

四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析

杨相斌, 胡卸文, 曹希超, 金涛, 席传杰, 黄健, 杨瀛

Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province

YANG Xiangbin, HU Xiewen, CAO Xichao, JIN Tao, XI Chuanjie, HUANG Jian, and YANG Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

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

张绍科, 胡卸文, 王严, 金涛, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 79-85

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

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203039

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.

四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析

杨相斌¹, 胡卸文^{1,2}, 曹希超¹, 金涛¹, 席传杰¹, 黄健¹, 杨瀛¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 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(西南交通大学), 四川 成都 610031)

摘要: 火后泥石流是一种裹挟大量松散物质的特殊性洪流, 与林火密切相关, 其成灾特征与常规泥石流差异显著, 因此常规泥石流的防治经验对其不完全适用。西昌“3·30”火灾后, 火烧迹地火后泥石流频发, 严重威胁当地人民生命财产安全。研究火后泥石流的成灾特征, 并针对性提出综合防治措施是必要且迫切的。文中以四川省凉山州西昌市新村电池厂沟为研究对象, 分析了火烧迹地及流域特征, 研究了火后泥石流成灾特征并提出相应的防治措施。结果表明, 电池厂沟过火面积占总面积的 83.37%, 严重火烧区占 33.47%, 地表灰土层广泛堆积于坡面, 松散物源中坡面物源占 69.83%。火后泥石流表现出频发性: 首次暴发于火后一个月左右, 首个雨季累计暴发 5 次; 且泥石流起动降雨阈值低, 易发性激增。据此, 对该沟提出相应的防治措施: 短期应急(坡面枯木清理、植被恢复、简易谷坊坝); 中期治理(沟内拦砂坝辅以坝后沉沙池); 长期预防(森林防火、植被保护、预警避险)。短期、中期方案已在电池厂沟实施, 工程竣工后至今, 综合治理效果得到了初步检验, 可为今后火后泥石流防治提供参考。

关键词: 火后泥石流; 火烧迹地; 成灾特征; 综合防治; 工程治理

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0001-08

Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province

YANG Xiangbin¹, HU Xiewen^{1,2}, CAO Xichao¹, JIN Tao¹, XI Chuanjie¹, HUANG Jian¹, YANG Ying¹

(1. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety (Southwest Jiaotong University), Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Post-fire debris flow is a special torrent containing a large amount of loose material, which is closely related to forest fire. Its characteristics are significantly different from the conventional debris flow. Therefore, conventional debris flow prevention experience is not completely applicable to it. After the fire that broke out on March 30 in Xichang, debris flow

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-04-25

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731285)

第一作者: 杨相斌(1996-), 男, 云南楚雄人, 硕士研究生, 主要从事工程地质、地质灾害方面的研究。E-mail: xbyoung@qq.com
通讯作者: 胡卸文(1963-), 男, 浙江金华人, 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

occurred frequently in burned area, seriously threatening the safety of local people's lives and property. It is necessary and urgent to study the characteristics of debris flow after fire and put forward comprehensive prevention and control measures. This study takes Dianchichang gully in Xichang, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province as a typical case. Analyzed the characteristics of burned area and watershed. Studied the characteristics of post-fire debris flow disaster. And proposed the corresponding prevention and control measures. The results show that the burned area covered 83.37%, seriously burned areas accounted for 33.47%, resulting in widely spread ash layer. Slope provenance accounted for 69.83%. Post-fire debris flow occurred one month after the forest fire, and a total of 5 debris flows occurred in the first rainy season. Moreover, the threshold of debris flow starting rainfall is small and the occurrence of debris flow increases rapidly. The post-fire debris flows in the study site are characterized by high frequency and sudden occurrence. Accordingly, the corresponding prevention and control measures were propound as follows. The rapid emergency treatment measures include clarifying dead wood on slope surface, vegetation restoration, and building of simple barrier dams in gully. Medium-term governance measures are debris dams in gully and grit basins. And long-term prevention measures are a combination of forest fire prevention and vegetation protection. This scheme has been implemented in Dianchichang gully. Since the completion of these projects, the effects of comprehensive treatments have been preliminarily proved effective for the mitigation of this type of special debris flow. It can provide reference for post-fire debris flow prevention in the future.

Keywords: post-fire debris flow; burned area; disaster characteristic; comprehensive control measures; engineering management

0 引言

森林火灾是我国西南山区常见灾害,近 5 年来四川省发生林火 832 起,主要集中在川西南山区^[1]。林火烧毁植被,改变地表径流条件,产生大量松散的灰烬层和泥沙^[2],火后泥石流 (post-fire debris flow) 是火灾后最为严重的次生灾害。据统计,美国西部地区约 35% 的火烧迹地会发生火后泥石流,常表现出高频暴发、降雨阈值极低等特点^[3-4],而在川西南地区,近 10 年来约有 70% 的火烧迹地发生了泥石流灾害^[5]。火后泥石流暴发周期与植被恢复密切相关,火后第一个雨季是泥石流高发期,活跃期通常持续 3~5a^[6]。其成灾特征及成灾机理与常规泥石流差异显著^[7]。

目前,针对常规泥石流的防控体系已相对成熟^[8],陈晓清等^[9]认为地震极重灾区泥石流治理应在震后 3~5a 实施效果更佳,胡卸文等^[10]提出应根据沟道地形特征,结合保护对象,合理采用拦挡、固坡、排导等工程的有机组合。大型拦挡工程防治效果突出但施工周期较长,而火后泥石流的暴发与林火的时间间隔通常较短。因此,将常规泥石流的防治经验运用于火后泥石流时存在一定局限性。针对火后泥石流,国外学者提出^[11-13]除了采用常规拦砂坝、导流堤和植被恢复等措施,还可在火烧迹地采用稻草覆盖的方法减少坡面侵蚀,在具有笔直树干的区域,还可同时使用原木拦渣坝

拦粗放细,取得较好的防治效果。然而,我国西南山区山高林密,交通不便,原材料运输至火烧迹地较困难,泥石流流域多呈深 V 型,坡面较陡,坡面大规模稻草覆盖难以实施,将树干横置于沟内设置原木拦渣坝,一定程度上能起到疏水拦砂的效果,但发生堵溃则会扩大泥石流规模^[14]。可见国外的防治经验并不完全适用。因此,针对我国西南地区火后泥石流的成灾特点提出相应的综合防控措施无疑具有重要意义,其成果可填补我国这一研究领域的空白。

2020 年 3 月 30 日,四川省凉山州西昌市经久乡发生森林火灾,作者团队于火烧后次月(2020 年 4 月)赶赴现场,并对火烧区共 63 条潜在泥石流沟道进行了火后泥石流易发性评价,其中电池厂沟为易发性评分最高的泥石流沟^[1]。因此,本中以电池厂沟为例,通过遥感解译、现场调查、室内外试验查明了该流域及火烧迹地的基本特征、泥石流成灾特征,并结合实际工程治理措施总结提炼出相应的防治理念,以期为西南地区其他火后泥石流的防治提供参考。

1 研究区概况

电池厂沟位于四川省凉山彝族自治州西昌市新村。西临安宁河谷平原,东临琼海盆地,山势陡峭,沟谷多呈 V 型,为构造侵蚀中山地貌。区内出露地层主要为第四系全新统泥石流堆积层(Q_4^{sef})、残坡积层

(Q_4^{dl+el}), 白垩系下统小坝组(K_1x)粉砂岩、泥岩。火烧以前植被覆盖率达 90 %, 植被类型以灌木和针叶林为主。研究区属亚热带西南季风气候, 受周围群山阻隔, 区内小气候既有高原干燥气候的特点又有充沛的降雨, 多年年平均降雨 1 014 mm, 降雨集中于 6—9 月, 占全年的 84.77 %, 雨型多为暴雨。区内河流量随季节变化明显, 旱季河床裸露断流, 雨季受降雨影响常水位暴涨, 易发生山洪灾害。

2 火后泥石流成灾特征

2.1 火烧迹地特征

2020 年“3·30”经久乡森林火灾对研究区的植被造成严重破坏。文中通过现场调查植被烧毁情况及表层土壤特征, 将林火烈度分为重度、中度、轻度和未火烧

4 个等级, 并划定火烈度边界; 通过分析研究区火烧前后(2020 年 3 月 25 日及 2020 年 4 月 5 日)Sentinel-2 L1C 多光谱卫星遥感影像(<https://EarthExplorer.usgs.gov>), 参考相关研究^[15], 基于地物红外波段的差异计算研究区的 dNBR 值(火烈度监测指数)^[15], 并根据野外划定边界确认各火烈度区的 dNBR 阈值, 西昌地区不同火烈度 dNBR 阈值分别为 0.12, 0.33, 0.48, 据此绘制火烈度分布图(图 1)。统计结果表明, “3·30”西昌森林火灾总过火面积约 27.58 km², 各火烈度区面积特征的统计结果见表 1。研究区重度及中度火烧区集中分布于电池厂沟的上游区域(图 1), 植被及枯落物燃烧形成大量的灰烬层堆积于坡面及沟道, 对火烧迹地坡面灰烬层及松散扰动层厚度进行现场实测(图 2), 平均厚度为 5.1 cm。

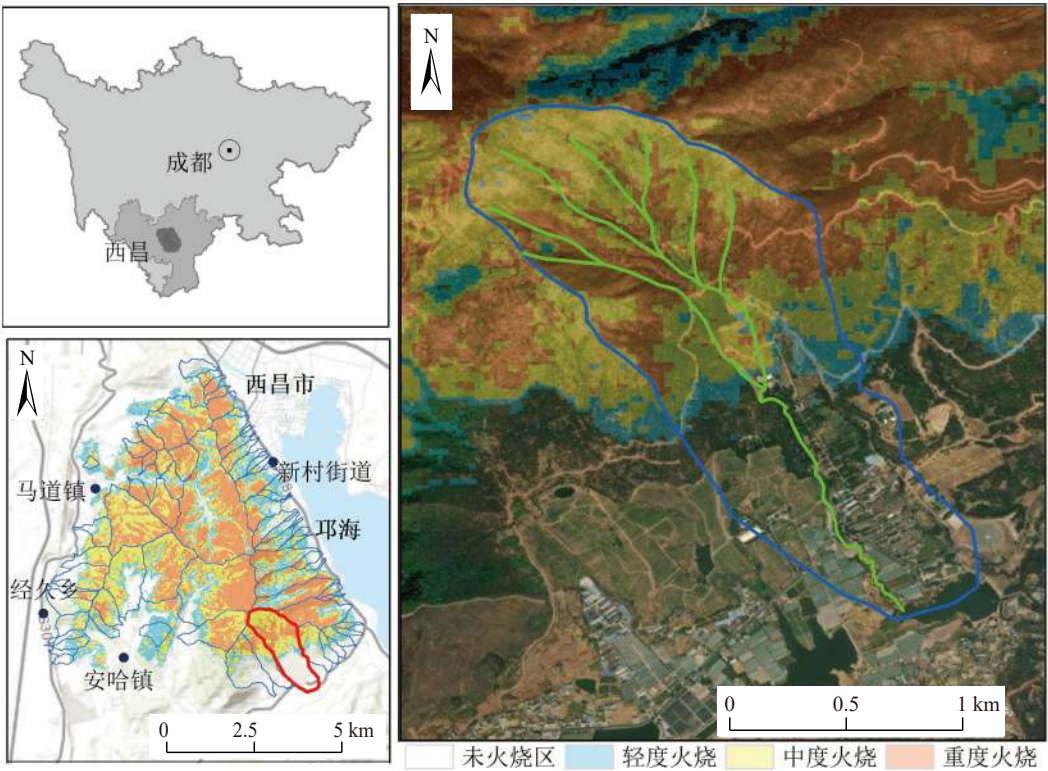


图 1 电池厂沟火烈度分布图

Fig. 1 Fire severity distribution of Dianchichang gully

表 1 电池厂沟火烧迹地不同火烈度判别特征

Table 1 Discriminant characteristics of different fire intensity in burned area in Dianchichang gully

火烈度	特征	dNBR值	面积/km ²
未火烧	火烧前后地表覆盖物无变化	<0.12	—
轻度火烧	超过50%的枯枝落叶完全烧毁	0.12 ~ 0.33	5.40
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烧毁	0.33 ~ 0.48	9.57
严重火烧	枯枝落叶和粗可燃物均被完全烧毁,地表为灰烬层覆盖	>0.48	12.61

布,是泥石流的主要物源。另外,泥石流不断侵蚀沟道内原有堆积物,侧蚀冲刷导致岸坡松散堆积体失稳形成浅表层滑坡,进一步增大了火后泥石流的物源规模。

表 2 电池厂沟泥石流物源统计表
Table 2 Statistics of different sources of debris flow in Dianchichang gully

物源类型	总体积/10 ⁴ m ³	体积分数/%
沟道物源	1.90	11.84
坡面物源	11.20	69.83
滑坡物源	2.94	18.33

2.3 泥石流成灾特征

在“3·30”火灾之前,电池厂沟最近一次较大规模的泥石流发生于 1991 年 8 月。“3·30”火灾后第一个雨季共暴发了 5 次不同规模的泥石流灾害。2020 年 5 月 1 日首次暴发泥石流,随后的 6 月 17 日、6 月 23 日(图 3 下照片)、7 月 18 日以及 8 月 13 日也相继暴发,泥石流自上游沟道起动,顺沟而下沿途铲刮,导致沟道深切拉槽(图 4),泥石流冲毁临时道路,淹没部分施工场地。

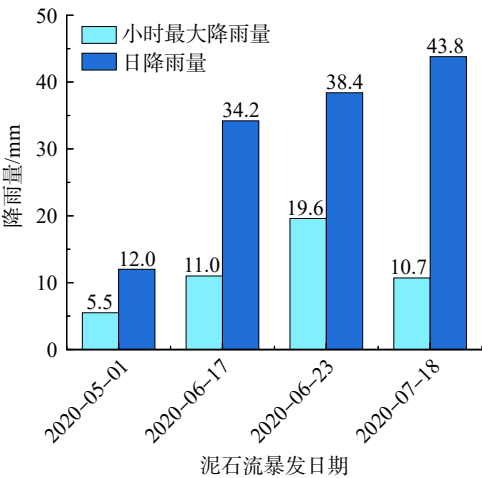


图 4 各次火后泥石流降雨量
Fig. 4 Rainfall of each post-fire debris flow

收集火烧区东南方向 1.7 km 外的雨量观测站资料并统计(图 4),第 5 次雨量计异常未收集到信息。5 月 1 日首次暴发泥石流时,日累计降雨量仅为 12 mm,小时最大降雨量为 5.5 mm,规模较大的“6·23”泥石流暴发时,日累计降雨量为 38.4 mm,小时最大降雨量为 19.6 mm。根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》显示,研究区内最大日降雨量均值为 65 mm,最大小时降雨量均值为 30 mm。对比显示,电池厂沟数次泥石流暴发时降雨量在当地是常见的中到大雨,首次暴发时降雨甚至是小雨,可见火后泥石流暴发所需降雨阈值降低。

该沟道火烧前已 29 年未发生泥石流,但火烧后仅 1 个月便首次暴发泥石流,首个雨季暴发了 5 次泥石流灾害,反映出火后泥石流突发性和频发性。

3 火后泥石流防治措施

3.1 防治理念

针对火后泥石流的突发性特征,应进行快速应急处置,防止首次暴发的泥石流造成灾害,针对其雨季多次暴发、暴发间隔时间短的特点,应修建半永久或永久工程,保护沟口建筑道路等设施,在设置工程设施时,考虑火后泥石流具有明显的堵塞溃决和下切揭底特征^[16],针对堵塞效应,关键在于疏浚沟道,消除堵塞,控规消能;针对其下切揭底特点,关键在于降低泥石流侵蚀力,拦挡回淤,护坡固源,防止下蚀。此外,林火对流域内植被造成严重破坏,在设置工程时也应致力于长期生态恢复及森林防火,从源头减小火后泥石流发生的可能性。

3.2 短期应急措施

快速应急处置是火后泥石流防治中必不可少的环节,常采用坡面清理、植被恢复及简易谷坊坝等措施。林火后及时对火烧迹地大部分区域进行坡面清理,重点在流域中上游的重度火烧区展开,将散落的枯枝树干清理后统一堆放或搬运回收利用(图 5),防止沟道堵塞;雨季前在火烧区播散草籽,加快植被恢复;在沟道内及主支沟交汇处修建简易谷坊坝群(图 5)。

坡面清理、植被恢复,其主要作用是消除堵塞、护坡固源。坡面清理防止散落枯木进入沟道形成堵塞点,植被恢复,减弱水土流失效应,减少因降雨冲刷造成坡面松散灰烬层起动力,从源头减少参与泥石流活动的物源量,控制泥石流规模,同时也减缓下游拦挡措施拦蓄压力。

简易谷坊坝群主要作用是控规消能,防止下切。林火后快速修建简易梯级谷坊坝群,可拦截火烧后小规模泥石流的冲出物质(图 5),避免泥石流冲出物漫流影响工程建设及居民生产生活,为永久工程建设争取时间,同时通过拦蓄松散堆积物,抬高沟床,减弱泥石流的下切和侧蚀,梯级回淤稳固坡岸坡脚,抑制浅层滑坡形成。

坡面清理、植被恢复及建议谷坊坝群等措施已在电池厂沟治理工程中实施,坡面清理、播散草籽等工作在林火熄灭后便快速开展,于 2020 年 4 月完成;本次治理工程共设置 2 处简易谷坊坝群,支沟简易谷坊坝群设置 2 座,主沟简易谷坊坝群设置 3 座,于 2020 年 5 月完成。此次治理中简易谷坊坝采用编织袋装土堆砌而成,

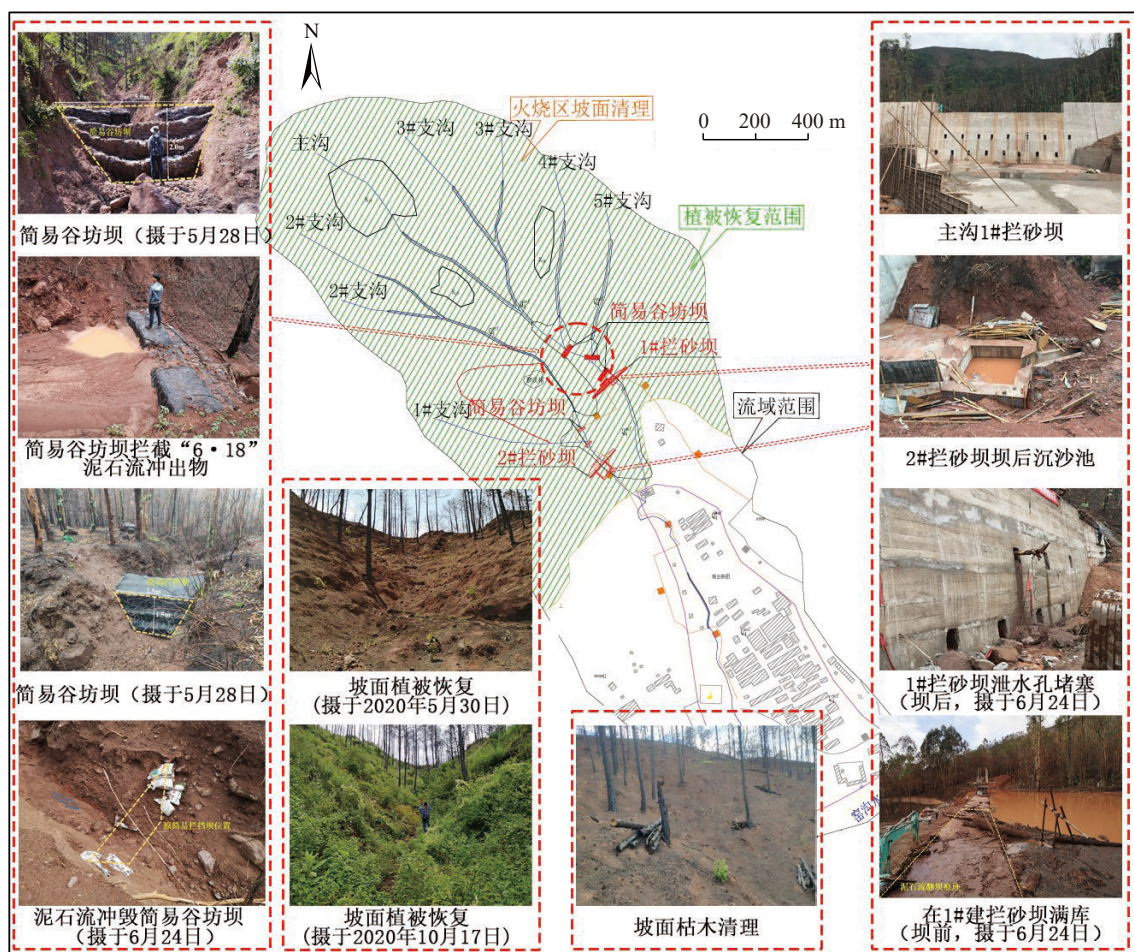


图 5 “6·23”泥石流造成沟道下切

Fig. 5 Gully bed was eroded by debris flow on 23rd June

对首次暴发的泥石流起到了拦挡效果,但再暴发较大规模泥石流时,简易谷坊坝由于强度不足发生变形或破坏,失去了拦挡作用。6月23日暴发的泥石流冲毁了主沟内一座简易谷坊坝(图5),坝前拦挡的早期泥石流堆积物成为新的沟道物源参与泥石流运动,产生“零存整取效应”,防治措施没有发挥防治效能,反而加重了灾害的作用。对此,在快速实施短期应急处置后还应设置永久工程措施,防止泥石流冲出物漫流掩埋建筑道路及污染水体。

3.3 中期治理措施

中期治理是火后泥石流防治中的关键环节,可采用半永久、永久工程等措施。基于防治理念,常用工程措施有沟内拦砂坝辅以坝后沉沙池。拦砂坝拦截几乎所有火后泥石流冲出固体物质,保障沟口保护对象的安全,同时沉沙池增大过水断面降低流速,沉淀去除水中大部分泥砂颗粒,避免了高含沙水体对主河及水库的景观污染。拦砂坝作为永久工程,是火后泥石流综合防中

的控制性措施,对火后泥石流的长期防灾具有关键作用。

此次电池厂沟治理工程中永久工程设置2座拦砂坝(图5),分别位于主沟中下游及1#支沟沟口,在2#拦砂坝坝后设置沉沙池过滤水质(图5)。永久工程于2020年5月施工,2020年8月底竣工,工程完成前后经历了2020、2021年雨季的检验。2020年雨季先后暴发的5次泥石流均未造成人员伤亡,2021年雨季期间仅发生了小规模泥石流,未造成灾害,目前拦砂坝坝体完好、库容充裕,可继续发挥拦蓄作用,治理工程效果得到了初步体现。值得注意的是,由于火后泥石流冲出物黏性高,多含枯枝树干等,易造成拦砂坝泄水孔堵塞排水不畅,存在安全隐患。6月17日暴发泥石流导致在建1#拦砂坝部分泄水孔堵塞,未及时疏通,随后6月23日再次暴发泥石流,拦砂坝泄水孔全部堵塞,泥石流流体无法及时排泄(图5),造成1#拦砂坝(当时已建有效坝高6m)满库(图5),泥石流翻坝后漫流,冲毁临时

道路。对此,在火后泥石流发生后,应检查拦砂坝排水情况,若泄水孔堵塞应及时疏通,确保拦砂坝能继续正常发挥作用。

3.4 长期预防措施

电池厂沟治理工程实施后,2021 年末暴发大规模泥石流。一方面是大多易于起动的物源已先后参与泥石流运动,另一方面是治理工程的控制作用初见成效。拦砂坝、梯级谷坊坝拦挡回淤,稳固沟床,同时沟床及坡面新生长的植被(草本、灌木为主)根系交织生长,进一步固定了坡面松散固体物质。治理措施实施后,原有的物源起动条件及沟道形态发生变化,大量分布的坡面物源由于工程约束,不能大规模起动,少量参与泥石流运动的物源受到沟道内拦砂坝的拦挡,在库内停积,泥石流运动过程以少量物源起动—沟内减势淤积—工程区停积为主。

可见,随着工程治理和植被恢复,火后泥石流活跃性逐渐降低,流域生态系统逐渐恢复,水土保持能力稳步趋向火烧前水平。此时,考虑火后泥石流的长期预防,应重点关注森林防火和植被保护,避免再次发生林火,从源头根治火后泥石流灾害。针对植被恢复,火烧迹地植被完全恢复需要 6~9a 时间^[17],恢复初期植被类型主要以草本、灌木为主,群落结构与功能还不完善,乔木由于种子库的损伤及生长所需条件较高,短期内难以恢复,可进行人工干预,如移栽树苗、封山育林等^[18]。此外,在植被恢复过程中,还需注意紫金泽兰等外来生物入侵,必要时进行人为干预调控^[19]。

火后泥石流起动降雨阈值低,暴发突然,开展针对性的预警避险也是十分必然的。作者团队基于火后泥石流暴发降雨阈值、实时降雨监测与群测群防于一体,提出了一套适用于山区火后泥石流的预警避险方案^[20],该方案已在喜德县中坝村火后泥石流(2020 年 6 月 4 日)避险中得到了成功应用,效果显著。

综上,火后泥石流综合防治措施可分 3 个阶段实施(图 6)。

4 结论

(1)电池厂沟火烧前已 29a 未暴发泥石流,火烧后遇到短时中强降雨便激发泥石流,首个雨季共发生了 5 次泥石流灾害,反映出火后泥石流所需降雨阈值较低,具有突发性、频发性特征。

(2)火后泥石流治理应采用短期快速应急处置措施、中期永久工程措施与长期预防手段相结合,应急措

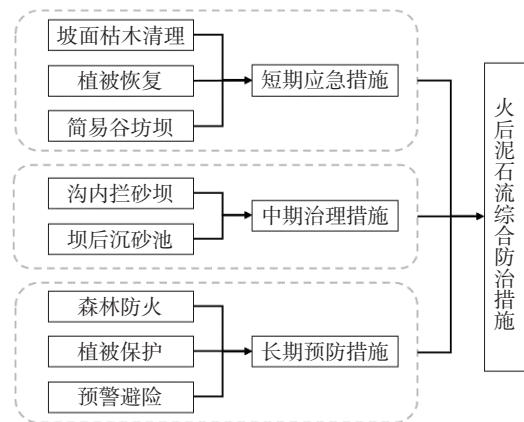


图 6 火后泥石流综合防治措施阶段示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stage of comprehensive control measures for post-fire debris flow

施可对首次暴发的火后泥石流进行临时拦挡,修建永久工程在长期内保障泥石流威胁对象的安全,长期预防则从源头避免火后泥石流发生。

(3)短期快速应急处置措施有坡面清理、坡面植被恢复、沟内修建梯级简易谷坊坝,以此稳固坡面物源,防止枯木进入沟道形成堵溃,逐级拦挡,稳固沟槽岸坡,削弱泥石流动能;中期永久治理工程采用沟内拦砂坝辅以沉砂池,拦截火后泥石流冲出物,减少对沟口居民、道路的掩埋,同时沉砂池过滤水质减少水体污染。长期预防着重于森林防火和植被保护,避免再次发生林火形成火后泥石流。

(4)文中提出的火后泥石流综合防治措施已在电池厂沟火后泥石流治理工程中实施,工程竣工后该沟泥石流未再次造成灾害,植被恢复良好,防治效果已初步体现。可为西南山区火后泥石流防治提供参考。

参考文献(References):

- [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)]
- [2] 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)]
- [3] CANNON S, RENEAU S. Conditions for generation of fire-

- related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25: 1103 – 1121.
- [4] JOSEPH E, AL E. Compilation of data relating to the erosive response of 606 recently-burned basins in the Western U. S. [R]. U. S. Geological Survey Open-File, 2005.
- [5] 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)]
- [6] DENNIS M S, JOSEPH E G, JASON W K. Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for post-fire flash floods and debris flows in the area burned by the Waldo canyon fire, Colorado, USA [M] // *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 621 – 624.
- [7] 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)]
- [8] 高相波, 李丽慧. 热水河流域典型泥石流灾害成因机制与协同防治研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1039 – 1048. [GAO Xiangbo, LI Lihui. Initiation mechanism of typical debris flow hazard in hot water river basin and synergetic prevention study [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1039 – 1048. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈晓清, 崔鹏, 赵万玉. 汶川地震区泥石流灾害工程防治时机的研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 125 – 130. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, ZHAO Wanyu. Optimal timing for the control of debris flow in Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(3): 125 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡卸文, 韩玫, 梁敬轩, 等. 汶川地震灾区泥石流若干关键问题 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 331 – 340. [HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Some key problems on debris flow in Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(2): 331 – 340. (in Chinese with English abstract)]
- [11] FOX D M. Evaluation of the efficiency of some sediment trapping methods after a Mediterranean forest fire [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(2): 258 – 265.
- [12] DE GRAFF J V. Improvement in quantifying debris flow risk for post-wildfire emergency response [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2014, 1: 5.
- [13] DEWOLFE V G, SANTI P M, EY J, et al. Effective mitigation of debris flows at Lemon Dam, La Plata County, Colorado [J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 366 – 377.
- [14] 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)]
- [15] 王晓莉, 王文娟, 常禹, 等. 基于NBR指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 967 – 974. [WANG Xiaoli, WANG Wenjuan, CHANG Yu, et al. Fire severity of burnt area in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, Northeast China based on normalized burn ratio analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 967 – 974. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 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)]
- [17] 吴超, 徐伟恒, 肖池伟, 等. 滇中地区典型火烧迹地恢复率动态变化及其影响因子 [J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2465 – 2474. [WU Chao, XU Weiheng, XIAO Chiwei, et al. Dynamic change of recovery ratios and influencing factors of typical post-fire burn areas in central Yunnan Province [J]. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2465 – 2474. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘鲁光, 朱兆棋, 陈曦, 等. 喜德县中坝村火烧迹地植被恢复初期优势种生态位与种间联结 [J]. 西部林业科学, 2022, 51(1): 110 – 117. [LIU Luguang, ZHU Zhaoqi, CHEN Xi, et al. Ecological niche and interspecific association of dominant species in the initial stage of vegetation restoration in Zhongba Village of Xide County [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, 51(1): 110 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈曦, 杨丹, 胡翠华, 等. 西昌市泸山景区森林火灾后植被恢复现状 [J]. 林业科技通讯, 2020(4): 13 – 17. [CHEN Xi, YANG Dan, HU Cuihua, et al. Vegetation restoration after forest fire in Lushan Scenic area, Xichang City [J]. *Forest Science and Technology*, 2020(4): 13 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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)]