

重庆市2022年8月森林火灾火烧区特点及火后泥石流易发性评价

周瑞宸, 胡卸文, 金涛, 曹希超, 周永豪, 张瑜

Characteristics of burned area and susceptibility assessment of post-fire debris flow of Chongqing wildfire in August, 2022

ZHOU Ruichen, HU Xiewen, JIN Tao, CAO Xichao, ZHOU Yonghao, and ZHANG Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性

Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas

王严, 胡卸文, 杨瀛, 于振江, 曹希超 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 40-45

火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density

黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161-168

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

刘德玉, 贾贵义, 李松, 丛凯, 张伟 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 33-33

川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响

Characteristics and potential engineering perniciousness of the debris flow group in one station of the Sichuan-Tibet Railway

何坤, 胡卸文, 刘波, 周瑞宸, 席传杰, 韩玫, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 137-149



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303045

周瑞宸, 胡卸文, 金涛, 等. 重庆市 2022 年 8 月森林火灾火烧区特点及火后泥石流易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 150-160.

ZHOu Ruichen, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Characteristics of burned area and susceptibility assessment of post-fire debris flow of Chongqing wildfire in August, 2022[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 150-160.

重庆市 2022 年 8 月森林火灾火烧区特点及 火后泥石流易发性评价

周瑞宸¹, 胡卸文^{1,2}, 金涛¹, 曹希超¹, 周永豪¹, 张瑜¹

(1. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间
信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 2022 年 8 月重庆市江津区、巴南区、北碚区相继爆发森林火灾, 总过火面积约 35 km²。火灾后火烧迹地植被及土壤结构遭到破坏, 坡表堆积了厚度 1~5 cm 不等的灰烬层, 受强降雨影响一旦爆发火后泥石流, 将对附近村镇基础设施及群众生命财产构成严重威胁。通过遥感解译、现场调查及试验, 查明了本次森林火灾火烧区空间分布特征, 实测了火烧迹地灰烬层厚度、土壤饱和导水率等参数。结果表明研究区重度、中度和轻度火烧区分别占 9.6%、34.0% 和 56.4%, 其对应的坡面灰烬-结构扰动层平均厚度分别为 5.10, 3.28, 1.15 cm。基于专家经验预测模型对火烧区共 95 条潜在泥石流沟道进行火后泥石流易发性评价, 其中 1 条为高等易发, 43 条为中等易发, 44 条为低等易发, 7 条为不易发, 分别占总数的 1.05%、45.26%、46.32%、7.37%。考虑到现状条件下各泥石流沟域内中度和重度火烧区仍残留有大量灰烬、泥沙等松散固体物源, 且土壤表现出较强的斥水性, 中等及高等易发性沟道在雨季一旦受集中降雨影响, 爆发火后泥石流的可能性较大。研究成果可为火烧迹地火后泥石流灾害预防与风险管理提供科学依据。

关键词: 重庆森林火灾; 林火烈度; 火烧迹地; 火后泥石流; 易发性

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0150-11

Characteristics of burned area and susceptibility assessment of post-fire debris flow of Chongqing wildfire in August, 2022

ZHOu Ruichen¹, HU Xiewen^{1,2}, JIN Tao¹, CAO Xichao¹, ZHOu Yonghao¹, ZHANG Yu¹

(1. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;
2. Engineering Laboratory combined with National and Local of Spatial Information Technology of High-Speed
Railway Operation Safety (Southwest Jiaotong University), Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In August, 2022, forest fires occurred in Jiangjin District, Banan District, and Beibei District in Chongqing, respectively, with a total burned area of approximately 35 km². After the wildfire, an ash layer with a thickness of 1~5 cm was deposited on the slope, and the vegetation and soil structure of the burned area were devastated. Affected by concentrated rainfall, it will pose a serious threat to the infrastructure of nearby villages

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-05-16

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42377170; 41731285)

第一作者: 周瑞宸 (1997—), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害成因与防治方面的研究。E-mail: cdzrc@my.swjtu.edu.cn

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工作。E-mail: huxiewen@163.com

and towns and residents' lives and properties once the post-fire debris flow occurs. Based on the remote sensing, field investigation, and in-situ tests, the distribution characteristics of burned areas after the fire were identified. The measured data including the thickness of the ash layer, and the saturated hydraulic conductivity of the soil were derived. The severe, moderate, and low burned areas accounted for 9.6%, 34.0%, and 56.4% of the entire area, respectively, with the corresponding average thickness of ash and soil disturbance layer of 15.10 cm, 3.28 cm, and 1.15 cm. According to the prediction model based on expert experience, a total of 95 potential debris flow gullies in burned areas were evaluated for the susceptibility of post-fire debris flow, of which 1 was of high susceptibility, 43 were of medium susceptibility, 44 were of low susceptibility, and 7 were not prone to occur, contributing to 1.05%, 45.26%, 46.32%, and 7.37% of the total, respectively. Considering that a large number of loose solid sources besides ash and sediment still exist in the moderate and severe burned areas within watersheds under the current conditions, with strong water repellency of burned soil, once the medium and high susceptibility gullies are affected by concentrated rainfall in the rainy season, there is a relatively high probability for the post-fire debris flow occurrence. This study provides basic information for the prevention and risk management of post-fire debris flows.

Keywords: Chongqing wildfire; fire severity; burned area; post-fire debris flow; susceptibility

在全球气候变暖背景下,森林火灾逐渐成为全球性的自然灾害,对基础设施、人类生活和生态系统构成巨大威胁^[1]。据统计,全球每年爆发森林火灾近22万起,年均过火面积超过 5×10^5 ha^[2]。应急管理部统计数据显示,2018—2022年全国共发生林火灾害7301起,受害森林面积超过 4.7×10^4 ha^[3]。森林火灾极大地改变了山坡土壤的水力性质和根系固结能力,为泥石流的发生提供了有利的孕灾环境^[4-5]。火后泥石流是林火后最常见也是最具破坏性的地质灾害之一^[6-7]。Wells^[8]对美国加利福尼亚州的火烧迹地研究发现,当地泥石流的发育特征与火烧严重程度密切相关。Moody等^[9]、Cannon等^[10]研究显示火烧迹地普遍新增火后泥石流灾害。Riley等^[11]和Nyman等^[12]认为,相较于其他泥石流,火烧迹地小规模泥石流的发生频率显著提高,且受火行为特征影响。此外,森林火灾可以降低泥石流的触发降雨阈值,增加泥石流对降雨的敏感性^[13-14]。据统计,美国西南部观测到的火后泥石流有一半以上由重现期小于2 a的降雨强度引起^[15]。杨瀛等^[16]对雅江县八角楼乡2018年雨季发生的5次火后泥石流调查中发现,其中4次泥石流激发雨强小于5 a。火后泥石流的潜在威胁可能会持续数年,特别是在火灾发生后的1~2 a,地表径流引发泥石流的风险非常高,但随着土壤地貌和植被的恢复,这种风险逐渐降低^[17-18]。

深入了解火后泥石流的发展趋势可以提高预测和减轻泥石流灾害的能力^[19]。易发性评价是降低火后

泥石流风险的有效方法,通过对以往收集到的灾害数据进行统计分析,建立评价模型,进而预测未来同一区域及周边地区发生火后泥石流的概率,为应急管理人员快速提供火灾后风险的流域^[20-21]。现行火后泥石流易发性判别方法主要分为3类:①专家经验法:层次分析法、专家打分法等^[22-23];②数理统计法:信息量法、证据权重法、确定性系数法等^[24-25];③机器学习法:逻辑回归、随机森林、分类树等^[26-28]。国外学者多通过数理统计及机器学习法建立火后泥石流易发性评价模型,但模型的适用范围具有一定的局限性,对数据库以外的地区预测效果较差。而国内学者由于样本不足,缺乏客观的数据分析,对火后泥石流易发性的研究较少,仅胡卸文等^[22]对西昌市“3·30”森林火灾火烧迹地63条火后泥石流沟进行了易发性评价,为工程地质条件相似的地区提供参考。

2022年8月19—21日,重庆市江津区、巴南区、北碚区相继爆发森林火灾,过火面积约35 km²。火灾后火烧迹地植被及土壤结构遭到破坏,坡表堆积了厚度1~5 cm不等的灰烬层,受强降雨影响一旦爆发火后泥石流,将对附近道路、工厂和村镇居民构成严重威胁。基于重庆火烧区最新遥感影像及现场调查,查明了森林火灾火烧区分布特征,实测了火烧迹地灰烬层厚度、土壤饱和导水率等参数。同时,基于专家经验预测模型对火烧区共95条潜在泥石流沟道进行火后泥石流易发性评价,旨在为重庆火烧迹地雨季后泥石流灾害预防与风险管理提供科学依据。

1 火烧区地质环境条件

火烧区所在的江津区、巴南区、北碚区位于重庆市西部(图 1),地处川东平行岭谷向南倾没于盆地南缘山地交接地带,地势东高西低、南北起伏,海拔多在 200~900 m,区内狭窄条形低山与宽缓向斜丘陵谷地相间排列,属构造剥蚀低山丘陵地貌。构造上隶属于扬子陆块内部川东陷褶束,发育的弧形褶束主要由一系列 NE、NNE 向近平行的隔挡式褶皱组成。研究区属于中弱地震活动区,地震活动强度较弱、频度较低^[29]。地层岩性主要为侏罗系粉砂岩、泥岩以及三叠

系灰岩、炭质页岩、石英砂岩,第四系全新统残坡积层主要为含碎石的粉质黏土。

研究区属东南亚季风环流控制的亚热带湿润气候,具有冬暖春早,夏热秋凉、雨量充沛、无霜期长等特点。多年平均气温 18.4 °C,冬季平均气温 7.7 °C,夏季平均气温 28.4 °C,极端最高气温 45.0 °C(2022 年 8 月 18 日),年平均日照时数 1 094.4 h。多年平均降雨量 1 100.7 mm,5—9 月为雨季,降雨量约占年总降雨量的 70%,且春夏之交多为夜雨。气候垂直分带较为明显,海拔每增高 100 m,降雨量增加约 25 mm。

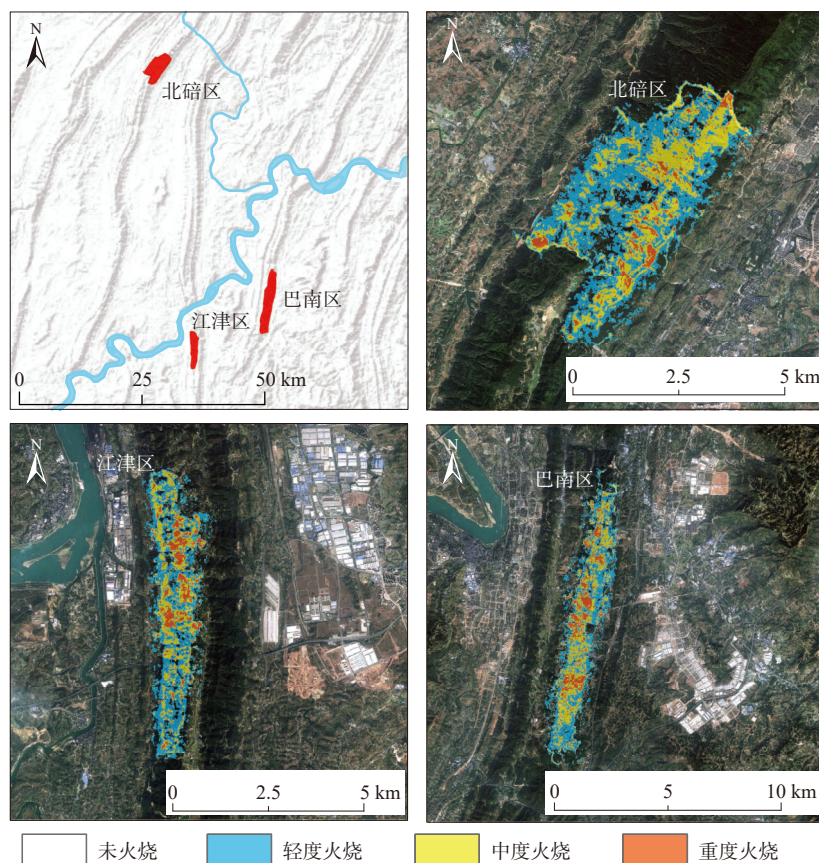


图 1 研究区地理位置及各部位火烈度分区图

Fig. 1 Geographical location and fire severity zoning map of the study area

2 重庆市 2022 年 8 月森林火灾火烧区特点

2.1 火烈度特征及判别标准

研究区原始森林覆盖率约 80%,植被类型以杉木林、竹林和马尾松林为主,林火导致火烧迹地植被结构严重破坏,覆盖率显著下降。差分归一化燃烧指数(the delta normalized burn ratio, dNBR)可以准确计算森林火灾的燃烧面积、边界和严重程度^[30],已成为快速评估光谱火灾效应的标准方法^[31]。通过欧空局网站

(scihub.copernicus.eu/dhus/)获取了研究区火烧前后(2022 年 8 月 11 日和 2022 年 9 月 5 日)Sentinel-2 的多光谱卫星光学遥感影像(精度 10 m),利用 Sentinel 的 SNAP 应用平台对其进行解译。

基于 Parsons 等^[32]提出的火烈度判别标准(表 1),实地调查了研究区火烧迹地不同火烈度区域地表覆盖物燃烧特征,结合遥感解译结果对各部位林火烈度进行校核,最终将火烧迹地的林火烈度划分为重度、

中度、轻度和未火烧 4 个等级, 绘制了重庆市 2022 年 8 月森林火灾 3 处火烧迹地火烈度分区图(图 1)。

表 1 研究区火烧迹地火烈度判别标准
Table 1 Fire severity criterion of burned areas in the study area

火烈度	特点
未火烧	火烧前后地表覆盖物无变化
轻度火烧	超过 50% 的枯枝落叶未完全燃烧
中度火烧	大部分枯枝落叶被烧毁, 但是大部分粗可燃物未完全燃烧
重度火烧	枯枝落叶和粗可燃物均被完全烧毁, 地表为灰烬覆盖

2.2 重庆市森林火灾火烧迹地火烈度分布特征

统计表明, 重庆市江津区、巴南区、北碚区森林火灾过火面积分别为 6.75, 15.14, 12.95 km²; 总过火面积达 34.84 km², 其中重度火烧区占比 9.6%, 中度火烧区占比 34.0%, 轻度火烧区占比 56.4%, 具体见表 2。空间分布上, 中度和重度火烧区集中在各个流域的中上

游, 而沟道下游多为轻度和未火烧区, 不同火烈度火烧迹地现场特征见图 2(a)—(c)。火灾发生后, 林下土壤结构和植物根系受到了不同程度的破坏, 中度和重度火烧区出现明显裸露的灰烬泥沙松散层, 见图 2(d); 受集中降雨影响极易被启动诱发泥石流, 沿途裹挟坡面和其他松散固体物源, 见图 2(e); 伴随沟道内散落的大量枯枝树干, 见图 2(f)。局部发生堵塞溃决的可能性极大, 其导致的流量放大效应会显著增强泥石流危害性^[33]。对研究区共 95 条潜在泥石流沟(江津区 19 条、巴南区 55 条、北碚区 21 条)进行统计分析, 结果表明中—重度火烧区面积占比大于 30% 的沟域数量占沟域总数的 45.3%; 大于 60% 的占沟域总数的 14.7%, 其中巴南区 12 条、江津区 2 条(表 3), 沟域内植被和土壤环境受火烧影响扰动极大。

表 2 研究区火烧迹地火烈度面积统计
Table 2 Fire severity area statistics of burned area in the study area

火烧迹地所在区域	火烈度						过火面积/km ²
	轻度火烧		中度火烧		重度火烧		
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	
江津区	3.81	56.5	2.14	31.7	0.80	11.8	6.75
巴南区	8.24	54.4	5.06	33.5	1.83	12.1	15.14
北碚区	7.61	58.7	4.64	35.8	0.70	5.4	12.95
总计	19.66	56.4	11.84	34.0	3.33	9.6	34.84



图 2 重庆市 2022 年 8 月森林火灾火烧区典型特征
Fig. 2 Typical characteristics of burned areas of Chongqing wildfire in August, 2022

表 3 研究区中—重度火烧区面积不同占比沟道数量统计

Table 3 Number of gullies with different proportions in moderate and severe burned area in the study area

火烧迹地所在区域	中—重度火烧区面积占比							
	<15%		15% ~ 30%		30% ~ 60%		>60	
	沟道数量/条	占比/%	沟道数量/条	占比/%	沟道数量/条	占比/%	沟道数量/条	占比/%
江津区	1	5.3	5	26.3	11	57.9	2	10.5
巴南区	19	34.6	13	23.6	11	20.0	12	21.8
北碚区	5	23.8	9	42.9	7	33.3	0	0
总计	25	26.3	27	28.4	29	30.5	14	14.7

2.3 火烧区坡面灰烬与土壤结构扰动特点

以往研究表明,火灾烧毁植被产生灰烬、烘焙地表扰动土壤结构与火后泥石流的爆发密切相关^[34]。火后泥石流物源启动有其特殊性,其突出特点就是火后形成了丰富的灰烬层物源,火后首次泥石流组成基本都是以灰烬层为主要成分^[35-36]。同时,灰烬会加剧地表径流和坡面侵蚀,间接作用于火后泥石流的形成过程^[37]。灰烬自身的吸水性首先会延缓径流和侵蚀的产生,但当灰烬层饱和后,反而会增大地表径流和流体密度,提高流体的物质运移和侵蚀能力^[38]。因此,查明火烧区各泥石流沟域内不同火烈度部位坡面灰烬及表层土壤结构扰动特点极为重要。

坡面灰烬-结构扰动层是火烧迹地的重要新生物质,一般被定义为火后坡面的颗粒残留物,由植被完全燃烧后的残留物、不完全燃烧的有机物和坡面部分失去结构联结的松散土壤组成^[39]。为了定量评价火烧区每一个子流域内的坡面灰烬-结构扰动层厚度,假定整个火烧迹地同一火烈度区地表覆盖物受火烧影响

程度相似,同时为了尽可能降低区域差异性的影响,野外调查时选取 3 处火烧迹地多个流域、不同火烧区部位对坡面灰烬-结构扰动层厚度进行现场实测(图 3a),在此基础上根据胡卸文等^[22]提出的式(1)估算火烧迹地单沟流域内坡面灰烬-结构扰动层的平均厚度。结果表明,重度火烧区平均厚度为 5.10 cm,中度火烧区平均厚度为 3.28 cm,轻度火烧区平均厚度为 1.15 cm,与火烈度呈正相关。

$$H = \frac{H_S \cdot S_S + H_M \cdot S_M + H_L \cdot S_L}{S} \quad (1)$$

式中: H ——单沟流域内坡面灰烬-结构扰动层平均厚度/cm;

S ——单沟总流域面积/ km^2 ;

H_S 、 H_M 、 H_L ——单沟流域内重、中、轻度火烧区坡面灰烬-结构扰动层平均厚度/cm;

S_S 、 S_M 、 S_L ——单沟流域内重、中、轻度火烧区面积/ km^2 。



图 3 火烧迹地灰烬层厚度、土壤渗透性及斥水性强度测定

Fig. 3 Determination of ash layer thickness, soil water repellency, and permeability strength in the burned area

土壤斥水性的增强对产流和汇流参数的影响巨大,是火烧迹地流域洪峰流量激增的主要原因,极大地促进了火后泥石流的启动^[40]。通过现场圆盘入渗试验(图 3b)和水滴入渗试验(图 3c)^[41]统计研究区土壤斥水性和渗透性的空间分异规律。野外试验时,在不

同火烈度区随机选取试验点,除去土壤表层的草木灰,选取土壤表层 0, 2 cm 两个深度测定其饱和导水率(图 3b);同时在距圆盘 10 cm 范围内统计两个深度下土壤的斥水性强度(图 3c)。结果如图 4 所示,研究区火烧迹地土壤表层及以下 2 cm 均存在不同程度的斥

水性,且均与火烈度呈正相关,其中重度火烧区水滴入渗时间普遍超过1 h;土壤渗透性与火烈度和斥水性强度成反比,其中重度火烧区的土壤饱和和导水率为未火烧区的1/10~1/5。

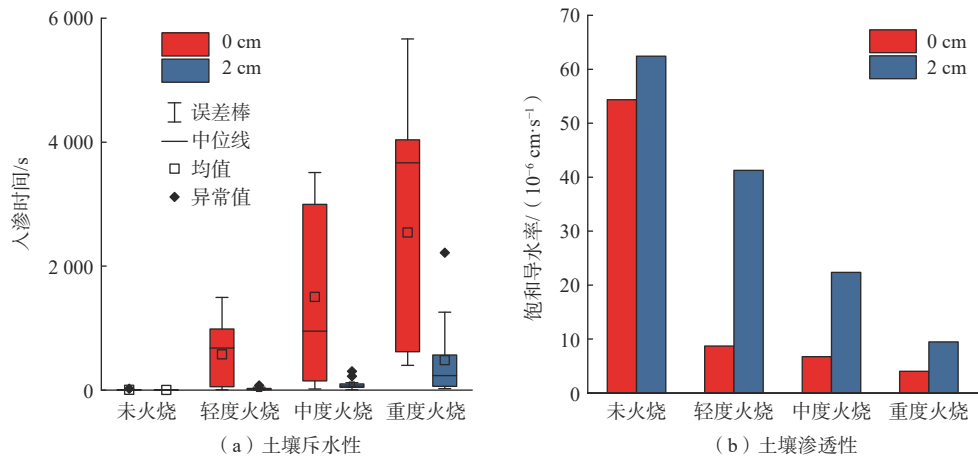


图 4 火烧区不同火烈度区不同深度土壤水文地质性质对比

Fig. 4 Comparison of soil hydrogeological properties at different depths of different fire severity in burned areas

现状条件下,火烧迹地坡表仍堆积有较厚的灰烬层,且土壤斥水性强、抗侵蚀能力弱,坡面径流汇集能力较强,加剧了雨季爆发火后泥石流的风险。

3 研究区火后泥石流易发性评价

3.1 易发性评价模型

林火造成流域内地质环境条件的改变,显著降低了泥石流启动的降雨阈值,常规泥石流的易发性模型对火后泥石流的适用性大大降低。由于火后泥石流的物源启动和运移机制十分复杂,目前对火后泥石流的条件因子尚未形成明确的共识。根据现有研究,中度及重度火烧能显著促进坡面径流,加剧坡面侵蚀^[42]。坡面灰烬泥沙层是火后泥石流的重要物源,并对坡面径流有显著影响。此外,陡峭的地形直接影响坡面和沟道的侵蚀速率以及沉积物的稳定性,促进火烧区地表径流向泥石流的转化^[43]。

胡卸文等^[22]选取2个火行为条件因子(中—重度火烧区面积占比、坡面灰烬-结构扰动层平均厚度)和

3个动力学条件因子(产沙区平均坡度、主沟平均纵坡降、沟道流域面积)作为火后泥石流易发性评价因子,基于专家经验法分别进行权重赋值,建立了火后泥石流易发性预测模型,其表达式为:

$$P = 0.4X_1 + 0.25X_2 + 0.2X_3 + 0.1X_4 + 0.05X_5 \quad (2)$$

式中: P ——单沟火后泥石流易发性总评分;

- X_1 ——中—重度火烧区面积占比得分;
- X_2 ——坡面灰烬-结构扰动层平均厚度得分;
- X_3 ——产沙区平均坡度得分;
- X_4 ——主沟平均纵坡降得分;
- X_5 ——流域面积得分。

该模型评价结果在西昌“3·30”火灾后第一个雨季得到了较好的验证,各项评价因子的权重符合野外客观实际,印证了该易发性模型的合理性,具有重要的指导意义。同时,参考《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》(TCAGHP006—2018)和 Cannon 等^[13]对火行为条件的定量分析方法,沿用了胡卸文等^[22]确定的如表4、表5所示的高、中、低等易发界限判别标准。

表 4 火后泥石流易发性评价因子等级划分及评分标准

Table 4 Grade division and scoring criteria of assessment factors of susceptibility

评价因子	不易发	低等易发	中等易发	高等易发
中—重度火烧区面积占比/%	<15	15~30	30~60	>60
坡面灰烬-结构扰动层平均厚度/cm	<1	1~2	2~3	>3
产沙区坡度/(°)	<15	15~25	25~32	>32
主沟平均纵坡降/‰	<52	52~105	105~213	>213
流域面积/km ²	≥100	<0.2或10~100	5~10	0.2~5
评分区间	[0,25)	[25,50)	[50,75)	[75,100]

表 5 火后泥石流易发性总评分等级划分标准

Table 5 Grading criteria for the total score of post-fire debris flow susceptibility

易发性	不易发	低等易发	中等易发	高等易发
打分	[0,25)	[25,50)	[50,75)	[75,100]

3.2 易发性评价结果

根据上述评价因子、易发性模型及判别标准,对重庆市 3 处火烧迹地共 95 条沟道开展了火后泥石流易发性评价,其中 1 条为高等易发,43 条为中等易发,44 条为轻等易发,7 条为不易发,分别占总数的 1.1%、45.3%、46.3% 和 7.4%(图 5、表 6)。巴南区火烧迹地共有 55 条潜在泥石流沟道,其中高、中、低等易发性沟道分别占对应易发性沟道总数的 100%、53.5% 和 56.8%。相对而言,北碚区和江津区的火烧迹地分别有 21 条和 19 条潜在泥石流沟,且几乎全部为中、低

等易发。尽管研究区主沟平均纵坡降普遍较陡,且流域面积多为 0.2~5 km²(高等易发,表 4),但由于 85% 以上的沟域产沙区坡度缓,且仅有 14.7% 的沟域内火烧程度较为严重(中—重度火烧区面积占比≥60%),导致重庆市 2022 年 8 月火烧迹地中—高等易发性泥石流沟道数量占比为 46.31%,其中江津区 12 条(63.16%)、巴南区 24 条(43.64%)、北碚区 8 条(38.10%)。根据野外调查及访问,研究区 95 条沟道在火烧前未爆发过大规模泥石流,但林火极大地改变了流域的地质环境条件,潜在降低了泥石流的触发降雨阈值。现状条件下各泥石流沟域内中度和重度火烧区仍残留有大量灰烬、泥沙等松散固体物源,且土壤表现出较强的斥水性,中等及高等易发性沟道在雨季一旦受集中降雨影响,爆发火后泥石流的可能性较大。

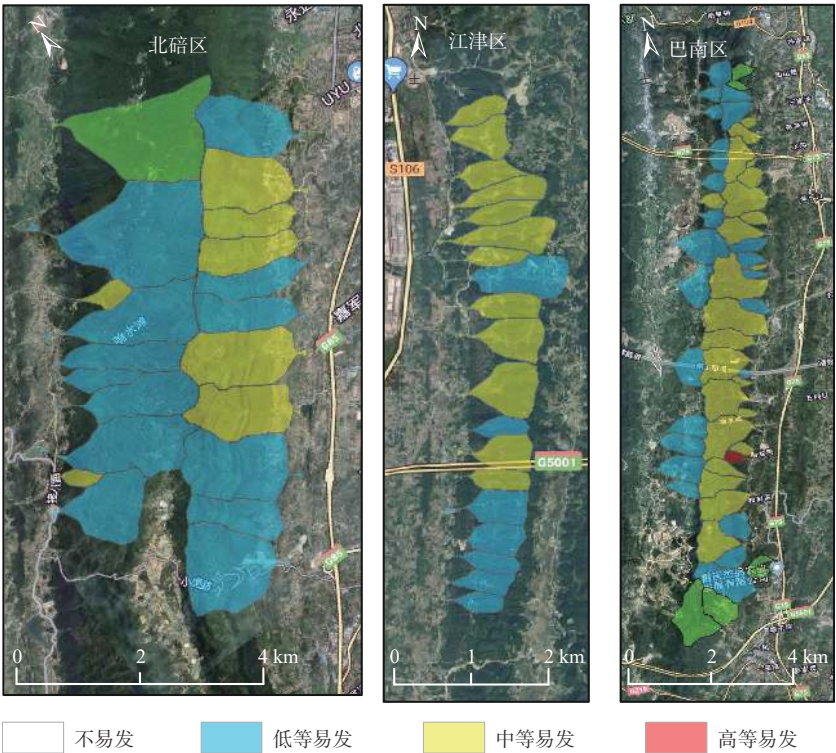


图 5 重庆森林火灾火烧区火后泥石流易发性分区图

Fig. 5 Zoning map of post-fire debris flow susceptibility in burned areas of Chongqing wildfire

表 6 重庆森林火灾不同火烧区火后泥石流沟道易发性数量统计

Table 6 Statistics on the susceptibility of debris flows in different burned areas of Chongqing wildfire /条

火烧区	沟道数量	高等易发	中等易发	低等易发	不易发
江津区	19	0	12	7	0
巴南区	55	1	23	25	6
北碚区	21	0	8	12	1
总计	95	1	43	44	7

4 讨论

采用专家经验预测模型对重庆森林火灾火后泥石流易发性进行了评价,结果显示研究区 95 条过火流域中,高等易发性沟域仅 1 条。根据现场调查结果,火灾发生后至今(2022 年 8 月 19 日—2023 年 3 月 13 日),研究区并无泥石流爆发记录。但同为红层地

区的西昌市 2020 年“3·30”火灾火烧迹地, 火后第一个雨季便爆发了上百次规模不等的泥石流^[44]。针对该评价模型在重庆火烧迹地的适用性, 将研究区与西昌火烧区进行对比, 对火后泥石流易发性评价结果及后续泥石流暴发情况展开分析。

结合经验模型中各评价因子的权重, 对两处火烧迹地火后泥石流易发性评价单因子评分及总评分结果进行对比(图 6)。影响火后泥石流启动的 3 个主控因素, 即火烧严重程度(中—重度火烧区面积占比 X_1)、坡面可启动物源量(灰烬-结构扰动层平均厚度 X_2)以及产沙区平均坡度(X_3), 重庆火烧迹地均显著低于西昌火烧迹地; 主沟平均纵坡降(X_4)二者并无明显差异; 而重庆火烧区的单沟流域面积(X_5)虽高于西昌火烧区, 但由于该因素影响权重最低, 对易发性评价结果影响较小。因此, 重庆火烧迹地火后泥石流的易发性评价结果低于西昌火烧迹地是合理的。

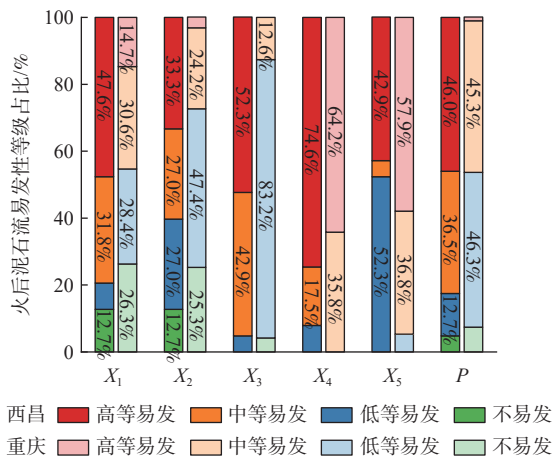


图 6 西昌和重庆火烧迹地不同火后泥石流易发性等级沟道数量占比结果对比

Fig. 6 Comparison of the proportions of the number of channels in different post-fire debris flow susceptibility grades in Xichang and Chongqing burned areas

统计火灾发生后火烧迹地的峰值小时降雨量、日降雨量和累积降雨量数据(2022 年 8 月 26 日—2023 年 2 月 2 日), 以及研究区近 10 年的月平均降雨量数据(图 7、图 8)。结果表明, 研究区在“8·19”火灾后已经过了雨季峰值期, 同年 8—12 月平均降雨较往年同期均值显著下降; 截至火后第一个雨季前(2023 年 3 月), 研究区降雨强度普遍较低, 其中峰值降雨量及累积降雨量均不高。在此背景下, 火灾发生后至今近 7 个月, 重庆火烧区的植被(以轻—中度火烧区的桉树和草本植物为主)具备充分的时间得以恢复, 使得坡

面截流和土壤抗侵蚀能力不断增强, 火后泥石流启动的降雨阈值有所提高。因而研究区在火后第一个雨季前没有爆发泥石流是符合实际的。

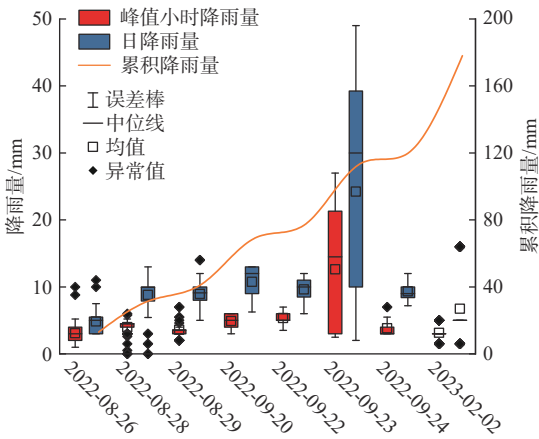


图 7 研究区 2022 年“8·19”火灾后降雨量统计
Fig. 7 Statistics of rainfall data in the study area after Chongqing wildfire in August 19th, 2022

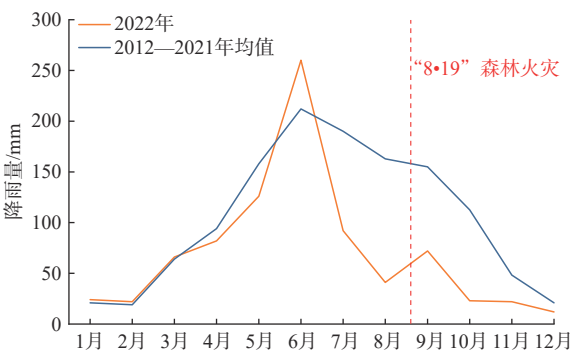


图 8 研究区历史月平均降雨量统计
Fig. 8 Statistics of historical monthly average precipitation in the study area

根据野外调查结果, 火烧区沟内植被覆盖密集且分布有大量刚竹, 一方面沟道附近未燃烧的竹林具有较强的韧性分布密集, 泥石流发生时可起到类似于梳齿坝的拦挡作用; 另一方面, 烧毁后的竹林枝干韧性大大削弱、整体性较差, 散乱分布于沟道中容易形成泥石流堵溃点(图 2f)。在降雨强度较小时尚且能拦截部分泥石流固体物质运移至沟口, 但在雨季一旦达到火后泥石流启动的降雨阈值, 研究区中等及高等易发性流域爆发火后泥石流的风险将显著提高。

5 结论

(1)2022 年 8 月重庆市江津区、巴南区、北碚区特大森林火灾, 总过火面积达 34.84 km², 其中重度火烧区占比 9.6%, 中度火烧区占比 34.0%, 轻度火烧区占

比 56.4%; 林火烈度显著影响火烧区坡面灰烬-结构扰动层厚度。调查显示重度、中度和轻度火烧区平均厚度分别为 5.10、3.28、1.15 cm。

(2) 基于专家经验预测模型, 对重庆 3 处火烧迹地共 95 条潜在泥石流沟道开展火后泥石流易发性评价, 结果表明研究区高等、中等、低等及不易发沟道分别为 1 条、43 条、44 条和 7 条, 分别占总数的 1.1%、45.3%、46.3% 和 7.4%。

(3) 尽管研究区主沟平均纵坡降普遍较陡, 且流域面积多为 0.2~5 km² (高等易发), 但由于 85% 以上的沟域产沙区坡度缓, 且仅有 14.7% 的沟域内火烧程度较为严重, 导致中—高等易发性泥石流沟道数量占比为 46.31%。考虑到现状条件下各泥石流沟域内中度和重度火烧区仍残留有大量灰烬、泥沙等松散固体物源, 且土壤表现出较强的斥水性, 中等及高等易发性沟道在雨季一旦受集中降雨影响, 爆发火后泥石流的可能性较大。

参考文献 (References):

- [1] JALALUDIN B, JOHNSTON F, VARDOULAKIS S, et al. Reflections on the catastrophic 2019-2020 Australian bushfires[J]. *Innovation (Cambridge (Mass))*, 2020, 1(1): 100010.
- [2] 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)]
- [3] 中华人民共和国应急管理部. 2022 年全国自然灾害基本情况 [EB/OL]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2022(2023-01-13) [2023-03-08]. [Ministry of emergency management of the people's republic of China. Basic information on national natural disasters in 2022[EB/OL]. Beijing: Ministry of emergency management of the people's republic of China, 2022(2023-01-13) [2023-03-08]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113_440478.shtml. (in Chinese)]
- [4] WALL S A, ROERING J J, RENGERS F K. Runoff-initiated post-fire debris flow Western Cascades, Oregon[J]. *Landslides*, 2020, 17(7): 1649–1661.
- [5] 胡卸文, 侯羿腾, 王严, 等. 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 106–112. [HU Xiewen, HOU Yiteng, WANG Yan, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 106–112. (in Chinese with English abstract)]
- [6] KEAN J W, STALEY D M, LANCASTER J T, et al. Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California, USA: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment[J]. *Geosphere*, 2019, 15(4): 1140–1163.
- [7] OUYANG Chaojun, XIANG Wen, AN Huicong, et al. Mechanistic analysis and numerical simulation of the 2021 post-fire debris flow in Xiangjiao Catchment, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, 128(1): e2022JF006846.
- [8] WELLS W G II. The effects of fire on the generation of debris flows in southern California[J]. *Reviews in Engineering Geology*, 1987, 7: 105–114.
- [9] MOODY J A, MARTIN D A. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(10): 1049–1070.
- [10] CANNON S H, BOLDT E M, LABER J L, et al. Rainfall intensity–duration thresholds for postfire debris-flow emergency-response planning[J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(1): 209–236.
- [11] RILEY K L, BENDICK R, HYDE K D, et al. Frequency–magnitude distribution of debris flows compiled from global data, and comparison with post-fire debris flows in the western U. S[J]. *Geomorphology*, 2013, 191: 118–128.
- [12] NYMAN P, SMITH H G, SHERWIN C B, et al. Predicting sediment delivery from debris flows after wildfire[J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 173–186.
- [13] CANNON S H, GARTNER J E, RUPERT M G, et al. Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(1/2): 127–144.
- [14] RAYMOND C A, MCGUIRE L A, YOUNBERG A M, et al. Thresholds for post-wildfire debris flows: Insights from the Pinal Fire, Arizona, USA[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(6): 1349–1360.
- [15] STALEY D M, KEAN J W, RENGERS F K. The recurrence interval of post-fire debris-flow generating rainfall in the southwestern United States[J]. *Geomorphology*, 2020, 370: 107392.

- [16] 杨瀛, 胡卸文, 王严, 等. 八角楼乡火后泥石流空间发育特征 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 818 – 827. [YANG Ying, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Spatial development characteristics of post-fire debris flow in bajiaolou town[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 818 – 827. (in Chinese with English abstract)]
- [17] HOCH O J, MCGUIRE L A, YOUNBERG A M, et al. Hydrogeomorphic recovery and temporal changes in rainfall thresholds for debris flows following wildfire[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(12): e2021JF006374.
- [18] YANG Ying, HU Xiewen, HAN Mei, et al. Post-fire temporal trends in soil properties and revegetation: Insights from different wildfire severities in the Hengduan Mountains, Southwestern China[J]. *CATENA*, 2022, 213: 106160.
- [19] THOMAS M A, RENGERS F K, KEAN J W, et al. Postwildfire soil-hydraulic recovery and the persistence of debris flow hazards[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(6): e2021JF006091.
- [20] STALEY D M, GARTNER J E, SMOCZYK G M, et al. Emergency assessment of post-fire debris-flow hazards for the 2013 Mountain fire, southern California[R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 2013.
- [21] CANNON S H, GARTNER J E, WILSON R C, et al. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 250 – 269.
- [22] 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后泥石流易发性评价 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 762 – 771. [HU Xiewen, JIN Tao, YIN Wanqing, et al. The characteristics of forest fire burned area and susceptibility assessment of post-fire debris flow in jingjiu township, Xichang city[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 762 – 771. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 任云. 四川九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理及危险性评价 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [REN Yun. Disaster Mechanism and Risk Assessment of Debris Flow after Sejiagou Fire in Jiulong County, Sichuan Province[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] JOHNSON P A, MCCUEN R H, HROMADKA T V. Magnitude and frequency of debris flows[J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 123(1/2): 69 – 82.
- [25] HUNGR O, MORGAN G C, KELLERHALS R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(4): 663 – 677.
- [26] JIN Tao, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Susceptibility prediction of post-fire debris flows in Xichang, China, using a logistic regression model from a spatiotemporal perspective[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1306.
- [27] ADDISON P, OOMMEN T, SHA Qiuying. Assessment of post-wildfire debris flow occurrence using classifier tree[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 505 – 518.
- [28] KERN A N, ADDISON P, OOMMEN T, et al. Machine learning based predictive modeling of debris flow probability following wildfire in the intermountain western United States[J]. *Mathematical Geosciences*, 2017, 49(6): 717 – 735.
- [29] 李峰, 张效亮, 刘华国. 重庆市主要构造地震危险性评价 [J]. 地震地质, 2013, 35(3): 518 – 531. [LI Feng, ZHANG Xiaoliang, LIU Huaguo. Seismic hazard analysis of the main faults in Chongqing urban area[J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(3): 518 – 531. (in Chinese with English abstract)]
- [30] MILLER J D, THODE A E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(1): 66 – 80.
- [31] FASSNACHT F E, SCHMIDT-RIESE E, KATTENBORN T, et al. Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 95: 102262.
- [32] PARSONS A, ROBICHAUD P R, LEWIS S A, et al. Field guide for mapping post-fire soil burn severity[R]. Fort Collins: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2010.
- [33] 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. [WANG Yan, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Material initiation of debris flow generation processes after hillside fires[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1415 – 1423. (in Chinese with English abstract)]
- [34] GABET E J, BOOKTER A. Physical, chemical and

- hydrological properties of Ponderosa pine ash[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20(3): 443.
- [35] 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)]
- [36] 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)]
- [37] 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)]
- [38] GABET E J, STERNBERG P. The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 666 – 673.
- [39] BODÍ M B, MARTIN D A, BALFOUR V N, et al. Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 103 – 127.
- [40] 张绍科, 胡卸文, 王严, 等. 四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 79 – 85. [ZHANG Shaoke, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 79 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 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)]
- [42] HYDE K D, WILCOX A C, JENCSO K, et al. Effects of vegetation disturbance by fire on channel initiation thresholds[J]. *Geomorphology*, 2014, 214: 84 – 96.
- [43] STALEY D M, NEGRI J A, KEAN J W, et al. Prediction of spatially explicit rainfall intensity–duration thresholds for post-fire debris-flow generation in the western United States[J]. *Geomorphology*, 2017, 278: 149 – 162.
- [44] CAO Xichao, HU Xiewen, HAN Mei, et al. Characteristics and predictive models of hillslope erosion in burned areas in Xichang, China, on March 30, 2020[J]. *CATENA*, 2022, 217: 106509.

编辑: 王支农