

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208007

王元欢, 沈昊文, 谢万银, 等. 火后泥石流启动降雨阈值分析——以四川乡城县仁额拥沟泥石流为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 108-115.

WANG Yuanhuan, SHEN Haowen, XIE Wanyin, et al. Analysis of the rainfall threshold for post-fire debris flow initiation: A case study of the debris flow at Ren'eyong gully in Xiangcheng County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 108-115.

火后泥石流启动降雨阈值分析 ——以四川乡城县仁额拥沟泥石流为例

王元欢¹, 沈昊文^{2,3}, 谢万银¹, 鲁 科¹, 胡桂胜^{2,4}

(1. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610032; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093; 4. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016)

摘要: 2014 年 6 月 1 日, 中国西南中横断山区仁额拥沟遭受了一次森林大火, 火后的短时低雨强降雨在 3#支沟内激发了 3 次泥石流; 2015 年 8 月的一次强降雨在仁额拥沟的 1#、2#和 3#支沟及其他附近的多个更小的流域内均激发了泥石流。为了解火后泥石流的降雨响应特征, 文章采用距离修正的方式处理降雨数据, 对 4 次泥石流进行降雨过程分析, 查明了流域特征对泥石流启动的作用及其对各支沟泥石流不同降雨阈值的影响。研究发现: (1) 泥石流降雨阈值在火后非常低且有随时间推移而增大的趋势; (2) 仁额拥沟火后泥石流具有高频率特征, 其原因除了在火后天然植被的破坏后降雨对坡面径流和侵蚀效应的放大, 流域本身的性质也有极大的贡献; (3) 各支沟内泥石流降雨阈值差异的主要原因在于流域面积的差异, 泥石流侵蚀受制于径流量大小。

关键词: 火后泥石流; 降雨阈值; 距离修正; 仁额拥沟; 降雨响应

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)01-0108-08

Analysis of the rainfall threshold for post-fire debris flow initiation: A case study of the debris flow at Ren'eyong gully in Xiangcheng County, Sichuan Province

WANG Yuanhuan¹, SHEN Haowen^{2,3}, XIE Wanyin¹, LU Ke¹, HU Guisheng^{2,4}

(1. Sichuan Institute of Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610032, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: In the early summer of 2014, a wildfire ravaged the Ren'eyong valley in the central Mt. Hengduan region of

收稿日期: 2022-08-03; 修订日期: 2022-10-13

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902); 中国科学院青年创新促进会项目(2020367); 国家自然科学基金联合基金项目(U20A20110)

第一作者: 王元欢(1985—), 男, 四川巴中人, 土木工程专业, 本科, 工程师, 研究方向为岩土工程及地质灾害。

E-mail: 316919296@qq.com

通讯作者: 沈昊文(1995—), 男, 江西九江人, 地质工程专业, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害形成机理与防治。

E-mail: 1756796469@qq.com

southwestern China. Following the blaze, debris flows were triggered three times in branch No. 3 due to short-term, low intensity rainfall. A year later, in August 2015, a brief period of high-intensity rainfall generated debris flows not only in branch No.3, but also in branch No. 1 and No. 2, as well as several smaller basins in the vicinity. To investigate the rainfall response characteristics of post-wildfire debris flow, the distance correction method was used to process the rainfall data. By analyzing the rainfall patterns of four debris flow events, the reseachers were able to identify the effects of watershed characteristics on the initiation of debris flow and its influence on different rainfall thresholds in each branch. The study found that: 1) Post fire debris flows can occur at a low rainfall threshold, which tends to increase over time. 2) The Ren'eyong valley experience high-frequency post fire debris flows, which can be attributed not only to the amplification of slope runoff and erosion caused by rainfall after the destruction of natural vegetation due to the wildfire, but also to the geological and geomorphic conditions of the area. 3) The rainfall threshold in each branch is primarily dependent on the drainage area, as the magnitude of discharge controls the entrainment.

Keywords: post-wildfire debris flow; rainfall threshold; distance correction; Ren'eyong valley; rainfall response

0 引言

森林大火摧毁植被,一方面使土体失去了植被和根系的加固保护能力,产生的灰烬及其他细颗粒可能堵塞土体孔隙并造成表层封闭^[1-2];另一方面,增强了土体斥水性对降雨入渗的阻碍作用^[3-4]。土体的渗透系数与火烧严重程度有关^[5],较低的火烧度对渗透系数的影响较为微弱,而当火烧程度增加到一定程度,受火烧土体的渗透系数会随火烧度的增加而呈指数递减。总体来讲,火灾后,山地表层水力条件的改变能够降低土体的渗透系数^[6],从而产生更大地表径流,使泥石流具有较低的临界阈值。

目前,关于火灾泥石流的研究区域主要集中在美国西部,另外澳大利亚东南部、加拿大和瑞典等地也有一些研究^[7-10],其他国家和地区鲜有关于火灾泥石流的研究。近年国内西南地区也出现了森林大火,开始频频发生火后泥石流等次生灾害。国内学者^[11-14]开展了火后泥石流成因机理、发育特征等方面研究工作。本文侧重在降雨作用下火后泥石流响应特征方面的研究,此项工作以仁额拥沟为研究对象。

1 研究区域

1.1 自然环境

研究区位于中国西部横断山脉的干旱高山区,流域面积 24.28 km²。流域近似呈正三角形形状,最高点位于流域最北端,海拔4 222 m;出口位于正西端,海拔 2 855 m;流域内部共发育 9 条支沟(1#—9#),水历经这些支沟汇流后由位于最西端的出口排出(图 1)。流域内主沟沟道宽度变化较大,兼有“V”型和“U”型形态,宽度 2~30 m 不等。其中,泥石流发生的 1#—3#沟的基

本情况见表 1。

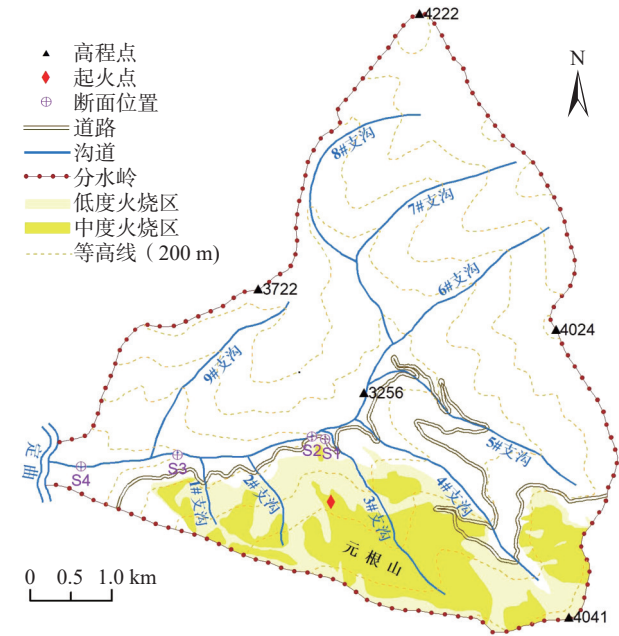


图 1 研究区地理位置及相关信息
Fig. 1 Location of the Ren'eyong valley and related information of the study area

表 1 1#—3#支沟基本信息			
Table 1 Geographic information of branches No.1—No.3			
编号	流域面积/km ²	沟长/m	平均坡度/(°)
1#	0.37	544	27
2#	0.73	755	26
3#	2.30	836	15

流域属大陆性季风高原型气候,降雨量少而集中在 6—9 月,干湿季节分明,日照充足。根据邻近乡城县气象站(研究区东南方向 33 km)的统计,最大年降水量 730.7 mm,多年平均降水量 472.62 mm,多年平均蒸发量

2 362 mm, 为降水量的 5.28 倍, 为典型的干旱河谷地区。流域内植被以乔木、高山松为主的青杠混交林。

流域内无断层穿过, 但区域附近有较多断层分布, 断层走向多为近南北向, 其中沟口位置断层为一南北向逆断层(图 2), 流域东部边界是东 3~4 km 处有另一条与流域边界近乎平行的南北向逆断层。流域附近的地震活动整体不频繁, 现有记录的最高地震为 1974 年 6 月 5 日发生在流域东北方向 27 km 的 5.3 级地震。区域岩层分界线多为近南北向, 这些岩层分界线将整个流域划分为 4 类岩性区(图 2), 上游区为三叠系黑色板岩, 中游区为三叠系黑色板岩夹石英砂岩, 下游区两岸出露三叠系板岩夹灰岩, 河床出露第四系的冲洪积堆积物。岩性总体上以软质岩为主。

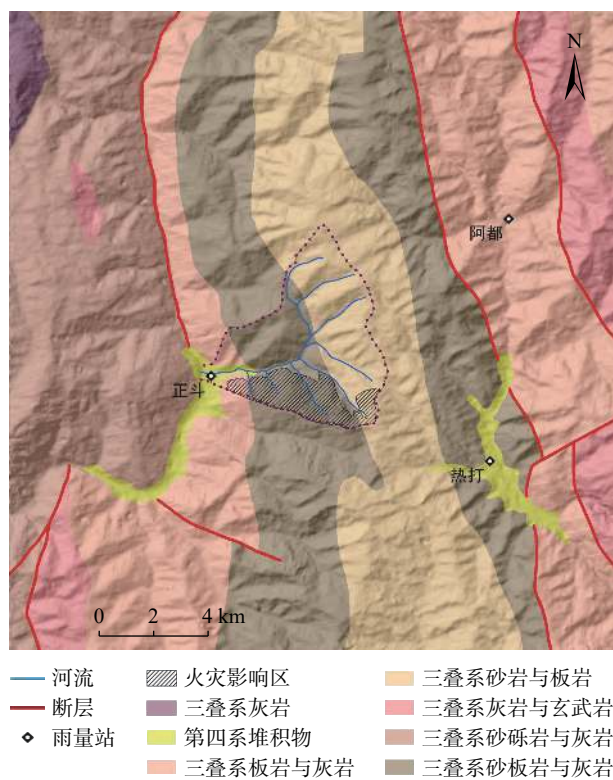


图 2 区域地质纲要图

Fig. 2 Outline map of regional geology

1.2 火烧强烈程度

2014 年 6 月 1 日, 由于高压输电工人在作业期间的不规则用火导致当日 18 时开始, 乡城县元根山出现森林大火。此次森林大火持续到 6 月 5 日 10 时, 受火灾影响的区域主要为流域南部及其外围的元根山, 面积共计 40 km², 其中处于仁额拥沟内的面积 5.4 km²。而仁额拥沟南部的 1#、2#和 3#支沟处于火灾影响范围内。此次火灾影响区内森林以高山松树为主, 地表有灌丛和草甸覆盖。

为了确定受火灾影响地区的火烧强烈程度, 我们在火烧区共开挖了 4 座长 1.5 m、宽 0.5 m、深 0.3~0.6 m 的探槽 S1—S4(图 3), 进行了现场槽探工作, 以评估火灾对土壤性质变化的影响, 从而得出植被烧伤程度, 并完成火烧强烈程度分级图(图 1)。

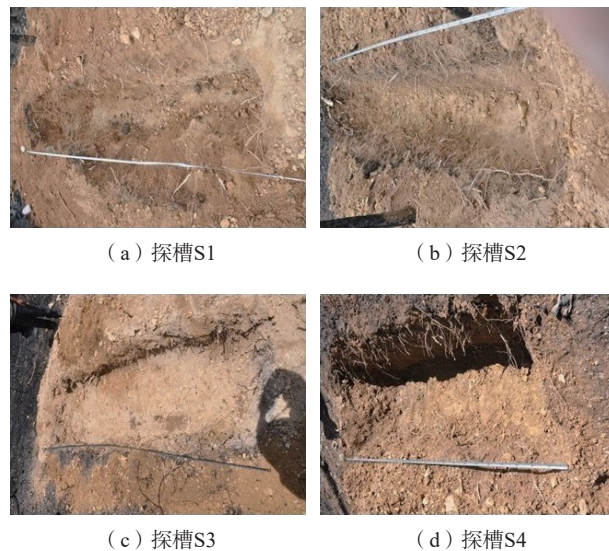


图 3 现场探槽照片

Fig. 3 Site view of the on-site trenching

现场调查发现, 3#支沟部分地区的树木被强烈燃烧, 约有 20% 的树木倾倒, 枝叶被大火清除干净, 仅有烧黑的树干残留, 但从强烈过火区的探槽来看, 土体表层变化不明显, 植物根系完好, 受影响的只有几厘米深。在植被燃烧程度相对较高的区域, 灰烬层的深度一般小于 1.0 cm, 上部 3~4 cm 的根系是烧焦的, 但下部的根还是活的, 表明该区域为中度火烧区^[14-15]。1#、2#支沟大部分地区表面只是轻度燃烧, 虽然所有地表凋落物、草本植物和灌木也被烧掉, 但被火烧后倾倒的树木十分有限, 部分低矮的根茎被烧焦了, 然而顶层的一些树枝只是被烤干, 仍然有些绿色的树冠, 在野火过后的春天, 树木绿色的树枝和叶子覆盖。在植被燃烧程度相对较轻的区域, 灰烬层深度为 0.5 cm, 上部 1~2 cm 的根被毁, 表明此区域为低度火烧区。在植被燃烧严重程度较低的地区, 观察到的灰烬较少, 根系被烈火破坏的程度较低, 进一步表明该区域火烧程度较低。

基于野外调查、遥感数据和现场探槽等方法, 我们完成了火烧强烈程度的分级(图 1)。根据图 1, 可以在表 2 中给出具有低度和中度火烧程度的区域面积。统计分析表明, 1#、2#和 3#支沟的流域受火灾影响的面积较大, 分别占各自流域总面积的 83.8%、87.7% 和 91.7%。流域内 3#支沟的火烧强烈程度最高, 71.6% 的流域为中

度火烧, 而 1#、2#支沟分别有 32.2% 和 29.7% 的流域为中度火烧。此结果和实际泥石流发生情况较吻合, 即整体流域为低火烧区的 1#、2#支沟暴发泥石流的概率小于整体流域为中火烧区的 3#支沟。

表 2 1#—3#支沟火烧强烈程度及面积统计

Table 2 Summary of fire severity classification and affected areas of branches No.1—No.3

编号	火烧面积/km ²	轻度火烧/km ²	中度火烧/km ²
1#支沟	0.31	0.21	0.10
2#支沟	0.64	0.45	0.19
3#支沟	2.11	0.6	1.51

2 数据及处理

2.1 泥石流发生情况

根据调查, 仁额拥沟在 2014 年 6 月的森林大火后至今共暴发泥石流 4 次(表 3)。

表 3 泥石流基本情况

Table 3 Basic property information of the debris flows

序号	时刻	位置	冲出量/(10 ⁴ m ³)	前期 3 d 降雨量/mm
DF1	2014年6月8日 16:08	3#	0.8	1.11
DF2	2014年6月30日 16:00	3#	1.4	14.84
DF3	2014年7月10日 23:20	3#	0.5	0.81
DF4	2015年8月24日 19:43	1#、2#、3#	2.2	39.97

乡城县正斗乡坐落在仁额拥沟沟口的堆积扇上(图 2)。2014 年 6 月 8 日, 当地政府部门正在正斗乡就火灾后的各项问题进行讨论时, 当地的地质灾害巡逻员发现河道有断流现象, 即刻通知当地群众撤离, 当时流域下游仅有零星小雨。泥石流暴发后, 四川省地质工程勘察院被指派进行应急勘察, 2014 年 7 月 10 日晚, 入住当地小学时, 听见沟道内泥石流流动的声音, 当晚彻夜未眠。2015 年 8 月 24 日, 天气预报预测了强降雨过程, 当地政府部门提前发布了灾害预警信息, 在泥石流发生前, 地质灾害监测员根据河道断流现象再次发布警报, 保障了当地居民有足够的撤离时间。尽管 4 次泥石流冲毁了公路、房屋、农田(图 4), 但是并未造成人员伤亡, 经济损失被评估为 1 800 万元。

2.2 气象数据

在中国西部, 绝大多数气象站位于山间谷地, 那里有更多的村民居住, 基础设施相对更好, 而在泥石流形成区的山顶源头气象站较少。经过细致筛查, 我们最终选择了 3 处气象站的降雨数据, 分别是位于沟口的正斗站、位于流域山背后河谷的热打站、位于流域北端山背后



图 4 被泥石流冲毁的房屋

Fig. 4 Site photo of the ruined houses destroyed by debris flows

河谷的阿都站。这 3 个站呈一个三角形将研究区夹杂在其间(图 2)。雨量站的其他信息见表 4。

表 4 3 处雨量站基本情况

Table 4 Summary of the basic property information of the three rain gauges

序号	气象站名	海拔/m	距泥石流沟距离/km	精度/mm	权重参数
1	正斗站	2 858	4.10	0.1	0.577
2	热打站	3 363	5.56	0.1	0.313
3	阿都站	2 783	9.40	0.1	0.110

雨量站距离泥石流发生区域有一定距离, 根据雨量站相互位置关系可以推测泥石流发后区域的降雨过程^[16-17], 计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^3 \omega_i P_i$$

(1)

$$\omega_i = d_i^{-2} / \sum_{i=1}^3 d_i^{-2}$$

(2)

其中: P_i ——不同雨量站记录的降雨数据/(mm·h⁻¹);
 ω_i ——权重参数;
 d_i ——雨量站距离泥石流发生地距离/km。

3 分析和结果

3.1 降雨过程

对收集到的正斗、热打和阿都 3 站的泥石流发生的小时降雨数据采用距离修正的方式进行处理, 最后绘制出 4 次泥石流发生前后的降雨过程线(图 5)。图 5 中显示, 2014 年发生的 3 次泥石流的激发降雨为短历时低强度降雨, DF1 与 DF2 发生时, 降雨量非常低, 当时在沟口下游开会商讨火后灾害处理对策的水务局人员反

映,当时雨量很小;而 DF3 发生时水务局人员在下游小学内见证泥石流向下运动时,也仅零星小雨。2015 年 DF4 发生之前,19:00 左右开始突降暴雨,泥石流源区的降雨一开始便增至 26.39 mm/h,沟口的降雨更是达到了 38.5 mm/h,之后 1 h 便降到 5 mm/h 以下。19:43

左右,泥石流到达沟口,若考虑泥石流的汇流时间,则泥石流应在降雨开始后不久即暴发。比较 4 次泥石流的激发降雨可以发现,火灾后第一年,泥石流的激发降雨非常低,为短历时低强度降雨,而火后第 2 年,泥石流的激发降雨有了显著增加,为短历时高强度降雨。

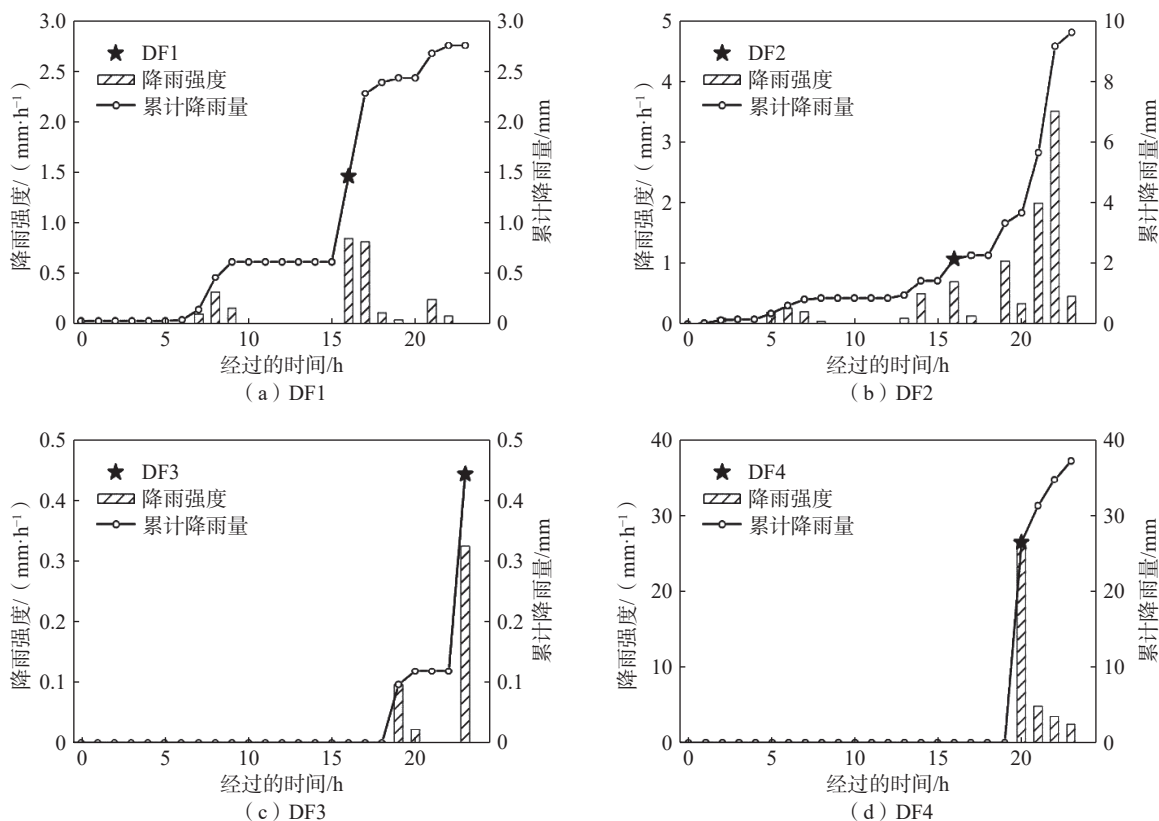


图 5 泥石流发生时的降雨过程

Fig. 5 Rainfall process during the debris flows

3.2 泥石流启动过程

根据现场调查,4 次泥石流均暴发于受火灾影响的区域。DF1—DF3 主要启动于 3#支沟,而在 2015 年 8 月 24 日,在 1#、2#、3#支沟及其附近的更小流域面积的支沟内均暴发了泥石流。只是那些小支沟的流域面积很小,在图 1 上难以表示,文中只列举了 1#、2#和 3#支沟的情况。

3.2.1 2014 年泥石流活动情况

2014 年泥石流的启动区域位于 3#沟上游(图 6)。在 3#沟上游发现,坡面上可见大量被火烧后倾斜的树干,地表覆盖有一层黑色的灰烬层,槽探显示灰烬层以下树根完整,火灾对该地区乔木深部根系的影响不大。表面上分离的烘干层分布较多,现场发现坡面上的灰烬层与表层浮土有顺坡流动痕迹。沟道底部衍生的切沟道宽 0.5~0.8 m,深 0.4~0.6 m,沟底无泥石流淤积,有

石块出露,沟沿上倾斜的灌丛树枝显示当时的泥石流填充了整个断面,泥石流流量小于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。降雨在坡面上



图 6 3#支沟上游沟道

Fig. 6 Site photo of the upstream channel at 3# branch ditch

汇流后形成地表径流,在陡峻的地形条件下,径流裹挟坡面表层的灰烬层和烘干层形成高含沙水流,侵蚀能力增加,在侵蚀过程中致使容重和流量增加,但由于径流量小,侵蚀能力有限,运动的物质以细颗粒为主。

物源区下游,沟道纵比降减小,但两岸坡面坡度增加到 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$,为“V”形沟道。径流沿程放大后侵蚀岸坡,致使斜坡滑动失稳频发。3#支沟下游两岸不间断有滑坡分布(图 7),滑动以浅表层为主,绝大部分的滑动厚度在 2 m 以下,体积从十几到上百立方米,滑向沟道,部分或者全部堵塞住沟道,此外大量火烧后的树干也造成了堵塞。由于沟道堵塞,泥石流淤积后再溃决导致流量陡然增大。



图 7 3#支沟下游沟道

Fig. 7 Site photo of the downstream channel at 3# branch ditch

3.2.2 2015 年泥石流活动情况

DF4 发生后,着重对新暴发泥石流的 1#(图 8)和 2#支沟(图 9)进行了调查。其中 2#支沟内泥石流的启动过程与 DF1 在 3#支沟内的启动过程相似,但 1#支沟内的启动过程有一些不同。

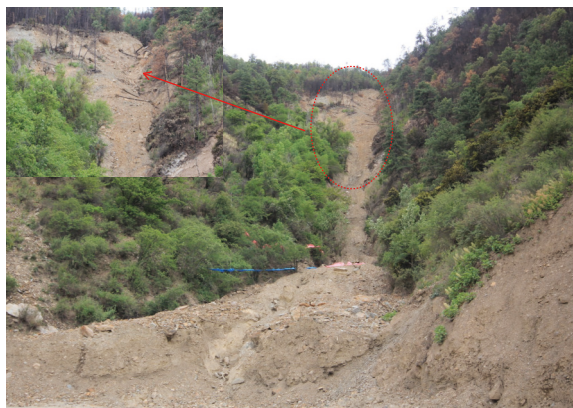


图 8 1#支沟泥石流概貌

Fig. 8 Overview of the debris flow at 1# branch ditch



图 9 2#支沟泥石流概貌

Fig. 9 Overview of the debris flow at 2# branch ditch

1#沟物源区也经历了森林火灾,火灾致使地表灌丛和乔木下部树枝被烧毁,而树冠位置已散发新叶。根据沟道比降,1#支沟可分为三段,其中中部段地形比降最大(图 8),约为 32° ,为泥石流的形成区,上部和下部的比降则相对较缓,为清水提供区与堆积区。在泥石流形成区的末端,1#沟东西两侧各分离出 1 条小支沟,中间夹杂一个平台。降雨发生后,在东西两侧支沟中首先形成高含沙地表径流,径流在到达泥石流形成区位置,由于沟道比降增加,径流侵蚀能力显著增大,高含沙水流逐步转化为泥石流。中间平台受两侧泥石流的侵蚀发生滑动,厚度达到 3~4 m,平台上的树木横七竖八躺着。受泥石流发生前 3 日内 9.2 mm 降雨的作用,土体含水率高,中间平台滑动后液化即形成泥石流促使泥石流规模增大。泥石流在陡峭的坡面运动中继续侵蚀坡面土体致使泥石流规模显著增加。

总的来说,发生在仁额拥沟内 3 条支沟中多次泥石流的启动方式是类似的,即:降雨作用下形成地表径流,径流侵蚀地表灰烬层和岩土碎屑形成高含沙水流;高含沙水流在运动过程中不断侵蚀后导致泥石流形成并规模扩大。不同之处在于,1#沟内的泥石流包含了浅层滑坡液化而转化的成分。规模放方面,1#沟内泥石流主要是因为沟底的侵蚀,而 3#沟内的泥石流则主要由沟岸破坏与沟道堵溃共同作用导致。

并不是所有的受火灾影响的流域都会发生泥石流,受火灾影响的流域对降雨的响应可以是泥石流、高含沙水流,也可能是无响应。仁额拥沟泥石流的特别之处在于,虽然该流域内遭受的火烧程度不高,但是火后的局部降雨却在火烧区激发了泥石流,且泥石流暴发的频率很高;另外,2014 年的 3 次降雨过程激发了 3#沟内的 3 次泥石流,但是 1#和 2#沟虽然具有更大的沟道比降却无响应。这些事实让我们相信,火后泥石流发生的可

能性虽然与火烧程度有关,但森林大火所不能改变的流域地质条件、流域面积、地形比降等因素同样会影响泥石流的发生。火后泥石流的发生应该是火烧严重程度、降雨特征、集水区形态、岩土体性质和气候条件等之间的相互作用。

4 讨论

4.1 坡面径流效应机制

坡面径流是在强度超过坡面土体入渗速率时产生的,火灾前后坡面土体渗透率的变化是泥石流暴发的重要因素。在自然降雨条件下由于植被覆盖率高能够延缓降雨入渗速率,故一般情况下植被覆盖率高的坡面在降雨期间径流较小。但是仁额拥沟地处川西高原,生态环境条件本就相对脆弱,火灾过后的坡体保水能力进一步降低,植被更加稀疏(图 10),缺少了树冠和枝叶对雨水的遮挡,在相同的降雨条件下,火烧区的坡面更易形成坡面径流。坡面径流对火灾后土体的灰烬层和烘干层有一定的冲刷力,且存在的动水压力可使坡面土体失稳。同时由于坡体本身风化程度较高,森林火灾又加剧了坡体的风化,这些潜在物源和火灾后形成的草木灰和枯木叶等将会由降雨形成的坡面径流一起带入沟道(图 11)。坡面径流的增加一定会加剧火烧区坡面水土的流失,为泥石流提供更加丰富的物源。



(a) 非火烧区坡积物 (b) 火烧区坡积物

图 10 非火烧区与火烧区坡积物对比

Fig. 10 Comparison of slope sediments in non-fire area and fire areas



图 11 火后泥石流的携带坡面烧毁的植被

Fig. 11 Site photo of the burned vegetation carried by post-fire debris flow

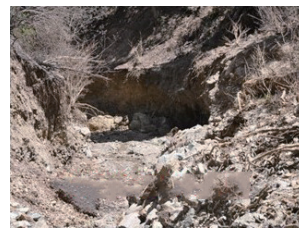
4.2 侵蚀效应机制

森林火灾对坡体表层土体的侵蚀破坏主要表现在对植被的破坏从而降低土体的抗侵蚀能力。火灾过后,植被树冠、枝叶及草本植物被烧毁,导致植被对雨水的消能作用和对坡面汇流削弱作用降低甚至消失,加剧表层土体的侵蚀。火烧区坡面上的松散物源在降雨和坡面径流作用下首先会形成重度较大的高含沙水流,汇流过程中不断加剧坡面的重力侵蚀,进入沟道后会继续强烈侵蚀沟床和沟岸而形成大量的沟道和岸坡物源。现场情况显示,1#支沟冲刷深度一般为 1~5 m; 2#支沟冲刷深度为 0.5~1 m,其余支沟冲刷深度为 1~3 m(图 12)。此外,火灾形成的残缺木头也可能堵塞沟道,继而形成堵溃型泥石流,进一步加大下游侵蚀力度,使得原来的沟道不断拓宽。同时,森林火灾将强烈加剧区域的沟蚀作用,坡面上会形成许多新的冲沟,随着时间推移,沟蚀作用不断加剧逐步演化成具有一定规模的支沟。



(a) 1#沟内泥石流冲刷

(b) 2#沟内泥石流冲刷



(c) 3#沟内泥石流冲刷

图 12 支沟泥石流冲刷侵蚀概况

Fig. 12 Overview of debris flow erosion in the branch gully

5 结论

(1) 泥石流降雨阈值在火后非常低并有随时间推移而增高的趋势。

(2) 仁额拥沟内的火后泥石流具有高频率特征,启动原因除了火后天然植被的消失,表层灰烬层和烘干层遍布、土壤斥水性的增加,也与流域本身的性质(地质与土源条件、沟道比降和区域干燥的气候条件)密切相关。

(3) 各支沟内泥石流降雨阈值差异的主要原因是流域面积的差异,泥石流侵蚀受制于径流量大小。

(4)火后泥石流更多的是降雨形成的径流冲刷启动,后期可能出现滑坡启动。

(5)降雨对火烧迹地坡面径流效应和侵蚀效应具有放大作用。

参考文献(References):

- [1] LARSEN I J, MACDONALD L H, BROWN E, et al. Causes of post-fire runoff and erosion: Water repellency, cover, or soil sealing? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1393–1407.
- [2] SCOTT, W WOODS, VICTORIA N, et al. The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(3–4): 274–286.
- [3] MACDONALD L H, HUFFMAN E L. Post-fire soil water repellency [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1729–1734.
- [4] NYMAN P, SHERIDAN G, LANE P N J. Synergistic effects of water repellency and macropore flow on the hydraulic conductivity of a burned forest soil, south-east Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(20): 2871–2887.
- [5] MOODY J A, EBEL B A, NYMAN P, et al. Relations between soil hydraulic properties and burn severity [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, 25(3): 279.
- [6] MOODY J A, EBEL B A. Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire [J]. *CATENA*, 2012, 93(93): 58–63.
- [7] KEAN J W, STALEY D M, CANNON S H. In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(F4): F04019.
- [8] SMITH H G, SHERIDAN G J, LANE P N J, et al. Paired Eucalyptus forest catchment study of prescribed fire effects on suspended sediment and nutrient exports in south-eastern Australia [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(5): 624.
- [9] JORDAN P. Post-wildfire debris flows in southern British Columbia, Canada [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, 25(3): 322.
- [10] CONEDERA M, PETER L, MARXER P, et al. Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: a case study of the Riale Buffaga, Ticino, Switzerland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(2): 117–129.
- [11] 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. [HU Xiewen, WANG Yan, YANG Ying. Research actuality and evolution mechanism of post-fire debris flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1562–1573. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王严,胡卸文,杨瀛,等.火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性[J].*水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 40–45. [WANG Yan, HU Xiewen, YANG Ying, et al. Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 40–45. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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. [REN Yun, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Disaster mechanism of the Sejiao post-fire debris flow in Jiulong County of Sichuan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 150–156. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄健,胡卸文,金涛,等.四川西昌“3·30”火烧区响水沟火后泥石流成灾机理[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 15–22. [HUANG Jian, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Mechanism of the post-fire debris flow of the Xiangshui gully in “3·30” fire area of Xichang, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 15–22. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨相斌,胡卸文,曹希超,等.四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 1–8. [YANG Xiangbin, HU Xiewen, CAO Xichao, et al. Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [16] CHEN J C, HUANG W S, JAN C D, et al. Recent changes in the number of rainfall events related to debris-flow occurrence in the Chenyulan Stream Watershed, Taiwan [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2012, 12(5): 1539–1549.
- [17] 刘世康,范宣梅,王文松,等.降雨模式对震后泥石流启动模式影响的试验研究——以九寨天堂沟为例[J].*地质科技通报*, 2022, 41(6): 278–286. [LIU Shikang, FAN Xuanmei, WANG Wensong, et al. Experimental study on the effect of rainfall patterns on the failure mode of debris flows after earthquakes: A case study of Tiantanggou, Jiuzhai [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 278–286. (in Chinese with English abstract)]