

甘建军, 袁良浚, 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. [GAN Jianjun, YUAN Liangkui, GUI Faliang, et al. Formation Mechanism and Dynamic Characteristics of Rainstorm-induced Debris Flow in Poyang Lake Valley of Jiangxi Province [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 154–158. doi: 10. 3969/j. issn. 1000–811X. 2017. 02. 027.]

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*

甘建军¹, 袁良浚², 李明², 唐 春¹, 颜 龙¹

(1. 鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 南昌工程学院, 江西 南昌 330099;
2. 江西省勘察设计院, 江西 南昌 330000)

摘 要: 对鄱阳湖流域暴雨型泥石流形成机制与动力特征进行研究, 旨在为此类山洪灾害防治及流域水工程安全提供借鉴。以江西省修水县卢庄沟暴雨型泥石流为例, 通过现场调查和室内试验, 对其发育特征及动力学特征进行分析。研究结果揭示该泥石流长 6.25 km, 流域面积 4.27 km², 物源 62.46 万 km³, 主沟坡降大 (524.1‰), 高差约 1 160 m 地形易于汇水且泥石流动力足。江西省修水县卢庄沟泥石流形成机制和动力特征可总结为: 暴雨–滑坡–松散堆积体搬运–老泥石流沟冲刷复活–泥石流形成。

关键词: 鄱阳湖流域; 泥石流; 形成机制; 动力特征; 卢庄沟; 江西省修水县

中图分类号: X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2017)02–0154–05

doi: 10. 3969/j. issn. 1000–811X. 2017. 02. 027

鄱阳湖流域面积约 16.22 万 m², 包括“五江一湖”, 即赣江、抚河、饶河、信河、修水五大河流及鄱阳湖, 在此流域内汇集了 3 700 多条流域面积超过 10 km² 的支流。这些河流经过历史的演变形成构造完整的水流切割地貌, 特别是在鄱阳湖盆地周边与山区接壤的中低山地区, 地形地貌复杂, 构造作用较强烈, 极端降雨频繁, 形成了众多崩滑流松散堆积体。这些丰富的松散崩塌堆积物为流域泥石流提供了充足的物源, 极易发生山洪泥石流灾害。1998 年, 江西铜鼓县塔下村泥石流毁房 15 幢, 农林约 14 hm²; 2008 年, 江西宜春上洞村泥石流毁房 3 栋, 死亡 5 人; 2010 年, 流域内发生泥石流 47 起。2015 年, 流域内又发生泥石流 24 起, 因灾死亡 12 人, 直接经济损失超过 8 500 万元; 其中, 位于流域西北方的修水县卢庄沟历史上曾经 3 次改道, 为多发性泥石流沟, 其泥石流形成机制具有代表意义^[1]。

2011 年 6 月 10 日, 在局地短历时强降雨的诱发下, 江西修水县卢庄村平石寺–黄龙山区域暴发了大型泥石流, 冲出方量 25.13 万 m³, 摧毁农田 17 hm², 冲毁公路桥梁 3 座、人行桥 5 座、公路 5 km、河堤 3 km、水堰 26 座, 损毁当地居民 39

间房屋, 直接经济损失 1 081 万元。

由崩滑碎屑、采矿弃渣、建筑弃土及古泥石流、老泥石流堆积物(Q₄^{sed})作为物源补给, 连续降雨或暴雨作为其诱发水动力条件的中低山暴雨型泥石流在鄱阳湖流域极为发育, 其形成机理复杂, 因此, 本文以卢庄沟泥石流为例, 研究了鄱阳湖流域暴雨型泥石流的成因和特征, 以期为该区域其他类似暴雨型泥石流的科学防治提供依据。

1 研究区概况

卢庄村泥石流沟位于江西省与湖北省、湖南省交界的九江市修水县黄龙乡卢庄村黄龙山南面沟谷, 属于鄱阳湖流域的修水流域。区内发育泥石流多条支沟, 呈树枝分叉状, 支沟平常纵坡较大, 流量较小, 一旦发生特大暴雨和连续降雨, 沟内水流会呈陡涨陡落的山溪性运动特性。该区属于深切构造侵蚀中低山和低山丘陵地貌, 区内最高山黄龙山高 1 506 m, 泥石流沟口邓坊高程 310 m, 主沟相对高差 1 196 m。区内罗家(500 m)以上的沟域, 以坡度 35°~60°的陡坡地貌为主, 岸坡植物生产较茂盛, 地形圈椅状, 有利于汇水。罗家(500m)以下沟域两岸为相对平缓的种植地(图 1)。

* 收稿日期: 2016–09–20 修回日期: 2016–11–09

基金项目: 江西省自然科学基金“江西红壤砂岩区暴雨诱发型深基座滑坡形成机理研究”(20161BBG70051); 江西省教育厅科技项目“降雨型砂岩区类土质滑坡 GMD 预测模型研究”(GJJ151124); 南昌工程学院 2015 年教改重点教改课题(2015JG001)

第一作者简介: 甘建军(1975–), 男, 江西永新人, 博士, 工程师, 讲师, 主要从事岩土工程和边坡稳定性的研究和实践工作。

E-mail: sedkj2006@126.com

通讯作者: 袁良浚(1970–), 男, 江西泰和人, 高级工程师, 主要从事地质灾害形成机制及治理研究. E-mail: 2433231019@qq.com

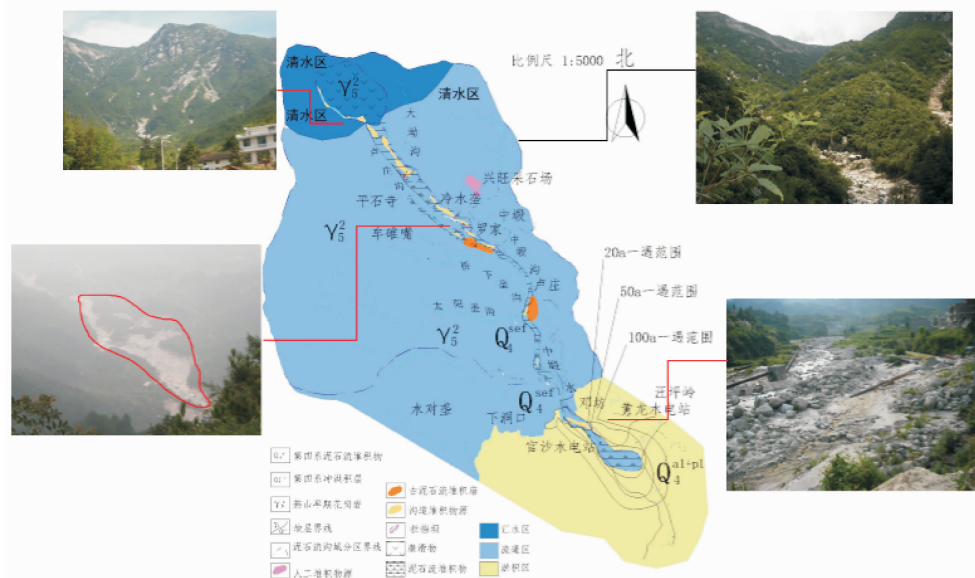


图1 江西修水县卢庄沟流域及分区示意图

研究区出露地层为第四系泥石流堆积层(Q_4^{sef})、第四系残坡积层($Q_4^{\text{sef}+\text{dl}}$)及燕山早期侵入岩(γ_5^2)。区内属亚热带季风性气候,降雨丰沛。修水县年平均降水量 1 628.9 mm(1990–2012 年统计),但平面分布差异较大,年内各季节降水量分配不均匀,每年 8 月至次年 2 月降水量 570.9 mm,3 月至 7 月降水量 1 049.1 mm,分别约占年降水总量的 35.2%,64.8%。区内年平均气温 16.2℃~19.7℃,年最大日降水量 221.8 mm,最大小时降水量 73.5 mm,区内历年的平均蒸发量为 1 460.7 mm。

研究区位于华东新华夏系第二隆起带西侧,淮阳山字型构造南侧,坐落于九岭山–万洋山新华夏复式隆起带、赣北东西向构造带及北东向构造带的交叉部位。区内岩层受老构造运动挤压变形,岩层中褶皱、褶曲等次生构造较为发育,致使岩石破碎,裂隙发育,为泥石流的发育及发生提供了有利的地质条件。

鄱阳湖流域拥有山地沟谷面积超过 6.0 万 km^2 ,约占全省总面积的 36%,流域内自 1950 年代以来发育的 3 329 条泥石流主要分布在“五江一湖”流经的修水、庐山、武夷山中北段、罗霄山、九岭山及怀玉山等中低山区支沟两侧,给当地居民生命财产、生产及生活造成较大的威胁。流域两侧山体多为花岗岩化的红粘土,受沟谷冲刷或冲刷作用,物源多为崩滑岩土体(约占 81.63)。区内沟谷多呈“V”形,谷坡坡度在 30°~70°,其形态极有利于雨水的汇集。鄱阳湖流域从规模上分,中型、小型泥石流分占 17.47%、80.32%,沟谷型泥石流约占总数的 52.57%;从时间看,雨季(4–9 月)发生的泥石流约占总数的 97.78%;从物性上分,稀性泥石流约占总数的 87.2%。2011 年 6 月 10 日爆发的卢庄沟泥石流具有典型中低山沟谷性暴雨型泥石流特征,因此,选取该沟作为研究

对象具有较好的代表性^[2]。

2 流域暴雨型泥石流的形成条件

黄龙泥石流平面上呈“圈椅状”,后缘到前缘地形上由陡趋缓,卢庄村老泥石流沟第四系泥石流堆积层(Q_4^{sef})厚 2~15 m,具多期泥石流冲积的层理分布特征,是多发性泥石流(图 1)^[2]。

2.1 形成区的基本特征

卢庄沟平石寺以上区域为泥石流的汇水区,上游各支流呈叶脉状,地貌上属低山~中山“V”型河谷地貌。海拔高程从 850~1 506 m,相对高差 656 m,汇水面积约 0.70 km^2 。区内构造活动复杂,具有强烈的挤压变形作用及差异抬升作用。出露灰白色、灰褐色二长花岗岩(γ_5^2)地层,受风化作用及构造裂隙影响,沟谷两岸岩体陡峻破碎,坡度 40~70°;沟谷细长窄小,主沟长 1.34 km,纵坡降 496.9‰,沟道宽度 5~10 m,支流 12 条。崩塌、滑坡较发育,约 12.03 万 m^3 的碎石、中–强风化孤石崩滑物堆积在沟谷两侧山坡上,为泥石流形成提供了丰富物源。

2.2 流通区的基本特征

流通区由平石寺至卢庄村,高程 530~850 m,呈“U”型沟谷地貌。区域内沟长 1.53 km,首尾高差 320 m,平均纵坡降 226.7‰,流域面积约 4.65 km^2 ,地貌上属中低山,地垒式断块中山、地堑式丘陵、河谷盆地交互叠加,具有强烈的河床揭底及河岸侵蚀冲刷作用。该沟段两岸岸坡较形成区平缓,沟道弯曲度较大,宽度 8~40 m,支沟发育少。受“6·10”泥石流冲刷影响,该段沟域共发育 17 处漂砾石为主的泥石流堆积体和 16 处岸坡不稳定松散堆积体,松散堆积体物源约 38.33 万 m^3 ,堆积体最厚超过 10 m,是修水县卢庄沟泥石流 70% 物源所在。

表 1 江西省修水县黄龙乡卢庄沟泥石流特征值

汇水面积/km ²	主沟长/km	主沟平均 坡降/‰	植被覆盖率/%	两岸坡度/°	d _{max} /m	固体物源 /万 m ³	补给方式
10.85	6.2	192.9	70	30~70	1.4	86.89	冲刷
泥痕爬高/m	泥石流重度/ (t/m ³)	泥石流流速/(m/s)	设计峰值流量 5%/(m ³ /s)	校核峰值流量 2%/(m ³ /s)	流体冲击 力/(t/m ²)	泥石流性质	泥石流类型
2.75~3.38	1.63	5.7~6.4	285.3	398.6	91.59	稀性	沟谷型

注：该特征值据 2011 年 6 月 10 日和 6 月 17 日泥石流调查和计算得出^[3]。

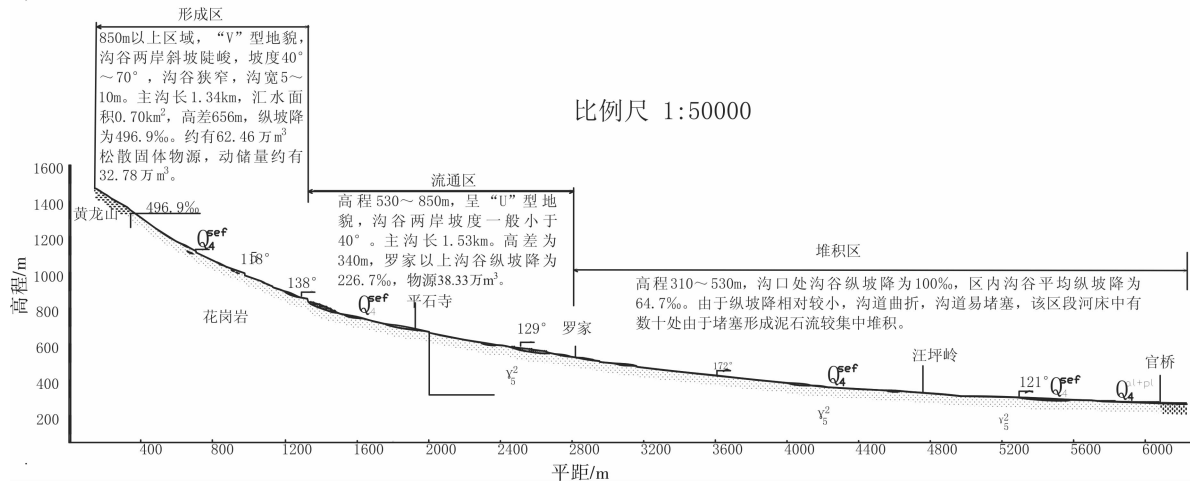


图 2 卢庄沟泥石流形成机制剖面示意图

2.3 堆积区的基本特征

流域内卢庄沟出山口罗家至官桥村的宽缓地段为泥石流主要堆积区，沟口高程 310 m，官桥村河谷最低处高程 530 m，该段受地堑式丘陵、河谷盆地交互叠加的构造作用，并没有明显的堆积扇形状，而是沿着沟谷两侧堆积，最窄处仅有 20 m，最宽处达 550 m，该段沟长 3 400 m，面积约 1.6 km²，平均纵坡降 64.7‰；地貌上属低山丘陵区，以河道第四系泥石流规程物(Q_4^{ef})为主，间杂残坡积物(Q_4^{el+dl})。众多居民择沟畔古泥石流堆积地而居，“6.10”泥石流发生后，6 月 17 日泥石流再次暴发，该段沟谷两段 60% 居民房屋遭受破坏或损毁。经多期堆积冲刷叠加，堆积体沿卢庄村被推移至官桥村南西侧近山脚处。卢庄沟泥石流重度 1.67 t/m³，为稀性泥石流(表 1)。

3 卢庄沟泥石流的形成机制及动力特征

据调查，研究区岩石结构碎裂，花岗岩的物理、化学和人类工程活动等风化作用形成的松散崩滑残坡积物(Q_4^{el+dl})，以及河道老泥石流堆积物(Q_4^{ef})是主要物源基础；暴雨迅速汇聚为泥石流的形成和规模加大提供了水源条件，是老泥石流“复活”的主因；强有力的冲刷、淘蚀和爬坡能力是泥石流成灾的动力来源(图 2)。

3.1 碎裂岩石的风化与崩解反应

卢庄沟上游出露燕山早期全风化、强风化花

岗岩，其主要成分有石英、长石、云母、角闪石等，它们通常占 95% 以上，其中 5% 为磷灰石、第四系泥质充填物等。受区内九岭山—万洋山造山运动的影响，山丘浅表部的花岗岩节理、裂缝较发育，在亚热带气候的干湿交替影响下，岩体热胀冷缩，风化强烈，在坡顶及坡中呈块状、碎裂状残积，力学强度极低，最高的岩石单轴抗压强度仅为 3.6 MPa。这些花岗岩风化、崩解后，以砾质粘性土的形式堆积于坡脚，力学强度极低，遇水易软化、崩解，工程力学性质差；研究区发现此类崩滑残坡积(Q_4^{el+dl})堆积体 12 处，体积约 12.03 万 m³，可供运移物源总量 8.68 万 m³，主要分布于平石寺至黄龙山山顶沟道两侧山坡处，为泥石流提供了主要的物源^[4]。

3.2 雨水的汇聚与搬运作用

研究区位于赣北中低山区，沟域两侧汇水面积较大，沟谷岸坡较陡，支流较为发育，且常出现小气候环境内的局部性暴雨。据气象资料，黄龙乡 2011 年 6 月 10 日日最大降雨量 182.2 mm，当月降雨量 611.7 mm，其中 1 h 最大雨强为 91.9 mm。卢庄沟主沟上游有大坳沟等三条一级支流，平石寺以下依次又有中坳沟(左岸)、桥下坳沟(右岸)、太阳坳沟(右岸)等多条一级支流汇聚，呈树枝状水流向主干集中(见图 1)。

卢庄沟内常年平均水深不大，仅 0.3~1.2 m，上下游水位变化也只有 1~3 m。沟口处丰水期(4~9 月)流量仅 1.5~2.0 m³/s，20 年一遇洪峰流量却达 12.8 m³/s；但由于上游集雨面积 >7 km²、沟长 >6 km²、坡降大(>496‰)，洪水具有

表2 泥石流流速计算表

计算断面	汇水面积 /km ²	平均泥深 /m	主道坡降/‰	泥沙修正 系数	固体物质 重度/(t/m ³)	平均流速 /(m/s)
平石寺	0.72	2.2	538	0.688	2.65	5.9
罗家	4.12	2.8	283	0.688	2.65	6.4
汪平岭	6.35	2.5	275	0.650	2.65	5.9
官桥村	8.20	2.5	232	0.650	2.65	5.8

量大、峰高、历时短、水动力条件差异性明显,这也为不同沟段的颗粒级配成果所验证。据勘查和室内试验,下游沟口段土石比为13.1:87.1,上游土石为2.2:97.8,表明细小颗粒大部分被洪水带走。此外,上游平石寺老堆积扇总长度300 m,前缘宽度达70 m,堆积平均厚度达8 m以上,方量达15万m³,下游罗家老堆积扇总长度300 m,前缘宽度达130 m,堆积平均厚度达15 m以上,方量达50万m³,表明泥石流河道曲折地形影响,搬运过程随地形变化,具有分段性特征,在平石寺和罗家平缓地段分段堆积,其余河段以薄层淤积为主(见图1)。

3.3 卢庄沟泥石流的运动与动力特性

卢庄沟属于典型的中低山区沟谷型泥石流,由于上游以碎块状的花岗岩为主,颗粒粒径大,所以研究泥石流的运动及动力参数至关重要,其中卢庄沟泥石流的运动速度、冲击能力等参数决定了该区域泥石流的运动特征。为此,本文根据此沟灾后泥石流勘查实验数据,结合不同频率降雨量频率和地形资料,利用相关理论及公式对这些参数进行计算分析。

3.3.1 泥石流的流速计算

根据形态调查表及实际地形地貌、气象资料,卢庄沟在不同剖面的动力学特征参数见表2^[1]。

从表2中可以看出,该泥石流流速到地形影响,在平石寺沟口流速就达到5.9m/s,到罗家受到沟口大坳沟、中坳沟、桥下坳沟、太阳坳沟处的补给,流速增大到最大值6.4m/s,到下游汪平岭和官桥村受平缓地形影响,流速又逐渐减少。

3.3.2 泥石流流量计算

根据泥石流历时 T 和泥石流流量 Q_c ,因山区泥石流陡起陡降的特点,主要考虑一次暴发泥石流的总量,将其过程概化为“三角形”,通过以公式(1)计算泥石流的总量 W_c ,以公式(2)计算一次冲出固体物质的总量^[5]。

$$Q = 19TQ_c/72; \quad (1)$$

$$Q_H = \frac{Q(\gamma_c - \gamma_w)}{(\gamma_H - \gamma_w)} \quad (2)$$

式中: Q 为一次泥石流过程总量(m³); T 为泥石流历时(取5400 s); Q_c 为泥石流最大流量(m/s); Q_H 为一次泥石流冲出固体物质总量(m³); γ_c 为泥石流重度(取1.662 t/m³); γ_w 水的重度(取1.0 t/

m³); γ_H 为泥石流固体物质的重度(取2.65 t/m³)。据此,对不同断面的泥石流一次总量和固体物质冲出量进行预测(表3)。

表3 卢庄沟官桥村断面泥石流暴发总量预测

设计频率/%	1	2	5	10	20
泥石流总量/万m ³	30.24	25.13	23.08	18.16	11.25
固体物质总量/万m ³	12.13	10.08	9.26	7.29	4.51

根据形成调查法和雨洪法比分析,卢庄沟官桥村出口断面泥石流流量值与雨洪法 $P=2\%$ 的流量计算结果相当,因此,泥石流峰值流量选取10.08万m³^[4]。对比“6.10”降雨量,从本次降雨时间(90 min)雨量分析,表明此次降雨频率大致相当于10年一遇,但从泥石流最后形成规模(堆积物达32.78万m³)看,上述预测明显偏小。其原因主要是在平缓地带,泥石流堆积体沿着河道堆积和淤积,还有一些古泥石流堆积体被冲刷淘蚀但运移过一段时间沿线淤积。

3.3.3 泥石流冲击力及冲起高度

泥石流整体冲击力决定了碎石的起运、搬运和冲刷能力,因此,结合一次性流量、地形资料、沟道大小和泥石流规范计算公式,算出卢庄沟在平石寺、罗家、汪家岭、官桥村的设计流速、整体冲击力和单块最大冲击力,见表4。

表4 卢庄沟泥石流冲击力计算表

断面	平石寺	罗家	汪平岭	官桥村
设计流速/(m/s)	5.9	6.4	5.9	5.8
整体冲击力/(kN/m ²)	77.15	91.59	81.67	74.48
弯道超高高度 Δh /m	1.53	1.67	1.35	1.32

从计算结果看,该沟泥石流冲击力最大是在罗家附近,到下游冲击力变小,实现调查中罗家附近沟道泥石流冲蚀切割深度1~3.5 m,远高于其他沟段,这与计算结果比较相符^[5]。

3.3.4 泥石流复发性的危害与评价

卢庄沟内灾后固体松散物源储量超过30万m³,相当于2011年卢庄泥石流冲出物质的3倍,受强降雨和地形地貌、地层岩性的影响,泥石流仍有可能再次激发,且激发泥石流的临界雨强可能降低。因此,结合卢庄沟河道的宽度、弯曲程度、汇流情况、汇水面积、松散物贮量、雨强及历时,综合判定卢庄沟泥石流为中高频泥石流,其不同频率条件一次性泥石流发展预测范围如图1所示。

据泥石流勘查规范,将卢庄沟泥石流影响范围划分为3个区。极危险区:平石寺沟岸至罗家的古泥石流堆积扇,面积2.08万 m^2 。危险区:罗家以及官桥村的沟道两侧区域,面积3.35万 m^2 。影响区:高于危险区与危险区相邻的地区,包括官桥桥到下游沙墩村的广大区域,一旦遇到20年以上一遇的强降雨,有可能再遇到泥石流危害,面积5.35万 m^2 。

4 结论与讨论

(1)卢庄沟泥石流是受特大暴雨而诱发的沟谷型、低频率、稀性泥石流,目前正处于发展期(壮年期)。因风化作用、构造运动和差异性地壳抬升导致卢庄沟崩滑残坡积物及沟道古泥石流堆积物丰富,沟内尚有松散堆积物源32.78万 m^3 ,一旦再次遭遇强降雨或连续降雨,极有可能再次暴发泥石流。地形地貌上,卢庄沟具有与鄱阳湖流域上游中低山沟谷的典型特征,即地形呈圈椅状、支流呈叶脉状,汇水面积大,主沟坡降大,相对高差超过800 m以上,易聚水,水动力条件足。

(2)卢庄沟泥石流沟口流速最大超过6.1 m/s,泥石流冲击力最高超过900 kN/ m^2 ,导致“6.10”泥石流冲毁了卢庄沟口部分建筑物,表明鄱阳湖流域中低山地区泥石流危害不容忽视。计算分析表示,卢庄沟一旦遇到20年一遇以的强降雨,其影响范围更大,将危及到下游官桥村小学及两侧水库的安全。

(3)该泥石流经历风化碎裂、崩滑堆积、暴雨汇聚、松散堆积体搬运洗刷、老泥石流沟冲刷复活等过程,最终形成暴雨型泥石流。其中风化物堆积是基础,雨水迅速汇聚是诱因,高陡边坡及充足水动力条件是诱因,因此,要加强对泥石流流沟的监测与治理,对黄龙山恢复植被、拦挡停淤、水石分治,对沟口居民建议搬迁避让,并在官桥村的沟谷左岸一侧设置混凝土挡土墙防冲护坡,引导水流或泥石流沿主沟安全排泄,在沟口堆积扇恢复植被,开展坡面植物防护,防止水土流失,同是开展土地整理,并还耕于当地农民。

参考文献:

- [1] 江西省勘察设计院. 江西省修水县黄龙乡卢庄村平石寺泥石流治理工程勘察报告[R]. 南昌:江西省勘察设计院, 2013.
- [2] 高波, 王佳运, 张成航, 等. 青海省玉树州高原暴雨型泥石流形成机制——以称多县拉隆沟泥石流为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 28–31.
- [3] 曾昭华. 江西省地质灾害的形成及其分布规律[J]. 地质与勘探, 1996, 33(4): 17–20.
- [4] 胡卸文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞湖大水沟泥石流发育特征及堵江危害性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 850–858.
- [5] Masami Saito, Tohru Araya and Futoshi Nakamura. Sediment production and storage processes associated with earthquake-induced landslides in Okushiri Island, 1993[J]. Sabo Gakkaishi, 1993, 47(6): 32–37.

Formation Mechanism and Dynamic Characteristics of Rainstorm-induced Debris Flow in Poyang Lake Valley of Jiangxi Province

GAN Jianjun¹, YUAN Liangkui², GUI Faliang¹, LI Ming², TANG Chun¹ and YAN Long¹

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Water Engineering Safety and Efficient Utilization of Resources in Poyang Lake Watershed, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;
2. Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330099, China)

Abstract: The formation mechanism and dynamic characteristics of rainstorm-induced debris flow in Poyang lake valley of Jiangxi Province is researched, which was expected to provide a reference for this kind of mountain torrent disaster and safety of river basin water project. Through field investigation and laboratory test, Luzhuang debris flow of Huanglong County in Jiujiang City was selected as an example, and the development characteristics and kinetics characteristics were analyzed. The main channel length of the debris flow is about 6.25 km, the catchment area is 4.270 km^2 . The supply of source was comparatively abundant (about $62.46 \times 10^4 \text{ km}^3$), the longitudinal gradient is 524.1‰ and the height differences is 1160m, the topography is easy to catchment. The process of rainstorm-induced debris flow in the study area can be divided into 4 stages: debris flow-source formation; loose accumulation carry; older landslide resurrection and debris flow initiation.

Key words: Poyang Lake Basin; debris flow; formation mechanism; dynamic characteristics; Luzhuang Ditch; Xiushui County in Jiangxi Province