

文章编号: 1008-2786-(2018)3-488-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000345

# 甘肃天水大沟短时强降雨诱发低频泥石流特征及成因

曲 瑞<sup>1,2</sup>, 李仲先<sup>3</sup>, 何政伟<sup>1,2\*</sup>, 何云峰<sup>4</sup>, 王舒阳<sup>4</sup>, 王 勇<sup>5</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059;  
3. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000; 4. 甘肃省地质环境监测院, 兰州 730050; 5. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000)

**摘 要:** 甘肃天水地区为低频泥石流事件的典型多发区, 区域内不仅具有特殊的气候环境特征, 还为低频泥石流的孕育提供极佳的地形地貌条件。2013 年 7 月 21 日, 甘肃天水麦积区马跑泉镇大沟村发生大型泥石流并造成重大经济损失。此次泥石流发生过程形成了一条完整的地震—滑坡—泥石流灾害链, 属于典型小流域低频泥石流。本次研究以甘肃省天水市麦积区马跑泉镇大沟村泥石流为研究对象, 从地质条件、成因分析、形成过程与特征等方面分析了其独特的形成机制, 采用模型计算泥石流临界径流深, 反演泥石流发生的临界降雨强度, 为此类缺少降雨资料的低频小流域泥石流计算提供参考方法。

**关键词:** 短时强降雨; 低频泥石流; 泥石流成因; 天水市大沟

**中图分类号:** P694

**文献标志码:** C

对于暴发间隔时期较短的高频泥石流而言, 人们对其危险性具有足够的认识, 但对低频泥石流而言, 其危害性往往容易被人们忽视, 因而造成惨痛的教训<sup>[1]</sup>。一个典型的低频泥石流例子是 2010 年 8 月 7 日的甘南藏族自治州舟曲泥石流, 400 年一遇的泥石流几乎摧毁舟曲县城, 造成极其严重的人员伤亡, 直接经济损失数亿元<sup>[2]</sup>。据有关统计<sup>[1-2]</sup>, 在历史灾难性泥石流事件中, 低频泥石流占相当比重。然而, 针对低频泥石流的早期识别及其形成机理的研究尚不够深入, 故难以对此类泥石流开展针对性的防灾减灾对策<sup>[3]</sup>。

甘肃天水地区为低频泥石流事件的典型多发区。研究区域不仅具有特殊的气候环境特征, 还为低频泥石流的孕育提供极佳的地形地貌条件。本研究以甘肃省天水市麦积区马跑泉镇大沟村泥石流为研究对象, 从地质条件、成因分析、形成过程与特征、

发生机制等方面, 采用模型计算泥石流临界径流深, 反演泥石流发生的临界降雨强度, 为此类缺少降雨资料的低频小流域泥石流计算提供参考方法。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质背景

大沟泥石流位于天水市麦积区马跑泉镇大沟村西侧, 呈南—北方向延伸, 南至刘家堡村西侧, 北至羲皇大道南侧(图 1)。流域内总的地势是南高北低, 海拔 1 080 ~ 1 500 m, 相对高差 420 m。出露地层主要为新近系(N)棕红色、灰白—灰绿灰色含钙质泥岩与薄层泥岩互层及第四纪黄土(Q<sub>3</sub><sup>col</sup>)。研究区属于祁吕贺兰山字型构造体系与秦岭构造体系的复合部位, 断裂、褶皱发育明显(图 2)。第四纪以来新构造运动强烈, 且位于青藏高原北部地震亚区龙

收稿日期(Received date): 2017-12-18; 改回日期(Accepted date): 2018-06-15

基金项目(Foundation item): 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLP2017Z005)。[State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection Independent Research Project(SKLP2017Z005)]

作者简介(Biography): 曲瑞(1991-), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 第四纪地质与山地灾害。[QU Rui(1991-), male, born in Lan Zhou, Gansu province, M. Sc. candidate, research on quaternary geology, mountain hazards] E-mail: quurui@gmail.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 何政伟(1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 遥感地质及生态地质环境等领域研究。[HE zhengwei(1966-), male, Ph. D., professor, specialized in research on remote sensing geology and ecological geological environment] E-mail: hzw@edut.edu.cn

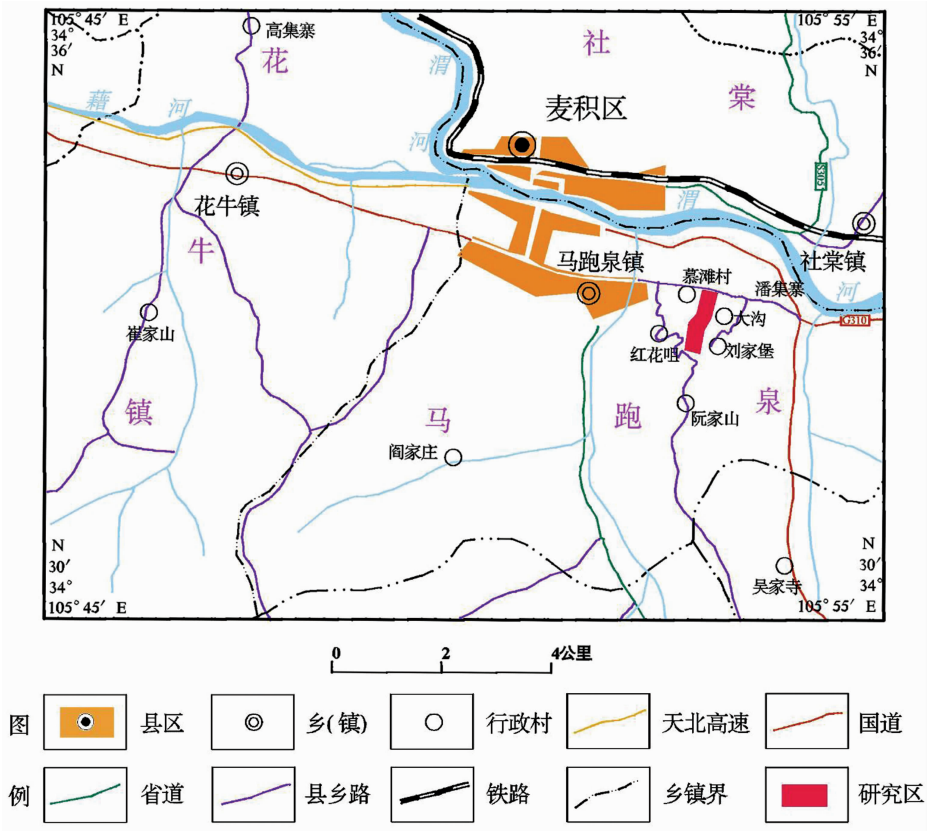


图1 大沟泥石流地理位置图

Fig.1 Location of Dagu debris flow

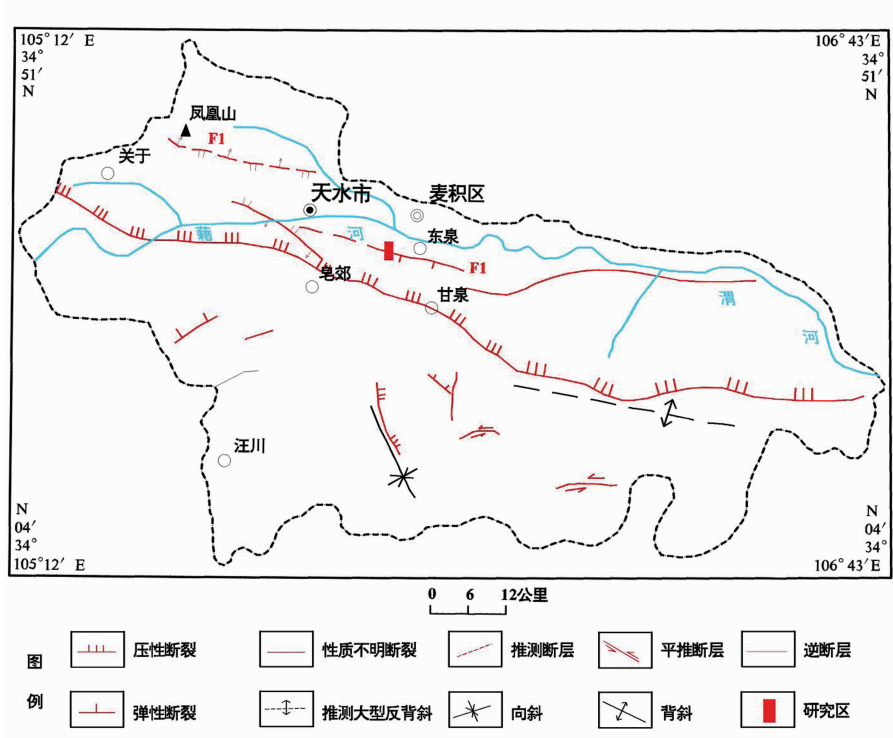


图2 大沟泥石流工作区构造纲要图

Fig.2 Structure geology of the work area of Dagu debris flow

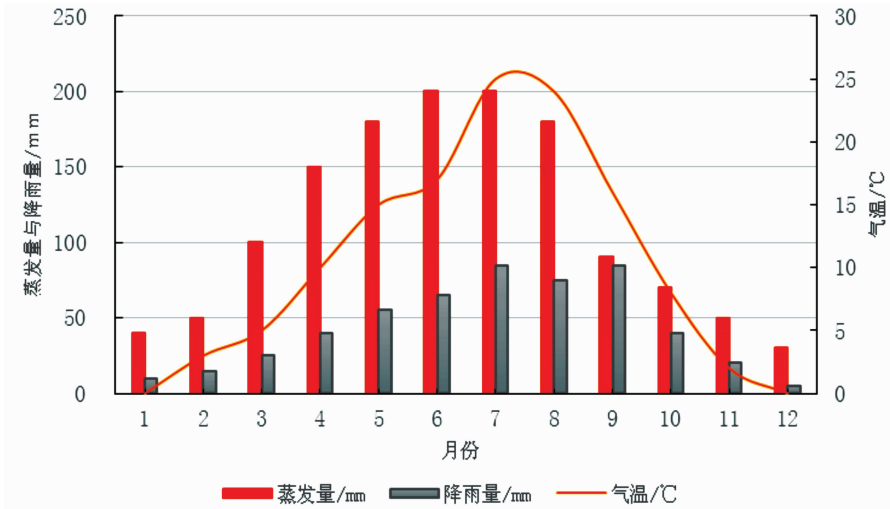


图3 天水市麦积区气象要素图<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Meteorological element map of Maiji District, Tianshui City, China<sup>[4]</sup>

门山地震带,地震活动强度大。

1.2 降水

大沟流域处于温带半湿润到半干旱气候类型的过渡带,大陆性气候特征明显。据麦积区气象站资料统计,区内多年平均降水量为 558.4 mm,年最大降雨量 810 mm(2003 年),年最小降水量 330.1 mm(1969 年)。降水量年内分配不均匀,全年降雨量的 60% 集中于 6—9 月份,多以大雨、暴雨的形式出现(图 3)。据麦积区气象资料统计,区内一次连续最大降水量为 286.6 mm,1 日最大降水量为 113 mm,1 小时最大降水量为 57.3 mm。

2 泥石流事件及其特征

2013 年 7 月 21 日晚 8 时到 7 月 22 日上午 8 时,麦积区遭受暴雨袭击,马跑泉镇降雨量超过 101.8 mm。上午 7 时 45 分,受 7·22 岷县地震影响,大沟沟脑位置的不稳定斜坡失稳发生滑坡,形成堰塞坝。下午 3 时,堰塞坝溃决,约有  $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3$  固体物质冲出沟口,形成严重泥石流灾害,大沟村道路及部分农田泥沙淤积严重(图 5),直接经济损失超过 1 000 万元。泥石流形成区和流通区沟道以冲



图4 大沟泥石流灾前灾后正射影像对比图

Fig. 4 Orthophoto comparison map before and after Dagou debris flow disaster

蚀为主,冲出沟口后开始淤积,厚度约3.6~6.0 m。堆积物以泥沙、粉质粘土夹泥岩碎屑为主,粒径0.1~0.5 mm,含量90%以上,无分选层次性。

## 2.1 地形

大沟泥石流沟谷位于渭河Ⅱ级阶地后缘黄土丘陵地带,主沟长度938.4 m,流域面积小,仅为0.488 km<sup>2</sup>。沟脑处三面环山,地形狭窄,冲沟、陡坎非常发育。山脊高程1500 m,沟口高程1099 m,相对高差401 m。主沟道平均纵比降159‰,沟床比降变化大,沟程较短,次生灾害等松散堆积物使局部堵塞抬升。大沟泥石流沟地形条件有利于降水在短时间内汇集,使坡面水流和支沟洪水迅速获得能量汇集在主沟道中,使主沟道泥石流的规模和峰值快速升级,加大泥石流规模。

## 2.2 物源特征

物源条件是限制低频泥石流发生的主要因素。在同样的降雨条件下,缺乏松散固体物质的地区只能形成山洪。受到内外营力条件的影响,低频泥石流易在地震、强降水、滑坡等特殊因素激发<sup>[5]</sup>。唐邦兴等人<sup>[6]</sup>根据泥流水体和土体的供给方式,按照发生学原则,将泥石流分为15类。天水地区常见泥石流类型可归纳为三类:降雨-坡面侵蚀型、降雨-滑坡崩塌型、堤坝溃决-滑坡崩塌型。大沟泥石流发生前,流域内植被覆盖较好,坡面松散堆积物较少。钻探发现,沟道内松散堆积层较薄,不满足泥石流发生的条件,但在地震和强降雨共同作用下,滑坡为本次低频泥石流的发生提供了主要物源。通过物源分析、现场调查等手段,查明来源于沟脑滑坡堆积物占冲出物质总量80%~85%,故本次泥石流应属于堤坝溃决-滑坡崩塌型低频泥石流。泥石流发生后流域内仍然残留松散堆积物 $173.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,丰富的物源增大了低频泥石流转化为高频泥石流的可能性。

## 2.3 泥石流发育特征

流域形成区面积大,地形有利于降水的汇集。在形成堰塞坝后的4~5个小时,坝体后水体迅速增大,为泥石流的发生提供了充分的水源。另外,由于流通段短,堆积区面积较小,纵比降大,物源相对位置较高,泥石流的形成时间缩短,运动速度提高<sup>[7]</sup>。在物源丰富、水源充分及地形有利三个外在条件共同影响下,低频小流域内形成了大型泥石流。

## 2.4 泥石流运动特征

1) 泥石流流速:结合综合形态调查法、现场测试法和查表法,确定泥石流的重度为 $18.5 \text{ kN/m}^3$ ,属于亚粘性泥石流<sup>[8]</sup>。采用甘肃省国土资源厅发布的《甘肃省地质灾害防治工程勘察设计技术要求》中泥石流流速计算公式:

$$V_c = m_c \cdot H_c^{2/3} \cdot I_c^{1/2} \quad (1)$$

选择了三个有代表性的典型断面,进行了泥痕(泥深)调查测量,其中1-1',2-2'断面位于形成区,3-3'位于堆积区。计算结果见表1。

表1 大沟村泥石流流速计算结果

Tab.1 Velocity calculation results of Dagou debris flow

断面名称	河床粗糙率 $m_c/\%$	泥深 $H_c/\text{m}$	水流坡降 $I_c/\%$	流速 $V_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1—1'	8	1.20	108	2.97
2—2'	8	1.80	267	6.19
3—3'	8	1.50	237	5.10

## 2) 泥石流流量

采用形态调查法和雨洪法确定泥石流流量。形态调查法是在之前求得的泥石流流速的基础上,通过调查泥石流过流断面面积( $W_c$ )求得。计算如下,计算结果见表2。

$$\text{形态调查法: } Q_c = W_c \cdot V_c \quad (2)$$

$$\text{雨洪法: } Q_c = Q_B(1 + \Phi)D \quad (3)$$



图5 大沟泥石流发生后道路、房屋淤埋情况<sup>[4]</sup>

Fig.5 Road and house buried situation after the occurrence of Dagou debris flow<sup>[4]</sup>



表 2 大沟村泥石流流量计算结果  
Tab. 2 Flow rate calculation results of Dagou debris flow

断面名称	沟谷底宽 b1/m	沟谷顶宽 b2/m	沟床坡降 Ic/‰	断面面积 W <sub>c</sub> /m <sup>2</sup>	流速 V <sub>c</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	流量 Q <sub>c</sub> /(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1—1′	56	60	108	58	2.97	172.26
2—2′	9.5	15.2	267	22.23	6.19	137.60
3—3′	15	21.4	237	27.3	5.10	139.23

采用雨洪法计算得百年一遇泥石流洪峰流量  $Q_c$  为  $29.76\text{ m}^3/\text{s}$ ,与采用形态调查法所得结果相差较大。由于雨洪法基于洪水流量计算,忽略了堰塞体堵溃对泥石流的放大效应,适用于高频泥石流冲沟<sup>[9]</sup>。利用形态调查法获得的数据,结合公式(4)进行综合评估。

$$Q_w = K \cdot Q_c \cdot T \quad (4)$$

$Q_w$  为泥石流一次最大冲出量; $T$  为泥石流过程时间,根据现场调查取  $60\text{ min}$ , $K$  取值  $0.202$ 。计算得本次泥石流一次最大冲出量为  $12.53 \times 10^4\text{ m}^3$ 。计算结果与现场实测冲出沟口的堆积物总量接近,因此以形态调查法所得结果为依据。

2.5 灾害链特征

大沟泥石流灾害具有明显的灾害链特征。受  $5 \cdot 12$  汶川地震影响,沟脑位置的山体产生后缘裂缝,在多次连续降雨作用下裂缝明显拉张。此后,在  $7 \cdot 22$  地震的作用下,滑坡体沿滑面向下运动,形成堰塞坝,溃坝后形成泥石流,构成了地震—滑坡—泥石流灾害链。大沟泥石流分为两条次级灾害链:1) 地震—滑坡—堰塞坝溃决—大型山洪泥石流。位于沟脑处的滑坡体堰塞坝溃决,呈现放大效应,在重力的作用下,泥石流急速下泄。这符合吴玮江<sup>[10]</sup>等所观察的现象;2) 泥石流—滑坡—泥石流。在流通区,斜坡坡脚受到泥石流下切,坡体崩滑入沟道,形成堆积。

2.6 低频性

通过对当地居民走访与查询地方志资料,未发现大沟有泥石流历史,但在雨季强降雨发生时,偶尔会发生小规模山洪。据资料,2004 年,大沟发生过一次相对较大规模的山洪。沟脑曾发生多次崩塌、滑坡,但没有人员伤亡和财产损失的报道。2013 年 7 月 21 日,大沟暴发泥石流期间,小时降雨量超过了 50 年一遇概率。根据大沟村所在地天水麦积区气象站观测数据与上述综合分析,“ $7 \cdot 21$ ”大沟泥石流的暴发频率为  $50 \sim 100$  年一遇,属低频泥石流。

3 降水与泥石流形成关系

3.1 泥石流发生对降雨的响应

大沟流域沟脑位置发育有老滑坡,其滑坡周界圈椅状地形特征明显,体积约  $115.0 \times 10^4\text{ m}^3$ ,属大型滑坡。本次泥石流的固体松散物质主要来源于老滑坡东侧前缘次级滑坡。2008 年受“ $5 \cdot 12$ ”汶川大地震波及影响形成变形裂缝。此滑坡主滑方向  $277^\circ$ ,体积约  $29.7 \times 10^4\text{ m}^3$ ,属中型滑坡。

在前期累计降雨  $220\text{ mm}$  的基础上,7 月 21 日傍晚,大沟村发生强降雨,沟脑坡脚岩土体受地表流水冲蚀,发生软化,引起滑坡复活,滑坡体堆积于坡脚,阻断沟道,形成堰塞坝。通过结合现场勘查与卫星图像分析,坝体宽度应为  $50\text{ m}$ ,高度约为  $10\text{ m}$ 。受滑坡堆积堰塞体截流,流域内水位不断抬升,滑坡堆积体浸水饱和,当晚 11 点(强降雨后约 5 个小时)堰塞坝溃决,属于逆流渐进破坏型溃决。这是因为,由于汇水面积不大,上游来水蓄积量较小,且黄土的渗透性强,在较大水力梯度下,产生管涌现象。溃决后,由于坝体高度高于沟岸,近一半碎屑物堆积在堰塞坝下游  $50\text{ m}$  内的沟岸两侧,部分坝体碎屑物随堰塞湖水沿沟而下,形成泥石流。

3.2 泥石流临界降雨量

大沟泥石流产生的水动力条件主要是降水产生的沟道径流。麦积区气象站数据表明,泥石流发生时的小时雨量为  $15\text{ mm}$ ,在滑坡发生至泥石流发生的 7 个小时内累计降雨量为  $21\text{ mm}$ 。研究表明<sup>[11]</sup>,天水地区的泥石流临界降雨量为  $25\text{ mm/h}$ ,成灾雨强为  $40\text{ mm/h}$ ,可得到成灾一次降雨量大于  $40\text{ mm}$ <sup>[12]</sup>。大沟泥石流发生时的降水量明显小于上述阈值。因此,大沟泥石流的产生,滑坡和堰塞坝的形成与溃决是重要成因。

目前,泥石流临界降雨量值的获得主要是基于实证法和经验模型法。这两种方法都依赖大量的降雨、泥石流历史资料,因此适用于泥石流多发区<sup>[13]</sup>。

针对大沟村小流域低频泥石流,当地的泥石流历史资料较少。因此,本研究通过物源条件,结合大沟泥石流的形成机制,反演计算该地区的泥石流临界降雨量。参考潘华利<sup>[14]</sup>、徐黎明等人<sup>[15]</sup>提出的计算临界降雨量的方法。首先根据高桥保<sup>[16]</sup>提出的溪床堆积物泥石流在堆积物的表面受水流作用时,发生泥石流的临界水深为松散堆积物开始启动时的流水深度。并按照流速计算公式计算流速,在得到流量后,求出流域径流深。

根据水量平衡方程可以得到:

$$I_{60} + P_a = R + I_m^{[10]} \quad (5)$$

$I_m$  流域内最大蓄水量(mm);  $P_a$  为前期降雨量(mm);  $I_{60}$  (mm) 为小时雨量;  $R$  为径流深(mm)。

$$h_0 = \left[ \frac{C \cdot (\sigma - \rho) \tan \theta}{\rho \tan \phi} - \frac{C \cdot (\sigma - \rho)}{\rho} - 1 \right] d_m \quad (6)$$

$$Q = BV_c h_w \quad (7)$$

$$R = \frac{3.6 \sum Q \Delta T}{F} = \frac{3.6 Q}{F} \quad (8)$$

其中  $h_0$  为沟道水流深度(m);  $C$  为堆积体的体积浓度;  $\sigma$  为砂砾密度;  $\rho$  为水密度( $1.0 \text{ g/cm}^3$ );  $\theta$  为沟床坡度;  $\phi$  为内摩擦角;  $d_m$  为砂砾平均粒径(mm)。通过打钻取样等方式我们可以获得如下数据表3。

表3 泥石流起动临界水深计算结果

Tab.3 Calculation results of the critical depth of debris flow start

$\sigma(\text{g/cm}^3)$	$\tan \phi(\text{g/cm}^3)$	$\theta/^\circ$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$h_0/\text{m}$
2.3	0.301	20	1	1.12

大沟流域遭受多次暴雨的袭击,并在泥石流发生前24小时内前期降雨量将近100 mm,可以视此时流域内最大蓄水量  $I_m$  (mm) 与前期降雨量  $P_a$  (mm) 相等即  $I_m = P_a$ 。结合5式可以得到  $I_{60} = R$ ,即当小时雨量达到起动径流深  $R$  时,暴发泥石流。最终得到如下结果表4。

表4 降雨量阈值计算结果

Tab.4 Calculation results of rainfall threshold

$h_0$	$B$	$V$	$Q$	$F$	$R$	$I_{60}$
/mm	/m	/(m/s)	/(m <sup>3</sup> /s)	/km <sup>2</sup>	/mm	/mm
1.12	3	3	10.35	0.488	74.3	74.3

最终求得  $I_{60} = 74.3 \text{ mm}$ , 大于泥石流实际的小时雨强15 mm。这是因为,滑坡和堰塞坝的形成使得大沟泥石流的临界降雨量减少为预计的20%。

## 4 结论与建议

1) 小流域低频泥石流的发生与特定的孕灾环境有关。大沟泥石流的形成是典型地震—滑坡—泥石流灾害链过程,其激发泥石流的临界降雨量远远低于区域统计临界降雨阈值。这表明,在特定的孕害条件下,即使降雨量达不到当地泥石流临界降雨量的强度,仍然有形成堤坝溃决—滑坡崩塌型泥石流的可能性。但是,值得讨论的是,并非所有的滑坡都能转化为泥石流<sup>[17]</sup>。

2) 丰富的物源储备是小流域低频泥石流发生的最主要的因素。由于地震、滑坡可以使流域内松散物源迅速增长,因此,开展地质环境调查并在雨季来临前、地震发生后、强降雨后通过实地勘察或卫片解译等方式对小流域物源条件进行排查并记录,以小流域为单位进行综合防治<sup>[10]</sup>,计算每个流域泥石流发生的临界雨量,并结合沟口径流量变化情况,监测是否有堰塞坝的形成。这是一条有效防治小流域低频泥石流的手段。

3) 本研究采用 Takahashi 等人提出的水力类泥石流气动模型的临界径流深模型,通过已有参数计算出泥石流发生临界径流深,反推出大沟泥石流发生的临界降雨强度。结果表明,该方法可以简单有效地评估小流域低频泥石流的临界降雨值。

**致谢:** 本文基础资料来源于甘肃省地质灾害应急中心天水市“7·25”现场应急调查、勘查资料来源于中国建筑材料工业地质勘查中心甘肃大队大沟村泥石流治理工程勘查报告。在此一一表示感谢!

## 参考文献(References)

- [1] 铁永波,周洪福,倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学,2013(04):110-113 [TIE Yongbo, ZHOU Hongfu, NI Huayong. Formation of low frequency debris flow induced by short-time heavy rainfall in mountain area of southwest China — take lengmu debris flow as an example, Baoxing, Sichuan province. [J] Journal of Catastrophology. 2013(04):110-113]
- [2] 余斌,杨永红,苏永超等. 甘肃省舟曲8.7特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报,2010,18(4):437-444 [YU Bin, YANG Yonghong, SU Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazard in Zhouqu country, Gansu province on august 7, 2010. [J] Journal of Engineering Geology. 2010,18(4):437-444]
- [3] 唐川,章书成. 水力类泥石流起动机理与预报研究进展与方向[J]. 地球科学进展,2008(08):787-793 [TANG Chuan, ZHANG Shucheng. Study progress and expectation for initiation mechanism and prediction of hydraulic-driven debris flows [J].

- Advance in Earth Science. 2008(08):787-793]
- [4] 中国建筑材料工业地质勘查中心甘肃总队. 甘肃省天水市麦积区大沟泥石流灾害综合治理工程勘查报告[R]. 天水:中国建筑材料工业地质勘查中心甘肃总队, 2013 [Geological Exploration in the Chinese Building Material Center in Gansu Province. Investigation report on comprehensive treatment of Dagou debris flow disaster in Maijishan district Tianshui, Gansu [R]. Tianshui: Geological exploration in the Chinese building material center in Gansu province. 2013]
- [5] 王士革, 范晓岭. 低频率泥石流灾害及工程防治[J]. 山地学报, 2006, (05):562-568 [WANG Shige, FAN Xiaoling. The hazard and engineering control of low frequency debris flow[J]. Mountain Research. 2006, (05):562-568]
- [6] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000. 60-70 [Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Debris flow in China [M]. Beijing: The Commercial Press. 2000, 60-70]
- [7] 胡向德, 黎志恒, 魏洁等. 舟曲县三眼峪沟特大型泥石流的形成和运动特征[J]. 水文地质工程地质, 2011, (04):82-87 [HU Xiangde, LI Zhiheng, WEI Jie, et al. Formation and kinematic characteristics of the debris flow disaster at the Sanyanyu gully, Zhouqu County of Gansu Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology. 2011, (04):82-87]
- [8] 费祥俊, 舒平安. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 12-15 [FEI Xiangjun, SHU Anpin. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2004, 12-15]
- [9] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵. 唐家人山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, (01):181-189 [HU Xiewen, LU Xiaoping, HUANG Runqiu, et al. Developmental features and evaluation of blocking dangers of Dashui ditch debris flow in Tangjiashan dammed lake. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009, (01):181-189]
- [10] 吴玮江. 天水市滑坡泥石流灾害[J]. 水文地质工程地质, 2003, (05):75-78 [WU Weijiang. Landslide and debris flow hazards in city of Tianshui. Hydrogeology & Engineering Geology [J]. 2003, (05):75-78]
- [11] 中国科学院兰州冰川冻土研究所著. 甘肃泥石流[M]. 兰州: 人民交通出版社, 1982. 50-60 [Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, LIGG. Debris flow in Gansu [M]. Lanzhou: China communication press, 1982, 50-60]
- [12] 谭炳炎. 中国黄土地区的泥石流活动及其防治[J]. 铁道学报, 1985, (03):75-83 [TAN Bingyan. Mud-Rock flow movements and their prevention and control in China's loess areas[J]. Journal of the China Railway Society, 1985, (03):75-83]
- [13] 高波, 张茂省, 张成航等. 甘肃舟曲三眼峪泥石流降雨临界阈值[J]. 灾害学, 2016, (01):25-28 [GAO Bo, ZHANG Maosheng, ZHANG Chenghang, et al. Rainfall threshold for debris flow in Sanyanyu valley, Zhouqu, China [J]. Journal of Catastrophology. 2016, (01):25-28]
- [14] 潘华利, 欧国强, 黄江成等. 缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(07):2122-2126 [PAN Huali, OU Guoqiang, HUANG Jiangcheng, et al. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in data lack areas. Rock and Soil Mechanics 2012, 33(07):2122-2126]
- [15] 徐黎明, 王清, 陈剑平等. 资料缺乏地区诱发泥石流临界降雨量预测[J]. 铁道勘察, 2014, (02):75-78 [XU Liming, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in areas without data [J]. Railway Investigation and Surveying. 2014, (02):75-78]
- [16] 高橋保. 土石流の発生と流動に関する研究[J]. 京都大学防災研究所年報, 1977, 20(B-2), 405-435
- [17] GRISWOLD J P, IVERSON R M. Mobility and statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches [R]. Reston, VA: US Geological Survey. Scientific Investigations Report 2007-5276, 2008:22

## Characteristics and Causes of Low Frequency Debris Flow Induced by Heavy Rainfall in Dagou Village, Tianshui City, Gansu Province, China

QU Rui<sup>1,2</sup>, LI Zhongxian<sup>3</sup>, HE Zhengwei<sup>1,2</sup>, HE Yunfeng<sup>4</sup>, WANG Shuyang<sup>4</sup>, WANG Yong<sup>5</sup>

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China;

3. Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan 617000, China; 4. Geological Environment Monitoring Institute of Gansu

Province, Lanzhou 730050, China; 5. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The Tianshui area of Gansu Province has been haunted by low-frequency debris flows. The area not only has special climatic and environmental characteristics, but also provides favorable topographical conditions for the motivation of low-frequency debris flows. On July 21, 2013, a massive debris flow occurred in Dagou Village, Ma

Runquan Town, Maishui District, Tianshui, Gansu Province, causing major economic losses. The occurrence of the debris flow involved with a complete disaster chain of earthquake-landslide-debris flow, and it was regarded as a typical small basin low-frequency debris flow. This study was aimed to investigate the event of Dagou debris flow and tried to find its origin. From the aspects of geological conditions, genetic analysis, formation process and characteristics, it revealed the unique formation mechanism, and a model was introduced to calculate the critical runoff depth of debris flow, and then it retrieved the critical rainfall intensity of debris flow by inversion analysis. This paper provides a reference approach to the calculation of debris flow in low-frequency with small watersheds lacking rainfall data.

**Key words:** short-term heavy rainfall; low-frequency debris flow; cause of debris flow; Dagou of Tianshui City