

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.03.11

引用格式: 铁永波,徐如阁,刘洪,等.西昌市泸山地区典型火后泥石流特征与成因机制研究——以响水沟左岸3#支沟为例[J].中国地质调查,2020,7(3):82-88.

西昌市泸山地区典型火后泥石流特征与成因机制研究

——以响水沟左岸3#支沟为例

铁永波,徐如阁,刘洪,王家柱,巴仁基,
向安平,杨剑,欧阳渊,张琦,王宏

(中国地质调查局成都地质调查中心,成都 610081)

摘要: 2020年3月30日,四川省凉山州西昌市经久乡发生森林大火,山火燃烧后形成的山火灰和烧焦土体在强降雨作用下极易启动形成泥石流,给西昌市泸山、琼海景区生态环境及当地百姓生命财产安全带来潜在地质灾害风险。以西昌市安哈镇响水沟左岸3#支沟为例,采用野外调查、无人机航拍、地球物理探测、现场及室内实验等手段,对2020年5月1日该沟发生的火后泥石流流体特征、动力学参数及成因机制等开展研究,系统分析了山火及降雨过程对该次火后泥石流形成的影响机制。该成果可为系统认识西昌泸山“3·30”山火地区火后泥石流的运动特征、物源规模、激发雨量及其发展趋势研判提供科学参考。

关键词: 西昌山火地区; 火后泥石流; 成因机制; 运动特征; 防灾减灾

中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 2095-8706(2020)03-0082-07

0 引言

2020年3月30日,四川省凉山州西昌市经久乡发生山火,火势沿泸山景区蔓延,由于山火影响区紧邻西昌市城区,引起社会的广泛关注。山火发生后,国家主席习近平、国务院总理李克强均做出重要指示,要求深入排查火灾、泥石流及影响安全生产等的各类隐患,全力保障人民群众生命和财产安全^[1]。山火导致泸山景区植被破坏严重,大量松散的黑色山火灰和烧焦土体裸露地表,在雨水冲刷作用下极易启动形成泥石流。受降雨影响,2020年5月1日,西昌山火影响区内的响水沟左岸3#支沟、电池厂后山泥石流沟均发生小规模火后泥石流,对当地民房、耕地造成破坏,直接经济损失约2万元人民币,这给汛期西昌市泸山地区火后泥石流的防灾减灾工作提出了新的挑

战。据西昌市自然资源局对“3·30”山火影响区内地质灾害的初步排查,该区有潜在泥石流60余处,对当地旅游设施、集镇、学校约17 000余人的生命财产及邛海水质构成威胁,潜在火后泥石流风险极高。

火后泥石流是一种因前期山火影响而形成的一类特殊泥石流,其流体的颜色、容重及黏度等与普通泥石流明显不同。美国、澳大利亚等经常发生山火的国家或地区对火后泥石流的研究较多,对其规模与过火面积的关系、泥石流动力学特征、启动临界雨量值及演化趋势等均有较系统的认识^[2-3];国内学者近年来也对火后泥石流开展了相关研究,对其形成机理及规律等有了深入的认识,取得了一些研究成果^[4-6]。

本研究以西昌市安哈镇响水沟左岸3#支沟泥石流为例,通过野外调查、无人机航拍、物探、槽探、现场实验等手段,对该沟此次火后泥石流特征、成因机制及运动特征等进行了初步研究,提出了防灾

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2020-06-10。

基金项目: 中国地质调查局项目“川西山区城镇灾害地质调查(编号: DD20190640)”和国家自然科学基金面上项目“循环冻融作用下冰碛土的碎化效应及其对泥石流启动的影响试验研究(编号: 41772324)”联合资助。

第一作者简介: 铁永波(1979—),男,博士研究生导师,“南方山地丘陵区地质灾害调查工程”首席专家,中国地质调查局优秀地质人才,万方数据从事地质灾害形成机理与风险评价研究。Email: tyb2009@qq.com。

减灾建议,可为深入认识西昌山火地区火后泥石流的形成机理与未来演化趋势研判提供科学依据。

1 研究区概况

响水沟左岸3#支沟位于四川省凉山州西昌市安哈镇境内,沟口地理坐标为 N27°48'41.09", E102°14'41.86"。响水沟流域地形总体较陡,呈东高西低、北高南低的特点。气候属亚热带季风气候,多年平均降雨 1 014 mm,降雨集中于 6-9 月,占全年降雨的 76%,且多为暴雨;山区气候垂直分带十分明显,年平均气温 14~17℃,日照时数 2 000~2 400 h。响水沟流域内主要居住彝族,以农耕为主,民房和耕地主要沿河谷或沟口宽阔地分布。

响水沟左岸3#支沟流域面积 0.078 km²,主沟长度 783 m,相对高差 370 m,主沟纵坡 418‰,流域形态呈长条状,总体上宽下窄,支沟不发育,可分出明显的形成区、流通区和堆积区,如图 1 所示。

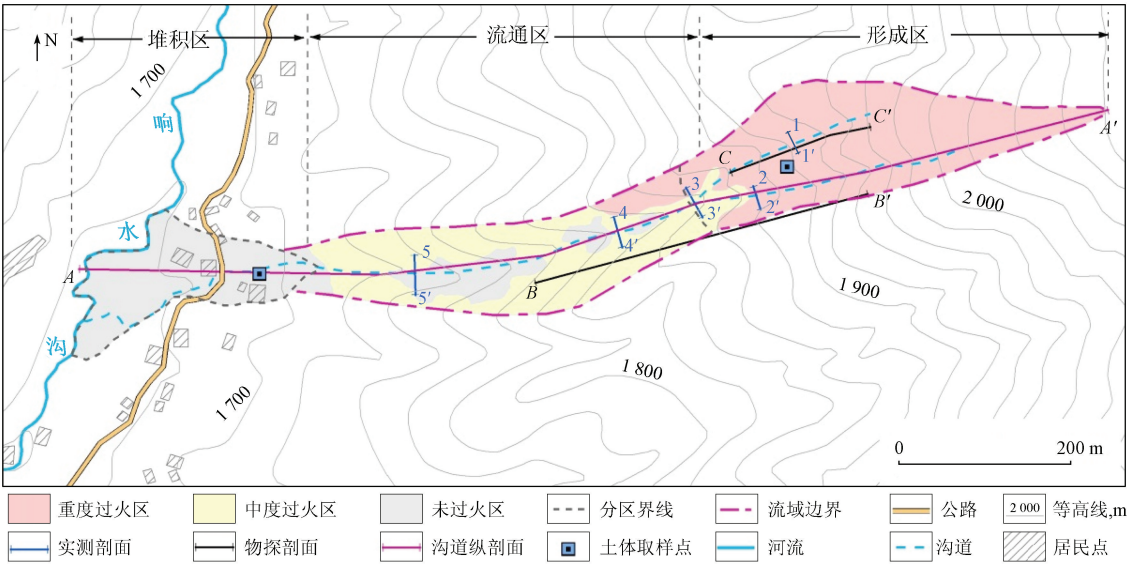


图1 泥石流流域分区特征

Fig.1 Subzone characteristics of the debris flow gully

形成区主要位于流域内海拔 1 840~2 080 m 之间,主沟纵坡约 520‰,发育的 2 条支沟与主沟呈“Y”字型交汇,沟道两侧平均坡度约 40°,沟道呈“V”字形,沟底平均宽度约 0.5 m,沟道两侧山坡平均坡度约 34°,形成区为此次山火的重度过火区,坡表植被几乎被烧光,残留在坡体表面的松散山火灰及烧焦土体厚度 10~20 cm,暴露在坡体表面,在降雨作用下极易通过面蚀作用进入沟道成为泥石流物源,沿岸无明显崩滑体分布,两侧坡体垮塌程度较轻。流通区位于流域内海拔 1 710~1 840 m 之间,该段主沟纵坡约 345‰,无明显支沟发育,沟道两侧平均坡度约 45°,沟道相对狭窄,平均宽度约 1.2 m,沟底有基岩出露,侧蚀和掏蚀程度较弱。流通区沟道两岸受此次山火影响较小,而两侧接近山脊部分的过火程度则相对较重,但因水力条件差,该区域为泥石流形成提供

的物源补给有限。堆积区位于流域内海拔 1 678~1 710 m 之间,该段主沟纵坡约 120‰,堆积区地势开阔,为明显的老冲洪积扇形态。

流域内出露的主要地层单元为白垩统小坝组二段($K_{1-2}x^2$)与一段($K_{1-2}x^1$),二者呈整合接触。第四系(Q)则以残积物(Q_4^{el})、坡积物(Q_4^{dl})和冲洪积物(Q_4^{apl})形式不整合在小坝组二段与一段之上,其中,沟口—山脚地区主要分布冲洪积物,沟口附近为坡积物,沟口以上地区为残积物。小坝组二段的岩性组合主要为砖红色、暗红色泥岩夹粉砂岩;小坝组一段主要为砖红色粉砂岩、泥岩夹粉砂岩、砂岩,底部为一套薄层紫红色砂岩和砾岩,基岩产状 $290^\circ \angle 40^\circ$ (图 2)。流域坡体上主要分布有泥岩风化后形成的残坡积碎石土,土体黏粒成分较多,土层厚度 0.1~1.0 m。

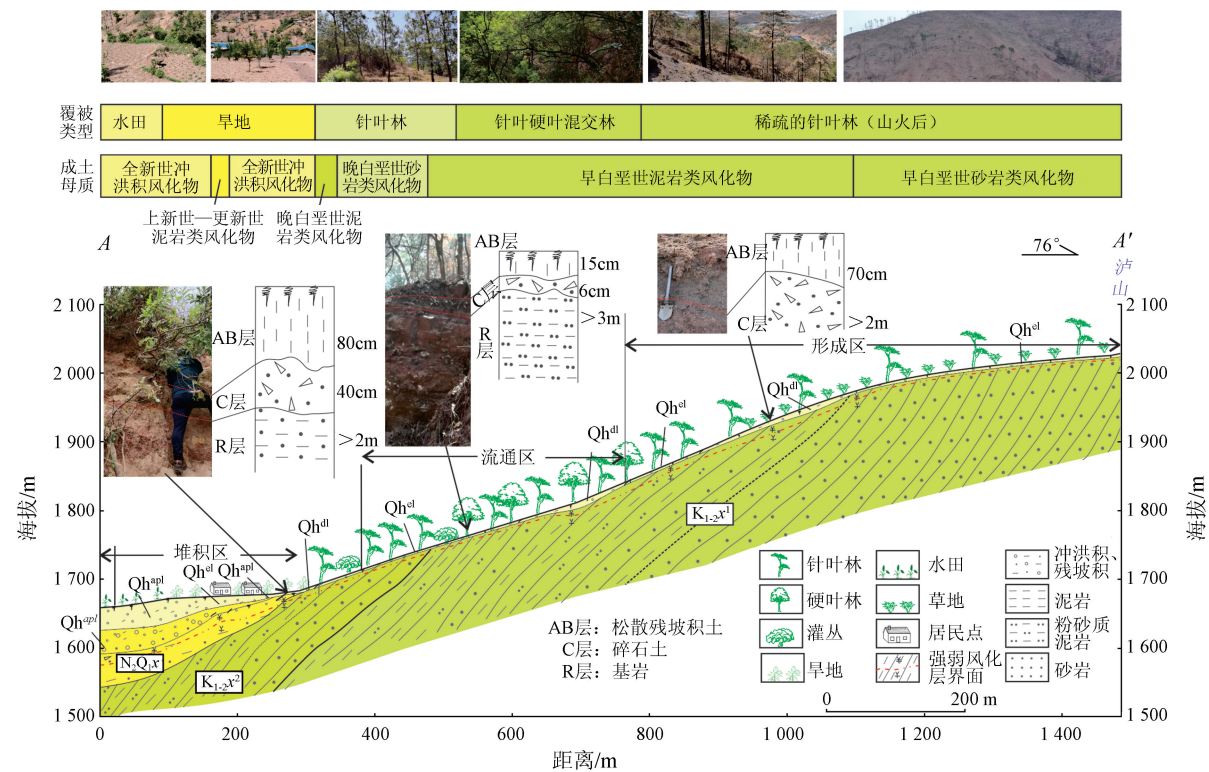


图2 响水沟左岸3#支沟流域纵剖面特征

Fig.2 Longitudinal profile characteristics of 3# branch on the left bank of Xiangshuigou

2 火后泥石流特征

2.1 泥石流堆积特征及容重

从泥石流冲出沟口后在开阔区域的堆积特征看,堆积泥浆呈褐黑色,黏粒含量较多,干涸后泥浆堆积体表面出现裂痕。堆积体中碎块石含量较高,夹杂一定烧焦的树枝等,具有典型的火后影响特征。在堆积区调查发现的泥石流冲出最大块石粒径0.8 m×0.35 m×0.27 m,基岩岩性为砖红色砂岩。研究中统计了8组泥石流冲出的烧焦树枝,其中最长的为2.8 m,直径为0.25 m,烧焦树枝的长度和直径大小都呈现出随距沟口距离增加而减小的规律。根据泥石流发生后留下的泥痕特征,在现场采用配浆法完成了3组泥石流流容重实验。通过对3组数据取平均值,得到响水沟3#支沟此次火后泥石流流容重约1.86 t/m³,属于黏性泥石流。此外,对泥石流物源区和泥石流发生后堆积区土体开展了土体颗粒分析实验,发现经过泥石流搬运后堆积

的土体中块石、沙砾、粉粒及黏粒的含量比物源区高,说明在泥石流运动过程中有沟道侵蚀启动的块石、沿途坡面上山火灰等细颗粒的加入(图3)。

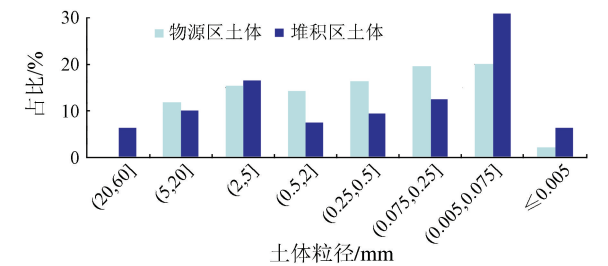


图3 响水沟3#支沟泥石流物源区和堆积区土体颗粒级对比

Fig.3 Comparison of the proportions of different sizes of soil particles in the debris flow in the source area and accumulation area of 3# branch on the left bank of Xiangshuigou

2.2 泥石流动力学参数特征

根据1:1万比例尺地形图提取的泥石流流域参数特征值,结合野外调查中5条实测剖面中的泥石流泥痕等实测数据(图1),计算得到泥石流在不同区的流速(表1)。

表1 泥石流流域参数及野外实测数据统计

Tab.1 Basin parameters and field measured data of the debris flow gully

断面位置	编号	流域面积/ km ²	沟源至断 面长/km	沟道纵坡 降/‰	泥深/m	断面面积/ m ²	湿周/m	弯道超高/m	断面平均流速/ (m·s ⁻¹)
形成区左岸支沟	DM-01	0.011 6	0.116	440	0.40	0.50	3.55	0	4.61
形成区右岸支沟	DM-02	0.020 3	0.272	450	0.70	0.66	3.58	0	6.72
流通区上部	DM-03	0.039 7	0.286	366	1.00	1.39	5.64	0.20	8.18
流通区中部	DM-04	0.043 8	0.339	325	1.18	1.83	6.39	0.18	8.91
流通区下部	DM-05	0.054 5	0.462	321	0.98	2.25	6.46	0.53	7.86

2.2.1 流速

在计算中,泥石流流体性质均作为黏性(重度均大于1.8 t/m³),其流速采用低阻型计算公式(东川泥石流改进公式)进行计算^[6],即

$$V_c = K H_c^{2/3} I_c^{1/5}。$$
 (1)

式中:V_c为泥石流断面平均流速,m/s;K为黏性泥石流流速系数,采用内插法查得;H_c为平均泥深,m;I_c为泥位纵坡降。响水沟左岸3#支沟泥石流流速分布特征见表1。

2.2.2 峰值流量

根据《四川中小流域暴雨洪水计算手册(1984)》^[7]及《四川省暴雨统计参数图集》^[8],结合暴雨量均值等值线图计算出暴雨洪峰流量,进而参考《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》(T/CAGHP 006—2018)^[9]中流量计算方法,对泥石流峰值流量进行计算,即

$$Q_c = (1 + \Phi) Q_p D_c。$$
 (2)

式中:Q_c为泥石流断面峰值流量,m³/s;Q_p为暴雨洪峰流量,m³/s;D_c为堵塞系数,可根据勘查规范查表确定;Φ为泥沙修正系数。

通过对降雨过程、降雨强度及频率特征的分析,选取五年一遇的降雨频率作为“雨洪法”计算的结果。考虑到雨洪法是在自然条件下通过区域植被特征获取地表汇流参数的,而山火之后植被及地表土壤结构已发生较大的变化,因而,此处取值以“形态调查法”结果为准,即泥石流峰值流量取17.69 m³/s(表2)。

从计算结果看,采用形态调查法计算得到的泥石流峰值流量比采用雨洪法计算得到的值大许多,这可能是由于泥石流在运动过程中所携带的漂木形成的短暂堵塞对峰值流量起到了明显的放大效应。鉴于在对泥石流流通区进行调查时,随处可见容易形成堵塞的卡口地形,因此,此次泥石流峰值

表2 泥石流峰值流量计算结果

Tab.2 Calculation results of the debris flow peak discharge

方法类型	断面编号	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
雨洪法	4-4'	15.70
	5-5'	11.80
形态调查法	1-1'	2.30
	2-2'	4.44
	3-3'	11.37
	4-4'	16.32
	5-5'	17.69

流量的确定以形态调查法计算得到的结果作为参考。

2.2.3 总冲出量

泥石流总冲出量根据公式^[9]

$$Q = 0.264 T Q_c。$$
 (3)

进行计算。式中:Q为一次泥石流过程总量,m³;T为泥石流历时,单位为s,依据现场访问,计算时取2 400 s;Q_c为泥石流最大流量,m³/s。

根据计算结果,此次火后泥石流一次冲出总量约1.1×10⁴ m³,一次固体物质冲出量约0.6×10⁴ m³。

3 火后泥石流成因分析

3.1 山火为泥石流物源显著增加的“始作俑者”

通过对沟口及附近当地居民的访问了解到,响水沟3#支沟为季节性冲沟,仅在每年雨季时才会有流水,且流量很小,近50 a内均未发生过泥石流。通过现场调查和无人机航拍,发现2020年西昌“3·30”山火对响水沟3#支沟流域内植被的破坏较为显著。统计结果显示:整个流域内重度过火区面积约0.04 km²,主要分布在海拔1 840 m以上区域,地表草本、灌木基本全被烧毁,仅有部分乔木残留;中度过火区面积约0.024 km²,主要分布在流域中下游两侧山脊及沟道两侧山坡中上部,草本基本被烧光,部分灌木残留,乔木过火程度较轻;其余区域

为山火未影响区域,主要分布在流域中下游沟道两 侧山坡下部,植被保持完整(图4)。



(a) 重度过火区 (b) 中度过火区 (c) 山火未影响区

图4 山火对泥石流流域植被的影响特征

Fig.4 Influence of the fire on the vegetation in the debris flow gully

通过综合分析认为,此次响水沟左岸3#支沟泥石流形成的物源主要来自山火燃烧过后的松散山火灰及表层烧焦土体。从此次泥石流的堆积区土体特征可以看出,冲出后的泥石流流体中黏粒含量极高,流体呈稠状,颜色为褐黑色,流体中夹杂有大量烧焦的树枝。为合理估算山火过后流域内泥石流物源的储量规模及可能通过地表侵蚀而成为泥石流物源的松散土体规模,如图5所示,在响水沟左岸3#支沟物源区布设了2条约450 m的物探剖

面线,通过高密度电阻率方法,对泥石流物源区及流通区开展了地球物理探测。物探解译结果表明,在响水沟流域内,地表松散土体和强风化岩体平均厚度约4 m。考虑到地表残坡积土体厚度和强风化基岩的厚度还无法被细分(图5),特采用槽探进一步探索两者的界面及对应深度。结果表明,地表第四系残坡积土体的厚度介于0.1~1.0 m之间,厚度随坡度的不同而有所差异。

3.2 前期累计降雨与短时强降雨是触发泥石流的动力因素

通过实地访问,3#支沟泥石流发生在2020年5月1日19:00—20:00期间,根据距离响水沟3#支沟直线距离约8 km的西昌市气象站(国家站56571)降雨监测数据分析,此次降雨主要从2020年4月30日开始,至5月1日结束,24 h累计降雨量约52.2 mm,最大雨强为9 mm/h。从降雨强度分析看,此次泥石流发生前的累计降雨为16.1 mm,泥石流发生时最大降雨量为7.1 mm/h,诱发泥石流的小时降雨强度不大,但考虑前期降雨量因素,此次火后泥石流的降雨过程表现出了“前期累计降雨+短时强降雨”的组合模式(图6)。

西昌泸山地区火后泥石流的诱发降雨类型与西南其他地区短时强降雨诱发的泥石流存在明显不同^[10-12]。

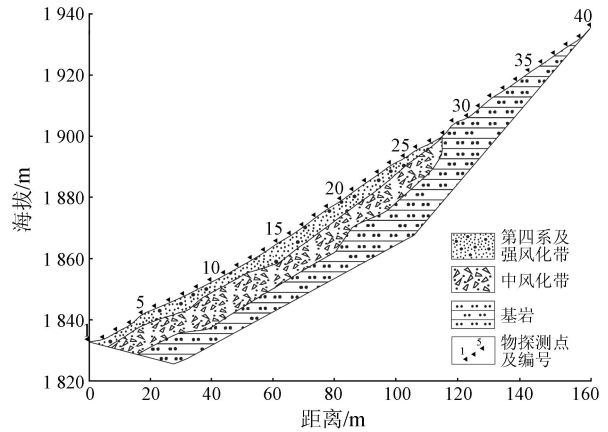


图5 基于高密度电阻率物探的泥石流物源区地下结构特征(图1中CC'剖面)
Fig.5 Underground structure of the debris flow source area based on multi-electrode resistivity method
万方数据 (section CC' in Fig.1)

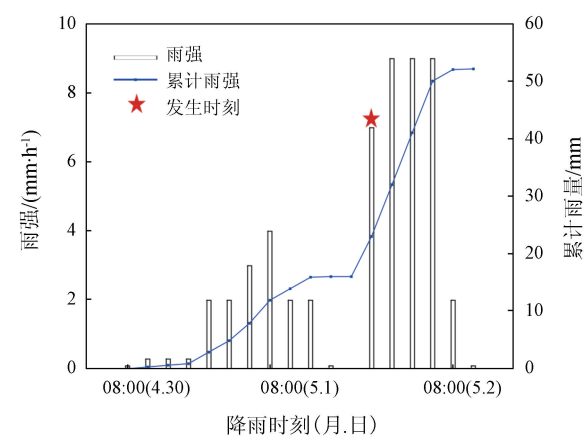


图6 响水沟3#支沟泥石流发生与降雨对应关系
Fig. 6 Relationship between the debris flow and rainfall of 3# branch on the left bank of Xiangshuigou

3.3 流域陡峻的地形为泥石流形成的必要条件

流域上陡下缓的地形,为此次泥石流形成奠定了动能基础。据调查,流域形成区和流通区沟道两侧山坡均较陡,植被被烧光后坡体表层土体稳定性极差,易在雨水或坡面径流的冲刷作用下进入沟道,为泥石流的发生提供物源。同时,流通区陡峻和狭窄沟道的束流作用,对泥石流流速起到了加速作用,此次泥石流冲出沟口后在堆积区仍继续流动约300余m,并携带较高含量的块石。

4 结论与讨论

(1)响水沟左岸3#支沟泥石流是西昌泸山山火地区火后泥石流的典型案例,泥石流为黏性泥石流,流体重量大,黏粒含量高,诱发泥石流的降雨表现为“前期累计降雨+短时强降雨”的组合模式,此次泥石流发生频率约为五年一遇。

(2)据离泥石流发生地直线距离约3km的海南乡降雨站观测数据,5月1日00:00-24:00间累计降雨为12mm,其中18:00-20:00间2h累计降雨量为11mm,虽然降雨强度的增加时间与泥石流发生的时间高度吻合,但海南乡同时段降雨量要比更远的西昌市区观测数据低,这也说明西昌市区降雨在空间分布上的差异性较大,不能完全反映泥石流发生地的真实降雨特征。因此,下一步需要根据泸山山火地区降雨量空间分布差异特征,有针对性地建立雨量站,获取详细的降雨数据,为进一步研究和确定火后泥石流的临界雨量值及监测预警模型提供基础数据。

(3)从此次西昌泸山过火区地表残留土体特征分析,山火烧光了地表植被,在地表形成的山火灰和烧焦土体极为松散,对流域内潜在泥石流储量物源的增加起到了积极作用。同时,在失去地表植被和落叶层的保护后,松散山火灰及烧焦土体极易在雨滴的溅蚀作用下被侵蚀,雨水亦会迅速形成地表径流,冲刷坡体表层松散土体,进而形成泥石流。从泥石流物源区和堆积区土体粒径统计结果可以看出,堆积区土体黏粒含量明显增加,流体呈褐黑色,表明在泥石流形成过程中有表层山火灰的加入,山火对泥石流潜在物源规模的影响显著。

(4)将形态调查法(剖面4-4'和5-5')计算得到的泥石流峰值流量与雨洪法计算结果进行比较发现,通过形态调查法计算的泥石流峰值流量比雨洪法大得多,这可能与泥石流发生后携带的漂木和流通区狭窄的沟道地形有关。泥石流携带的漂木在沟道狭窄的急转弯处或有枯树拦截处会形成短暂的堵溃效应,使得泥石流的峰值流量被放大,这与野外调查过程中发现的流通区沟道存在多处狭窄急弯和枯树横在沟道内的现象一致,表明山火烧焦的漂木对火后泥石流的动力学参数具有显著的影响,今后在这类泥石流防治工程设计中需要充分考虑。

(5)西昌山火地区火后泥石流物源补给方式在未来一段时间内将以面状侵蚀为主,对流域内坡体表面松散土体进行有效稳固将对后期火后泥石流的暴发频率、规模及破坏程度的控制起到显著效果,建议加快过火区生态植被的修复速度,选择适宜当地气候环境且生长速度相对较快的乔木、灌木及草本植物种子进行播种,起到有效稳固坡面松土体的作用。同时对威胁对象较多的潜在高风险火后泥石流开展应急工程治理,在兼顾流域景观和防灾减灾效果的前提下,形成生态治理与工程治理相结合的防治模式,探索针对风景区火后泥石流综合防治技术。

致谢: 本文是中国地质调查局成都地质调查中心多学科团队与多家单位共同参与完成的调查研究成果。中国地质调查局成都地质调查中心杨富成、张景华、李华、廖国忠、张腾蛟等参与了野外泥石流调查、剖面测量、现场实验等工作,电子科技大学周军博士后参与了泥石流物源区物探野外与解译等工作,凉山州地质环境监测站殷万清站长、西昌市自然资源局唐国莲局长、四川省核工业地质

局二八一大队宋钰朋、苟剑飞及四川省地质矿产勘查开发局攀西地质队技术人员等在工作期间提供了大力的支持与帮助,在此一并感谢!

参考文献:

[1] 习近平对四川西昌市经久乡森林火灾作出重要指示;要求坚决遏制事故灾难多发势头全力保障人民群众生命和财产安全[N/OL]. 人民日报,2020-04-01(1). http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-04/01/nw.D110000renmrb_20200401_2-01.htm.

[2] Cannon S H,Kirkham R M,Parise M. Wildfire-related debris-flow initiation processes,Storm King Mountain,Colorado[J]. Geomorphology,2001,39(3/4):171-188.

[3] Cannon S H,Bigio E R,Mine E. A process for fire-related debris flow initiation,Cerro Grande fire,New Mexico[J]. Hydrological Processes,2001,15(15):3011-3023.

[4] 胡卸文,王严,杨瀛. 火后泥石流成灾特点及研究现状[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1562-1573.

[5] 任云,胡卸文,王严,等. 四川省九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理[J]. 水文地质工程地质,2018,45(6):150-156.

[6] 王严,胡卸文,金涛,等. 火后泥石流形成过程的物源启动模式研究[J]. 工程地质学报,2019,27(6):1415-1423.

[7] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都:四川省水利电力厅,1984.

[8] 四川省水文水资源勘测局. 四川省暴雨统计参数图集[Z]. 成都:四川省水文水资源勘测局,2010.

[9] 中国地质灾害防治工程行业协会. 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.

[10] Ni H Y,Zheng W M,Song Z,et al. Catastrophic debris flows triggered by a 4 July 2013 rainfall in Shimian,SW China:formation mechanism,disaster characteristics and the lessons learned[J]. Landslides,2014,11(5):909-921.

[11] 铁永波,周洪福,倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发型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,2013,28(4):110-113,187.

[12] Tie Y B,Xu R G, Ba R J. The formation of runoff-generated debris flow in Southwestern of China:take Gangou as an example[J]. Environ Earth Sci,2014,72(5):1479-1490.

Study on the characteristics and formation mechanism of the typical post-fire debris flow in Lushan area of Xichang City: A case study of 3[#] branch on the left bank of Xiangshuigou

TIE Yongbo, XU Ruge, LIU Hong, WANG Jiazhu, BA Renji, XIANG Anping,
YANG Jian, OUYANG Yuan, ZHANG Yu, WANG Hong
(Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: On March 30, 2020, a forest fire broke out in Liangshan area of Xichang City in Sichuan Province. After the fire, the ash and burnt soil easily developed into debris flow in case of heavy rainfall, which brought potential geological hazard risks to the ecological environment of Lushan and safety of local people's lives and properties in Qionghai and Lushan areas. Taking 3[#] branch on the left bank of Xiangshuigou in Anha Town as an example, the authors conducted field investigation, UAV aerial photography, geophysical exploration, field and indoor experiments to study the fluid characteristics, dynamic parameters and genetic mechanism of the post-fire debris flow on May 1, 2020. The features of movement, provenance scale and deduced precipitation were also systematically analyzed. This achievement could provide some reference for the study of the development trend of the post-fire debris flow and the mitigation of disasters in this area.

Keywords: burned areas in Xichang; post-fire debris flow; formation mechanism; features of movement; disaster prevention and mitigation

(责任编辑:刁淑娟)