

森林火灾后泥石流的成因与特征分析

卢洪沛¹, 胡卸文²

(1. 甘孜藏族自治州自然资源和规划局,四川 康定 626000;
2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:通过四川省雅江县恶古村洞拥过沟森林火灾后泥石流的现场勘察、室内实验,对该泥石流的成因与基本特征进行分析,结果表明:森林火灾导致泥石流暴发所需要的松散固体物质增加,属于粘性—低频—暴雨—沟谷型—滑坡及坡面侵蚀性泥石流。泥石流重度为 1.89 g/cm³,平均流速 6.63 m/s,P=5%时泥石流一次固体物质冲出量约 20 446.48 m³。洞拥过沟泥石流在 P=5%下泥石流峰值流量为 32.27 m³/s,恶古河流量为 P=5%泥石流峰值流量的 3 倍;在一定短历时强降雨条件下,洞拥过沟暴发泥石流的可能性较大,且泥石流冲出物在沟口易淤积,其造成主河恶古河堵塞和溃决的可能性较大。
关键词:洞拥过沟;森林火灾;低频泥石流;松散固体物源
中图分类号:P426.1+6;[TV144];S891+.6 **文献标识码:** A **文章编号:**1001-2184(2021)05-0001-05

Study on Characteristics and Formation Mechanism of
Debris Flow After Forest Fire

LU Hongpei¹, HU Xiewen²

(1. Natural Resources and Planning Bureau of Ganzi Tibetan Autonomous Region, Kangding, Sichuan, 626000;
2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031)

Abstract: Through on-site investigation and laboratory experiments of the debris flow after forest fire in Egu Village, Yajiang County, Sichuan Province, this paper analyzes the cause and basic characteristics of the debris flow. The investigation and experiment results show that the loose solid matter induces the outbreak of debris flow is increased by the forest fire, and the debris flow is regarded as viscous, low-frequency landslide and erosive debris flow on the slope of gully under heavy rain. The gravity of the debris flow is 1.89 g/cm³, the average flow velocity is 6.63 m/s, and when P=5%, the amount of solid matter washed out by the debris flow at one time is 20446068m³. When P=5%, the debris flow in Dongyonggou gully has a peak volume of 32.27 m³/s, and the flow of Egu River is 3 times that of the debris flow when P=5%. There is a greater possibility of outbreak of debris flow across the Dongyong gully, and the debris flow effluent is easy to silt up at the mouth of the gully, which is more likely to cause blockage and collapse of Egu river.
Key words: Dongyong gully; forest fire; low frequency debris flow; loose solid source

0 引 言

随着人类在林区活动不断加剧,森林火灾逐渐演变为一种常见的林区灾害,据不完全统计,近年来中国平均每年发生森林火灾约 1 万多次。例如 2020 年 3 月 30 日四川省西昌市发生森林火灾,火灾烧毁林地约 1 000 公顷,2016 年 3 月 15 日,四川省九龙县突发森林火灾,火灾烧毁林地约 160 公顷^[2],森林火灾造成林区内大量动植物死

亡,对林区生态系统造成严重破坏,产生大量的烟尘和温室气体污染大气环境^[3]。此外,火灾后引发水土流失、崩塌滑坡、泥石流等不良次生地质灾害,造成巨大的人员伤亡和财产损失^[4]。
火灾后泥石流在成因上与普通泥石流有较大差异,其松散固体物质主要是在火灾后产生,按照启动条件的不同,可分为表面径流型和浅层滑坡型^[5]。目前,国内外对火灾后泥石流的研究较少,对泥石流的研究多集中在震后型泥石流和普通型泥石流^[6-8],火灾后泥石流的研究主要集中在火

收稿日期:2021-05-18
基金项目:国家自然科学基金资助(No:41731285,41672283)。

灾改变土壤的水力性质以及增加物源的动态储量^[9-13];ColeR^[14]通过对比试验发现,在火灾区域内土壤含水量和浅表土的吸附性显著降低;McGuire^[15](2019)指出火灾后流域爆发泥石流的临界阈值降低约35%;雷鸣宇^[16]等(2021)研究发现火灾后植被根系死亡导致土体抗剪强度下降,从而解释了火灾后泥石流的启动机理。

2018年2月16日,雅江县恶古乡马益西村后山突发森林火灾,过火面积20.59 km²,其中严重烧毁面积6 km²,涉及恶古村、下马益西村。森林火灾过后,同年6月暴发泥石流灾害。本文以洞拥过沟为典型研究对象,探究火灾后泥石流的运动过程以及形成机制。

1 研究区概况

洞拥过沟位于甘孜州雅江县恶古村,属雅砻江水系一级支流恶古河左岸支流,距雅江县城58 km。出露地层由老到新依次为三叠系上统(侏倭组 T₃zh)地层、第四系(Q)堆积层。地理位置处于川西高原与四川盆地过渡带,地跨扬子陆块区与羌塘—三江造山系两大一级构造单元,新构造活动异常强烈,使区域内地势不断抬升,两侧风化剥蚀搬运作用显著,属构造剥蚀侵蚀高山地貌。研究区位于活动频繁的鲜水河地震带附近,地震频发,地震基本烈度为7度。

洞拥过沟位于青藏高原东缘,属于大陆性季风高原型气候。年均气温一般在4~11℃,最低气温-16.0℃,最高气温为36.1℃。年平均降雨量705.2 mm,年降水量最大值为1 001.3 mm,最小值为497.0 mm,年平均蒸发量1 090 mm。但区内降雨量时间分布不均,主要集中于5~9月。

2 洞拥过沟泥石流基本特征

2.1 泥石流灾害的历史及特征

洞拥过沟历史上多次发生泥石流。1987年,洞拥过沟因森林火灾曾暴发大规模泥石流,导致沟口11户民房被埋。1997年7月,泥石流携带的大石块堆积于沟道下游和沟口,堆积平均长度约150 m,平均宽度为100 m,平均厚度约为2 m,初步估算该次泥石流固体冲出量约 3×10^4 m³。2018年2月恶古乡流域发生大面积深林火灾,发生火灾之前洞拥过沟属于低频泥石流沟,但是火灾发生后,同年的雨季(5~9月),该流域多次暴发暴雨型泥石流灾害,最为严重的一次发生在6

月中旬,在强降雨作用下(6 h降雨量33.6 mm)泥石流持续时间约30 min,泥石流携裹沟口前缘滑坡堆积体沿沟道冲刷,沟口最高处泥石流泥位高度3.5 m以上,造成两岸农户房屋损毁,护堤破坏。该次泥石流冲出固体物质约 1.05×10^4 m³,堆积物冲至恶古河,造成恶古河淤塞,上游形成堰塞湖,严重威胁了沟道下游村镇及恶古村农户的生命财产安全。

洞拥过沟与主河恶古河呈90°左右的锐角相交,不利于泥石流物质排泄;利用形态调查法计算出泥石流发生时恶古河洪峰流量约为100 m³/s,洞拥过沟泥石流在P=5%下泥石流峰值流量为32.27 m³/s,恶古河流量为P=5%泥石流峰值流量的3倍,洞拥过沟泥石流属高重度的粘性泥石流,泥石流冲出物易淤积,难易被主河河水稀释并搬运,因此,暴发泥石流灾害时,其造成主河恶古河堵塞和溃决的可能性较大。

2.2 泥石流类型特征

根据现场调查访问,1997、2018年洞拥过沟泥石流浆体浓稠,按泥石流灾害防治工程勘察规范中泥石流浆体稠度特征表的标准,其容重应在1.8~2.3 g/cm³之间,结合现场配浆试验,实际容重在1.89 g/cm³,为偏粘性泥石流。根据记录,洞拥过沟泥石流暴发的频率为低频泥石流。值得注意的是,2018年森林火灾后已连续两年发生暴雨泥石流灾害,而且具有发育为中频泥石流的可能,因其发育于沟谷地带,属于沟谷型泥石流。泥石流发生所需要的松散固体物质来源是主沟两侧的崩滑和坡面侵蚀以及运动过程中沟床底部的沟道物源,属于滑坡及坡面侵蚀型泥石流。泥石流的激发条件是短历时强降雨,属于暴雨型泥石流。因此,洞拥过沟泥石流属于粘性—低频—暴雨—沟谷型—滑坡及坡面侵蚀性类泥石流。

2.2 泥石流堆积特征

对洞拥过沟泥石流堆积区不同位置的泥石流堆积物进行采样,在室内进行颗粒级配试验并绘制颗粒级配曲线,曲线说明洞拥过沟内不同位置的水动力条件和冲淤特征。沟道内(1号,2号)土石比均较小,纵坡比大,水动力条件强,强大的水动力条件使沟道内的细小颗粒难以停留在流通区沟道内,被泥石流裹挟带走,仅留下粗颗粒物质在

沟内。流通区(3 号)由于森林火灾后坡面侵蚀物源、沟道岸坡滑坡物源等聚集,而地表水势能尚未在向下径流中经巨大的沟道比降迅速增大,其裹挟泥砂的能力相对较弱,沟内出现轻微淤积。在下游流通区(4 号)土石比自上游向下游总体呈现逐渐增大的趋势特征,表明堆积区水动力条件迅速变弱,使流体中细颗粒物质淤积。

2.3 泥石流运动参数特征

2.3.1 泥石流流体重度

洞拥过沟火灾后泥石流容重的计算标准,是根据 2018 年 6 月暴发的泥石流灾害现场调查测定的。测定方法是在洞拥过沟泥石流主要流通堆

积区段,采集泥石流堆积物搅拌配制成泥石流浆体,配置好的浆体要与泥石流灾害后沟道残留的泥痕的颜色、形状和厚度等特征相符,并找到目睹过泥石流暴发的当地村民,将配置的样品让其确认,然后测量配置浆体的容重,其计算公式为:

$$\gamma_c=\frac{G_c}{V}$$
(1)

式中 γ_c 为泥石流重度(g/cm^3); G_c 为配制泥浆重量(g); V 为配制泥浆体积(cm^3)。

计算结果(表 1)表明洞拥过沟泥石流重度为 $1.76\sim 2.02\text{ g}/\text{cm}^3$,平均值为 $1.89\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2.3.2 泥石流的流速

表 1 洞拥过沟泥石流容重计算表

试验位置	编号	配制泥浆重量 G_c/kg	配制泥浆体积 V/L	泥石流重度 $\gamma_c/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$
101°3′28.65″E 29°36′34.85″N	1—1	28.35	15.00	1.89
101°3′27.23″E 29°36′38.96″N	2—2	26.4	15.00	1.76
101°3′14.73″E 29°36′49.63″N	3—3	30.3	15.00	2.02

泥石流流速是重要的泥石流流动力学性质之一,洞拥过沟泥石流流速采用东川公式计算:

$$V_c=KH_c^{2/3}I_c^{1/5}$$
(2)

式中: V_c 为泥石流断面平均流速(m/s); H 为泥位高度(m); K 为泥位纵坡率; I_c 为清水河床糙率。

计算结果表明(表 2),洞拥过沟泥石流平均流速为 $6.63\text{ m}/\text{s}$ 。

表 2 洞拥过沟泥石流流速计算表

断面位置	系数	泥石流过流厚度 / m	沟床坡降 / $\%$	泥石流流速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1—1	10	0.9	0.210	6.82
2—2	10	0.8	0.265	6.61
3—3	10	0.6	0.611	6.45

2.3.3 泥石流峰值流量

洞拥过沟泥石流峰值流量按《四川省水文手册》提供的公式计算,且先计算暴雨洪峰流量,公式如下:

$$Q_p=0.278\cdot\psi\cdot\frac{S}{\tau^n}\cdot F$$
(3)

式中: Q_p 为暴雨洪峰流量(m^3/s); ψ 为洪峰径流

系数; F 为汇水面积(km^2); S 为暴雨雨强(mm/h), $P=2\%$, $32.73\text{ mm}/\text{h}$, $P=5\%$, $27.6\text{ mm}/\text{h}$; i 为最大暴雨强度(mm/h); n 为暴雨公式指数; τ 为流域汇水时间(h)。

泥石流峰值流量计算:

$$Q_c=(1+\varphi)Q_p\cdot D_c$$
(4)

$$\varphi=(\gamma_c-\gamma_w)/(\gamma_H-\gamma_c)$$
(5)

式中 Q_c 为频率为 P 的泥石流洪峰值流量(m^3/s); Q_p 为频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s); φ 为泥石流泥沙修正系数; γ_c 为泥石流重度(t/m^3); γ_w 为清水重度(t/m^3); γ_H 为泥石流中固体物质比重(t/m^3); D_c 为泥石流堵塞系数。

洞拥过沟暴雨洪峰流量计算表见表 3,泥石流峰值流量计算结果见表 4。计算结果表明在沟口位置, $P=5\%$ 的暴雨洪峰流量为 $9.02\text{ m}^3/\text{s}$,对应的泥石流峰值流量为 $32.27\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3.4 一次泥石流过流总量

一次泥石流过流总量按照蒋忠信编写的《震后山地质灾害治理工程设计概要》^[17]提供的计算公式进行计算:

表 3 洞拥过沟暴雨洪峰流量计算表

断面位置	汇水面积 /km ²	主沟长 /km	比降 /‰	洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)				
				P=1%	P=2%	P=5%	P=10%	P=20%
1—1	2.7	3.5	470	12.32	10.92	9.02	7.48	5.91
2—2	2.55	3.3	490	12.16	10.79	8.93	7.42	5.88
3—3	1.8	2.3	610	11.03	9.83	8.20	6.88	5.53

表 4 洞拥过沟泥石流峰值流量计算表

控制断面位置	洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)		泥石流峰值流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	
	P=2%	P=5%	P=2%	P=5%
1—1	10.92	9.02	42.01	32.27
2—2	10.79	8.93	41.69	32.09
3—3	9.83	8.20	38.62	29.95

$$Q=\frac{72TQ_C}{19}$$

(6)

式中 Q 为泥石流持续时间(s),根据调查访问确定; T 为一次泥石流过程总量(m³); Q_C 为泥石流最大流量(m³/s)。

计算结果(表 5)表明,洞拥过沟泥石流沟口处在 $P=5\%$ 时,一次泥石流过流总量为 20 446.48 m³。

表 5 洞拥过沟一次泥石流过流总量计算表

位置	泥石流 历时 /s	一次泥石流过流总量 /m ³			
		P=1%	P=2%	P=5%	P=10%
1—1	2 400	31 537.29	26 619.82	20 446.48	15 899.89
2—2	2 400	31 265.37	26 415.73	20 330.47	15 856.41
3—3	2 400	28 861.51	24 471.21	18 976.43	14 970.96

3 泥石流的成因与机制

泥石流灾害的形成主要取决于流域内物源的数量。流域内动物源的数量丰富时,在一定的短历时强降雨条件下,发生泥石流的可能性较大^[18]。内外动力地质作用为洞拥过沟泥石流的暴发提供了丰富的松散固体物质,如火灾使洞拥过沟上游形成区面蚀加剧坡面物源增加;洞拥过沟道上游及其支沟地形陡峻,沟谷纵坡大,是泥石流暴发的动力势能条件;沟谷降雨丰富汇水条件好,是泥石流暴发的水源条件。

3.1 地形地貌条件

洞拥过沟地势北西高南东底,沟域形态近似带状,沟道汇水面积 2.26 km²,沟域纵向长度 3.45 km,平均宽度 0.6 km,平均纵坡比降为 457‰。研究区内高程最高点位于西北侧分水岭处海拔高度为 4 210 m,最低海拔位于洞拥过沟

汇入恶古河口处为 2 631 m,相对高差 1 579 m。研究区内地势险峻,沟谷纵坡比降大,泥石流形成区的沟道纵坡比降在 400‰ 以上。因此,为泥石流的暴发和运动提供了良好的地势条件。

根据洞拥过沟的沟谷变化、物源数量等将其划分为:清水区、补给区、堆积区(表 6)。

表 6 洞拥过沟流域分区表

沟段名称	高程 /m	基本特征
清水区	4 210~3 440	沟床纵坡平均 423‰,流域汇水面积约 1.62 km ² ,占流域总汇水面积的 71.7%
补给区	2 705~3 440	沟道长度计 1.34 km,汇水面积 0.64 km ² ,占流域总汇水面积的 28.3%。横断面多呈“V”形,上段沟道下切严重,谷底一般宽 30 m 左右。
堆积区	2 705~2 631	长约 0.3 km,堆积扇宽度约 600 m,面积约 0.14 km ² ,堆积区厚度 10~15 m,泥石流堆积物方量约 8.4×10 ⁴ m ³ 。

清水区高程 4 210~3 440 m,区内基岩大多裸露,局部分布有少量冰蚀堆积物,沟源山顶基本无植被覆盖;沟道二侧沟谷陡峭,崩滑堆积体厚度大,该区段为泥石流的形成提供了一定量的物源和较为丰富的水源和水动力条件。补给区高程分布为 2 705~3 440 m,沟谷岸坡陡峭,松散堆积体在区内分布范围广,崩塌滑坡等不良地质现象在区内零星分布,尤其是在沟道中下段发育有大型滑坡,为泥石流的发生和运动提供了丰富的物源基础。堆积区高程为 2 705~2 631 m,平均纵坡 220‰,地形平缓,不利于泥石流堆积物流通。

3.2 物源条件

松散固体物质是泥石流暴发的物源基础^[19-22]。洞拥过沟泥石流松散固体物质储量较丰富,物源类型可分为集中物源、沟道物源、坡面物源。根据物源的潜在滑动面、胶结程度、密实度等条件将其划分为不稳定和稳定物源。根据现场勘察,沟域内物源总量 194.3×10⁴ m³,动物源总

量 $67.16\times10^4\text{ m}^3$ 。

此外值得注意的是,由于 2018 年 2 月大面积、高强度持续火烧,林火导致坡面上植被大面积死亡,固坡能力下降,林火形成大量的坡面细小堆积物,例如灰烬和泥沙,灰烬是火灾后泥石流的一种特殊物源。林火发生后,大量的植被及枯枝落叶被烧毁炭化,形成了灰烬层。灰烬层疏松多孔,质地较轻,在前期降雨中容易饱和,在暴雨时很容易起动,作为泥石流的一种物源,直接参与泥石流活动。由于高温烘烤作用,坡表土壤的物理力学性质发生了较大改变,形成了较松散的泥沙层,这是坡面物源的重要来源,它们也是构成火灾后泥石流直接的物源。此外,火灾后大量的树枝和树根等木材也成为火烧迹地主要的碎屑物质。在坡面流水的冲刷作用下,部分细颗粒在雨水的冲刷作用下容易顺斜坡向坡脚搬运成为泥石流坡面物源。洞拥过沟物源类型见表 7。

表 7 洞拥过沟物源类型表

物源类型	总储量 / 10^4	动储量 / 10^4
滑坡物源	11.09	4.35
沟状侵蚀物源	87.62	23.38
坡面侵蚀物源	92.62	37.05
沟道物源	2.97	2.38
合计	194.30	67.16

3.3 泥石流的形成机制

在短历时强降雨作用下洞拥过沟暴发泥石流,火灾后的浅表物源被泥石流夹带。流域内相对高差大,地形陡峭动力势能强,使洞拥过沟泥石流规模不断增大,流速不断加快。在强大的冲击侵蚀作用下,泥石流沿途掏蚀流通堆积区沟岸坡脚,下切侵蚀作用不断增强,崩塌滑坡物源和沟道内松散堆积物不断参与泥石流的运动过程。

洞拥过沟在 2018 年深林火灾未发生以前,流域植被平均覆盖率约 80%,火灾发生后,沟道中上游火灾区域基本无植被覆盖,导致崩滑坡面侵蚀等不良地质灾害强烈发育,松散固体物质增加。根据现场勘察流域内松散固体物源总量为 $159.48\times10^4\text{ m}^3$,可能参与泥石流运动的物源 $53.26\times10^4\text{ m}^3$,沟道内沿途泥沙等物源补给充分,加之泥石流形成区的沟道纵坡比降在 400‰以上,相对高差大,沟谷形态为“V”,因此,

内外地质作用强烈,地势不断抬升,两侧风化剥蚀搬运作用显著。以上因素均为泥石流暴发的有力条件。按照《泥石流灾害防治工程勘察规范》^[23],对影响洞拥过沟泥石流的因素综合评价,发生程度属易发。

4 结 论

(1)洞拥过沟泥石流属于粘性—低频—暴雨—沟谷型—滑坡及坡面侵蚀性类泥石流,泥石流平均重度为 1.89 g/cm^3 ,平均流速为 6.63 m/s , $P=5\%$ 时泥石流一次固体物质冲出量为 $20\,446.48\text{ m}^3$;洞拥过沟泥石流 $P=5\%$ 时的泥石流峰值流量为 $32.27\text{ m}^3/\text{s}$, $P=2\%$ 时泥石流峰值流量为 $42.01\text{ m}^3/\text{s}$,恶古河流量为 $P=5\%$ 泥石流峰值流量的 3 倍。

(2)火灾导致流域内崩滑等不良地质现象增多,侵蚀加剧,泥石流暴发所需要的松散固体物质增加,根据现场勘察流域内松散固体物源总量为 $159.48\times10^4\text{ m}^3$,可为泥石流运动提供物质补给的物源约 $53.26\times10^4\text{ m}^3$ 。

(3)在短历时降雨条件激发下,洞拥过沟暴发泥石流的可能性较大,恶古河输沙能力一般,不利于泥石流物质的排泄,泥石流冲出物易淤积,暴发泥石流灾害时其造成主河恶古河堵塞和溃决的可能性较大。

参考文献:

[1] 胡卸文,金涛,殷万清,等.西昌市经久乡森林火灾火烧区特点及火灾后泥石流易发性评价[J].工程地质学报,2020,28(4):762-771.

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

[3] 罗斯生,罗碧珍,魏书精,等.中度强度森林火灾对马尾松次生林土壤有机碳密度的影响[J/OL].植物生态学报:1-14[2021-01-20].

[4] 邸雪颖,陶玉柱.火灾后泥石流研究进展[J].应用生态学报,2013,24(8):2383-2392.

[5] 杨瀛,胡卸文,王严,等.火灾后泥石流流域坡面侵蚀物源动储量估算方法探讨[J/OL].工程地质学报:1-10[2021-01-20].

[6] 高云建,陈宁生,田树峰,等.低频泥石流对西南山区交通干线的危害与防治——以汶马高速理县段为例[J].人民长江,2018,49(4):23-28.

[7] 王飞龙,陈明.贵州西部山区泥石流流域土壤侵蚀量分析——以贵州省威宁县二塘河流域为例[J].人民长江,2018,49(21):36-39+55.

(下转第 127 页)

表 12 面板混凝土裂缝检测成果表(仅统计缝宽大于 0.2 mm 以上)

面板编号	裂缝编号	位置、高程 /m	缝长 /m	缝宽 /mm	缝深 /cm	备 注
12 号	12—1	301.4	0.9	0.59	5.4	已按照设计要求处理
17 号	17—3	278.1	4.2	0.28	3.6	已按照设计要求处理
21 号	21—1	307.3	0.8	0.44	2.3	已按照设计要求处理
小计	—	—	5.9	—	—	—

板施工质量优良。

6 结 语

老挝南公 1 水电站大坝面板混凝土施工通过采取对流纹岩高吸水率骨料配合比进行优化调整,同时施工过程中采取了制冷水拌和、对砂石骨料提前洒水保湿和喷雾降温、对运输罐车加装保湿层及对装料和卸料过程进行喷雾降温、对混凝土溜槽搭设遮阳棚和对仓面喷雾保湿降温及全覆盖流水养护等严格有效的施工措施。因此,大坝面板混凝土在高温环境施工情况下,达到高指标的质量要求,大坝面板混凝土温度裂缝缺陷率较小,渗流量较小(7.35 L/s),整个大坝面板防渗

(上接第 5 页)

[8] 崔鹏,韦方强,何思明,等.“5·12”汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J].山地学报,2008(3):280-282.

[9] 王绚,范宣梅,陈怡,等.九寨沟震后地质灾害分布特征与活动性预测[J].人民长江,2020,51(09):114-121.

[10] 孙显辰,王保云,刘坤香,等.云南省泥石流灾害影响因子分析[J].人民长江,2020,51(11):121-127.

[11] Raymond CA. McGuire LA. Youberg AM, et al. Thresholds for post-wildfire debris flows: Insights from the Pinal Fire, Arizona, USA. 2020, 45(6): 1349-1360.

[12] 杨瀛,胡卸文,王严,等.八角楼乡火灾后泥石流空间发育差异性特征[J/OL].西南交通大学学报:1-9[2021-01-12].

[13] 于振江,胡卸文,曹希超.火烧迹地土壤斥水特性研究及其对火灾后泥石流诱发机理[J].地质灾害与环境保护,2020,31(2):93-99.

[14] Cole R. Effects of wildfire on soil hydraulic properties on hillslopes in southwestern Oregon[J]. 2016.

[15] McGuire LA. Youberg AM. Impacts of successive wildfire on soil hydraulic properties: Implications for debris flow hazards and system resilience[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(11):69-72.

[16] 雷鸣宇,崔一飞,倪钧钧,等.浅层滑坡型火灾后泥石流起动机理研究进展与案例分析[J/OL].工程

效果较好,这对于高温环境进行大坝面板混凝土施工提供了工程实例,具有很好的借鉴作用。

参考文献:

[1] DL/T5330-2015.水工混凝土配合比设计规程[S].

[2] DL/T5144-2015.水工混凝土施工规范[S].

[3] DL/T5150-2017.水工混凝土试验规程[S].

[4] 徐万富.制定和实施有效温控措施防止混凝土裂缝出现[J].云南水力发电,2007,23(6):84-86.

[5] DL/T5128-2009.混凝土面板堆石坝施工规范[S].

作者简介:

田 聪(1974-),男,贵州沿河人,注册监理工程师,高级工程师,从事水利水电工程建设监理工作。

(责任编辑:吴永红)

地质学报:1-16[2021-01-20].

[17] 蒋忠信.震后山地地质灾害治理工程设计概要[M].西南交大出版社,2015.

[18] Chen ML, Liu XN, Wang XK, et al. Contribution of Excessive Supply of Solid Material to a Runoff-Generated Debris Flow during Its Routing Along a Gully and Its Impact on the Downstream Village with Blockage Effects. Water. 2019, 11(1):169.

[19] 林斌,张友谊,罗珂,等.沟道松散物质起动模型试验及冲出量预测——四川省以北川青林沟为例[J].人民长江,2019,50(05):113-118+126.

[20] 宋志,邓荣贵,陈泽硕.泥石流堵塞主河试验特征与模式[J].水土保持通报,2015,35(5):100-105.

[21] Bovis MJ, Jakob M. 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surface Processes and Landforms 24:1039-1054.

[22] 张惠惠,马煜,张健楠,等.汶川强震区都江堰虹口小沟地震泥石流灾害调查研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(01):42-48.

[23] 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[S].北京:中华人民共和国地质矿产行业标准.泥石流灾害防治工程勘查规范[M].北京:中华人民共和国国土资源部:DZ/T0220-2018.

作者简介:

卢洪沛(1982-),男,四川冕宁人,西南科大本科,工程师,主要从事地质环境监测工作;

胡卸文(1963-),男,浙江金华人,博士生导师,从事工程地质、环境地质方面的教学与研究工作。(责任编辑:卓啟昌)