

甘建军, 储小东. 中低山台风暴雨型泥石流形成机制和动力特征——以江西德安杜家沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 150–155. [GAN Jianjun, CHU Xiaodong. Formation mechanism and dynamic characteristics of typhoon rainstorm debris flow in middle and low mountains—a case at Dujia gully, Dean county, Jiangxi province [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 150–155. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.027.]

## 中低山台风暴雨型泥石流形成机制和动力特征 ——以江西德安杜家沟泥石流为例

甘建军<sup>1</sup>, 储小东<sup>2</sup>

(1. 南昌工程学院 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心, 江西 南昌 330099;

2. 江西省地质环境监测总站, 江西 南昌 330099)

**摘要:**受台风“麦德姆”登陆影响, 江西省德安县博阳河流域曾于2014年7月24日爆发群发性泥石流, 该次泥石流物源类型多样、地质条件复杂, 对沟口杜家沟及下游居民的生命财产安全产生了巨大威胁。通过野外调查及室内试验, 分析本次泥石流的发育条件和形成机理, 利用极限平衡法计算了泥石流的稳定性, 提出了治理的方法和对策。研究表明: 该次泥石流是在强降雨诱发下, 以中上游沟道松散物为启动点、沿程崩滑、侵蚀、揭底、堵塞、溃决, 是一场由台风暴雨形成的突发灾害。影响泥石流形成的主要因素是强降雨、丰富的松散物源和陡峻的地貌; 泥石流形成过程可分为强降雨、崩滑侵蚀、堰塞溃决三个阶段。参与杜家沟泥石流启动汇集的物质来源主要为崩滑物源和沟道物源, 其中, 沟道崩滑量占总量的85%, 沟道物源补给以沟道松散物为主, 占总量的15%。杜家沟泥石流的成灾模式类型多样, 表现为撞击冲毁、堵塞沟道、威胁下游。该泥石流具有低频、灾害链效应。

**关键词:**泥石流灾害; 形成机制; 台风; 杜家; 动力特征

**中图分类号:** P642; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)01-0150-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.027

2014年7月24日2时至24日20时之间, 第10号台风“麦德姆”由福建登陆, 经由浙江至江本西上饶, 至九江市德安县时发生强雷电暴雨。台风中心位于福建省三明市, 在距离中心的420 km的江西省德安县形成了持久少动的多个暴雨对流云团, 导致德安县形成了极端降雨, 日最大降雨量达541.4 mm, 引发了德安县博阳河流域多处沟道爆发泥石流灾害。杜家沟位于德安县丰林镇, 处于该次强降雨的暴雨中心<sup>[1]</sup>。“7.24”导致杜家沟泥石流一次冲出固体物体积约0.67万m<sup>3</sup>, 其中0.37万m<sup>4</sup>泥石流物质来源于东侧2#支沟。该泥石流冲毁房屋11栋, 损毁紫荆溪流域沟谷农田154亩, 造成直接经济损失360万元。

在台风暴雨型泥石流形成机制和动力特征研究方面, 国内外学者开展了大量的研究。研究内容主要包括风险区划与评价、降雨阈值、活动特征等; 研究方法涵盖物理模型试验、现场调查、原位试验、室内计算反演等; 研究对象多以具有代表性泥石流案例进行深入剖析。例如, 袁丽侠等<sup>[2]</sup>通过野外调查、室内试验、理论计算对浙江乐清侧人坦台风暴雨型泥石流进行了致灾机理分析, 探讨了浙江东南沿海台风影响区暴雨过程中

阶段划分与地质条件及降雨量之间的相互关系; Yu等<sup>[3]</sup>综合考虑地形、地质、水力因素的泥石流模型, 对台风“Toraji”引发的43个暴雨泥石流进行形成机制分析, 提出了一种具有有效累积降雨量和最大小时降雨强度的归一化临界降雨因子; Sezaki等<sup>[4]</sup>研究了日本九州西海岸的台风暴雨型泥石流的降雨特征、地质与土壤力学, 分析了台风暴雨型泥石流的形成机理; 王一鸣<sup>[5]</sup>通过二维极限平衡分析模型对台风暴雨型泥石进行变形破坏过程分析, 提出了台风暴雨型泥石流的启动机制; Huang等<sup>[6]</sup>采用小时强度与持续时间(I-D)、小时强度与累积降雨量(I-R)和日降雨量与先发日降雨量(ADR)指数方法研究了泥石流形成的降雨阈值, 指出公凭经验降雨阈值不足建立一个泥石流预测系统。以上的研究成果从不同角度研究研究了台风降雨型泥石流的形成机理与成灾特征, 但在内陆台风暴雨型泥石流研究还较少。

本文以2014年7月24日杜家沟泥石流为典型案例, 通过遥感解译、流域调查、灾后观测、理论计算的方法, 对杜家沟泥石流形成机理进行探讨, 开展损毁机制分析, 并对成灾特征进行总结, 为类似区域地质环境条件下的泥石流调查评价提供参考。

\* 收稿日期: 2019-07-30 修回日期: 2019-10-30

基金项目: 江西省水工程安全与资源利用工程研究中心开放基金项目(OF201603); 国家自然科学基金项目(51869012; 41641023); 江西省教育厅科技研究项目(GJJ151124); 江西省科技厅第一批科技计划项目(20161BBG70051; 20171BBG70046)

第一作者简介: 甘建军(1975-), 男, 江西永新人, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程和泥石流灾害防治的研究和实践工作。

E-mail: ganjianjun@nit.edu.cn

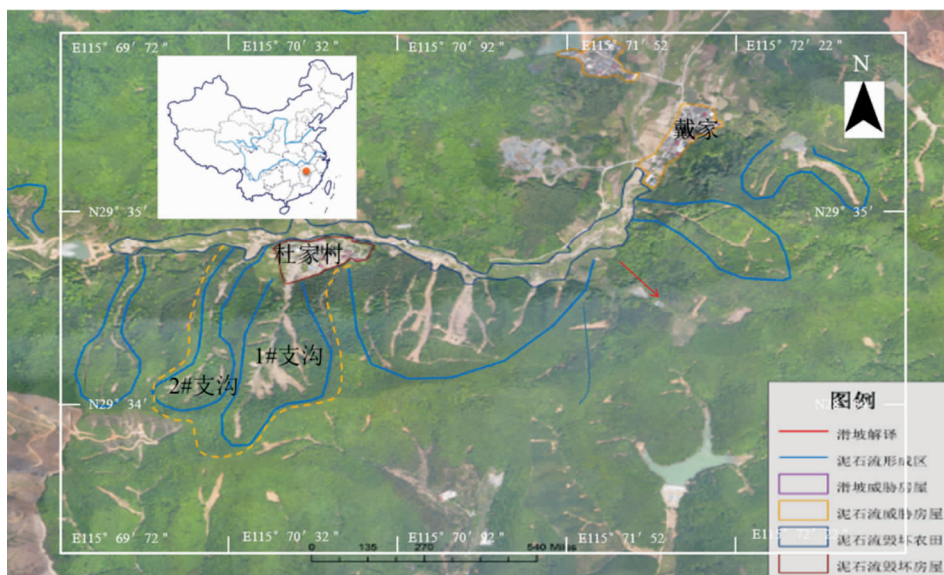


图1 流域及杜家泥石流所在位置示意图

## 1 研究区概况

### 1.1 地形地貌

德安县杜家沟沟域内水系呈树枝状分布,流域面积约  $0.093 \text{ km}^2$ 。流域内最高点海拔  $309 \text{ m}$ ,沟口海拔  $80 \text{ m}$ ,相对高差约  $229 \text{ m}$ ,总体地势为南西高、北东低。沟谷纵坡降中上游为  $665\%$ ,中下游为  $217\%$ ,加权平均纵降为  $327.94\%$ 。沟谷两侧斜坡相对高差处于  $40 \sim 150 \text{ m}$  之间,坡度约为  $25 \sim 45^\circ$ ,植被较为发育,多以杉树、竹林及灌木草丛为主。杜家沟沟谷长度  $560 \text{ m}$ (图1)。

杜家沟所在流域沿线发育众多中小型支沟泥石流。杜家沟泥石流位于紫荆村杜家组后缘,由东侧1#支沟和西侧的2#支沟组成,两条支沟上游段均有地数条槽状小水沟,沟道坡降较陡且短,植被覆盖率  $95\%$ 。受地质构造和地层岩性控制,杜家沟流域呈不对称分布,总体上东侧1#支沟为主支沟,面积较大,坡度较陡,纵坡多在  $450\%$  以上,两岸岸坡较陡,通常在  $35^\circ$  以上,利于水流汇集。两侧斜坡浅表结构松散时有崩塌、滑坡等不良地质现象发生,为泥石流发生提供了必要的物源条件。

### 1.2 地层岩性

研究区地层主要为第四系地层及寒武系中统杨柳岗组( $\varepsilon_{2y}$ )灰岩、下统王音铺组( $\varepsilon_{1w}$ )页岩和灰岩,多数以全-强风化揭露。第四系地层广泛分布于杜家沟流域浅表,主要有第四系泥石流堆积层( $Q_4^{sf}$ )、残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )两种类型,前者多赋存于多级阶地的沟床中及沟口堆积扇之中,具有二元结构,厚  $2.5 \sim 11.1 \text{ m}$  不等,一般厚  $7 \sim 10 \text{ m}$ 。残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )广泛分布在杜家沟域斜坡表面,主要为灰岩、页岩等经风化而形成的碎石土,厚度一般为  $1.7 \sim 6.1 \text{ m}$ ,结构松散。研究区工程地质图见图2。

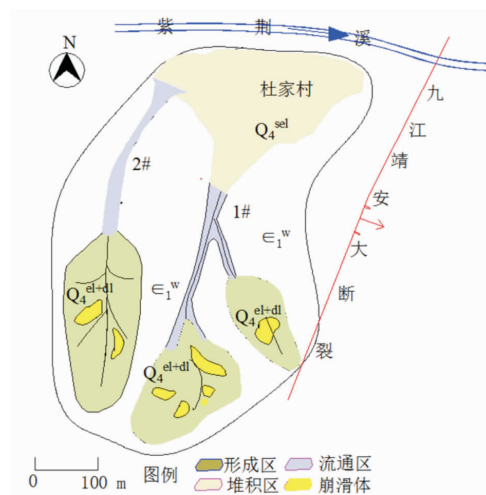


图2 杜家沟泥石流工程地质平面图

### 1.3 区域地质构造与地震

杜家沟位于我国东部江南台背斜与下扬子台向斜毗连的构造复合部位,彭山穹窿以南梓坊向斜东段南翼。受区内北东东向九江-靖安右旋走滑大断裂影响,滑坡东则发育一条正断层,产状为  $320^\circ \angle 40 \sim 70^\circ$ 。该断层揭露的构造角砾岩,结构破碎。断层上下两盘受新构造运动影响,岩体风化强烈,是研究区泥石流发生的重要物源<sup>[7]</sup>。

九江-靖安大断裂为庐山大断裂的南延部分,受该断裂的影响,区内发育九江-安义断裂、湖口-新建断裂梓坊向斜、彭山穹窿等构造。其中梓坊向斜北接彭山穹窿,南部为中元古界双桥山群地层组成的基底褶皱,向斜槽部最新地层为志留系下统清水组下段,向斜两翼主要由志留系下统殿背组、震旦系下统洞门组地层构成。所在区域新构造运动活动强烈,以间歇性强烈抬升运动为主,主要表现为河谷呈“V”字型,常表现在新生代地层发生断裂、褶皱。流域所在区域位于赣西北地震构造带上,区内地震基本烈度为VI度,据记载1949-2003年德安县境内共计发生大小14次地震,地震动峰值加速度为  $0.05 \text{ g}$ <sup>[8]</sup>。

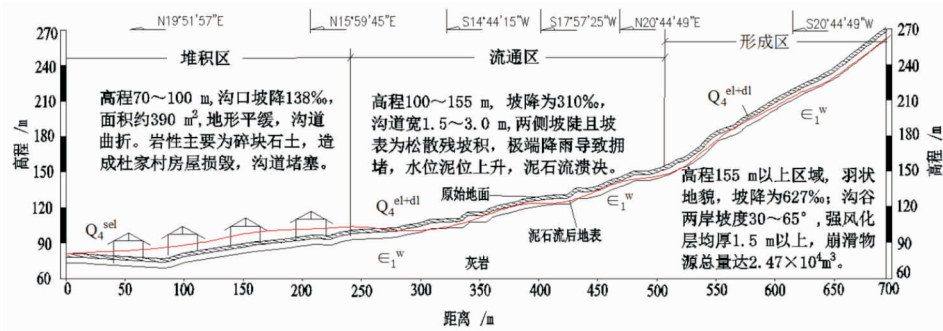


图3 杜家沟1#支沟泥石流形成发展剖面示意图

表1 江西省德安县丰林镇杜家沟泥石流基本特征值

编号	汇水面积/m <sup>2</sup>	沟长/m	主沟纵坡降/‰	植被覆盖率/%	岸坡坡度/°	最大粒径/m	固体物源/m <sup>3</sup>	补给方式
1#	6.58 万	746	271	72	15°~65°	2.5	2.63 万	冲刷-崩滑
2#	3.98 万	708	303	78	18°~70°	3.3	0.93 万	崩滑-崩滑

#### 1.4 降雨及水文地质条件

研究区 1959—2005 年期间的多年年平均降雨量 1 422.0 mm, 最大年份降雨量发生在 1998 年为 2 110.7 mm, 最小年份降雨量发生在 1963 年仅 865.6 mm。最大日降雨量也发生在 1998 年为 176.2 mm。雨水多集中于 4—8 月份, 全年占比为 60% 左右。2014 年 7 月 24 日, 研究区受台风“麦德姆”的影响, 凌晨 2—9 时降雨量就高达 357.8 mm, 为泥石流灾害的发生提供了充分的降雨条件。

杜家村沟域属于邻近赣鄱平原的低山丘陵区, 植被较发育, 水土流失较少。研究区地下水为基岩裂隙水, 赋存于斜坡的基岩裂隙中。杜家沟由多个分水岭相隔而成, 沟域内山坡上陡下缓, 支沟极为发育, 对地表降水的径流和汇集极为有利。地下水补给类型为大气降水为主, 沟域内排水条件较好, 贮水条件相对变差, 相对水量较贫乏。杜家沟为常年性流水沟, 流量受大气降水的影响, 变化幅度大, 枯水期径流量为 0.1—0.3 m<sup>3</sup>/s, 丰水期径流量为 1.2—2.0 m<sup>3</sup>/s。陡峻地形和持续降雨为泥石流提供了充分的水源动力条件<sup>[9]</sup>。

## 2 泥石流的发育特征

杜家沟泥石流是在台风引起的强降雨诱发下, 以中上游坡表松散残积坡崩滑为启动点、冲刷淘蚀、汇聚堰塞、溃决冲沟、房屋损毁、河道淤积等一系列灾害链效应。根据杜家沟泥石流的地质背景条件和形态特征, 该泥石流可分为形成区、流通区和堆积区三段, 泥石流在各区段的基本特征和演化过程可如图 3 所示。

#### 2.1 形成区的基本特征

杜家沟内高程 155 m 以上为泥石流的形成区, 区内支沟拉槽呈羽状分布, 属于低山“V”字型线性拉槽地貌。其中 1#支沟的形成区相对高差为 154 m, 主沟纵坡降达 627‰, 沟长 224 m, 汇水面积约 6.58 万 m<sup>2</sup>。2#支沟相对高差 160 m, 主沟坡降为 525‰, 汇水面积约 3.98 万 m<sup>2</sup>。区内斜坡陡峭, 斜坡坡度 30°~65°。由于区内构造较为复杂, 具

有较强烈的褶皱变形和拉槽作用, 出露顺向陡倾的灰白色、褐黄色灰岩( $\epsilon_{2y}$ )地层。受构造及风化作用影响, 斜坡地表岩土体结构松散, 强风层平均厚度达 1.5 m 以上, 多为碎块石粘土(图 3)。两条支沟在形成区发育数处崩滑, 形成了约 2.47 万 m<sup>3</sup> 的松散物源, 80% 的物源赋存于形成区(表 1)。

#### 2.2 流通区的基本特征

1#支沟流通区从上游各支沟汇聚处至村家村后缘取水处, 高程 100~155 m, 呈“V”字形沟谷地貌, 沟底宽 1.5~3.0 m, 主沟长 275 m, 纵坡降 310‰, 相对高差约 55 m; 两侧斜坡较陡, 坡度 15°~35°, 流域面积约 3.58 万 m<sup>2</sup>。2#支沟流通区位于高程 85~155 m, 也呈“V”字型沟谷地貌, 沟谷底部宽度 1.8~4.5 m, 支沟较少, 该段汇水面积约为 4.19 万 m<sup>2</sup>。两条支沟的流通区两岸斜坡地表结构均较破碎, 共计发育 8 处小型崩滑, 为泥石流提供了约 0.62 万 m<sup>3</sup> 的物源。

#### 2.3 堆积区的基本特征

堆积区主要位于杜家村后缘至村前紫荆溪的平缓部分, 1#支沟和 2#支沟分别从杜家村东侧和西侧绕过, 由于泥石流在主沟堵塞溃决效应, 泥石流由绕村而流改为穿村而过, 造成村庄房屋受损。沟口海拔约为 80 m。该段受泥石流淤积叠加作用, 具有明显的堆积扇形状, 钻探揭露泥石流堆积物最厚达 15 m, 主要岩性为碎块石土, 偶见孤立巨石, 表明杜家村是建立一个老泥石流堆积扇之上。该区域 1#支沟位于高程 100~155 m 之间, 沟道曲折, 损毁杜家村房屋 8 幢; 2#支沟从村西穿越杜家村, 损毁房屋 3 幢。“7.24”泥石流发生后, 经计算其重度为 1.87 t/m<sup>3</sup>, 为粘性泥石流。

## 3 泥石流的形成机制和动力特征

台风暴雨型泥石流的主要诱因是因台风引起的极端降雨<sup>[9]</sup>。研究区遭遇的台风型暴雨沿着陡峻地形迅速汇聚为泥石流形成提供了充足的动力条件; 而赋存于顺向斜坡上结构松散的残坡积( $Q_{4el+dl}$ )及碎块石为泥石流提供丰富的物源; 形成区陡峻的地形以及流通区狭窄的通道是造成泥石流堵塞溃决的主要原因。



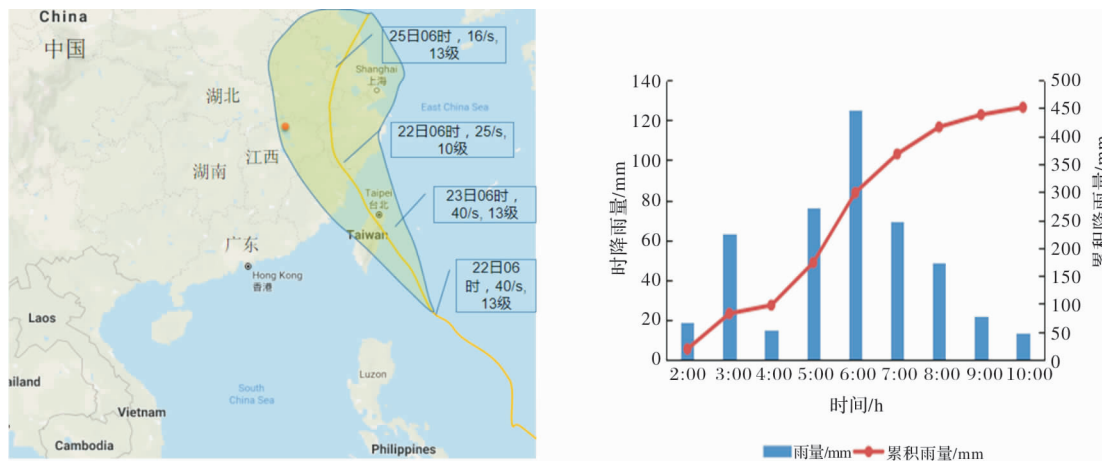


图4 2014年7月24日“麦德姆”台风路径和当天杜家沟流域雨量分布图

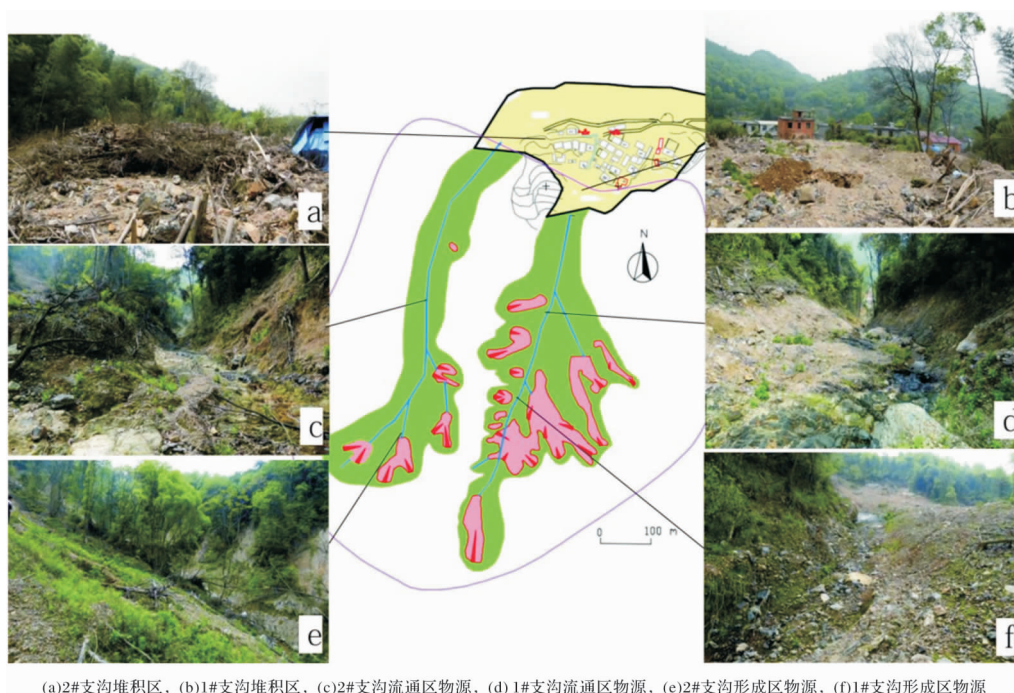


图5 杜家泥石流物源分布特征

### 3.1 台风降雨的水力作用

台风降雨诱发泥石流灾害过程中, 往往通过地表径流对斜坡的冲刷侵蚀作用, 引起水土的流失并向沟道汇聚; 此外降雨入渗会导致斜坡地下水位和土壤含水量激增, 坡体浅表产生扬压作用, 当孔隙水压力增加超过临界值时, 浅表坡体失去平衡迅速发生变形破坏形成崩滑; 这些崩滑体在流水作用下向低处搬运形成泥石流<sup>[10-12]</sup>。据德安县气象台丰林镇(距杜家沟约2.5 km)雨量观测站的监测资料, 2014年7月24日凌晨2:00开始降雨, 日降雨量达541.4mm, 最大雨强达125 mm/h, 创下研究区短时强降水历史记录(图4)。强降雨在杜家沟清水区瞬时汇聚, 冲刷斜坡表面松散岩土体和揭底沟道泥石流堆积物, 形成巨大的流量和强水动力, 在流通区“狭窄”沟道形成“束口”效应, 在堵溃体(坝)势能激增的情况, 最终达到堰塞体(坝)极限平衡临界点, 启动下滑形成粘性泥石流<sup>[12]</sup>。



图6 泥石流的爬高及损毁情况

杜家沟流水来源主要为岩石裂隙水, 常年流水平均水量较小, 枯水期沟口水流量 $0.1 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , 丰水期水流量 $0.4 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 经推算“7.24”泥石流暴发期间沟口洪峰流量达 $4.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 。杜家沟上游集水面积达 $10.56 \text{ 万 m}^2$ , 且由于主沟坡降达 $627\%$ 。杜家沟于2014年7月24日9:10爆发泥石流, 持

续时间仅为 30 min, 峰值流量达  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , 一次冲出物源量  $0.67 \text{ 万 m}^3$ 。由图 4 可见最大时降雨量出现在 7 月 24 日上午 6:00, 到泥石流暴雨时(7 月 24 日 9:00), 累积雨量超过 440 mm。综上, 台风暴雨引发了瞬时降雨超大增量、洪峰值高、流动速度大的洪水, 沟口泥石流堆积体的颗粒级配试验结果也反馈了该类型泥石流的水文特征。据泥石流重度现场及颗分试验, 杜家沟口泥石流堆积体的土石比 14.5: 82.3, 表明堆积体中存在大量的碎石、块石。沟口堆积区的面积约  $4.28 \text{ 万 m}^2$ , 均厚 3.0 m, 方量约  $12 \text{ 万 m}^3$ , 也证明此次泥石流搬运过程中的巨大能量和冲击力。

### 3.2 崩滑及沟道物源的启动与参与

杜家沟流域岩性主要为结构破碎灰岩、页岩, 其矿物成分主要为白云石、粘土矿物和碎屑矿物。参与“7.24”泥石流运动的杜家沟物源以早期崩滑残坡积为主(图 5e 和图 5f), 其次为沟道泥石流堆积物(图 5c 和图 5d)。受区内断裂构造的影响, 斜坡浅表的节理发育, 在干湿循环效应影响下, 岩土体热胀冷缩、碎裂化明显, 力学性质差。启动点位于形成区后缘的小型崩滑点, 这些崩滑堆积体结构松散, 数量众多, 启动迅速, 粘性土含量较大。

图 5 中的红色区域为研究区崩滑物源平面分布情况, 如图所示, 杜家泥石流 1#支沟的崩滑 11 处, 崩滑面积相对较大, 数量较多, 其固体物源占泥石流总固体物源的 73.88%; 2#支沟的崩滑物源 5 处, 崩滑面积数量均较小, 其固体物源占 26.12%。这些崩滑物源主要发生在形成区, 而流通区的参与泥石流的崩滑仅有 1 处。不同体积的固体物源对沟口杜家村的冲毁及破坏情况也不一样, 其中 1#支沟泥石流直接对杜家村的建筑物进行了冲击和破坏, 损毁建筑物 10 栋(图 5b), 而 2#支沟泥石流参与冲击和破坏杜家村的物源相对较, 仅毁坏房屋 1 栋。

(a)2#支沟堆积区, (b)1#支沟堆积区, (c)2#支沟流通区物源, (d)1#支沟流通区物源, (e)2#支沟形成区物源, (f)1#支沟形成区物源

### 3.3 杜家沟泥石流的运动与动力特性

杜家沟泥石流运动模式与动力既呈现出一一般泥石流的共性, 如形成区(清水区)汇水、水源动力充足、和冲击力较大的特性等, 也呈现出台风暴雨型泥石流的独特特征, 如降雨短历时、主支沟交汇处雍高、运动速度较大、运动距离较短、爬高能力较强等特殊特性。

#### 3.3.1 泥石流的流速计算

泥石流速度通常是通过泥石流通道弯曲率半径进行主观估计或者通过泥石流爬高反演计算获得, 或者通过适当的流变模型和材料特征输入的流动方程进行预测<sup>[13]</sup>。本研究充分考虑杜家沟泥石流具有沟谷型泥石流的特点, 采用规范推荐

的铁二院公式来计算流速:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} \frac{1}{n} H_c^{2/3} I_c^{1/5} \quad (1)$$

式中:  $V_c$  为泥石流流速( $\text{m/s}$ );  $\gamma_H$  为泥石流固体物源重度( $\text{t/m}^3$ ), 根据实验结果杜家沟沟谷下游沟口沟段, 泥石流重度为  $1.731 \text{ t/m}^3$ ;  $n$  为泥石流沟床糙率系数(0.100);  $H_c$  为平均泥深(m);  $I_c$  为沟道纵坡率。泥沙修正系数按《(DZ/T 0220 - 2016)泥石流灾害防治工程勘查规范》表 3-1 查表确定, 沟床糙率按野外调查得到的清水河床形态特征, 结合泥石流勘查规范和江西省水文手册<sup>[14]</sup>。从表 2 中可以看出, 两条支沟的沟口平均泥深、泥沙修正系数、糙率系数均接近, 算出来的在沟口断面的平均流速 1#支沟略大于 2#支沟, 说明两条支沟均对沟口杜家村产生威胁。

#### 3.3.2 泥石流的流量

泥石流的流量计算通常可以采用经验法、解析法、流动路径法和数值方法等, 根据台风暴雨型泥石流暴涨暴落的特点, 通过经验法对一次性泥石流过流总量  $Q$  计算流量<sup>[14]</sup>。

$$Q = 0.264 T Q_c = K T Q_c \quad (2)$$

式中:  $Q$  为一次泥石流过程总量( $\text{m}^3$ );  $T$  为泥石流历时(s);  $Q_c$  为泥石流最大流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

1#支沟采用上述方法计算可得杜家泥石流峰值历史最大流量为  $9.59 \text{ m}^3/\text{s}$ , 最大流量为  $5.81 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 根据野外调查所得杜家沟泥石流特征, 泥石流暴发历时按 90 分钟计算, 即  $T = 5400 \text{ s}$ , 可得设计泥石流冲出量为  $Q = 1.37 \text{ 万 m}^3$ , 本次泥石流冲出量为  $Q = 0.83 \text{ 万 m}^3$ 。同上, 可求得 2#支沟的最大泥石流峰值流量为  $8.69 \text{ m}^3/\text{s}$ , 最大流量为  $4.99 \text{ m}^3/\text{s}$ , 设计泥石流冲出量为  $1.24 \text{ 万 m}^3$ , 本次泥石流冲出量为  $0.71 \text{ 万 m}^3$ 。

#### 3.3.3 泥石流的冲击力和爬高

台风暴雨型泥石流通过高速运动的泥砂、碎石及树木等形成的巨大整体冲击力对下游的构筑物的进行冲击和破坏, 使建筑物发生损毁和破坏; 此外, 泥石流的冲击和爬高还磨损和挤压两岸构筑, 掏蚀两岸形成二次崩滑, 甚至造成人员伤亡。杜家沟泥石流的冲击力和爬高可通过试验法、调查法和理论计算等方法来获得。由于本次泥石流房屋损毁较为严重, 因此, 结合调查和理论计算法对泥石流的冲击力爬高进行了分析, 结果见图 6 及表 3<sup>[13]</sup>。由图 6 及表 3 可知, 1#支沟沟口整体冲击力远约为 2#支沟沟口整体冲击的 2 倍, 杜家村受泥石流冲击的建筑物受力面几乎与其受冲压方向的夹角垂直, 1#支沟沟口部分房屋主体墙被泥石流直接击穿, 在屋内淤积超过 1.6 m。而 2#支沟沟口泥石流冲压方向与受冲建筑物受力面夹角相对较小, 其整体冲击力较小, 仅对墙体窗户造成破坏, 虽然泥位爬高也超过 1.5 m, 但墙体完好无损(图 6b)。

表 2 断面泥石流流速计算表

计算位置	平均泥深/m	糙率系数	沟道纵坡	泥沙修正系数	固体物质重度/( $\text{t/m}^3$ )	断面平均流速/( $\text{m/s}$ )
1#支沟沟口	1.2	0.100	0.167	0.817	2.65	4.44
2#支沟沟口	1.1	0.100	0.156	0.817	2.65	4.42

表 3 杜家沟泥石流的整体冲击力与冲起高度计算结果表

计算位置	冲压方向角/ $^\circ$	形状系数 $\lambda/\text{m}$	重度/( $\text{t/m}^3$ )	流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	整体冲击压力 $\delta/\text{Pa}$	爬高/m	冲起高度/m	弯道超高/m
1#支沟沟口	90	1.33	1.731	9.59	5.96	1.61	1.01	1.18
2#支沟沟口	30	1.33	1.731	8.69	2.98	1.54	1.00	1.02

## 4 结论与认识

(1) 杜家沟泥石流的形成是受到“麦德姆”台风暴雨而诱发的低山沟谷型、低频和粘性泥石流, 以形成区崩滑体松散物率先启动, 沿陡峻地表汇聚并在流通区狭窄渠道形成挤压堰塞, 泥水位抬升后溃决下切拉槽、揭底冲刷, 引起沟口建筑物损毁的自然灾害。台风引起的强降雨在陡峻地貌的迅速汇水是杜家泥石流发生的诱因; 1#支沟斜坡上赋存的松散崩滑体是泥石流的主要物源, 其固体物源占物源总量的 73.88%。

(2) “7.24”杜家沟泥石流由两个支沟组成, 其中 1#支沟泥石流是杜家沟村损毁的主体。虽然 1#支沟沟口流速与 2#沟口的流速几乎相等, 但由于 1#沟口冲压力方向夹角近于垂直, 而 2#沟口冲压方向角仅有 30°, 其整体冲击力相差两倍以上, 造成了泥石流在 1#沟口损毁大大超过了 2#沟口。

(3) 杜家沟泥石流的动力特征较为典型, 表现为后缘暴雨汇水, 坡面土体崩滑、沟谷堵溃抬高、溃决加速冲刷、淹没冲毁下游。冲击破坏效应作用强烈, 淹埋沟口房屋。由于全球气候变暖, 台风暴雨时有发生, 在沿海甚至内地的中低山地区, 应特别加强这种规模不大, 但数量众多, 危害大的泥石流防治研究。

## 参考文献:

[1] 叶民华. 台风“麦德姆”引发德安县特大暴雨临近预报分析

- [J]. 大气科学研究与应用, 2015, 1: 48-55.
- [2] 袁丽侠, 崔星, 王州平, 等. 浙江乐清仙人坦泥石流的形成机制[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 150-154.
- [3] YU Bin, LI Li, WU Yufu, et al. A formation model for debris in the Chenyulan river watershed, Taiwan. [J]. Natural Hazards, 2013, 68(2): 745-762.
- [4] Sezaki M, Kitamura R, Yasufuku N, et al. Geodisasters in Kyushu area caused by Typhoon No. 14 in September 2005[J]. Soil and Foundations, 2006, 46(6): 855-867.
- [5] 王一鸣, 殷坤龙. 台风暴雨型泥石流启动机制[J]. 地球科学, 2018, 43(S2): 263-272.
- [6] HUANG Chingchuan. Critical rainfall for typhoon-induced debris flows in the Western Foothills, Taiwan [J]. Geomorphology, 2012, 185: 87-95.
- [7] 李凯, 吴中海, 李家存, 等. 江西九江及邻区主要断裂活动性遥感综合分析[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 577-593.
- [8] 吴文革, 谢卫红. 江西德安彭山穹窿构造特征及基岩控矿作用[J]. 北京地质, 2005, 17(1): 7-16.
- [9] 刘艳辉, 温铭生, 苏永超, 等. 台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J]. 水文地质工程地质, 2016(5): 119-126.
- [10] 甘建军, 袁良淦, 李明, 等. 鄱阳湖流域暴雨型泥石流形成机制与动力特征——以江西修水县卢庄沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 154-158.
- [11] 许强. 四川省 8.13 特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [12] 宋志, 邓荣贵, 倪化勇, 等. 四川石棉熊家沟泥石流形成机理与成灾特征分析[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 216-218.
- [13] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范 (DZ/T 0220-2006) [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2006.
- [14] 江西省地质灾害应急中心. 德安县丰林镇紫荆村杜家沟泥石流勘查报告[R]. 南昌: 江西省地质灾害应急中心, 2017.

# Formation Mechanism and Dynamic Characteristics of Typhoon Rainstorm Debris Flow in Middle and Low Mountains ——A Case at Dujia Gully, Dean County, Jiangxi Province

GAN Jianjun<sup>1</sup> and CHU Xiaodong<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Engineering Research Center of Water Engineering Safety and Resources Efficient Utilization, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Geological Environment Monitoring Station, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** Due to the impact of typhoon “Matmo” landfall, a catastrophically debris flow occurred in Dujia-gou, De’an county, Jiangxi province on July 24, 2014. The debris flow sources were diverse and the geological conditions were complex, which posed a great threat to the life and property safety of residents in Dujia gully and downstream. Through field investigation and laboratory test, the development condition and formation mechanism of debris flow were analyzed, the stability of debris flow was calculated by limit equilibrium method, and the control methods and countermeasures were put forward. The results show that the debris flow was a sudden disaster caused by typhoon and rainstorm, which is induced by heavy rainfall and starts from loose material in the middle and upper reaches of the gully. The formation factors of debris flow mainly include heavy rainfall, abundant loose source and steep landform. The formation process is divided into heavy rainfall, landslide erosion and dam break. The material sources involved in the initial collection of mud-rock flow in Dujia are avalanche material source and channel material source, among which, the avalanche material source in gully accounts for 85% of the total amount, and the source material supply in gully is mainly loose material in gully, accounting for 15% of the total amount. The types of debris flow in Dujia gully were various, such as impact, blocking gullies and threatening downstream. The debris flow has a low frequency and disaster chain effect.

**Key words:** debris flow; formation mechanism; typhoon. Dujia gully; engineering geology,