

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

张绍科, 胡卸文, 王 严, 金 涛, 杨 瀛

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

ZHANG Shaoke, HU Xiewen, WANG Yan, JIN Tao, and YANG Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-09>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County
殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County
曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral
张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

基于室内试验的四川峨眉—汉源高速廖山隧道碳酸盐岩溶蚀特征分析

Experimental analysis on dissolution characteristics of carbonate rocks in Liaoshan tunnel of EmeiHanyuan expressway in Sichuan Province

李华明, 蔡乐军, 陈南南, 黄平, 李芳涛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 73-84



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-09

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

张绍科, 胡卸文, 王 严, 金 涛, 杨 瀛
(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:以四川省冕宁县腊窝乡华岩子沟 2019 年 7 月发生的火后泥石流为典型案例, 通过对火烧迹地现场地质勘察、降雨模拟试验研究了与火后泥石流形成相关的地形地貌、火行为分布、松散物源规模、产流产沙特征以及相应的灰烬层、斥水性、渗透性等相关试验。结果表明: (1) 火烧迹地的斥水性强度越强, 径流产流量越大; (2) 严重火烧区的产沙量明显高于中度和轻度火烧区; (3) 火烧迹地的斥水性与火烈度大致呈正相关, 而渗透性恰好与之相反。研究揭示了火后泥石流的演变过程, 为火后泥石流的防治和预警提供了理论依据。

关键词: 火后泥石流; 火烧迹地; 火烈度; 降雨模拟; 产流产沙

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)05-0079-07

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

ZHANG Shaoke, HU Xiewen, WANG Yan, JIN Tao, YANG Ying
(Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: This paper studied the characteristics of geomorphology, fire behavior, unconsolidated source material volume, runoff and sediment production related to post-fire debris flow formations, field investigation in the burned area and rainfall simulation experiment were adopted to study the post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province occurred on 4 July 2019. The associated ash layer, water repellency and permeability experiments were also conducted. The results suggest that (1) the runoff charge shows a positive correlation with water repellency in burned area. (2) the sediment yields in severely burned area are conspicuously larger than that in moderate and slight burned areas. (3) the water repellency in burned area is approximately positively correlated with fire severity, while the permeability presents the negative correlation. This study revealed the evolution process of post-fire debris flow, and provided theoretical basis for the prevention and early warning of post-fire debris flows.

Keywords: post-fire debris flow; burned area; fire severity; rainfall simulation; runoff and sediment production

0 引言

近年来, 森林火灾的频发引起了人们的关注。林火不仅造成了生态系统破坏, 还会引起相关次生地质灾害。特别是部分山区, 火烧迹地因集中降雨而暴发泥石流, 这种因林火而引起的过火型泥石流, 习惯上称“火

后泥石流”(post-fire debris flow)或“火相关泥石流”(fire-related debris flow)^[1]。WELLS 等^[2]在对南加州林火后泥石流的研究过程中, 率先意识到泥石流的发生与林火相关, 并认为燃烧后地表以下几毫米会形成一层防水土壤, 它将减少前期降雨时间, 比常规泥石流更易启动。CANNON 等^[3]在对研究区域包括位于科罗拉多

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731285;41672283)

第一作者: 张绍科(1994-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事工程地质、地质灾害方面的研究。E-mail: 1575419786@qq.com

通讯作者: 胡卸文(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究。E-mail: huxiewen@163.com

州、新墨西哥州和加利福尼亚州的 95 个流域进行调查的过程中,就与火灾相关的泥石流可能发生的条件做出了评估。任云等^[4]以四川省九龙县三岩龙乡色脚沟火后泥石流为典型实例,采用现场调查、遥感解译、室内外实验等方法,系统开展了火后泥石流发育特点及形成机理研究。胡卸文等^[1]先后对多处火后泥石流进行常年跟踪调查,研究发现高温燃烧植被后将对土壤结构产生影响,导致表层土壤的水理物理性质剧烈改变,产生大量灰烬和松散泥沙。据统计,就四川省近十年林火发生过的地方而言,约 50% 的林区在火灾后一年或几年发生了不同程度的泥石流灾害。火后泥石流作为一种特殊的地质灾害,与常规泥石流相比,不仅含有大量灰烬及松散泥沙,还表现出高容重、大黏度的特点^[1]。从形成条件上与常规泥石流相比差别不大,但是从物源类型、激发雨强、运动特征等方面却有很大不同^[1]。目前,国内对常规泥石流研究较多,而对火后泥石流的研究相对较少,特别是对火后泥石流成灾机理的研究几乎处于空白。

2019 年 4 月 7 日 16 时 28 分,四川省凉山州冕宁县腊窝乡长脚村 1 组突发森林火灾,在火烧迹地的华岩子沟于 2019 年 7 月 4 日因集中强降雨而暴发首次泥石流。本文通过野外调查、室内外实验对该泥石流沟的成灾机理进行了研究。

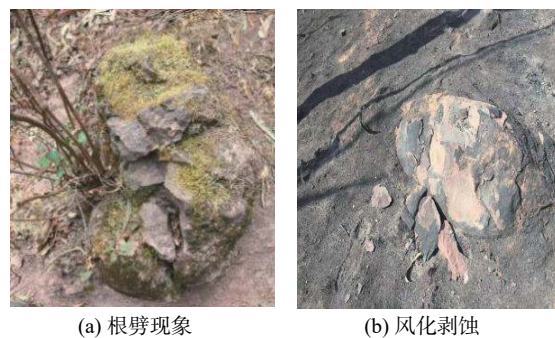
1 区域地质环境特征

研究区位于四川省西南部,川滇交界处的凉山彝族自治州。地势西低东高,面朝雅砻江,山岭海拔高度 2 100~2 800 m,此地山势巍峨,植被以云南松为主,平均胸径约 10.2 cm,高约 8 m。沟谷呈 V 型,坡度约 60°,沟道纵坡降约 252%,为高山-河谷地貌。该区雨热充足,年均降水量约 1 014 mm,属亚热带季风气候,年均气温 16 ℃,地理环境复杂多变,气候垂直差异大,表现出日温差大,年温差小的特点。

区域内无大型构造断裂带,出露岩性多为白云岩、千枚岩、泥页岩等。岩石多因昼夜温差大而破碎。区域内植物扎根岩石生长,根劈现象常见。该地常年风大风多,地表风蚀强烈,岩石风化现象严重(图 1)。

2 火行为特征

研究区火场海拔约 2 600 m,火烧植被为云南松与灌木丛。植株密度:乔木约 10 棵,灌木约 6 棵(范围 5 m×5 m),火灾前植被覆盖率约 86.5%,火灾后约 52.6%。火

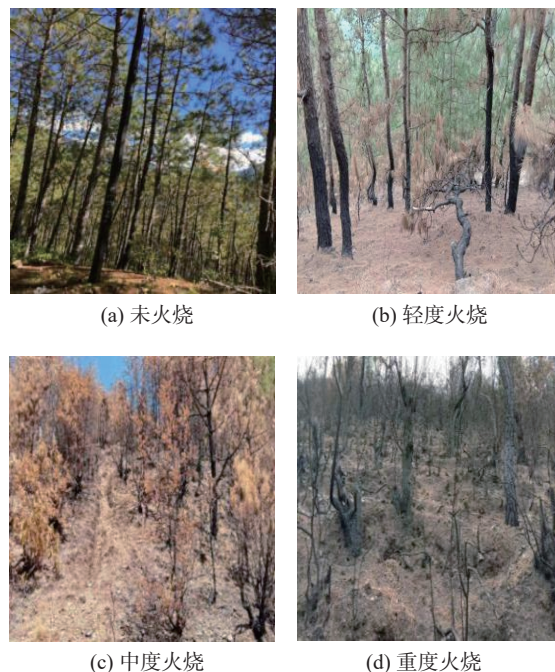


(a) 根劈现象 (b) 风化剥蚀

图 1 岩石自然风化破碎现象

Fig. 1 Natural weathering and disintegration of rock

行为指标常见有火强度、火烈度、火频率等,本文通过参考 KEY 等^[5]的火烈度 dNBR 分级标准并结合实地考察情况,将火烈度大致从地面覆盖物过火情况、树干(枝)烧黑高度、树叶颜色等三方面划分,对研究区火烧迹地依次划分为重度火烧、中度火烧、轻度火烧和未火烧区(图 2),具体判别标准详见表 1,通过遥感解译手段解译出了火烧区的火烈度图(图 3)。据统计,研究区过火面积 8.07 km²,其中严重火烧区面积 1.37 km²,占比 16.97%;中度火烧区面积 0.61 km²,占比 7.53%;轻度火烧区面积 1.84 km²,占比 22.78%;未火烧区面积 4.25 km²,占比 52.71%。从整个流域火烧特征分布来看,上游为严重火烧区;中游多为中等火烧区;下游处背风地带,植被烧毁不明显,界于轻度与未火烧之间。



(a) 未火烧 (b) 轻度火烧

(c) 中度火烧 (d) 重度火烧

图 2 不同火烈度区域代表照片

Fig. 2 Photographs of areas with different fire severity

表 1 火烈度划分标准

Table 1 Fire severity classification standard

依据火烈度	地面覆盖物过火情况	树干(枝)烧黑高度	树叶烧毁情况
未火烧	未过火	未烧黑	绿色
轻度	地面草, 落叶过火; 草桩, 腐殖质层保留	树枝未烧到, 树干烧黑小于 3 m	树叶基本绿色
中度	地面草, 落叶, 半腐殖质层基本烧毁	树干烧黑高度 5 ~ 10 m, 树梢保留	树叶多为黄色, 少数黑色
重度	地面草, 落叶, 半腐殖质层全部烧毁	树干烧黑高度 大于 10 m, 或全黑或树桩烧断	树叶烧毁或保留全黑树梢

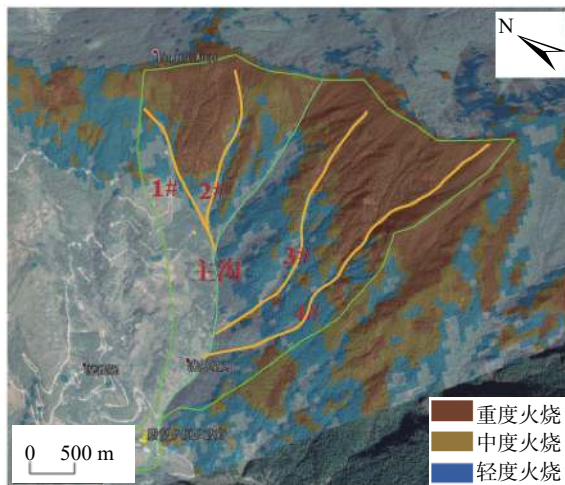


图 3 火烈度及沟道分布情况

Fig. 3 Fire severity and gully distribution

3 火烧迹地松散物源特征

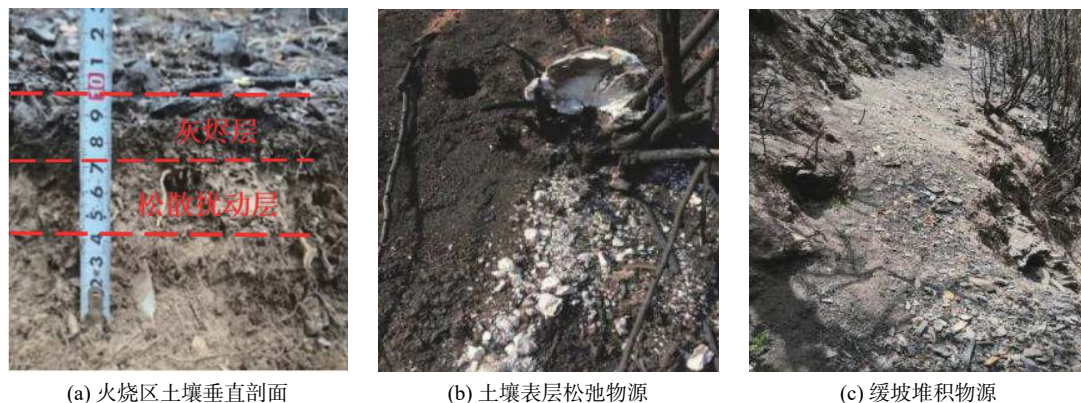
华岩子沟主沟长 3.61 km, 两岸分布有 4 条支沟, 右岸 1#、2#支沟分别约 1.03 km 和 1.02 km; 左岸 3#、4#支沟分别约 1.42 km 和 1.66 km。流域汇水面积 3.69 km², 最大高差 910 m, 主沟沟道纵坡坡降 252‰, 为泥石流的形成提供了动力条件。

火后泥石流起动物源与常规泥石流有所不同, 火灾后的坡面堆积了大量灰烬层, 如图 4(a) 所示, 这也是首次火后泥石流暴发的标志性物源。刘发林等^[6]研究了火干扰对地表径流与侵蚀的影响, 发现灰烬覆盖率与火强度呈正相关, 即火强度越强, 灰烬覆盖率越高。经调查, 灰烬堆积厚度最大可达 20 cm。林火对坡表土壤的焙烧, 使土壤表层形成类似“壳”状物, 坡表土壤出现烧结松弛现象, 如图 4(b)、图(c) 所示。它改变土壤的物理化学性质, 使土壤结构变得松散易碎, 成为火后泥石流物源重要的组成部分。地表草、树木在失去生命后, 其原本的固坡作用减弱, 坡表土壤更易松散。暴雨来临, 地表抗侵蚀能力下降, 在地表径流的不断冲刷作用下, 部分松散土颗粒被带走, 成为火后泥石流物源的另一组成部分。

经调查, 也有与常规泥石流相似的坡面物源、崩滑物源、沟床堆积物源等, 但其最突出的特点就是火烧后的灰烬层特殊物源。

4 火烧迹地渗透性与斥水性

土壤斥水性强度是通过除去火烧迹地土壤上部覆盖草木灰, 在露出的土壤表层进行水滴入渗实验测得。该实验以水滴入渗时间 (Water Drop Penetration Time, WDPT) 来评估斥水性强度^[7-8]。该实验在火烧迹地相同部位重复滴定 5 次, 记录各水滴入渗时间, 求其平均值。斥水性强弱也可以通过观察水滴与土颗粒表面接触角大小来反应, 如图 5(b) 所示。王严等^[9]选取四川雅江县恶古乡的火烧迹地为研究对象, 采用水滴入渗实验对斥水性强度的内在关系进行了探究。发现斥水性强度分布具有空间异质性, 且斥水性对中度和严重火烧区的影响深度约 3 cm, 对轻度火烧区影响深度约 2 cm。



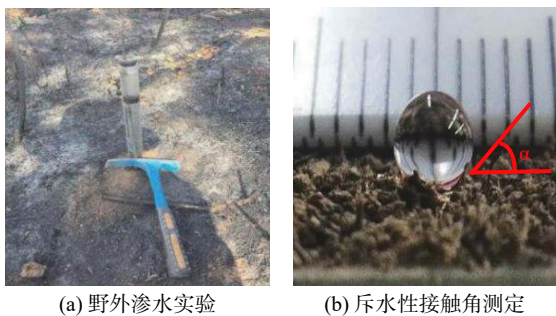
(a) 火烧区土壤垂直剖面

(b) 土壤表层松弛物源

(c) 缓坡堆积物源

图 4 火烧迹地坡面物源特征

Fig. 4 Residual deposit characteristics in burned area



(a) 野外渗水实验 (b) 斥水性接触角测定

图 5 渗透性与斥水性的测定

Fig. 5 Determination of permeability and hydrorepulsion

因此,该实验主要选取 0 cm, -2 cm 深度的土壤层进行斥水性强度的研究。

$$WDPT = \sum T_i / 5$$

式中: $WDPT$ ——某次实验所测得斥水性强度值;

T_i ——某次实验单个水滴所测时间。

研究结果显示(图 6):斥水性强度与火烈度强度基本成正相关,即火烈度越强,斥水性就越强。BADI A-VILLAS D 等^[10]先后对斥水性进行研究,认为经火干扰的土壤,其斥水性(也称“疏水性”)会有显著增加。一方面是因为原状土中斥水性物质的天然富集^[11],另一方面是由于高温林火会使土壤表层带有斥水性的有机化合物^[12]。图 6 可见中度火烧区与严重火烧区斥水性二者相差不大,大约是轻度火烧区的 6 倍;未火烧区略有微小斥水性,这证实 DOERR S H 等^[11]的研究结果:原状土也富集少量天然斥水性物质。说明该研究结果与前人对斥水性研究结论一致。

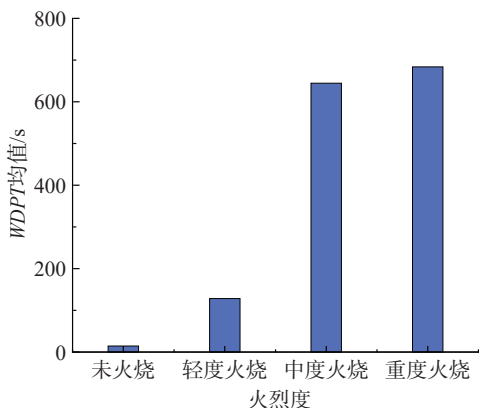


图 6 斥水性与火烈度关系

Fig. 6 Relationship between water repellency and fire severity

土壤渗透性的测定是采用美国 Decagon 公司发明的小型圆盘张力入渗仪 (Mini disk infiltrometer) 在火烧迹地进行圆盘入渗实验^[9]。与常用的双环法测渗透性

相比,该试验方法具有:(1)操作简单,携带方便;(2)能避免随机分布的土壤扰动开裂和大孔隙对实验结果的影响^[9];(3)适应于高山缺水的地区,提高实验效率。结果表明(图 7)轻度火烧区渗透性最好,中度火烧区渗透能力约轻度火烧区的 1/2,重度火烧区渗透性最差。说明火烧迹地表层土壤的渗透性与火烈度大致呈反相关的关系。

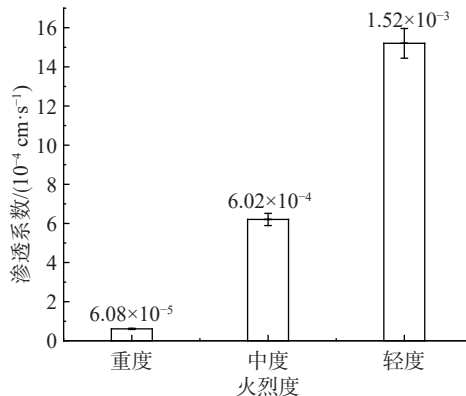


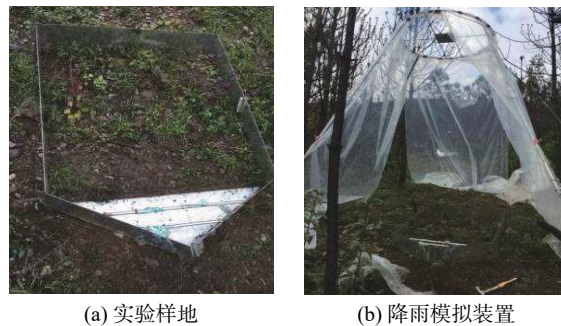
图 7 火烈度与渗透系数关系

Fig. 7 Relationship between fire severity and permeability coefficient

5 火烧迹地侵蚀的降雨模拟试验

为了充分掌握不同火烈度区域受集中降雨后坡面侵蚀产流和产沙能力及差异,本次研究专门进行现场降雨模拟试验,共选试验样地 30 块,每块样地面积为 1 m²,其中严重火烧 8 块,中度火烧 10 块,轻度火烧 8 块,未火烧 4 块(图 8)。

实验过程中控制降雨强度 80 mm/h,每次降雨模拟试验时间 30 min,每 2 min 进行一次产流收集,产流收集时间为 30 s。采用规格一致的 550 mL 塑料瓶收集,并依次编号处理。产流样品带回称重记录后静置 24 h,倒出上层清液并用滤纸进行过滤,过滤物经烘干箱烘干 24 h 后称重记录。经计算,可获得降雨试验的产流量、产流速率、产沙量、产沙速率等实验数据。



(a) 实验样地 (b) 降雨模拟装置

图 8 基于火烧迹地侵蚀的降雨模拟试验

Fig. 8 Rainfall simulation experiment based on fire erosion

5.1 产流特征

为探究火烧迹地土壤表层斥水性对累计产流量的影响, 对各样地进行了水滴入渗实验测其斥水性强度, 统计结果表明斥水性 *WDPT* 值分布较离散, 其规律通过拟合曲线整体变化趋势可看出斥水性强度与累计产流量大致呈正相关, 一定程度上说明火烧迹地斥水性强度越强, 径流产流量越大的特点(图 9)。

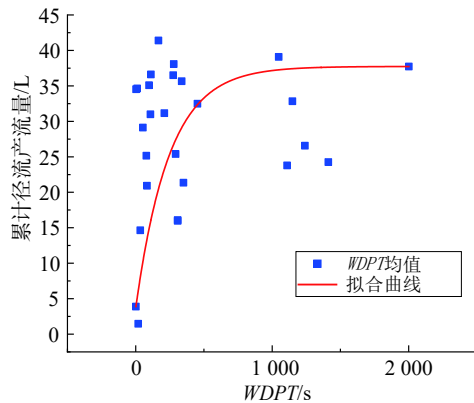


图 9 *WDPT* 均值与累计径流产流量关系

Fig. 9 Relationship between the mean value of *WDPT* and cumulative production flow

为了比较不同火烈度样地累计产流量、产流速率特征, 将不同火烈度样地的降雨模拟试验测得的累计产流量, 产流速率分别求平均值, 结果表明火烧迹地严重火烧区的累计产流量最大(图 10)。经调查, 这与该区高温林火焚烧后产生大量斥水性有机物密切相关, 斥水性物质会减弱地表渗透性, 使产流量增大。也与 SIMANTON 等^[13]做的降雨模拟试验发现重度火烧区径流量是未烧区四倍的结果相近。只是中度火烧区累计产流量显示低于轻度火烧区, 其原因是所选中度火烧样地地面背风, 灰烬泥沙层较厚, 径流产生前期大部分水

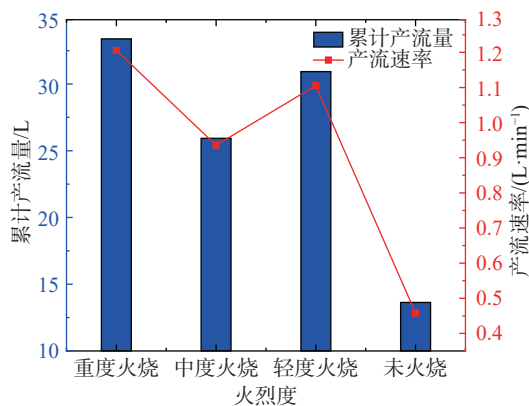


图 10 火烈度与累计产流量及产流速率关系

Fig. 10 Relationship between fire severity and cumulative flow rate and flow rate

流被吸渗, 导致产流量变小。而未火烧区植被茂盛, 地表覆盖物厚, 阻碍了径流运动, 并且其土壤渗透性良好, 大部分径流入渗土壤, 产流量及产流速率较小。

5.2 产沙特征

为探究坡度对产沙量影响, 对各样地坡度分别进行测量, 研究显示坡度对产沙量的变化没有明显规律, 说明坡度大小对产沙量没有直接影响(图 11)。而通过对不同火烈度产沙量、产沙速率的统计对比发现严重火烧区的产沙量明显高于中度和轻度火烧区, 轻度和中度火烧区产沙情况差异不大, 约为严重火烧区的 1/4; 未火烧区由于枯落物覆盖与植物根系的固坡作用, 产沙量相对较小(图 12)。

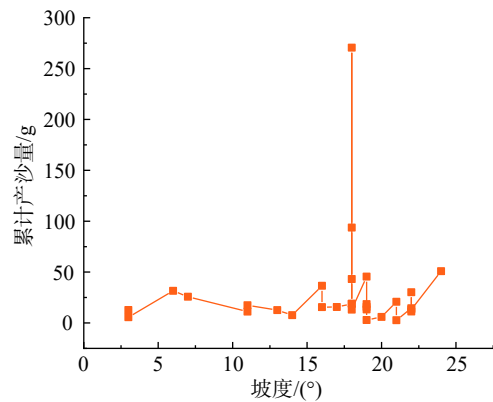


图 11 累计产沙量与坡度关系

Fig. 11 Relationship between cumulative sediment yield and slope

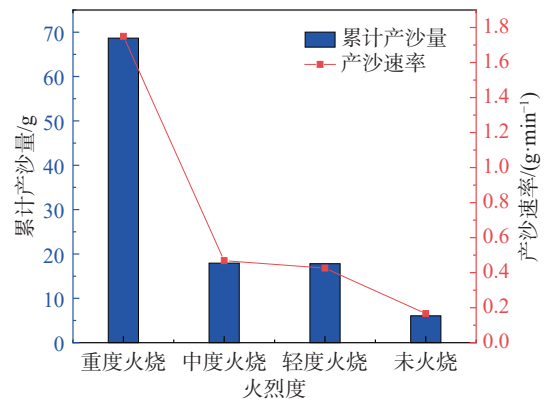


图 12 火烈度与累计产沙量及产沙速率关系

Fig. 12 Relationship between fire severity and cumulative sediment yield and sediment yield rate

6 火后泥石流形成机理

火后泥石流作为一种特殊的泥石流灾害, 与常规泥石流相比, 其演化过程具有明显的独特性和差异性。通过野外调查发现该地植被丰富、山势陡峭, 崩滑现象常

见,夏季雨水充足,使该地本身存在着大量的潜在滑坡与泥石流隐患。林火发生后,山坡上产生大量灰烬层,遇到集中降雨便形成灰烬流,成为火烧迹地首次泥石流暴发的主要物源^[4]。因植物被烧毁后失去生命力,对土壤的固结能力减弱,加之林火对表层土壤的焙烧,土壤结构破坏,水分散失,变得愈发松散,直接成为二次泥石流产生的重要物源。林火导致土壤表层斥水性增加,雨水难以下渗,坡表径流量的增大使坡面径流冲刷加剧,坡面侵蚀产生的物源也成为二次泥石流物源的重要组成部分。此外,山坡上倾倒下大量被烧毁的残枝树干,它们被冲到沟内后造成堵溃效应如图 13(a)所示。短暂性地放大泥石流流量,使沟道下切严重如图 13(b)所示。沟道两侧松散物源出现高临空面,坡脚因冲刷而失稳滑坡^[4],在遇降雨后将暴发三次乃至多次的泥石流灾害。



(a) 沟道堵溃效应

(b) 沟道下切掏蚀

图 13 沟道堵溃与下切掏蚀现象

Fig. 13 Gully plugging and cutting erosion phenomenon

贺小黑等^[15]认为降雨引起的地下水渗流是滑坡失稳的关键性因素。CANNON 等^[16]指出火后泥石流的启动类型通常有两种:一是地表径流冲刷;二是降雨入渗触发的浅表层滑坡。刘云等^[17]指出强降雨是地质灾害的主要诱因。通过野外调查发现,腊窝乡发生的泥石流以地表径流冲刷形成为主,结合该泥石流沟的发展趋势及发育特征,进一步推测随着地表植被的恢复,植物对土壤的固结能力增强,斥水性物质也将随时间推移而减少,土壤的渗透性逐渐变大,坡面侵蚀效应逐渐减弱。李明威等^[18]、殷万清等^[19]也发现植被对泥石流活动有一定的抑制作用。但因各次泥石流对主沟道的强烈淘刷,将会使两侧斜坡坡面松散物源(坡残积土等)临空而失稳,在随后的降雨过程中不断解体,成为后续泥石流暴发的主要补给物源。

7 结论

(1)林火与火后泥石流的产生密切相关。林火焚烧

植被后产生大量灰烬,成为火烧迹地首次泥石流标志性物源;焙烧作用使地表土壤结构破坏,变得松散易碎;林火将使植物根系对土壤的固结能力大大减弱。

(2)斥水性物质将增大坡面径流,减小泥石流暴发降雨阈值。火烧迹地土壤因斥水性物质的产生,雨水难以入渗土体,地表径流量增大;坡面径流冲刷加剧而形成的侵蚀物源将成为二次泥石流物源重要组成。

(3)通过对火烧迹地进行不同火烈度区域坡面侵蚀的降雨模拟试验及圆盘渗水实验,发现未火烧区的土壤渗透能力远大于火烧区,而火烧区产流量明显大于未火烧区。产沙量与火烈度基本成正相关,与坡度大小无关。但是严重火烧区的产沙量明显高于中度和轻度火烧区,轻度和中度火烧区产沙情况差异不大,约为严重火烧区的 1/4,未火烧区产沙量较小。

(4)火后泥石流松散物源启动类型主要有地表径流冲刷和降雨入渗触发的浅表层滑坡。腊窝乡发生的火后泥石流以地表径流冲刷形成为主,沟道两侧松散土体会因沟道淘刷作用而失稳解体,成为后续泥石流暴发的主要补给物源。

参考文献 (References) :

- [1] 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)]
- [2] WELLS W G II. The effects of fire on the generation of debris flows in southern California[M]/Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Geological Society of America, 1987: 105-114.
- [3] CANNON S H. Debris-flow generation from recently burned watersheds [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2001, 7(4): 321-341.
- [4] 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)]
- [5] KEY C H, BENSON N C. LANDSCAPE assessment (LA) sampling and analysis methods [C]/FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, Lutes D C edit, Rocky Mountain Research Station RMRS-GTR-164-CD, 2006.
- [6] 刘发林,杨继敏. 火干扰对径流及土壤侵蚀的模拟研究 [J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 858-865. [LIU Falin,

- YANG Jimin. Simulation study of fire disturbance on runoff and soil erosion [J] . Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 858 – 865. (in Chinese with English abstract)]
- [7] DEBANO L F. Water repellent soils: a state-of-the-art[R]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1981.
- [8] 陈俊英,吴普特,张智韬,等.土壤斥水性对含水率的响应模型研究 [J] . 农业机械学报, 2012, 43(1): 63 – 67. [CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture [J] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 63 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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)]
- [10] BADÍ A-VILLAS D, GONZÁ LEZ-PÉ REZ J A, AZNAR J M, et al. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire [J] . Geoderma, 2014, 213: 400 – 407.
- [11] DOERR S H, DOUGLAS P, EVANS R C, et al. Effects of heating and post-heating equilibration times on soil water repellency [J] . Soil Research, 2005, 43(3): 261.
- [12] DEBANO L F, SAVAGE S M, HAMILTON D A. The transfer of heat and hydrophobic substances during burning [J] . Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 779 – 782.
- [13] SIMANTON J R, WINGATE G D, WELTZ M A. Runoff and sediment from a burned sagebrush community [M]. Proceedings of the Symposium, 1990: 14 - 17.
- [14] 郝红兵,赵松江,李胜伟,等.汶川地震区特大泥石流物源集中启动模式和特征 [J] . 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 159 – 165. [HAO Hongbing, ZHAO Songjiang, LI Shengwei, et al. The star-up mode on large debris flow material source in Wenchuan earthquake region [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 159 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 贺小黑,彭鑫,谭建民,等.地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响:以湖南安化春风滑坡群为例 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 96 – 103. [HE Xiaohai, PENG Xin, TAN Jianmin, et al. Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: Taking Chunfeng landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 96 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [16] CANNON S H, GARTNER J E. Wildfire-related debris flow from a hazards perspective Debris-Flow Hazards and Related Phenomena[J].[s.n.], 2005: 363-385.
- [17] 刘云,康卉君.江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 112. [LIU Yun, KANG Huijun. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics of landslide and debris flow disasters in Jiangxi [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 112. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李明威,唐川,陈明,等.汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 182 – 190. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. The temporal and spatial evolution characteristics of landslides in the debris flow basin of Beichuan County, Wenchuan earthquake area [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 182 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 殷万清,金涛,胡卸文,等.喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 61 – 69. [YIN Wanqing, JIN Tao, HU Xiewen, et al. Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 61 – 69. (in Chinese with English abstract)]