

火后泥石流烧猪皮效应

陈洪凯^{1,3}, 张斌^{1,3}, 王圣娟², 王立龙¹

(1. 西华师范大学地理科学学院, 四川 南充 637009; 2. 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044;

3. 四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009)

摘要: [目的] 火后泥石流是一种具有普遍共性特征的特殊泥石流类型,起源于大型及特大型森林火灾。发现火后泥石流存在烧猪皮效应,其核心是山火对下垫面植被及岩土介质的火煨作用。[方法] 采用数值模拟方法分析下垫面火煨作用,揭示山火灾害发生后下垫面温度传导过程及温度应力变化规律。[结果] 山火对下垫面的影响深度可达到 3 m,温度应力可达到 405 MPa,易使下垫面岩土体发生热裂分解;提出火后物源概念,建立火后物源结构模型,包括火山灰层和火煨层 2 部分,前者是火后泥石流初期的主要物源,后者是火后泥石流中后期的主要物源。基于火后物源,探讨火后泥石流形成机理,即针对灰烬物源的面洗演化阶段和针对火煨层的沟蚀演化阶段,前者出现在山火后 2 a 左右时间内,后者出现的时间跨度大,可及千年至万年时间尺度;从火后泥石流烧猪皮效应角度,探讨开展火后泥石流防治思路问题。[结论] 研究成果对于火后泥石流形成机制研究及靶向治理有积极意义。

关键词: 火后泥石流; 烧猪皮效应; 下垫面火煨作用; 火后物源; 火后泥石流发育机理

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0345-07

Study of the "Roasted Pigskin-Effect" of Post-Fire Debris Flow

CHEN Hongkai^{1,3}, ZHANG Bin^{1,3}, WANG Shengjuan², WANG Lilong¹

(1.School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2.College of Resources and Security, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3.Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion in Dry Valleys, Nanchong, Sichuan 637009, China)

Abstract: [Objective] Post-fire debris flow is a specific type of debris flow with universal common characteristics, originating from large forest fires. It is found that there is a "roasted pigskin effect" in post-fire debris flows, which is primarily attributed to the fire-calcined effect of wildfires on the underlying surface vegetation and rock-soil media. [Methods] Numerical simulation was used to analyze the fire-calcination effect on the underlying surface and reveal the temperature conduction process and changes of temperature stress on the underlying surface following the wildfire disaster. [Results] The depth of influence of wildfire on the underlying surface could reach 3 m, and the temperature stress could reach 405 MPa, which could easily cause thermal cracking and decomposition of the underlying rock and soil. The concept of the post-fire material sources was proposed, and a structure model of the post-fire material sources was established, which included two parts, namely, the volcanic ash layer and the fire-calcined layer, with the former being the primary source of the initial stage of post-fire debris flow, and the latter being the primary source of the mid-and late-stage of the post-fire debris flow. Based on the post-fire material sources, the mechanism of post-fire debris flow formation was explored, i.e., the stage of surface-washing evolution for ash material sources and the stage of gully erosion evolution for the fire-calcined layer, the former appeared in about two years after the wildfire, while the latter spanned a much longer time scale, potentially reaching millennium

收稿日期:2024-11-30

修回日期:2024-12-30

录用日期:2025-01-10

网络首发日期(www.cnki.net):2025-04-03

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505403)

第一作者:陈洪凯(1964—),男,二级教授,博士,博士生导师,主要从事重力地貌减灾与工程安全研究。E-mail:chk658@163.com

通信作者:陈洪凯(1964—),男,二级教授,博士,博士生导师,主要从事重力地貌减灾与工程安全研究。E-mail:chk658@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

to ten thousand years. From the perspective of "roasted pigskin effect" of post-fire debris flow, strategies for prevention and control of post-fire debris flow were explored. [Conclusion] The research results have positive significance for studying the formation mechanism and targeted management of post-fire debris flow.

Keywords: post-fire debris flow; the roasted pigskin effect; fire-calcination effect on the underlying surface; post-fire material sources; development mechanism of the post-fire debris flow

Received: 2024-11-30

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-10

Online(www.cnki.net): 2025-04-03

山火, 又称森林火灾, 是一种发生在林野的火情, 通常由高温、连续干旱、大风等天气条件变化引起, 也可能由人类的粗心大意或故意纵火所致。如 2019 年 1 月 7 日 15:00, 四川省甘孜藏族自治州九龙县子耳乡发生森林火灾, 火场海拔高度 1 600~3 200 m, 过火面积约 0.4 km²; 2020 年 3 月 30 日 15:51, 四川省凉山彝族自治州经久乡马鞍村发生森林大火, 瞬间风向突变, 造成专业扑火队员 18 人牺牲。火烧迹地, 下垫面物理力学特性发生显著变化, 易于在强降雨及冰雪融水作用下发生泥石流灾害, WELLS 称之为火后泥石流, 并指出火后泥石流比常规泥石流更易启动^[1], 胡卸文等^[2]研究发现, 70% 的林火后都发生泥石流灾害。在火后泥石流研究中, 以灰烬为代表的火烧产物为泥石流提供更多物源, 已经形成共识^[3-9]。已有研究^[10-17]着眼于火烧迹地灰烬及高温破坏土壤团聚体, 研究火后泥石流形成机理、物源启动模式、物源动储量估算, 更多的是强调灰烬及表层土体对强降雨的响应问题, 与 DIBIASE 等^[18]、AALEXANDER 等^[19]、STALEY 等^[20]和 GUILINGER 等^[21]的研究思路基本相同。部分学者从山火对地表土壤的物理力学特性变化及产沙量角度研究火后泥石流成因机制, 如 FELLING 等^[22]对美国加州-内华达州典型火烧迹地研究发现, 火灾后土壤饱和和水力传导率降低 200%, 火灾会放大降雨径流, ROBICHAUD 等^[23]发现, 火灾后第 1 a 最高产沙量最大。综上, 总体看来, 目前对火后泥石流的研究聚焦度还不够, 尤其未对山火对地表岩土层高温煅烧作用进行深入研究。据统计^[24], 2000—2018 年发生山火灾害 129 840 次, 其中大型及特大型火灾占 42%, 火场面积计 3.78 万 km²。森林火灾地表火温一般 400 ℃、树冠火达到 900 ℃, 在美国加利福尼亚甚至可达到 1 200 ℃。生活常识告诉我们, 带皮猪肉都有烧猪皮环节, 目的是清除皮囊里的污染油脂和残留断毛, 使猪肉易于炖煮和去腥营养, 其科学原理是表层介质的热力崩解与碳化。由此推知, 山火对下垫面岩土介质必然存在火煅作用, 其火煅后效应称为烧猪皮效应。本文通过下垫面火煅作用模拟, 研究火后物源问题, 据此分析火后泥

石流形成机制, 对于深入开展火后泥石流形成机制研究及靶向治理有积极意义。

1 材料与方法

借鉴石灰和水泥煅烧原理, 山火发生后下垫面岩土介质必然存在高温裂解问题。构建下垫面火煅作用模式(图 1), 即: 强大、持续的山火使地表高温向下垫面深层传导, 煅烧下垫面表层树根及岩土体, 把高温向下传导的前沿边界称为煅烧锋。随着山火强度增强、历时延长, 煅烧锋从地表逐渐向下垫面深层扩展。煅烧锋上部火煅层范围内的岩土介质存在火煅致裂问题, 采用数值模拟方法分析下垫面火煅作用。

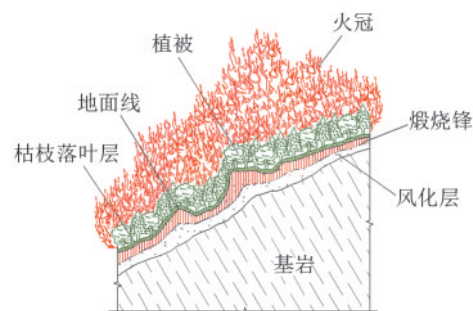


图 1 下垫面火煅作用概化模型

Fig. 1 Generalized model for the fire-calcination effect on the underlying surface

将计算模型导入 ABAQUS/CAE 软件中, 模型内部传热模型视为沿着坡面法向一维传热。定义风化层和基岩体材料属性, 采用自由网格划分技术划分网格模型, 建立模型尺寸为 50 m×70 m×50 m(图 2)。设置模型的初始温度为 20 ℃, 创建后续分析步, 编辑相互作用。在模型中假设坡体为各向同性弹性体, 按照第 I 类边界条件施加边界温度条件。上部温度边界为给定温度边界条件, 底部及周围为自由边界条件。模拟过程中不考虑岩土介质的自重应力。根据火灾全过程中火灾的形成及衰退现象, 采用升温(火灾初期)、恒温(全盛时期)、降温过程(衰退时期)进行模拟。由于目前尚未见森林火灾升温曲线的报道, 本文采用国际标准组织(ISO)理论实验曲线(图 3), 确定升温过程温度曲线, 见公式(1)。设置全过程起始温度 20 ℃, 结束温度 50 ℃, 总时间历程 720

min;其中,火烧升温过程持续 120 min(0~2 h),恒温过程持续 120 min(2~4 h),降温过程持续 480 min(4~12 h)。由公式(1)计算得知,全程最高温度为 1

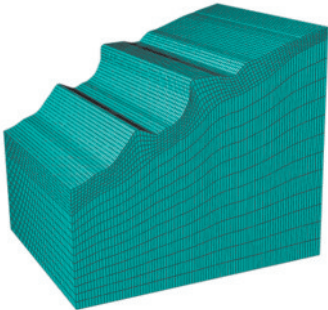


图 2 下垫面火煨作用有限元模型

Fig. 2 A FEM model for the fire-calcination effect on the underlying surface

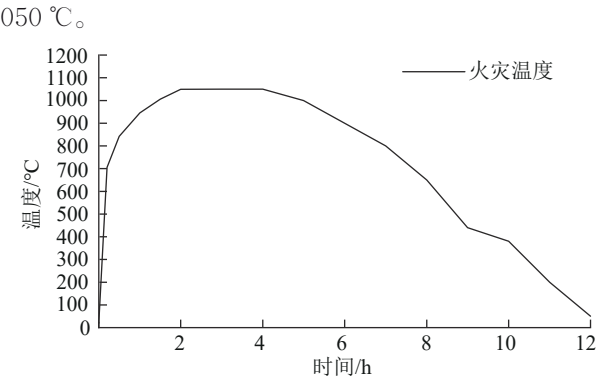


图 3 山火温度变化曲线

Fig. 3 Temperature variation curve of the wildfire

表 1 下垫面火煨作用模拟相关参数

Table 1 Parameters of the model of the fire-calcination effect on the underlying surface

类型	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/MPa	热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/K ⁻¹
风化层	1 800	0.30	20	3.30	400	10 ⁻⁴
基岩	2 000	0.28	34 500	2.55	970	10 ⁻⁴

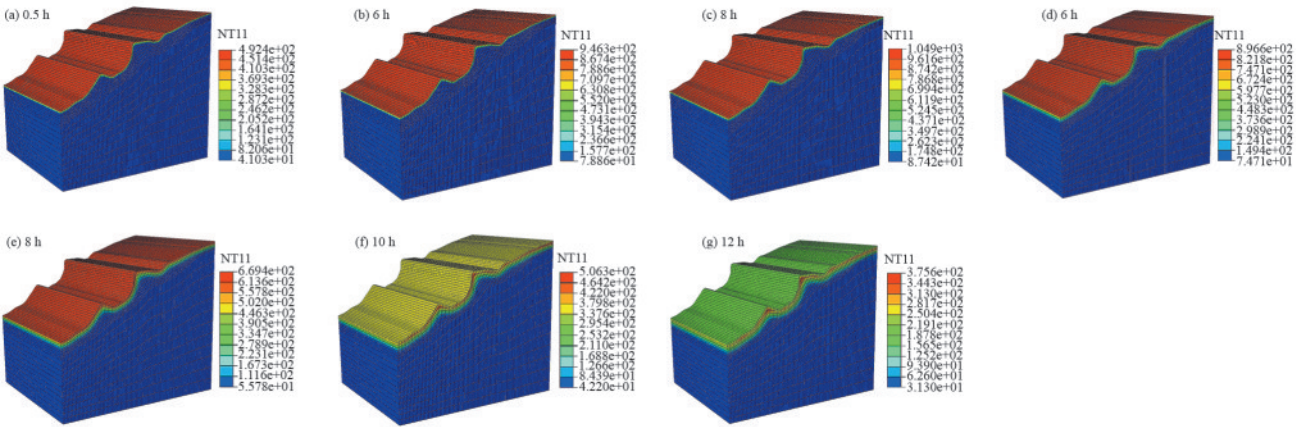


图 4 下垫面火煨作用温度云图

Fig. 4 Temperature change cloud diagram of the fire-calcination effect on the underlying surface

2.2 下垫面温度应力变化特性

由图 7 可知,山火升温阶段下垫面火煨层温度应

$$T - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

式中: t 为火烧经历时间,℃; T 为最终温度,℃; T_0 为初始温度,℃。

下垫面火煨作用模拟相关参数见表 1。

2 结果与分析

2.1 下垫面温度传导过程

由图 4 可知,山火发生后,初期 2~3 h,下垫面表层温度上升迅速,集中在下垫面表层;山火升温过程中,下垫面温度快速上升并向深部岩土层传导,表层温度变化于 80~1 050 ℃;山火恒温过程中,煨烧锋快速向下垫面深层推进;山火降温过程中,下垫面岩土体内部积聚大量热量且消散较慢,内部仍存在较高温度,温度远大于坡体表面,煨烧锋继续向深部推进,且不同微地貌部位,煨烧锋推进深度存在显著差异。由图 5 可知,在山火发生 2 h 内,煨烧锋可快速推进到深度 0.6~1.0 m,随后进入缓慢准线性增大阶段。升温过程最大影响深度为 2.9 m,火烧 12 h 影响平均深度为 3.29 m。图 6 为下垫面 0、1、2、3 m 深度位置的温度变化曲线。可见,埋深越大温度变化幅度越小,温度增幅在升温阶段最大。埋深 1~2 m 处岩土介质受温度影响较大,埋深 1 m 时温度最大点出现在火烧 4~6 h(降温阶段),埋深 2 m 时温度最大点出现在 8~10 h(降温阶段),埋深 3 m 时受温度影响较小,温度增幅变化不大。

力主要集中在表层区域,最大温度应力由 58 MPa 增加至 151 MPa。恒温阶段,温度向下垫面深部传导,

温度应力逐渐增大,12 h 时可及 405 MPa,足可以使一般岩土体发生热裂分解。

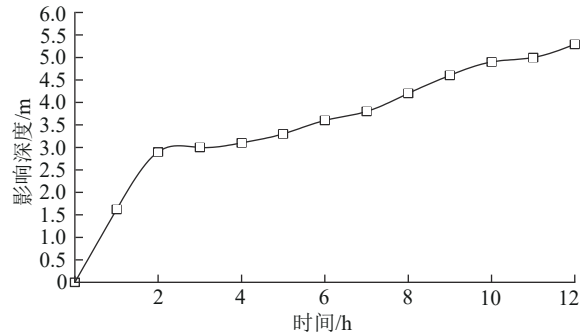


图 5 煅烧峰平均深度-时间关系

Fig. 5 Curve of the relationship between the average depth and duration of the calcination front

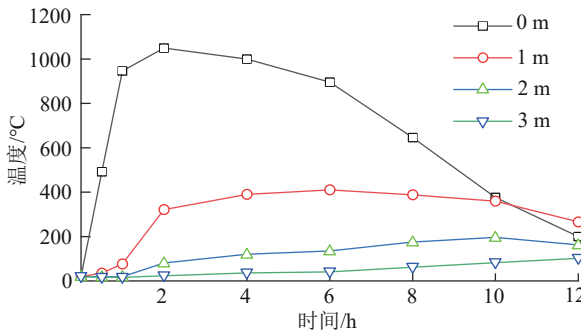


图 6 风化层深度-温度-时间关系

Fig. 6 Curves of the depth-temperature-duration relationships for the weathering zone

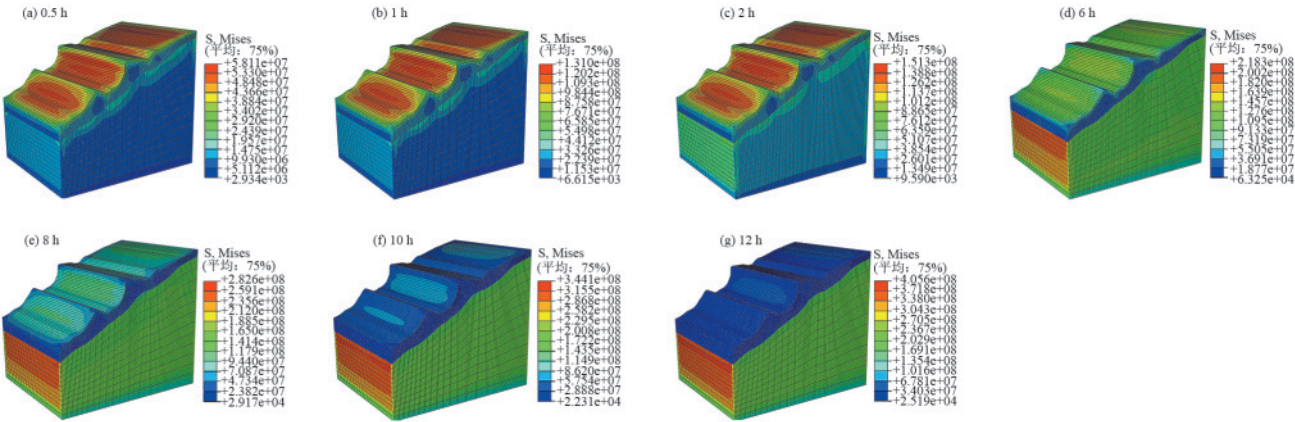


图 7 下垫面火煅层温度应力变化

Fig. 7 Temperature stress change cloud diagram of the fire calcination model of the underlying surface

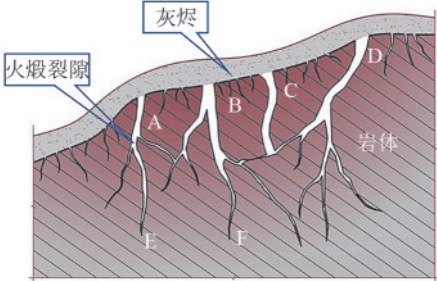


图 8 火后物源结构

Fig. 8 Pattern of post-fire materials causing debris flow

3 讨论

3.1 关于火后泥石流形成机制

物源是形成泥石流的三大要素之一,一般是沟谷或斜坡表层的松散岩土体及全强风化带,近年来强震区把震裂山体表层也归并到泥石流物源,提出物源动储量问题^[25];陈洪凯等^[26]基于现场勘测和有限元模拟,提出泥石流沟物源稳定性分区方法,指出根据不稳定和极不稳定物源区确定泥石流物源储量。然而,由山火引发的火后泥石流物源具有特殊的共性特征,即初期物源为山火灰烬层,后期是下垫面火煅层,统称为火后物源。由构建火后物源结构(图8)可知,灰烬层在降雨冲击和径流洗刷作用下易于失稳流动,成为火后泥石流初期物源;同时,灰烬层物源启动后,部分饱和及非饱和灰烬浆体对火煅裂隙顶部A、B、C、D端口有阻塞作用,地表径流入渗火煅层少,加强灰烬层的面洗作用;灰烬层冲蚀殆尽后,A、B、C、D端口逐渐开启,进入火煅裂隙的残余灰烬浆体及地表径流,在裂隙网络内产生静水压力并软化裂隙洞壁岩土介质,出现潜蚀作用,加速火煅层裂解,成为火后泥石流后期物源。在地表比较陡峭的部位,2~3 m的火煅层在潜蚀作用下易于发生表层岩土体剥离与流滑,表现为土溜及群发性小滑坡。

火后泥石流研究,应该抓住火后物源这一关键环节,从火后物源的启动问题着手研究火后泥石流形成机制问题。据此思路,火后泥石流发育存在2个阶段:

- 1) 面洗演化阶段 山火灾害出现后,产生灰烬物源,在强降雨或冰雪融水作用下,灰烬层产生多个局部饱和区,局部饱和区逐渐归并,以坡面冲刷方式启动,形成广布火烧迹地的坡面泥石流(图9)→大量的坡面泥石流汇集到山坡坡麓或沟谷内,形成沟谷泥石流。

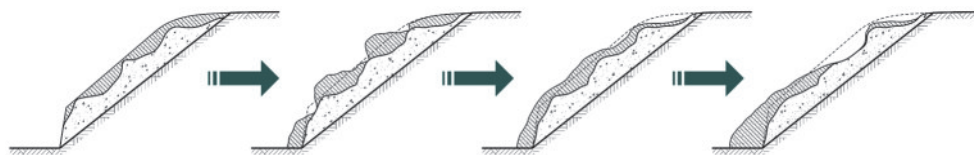


图9 火后泥石流初期的坡面泥石流演化模式

Fig. 9 Evolution pattern of slope debris flow at the early stages of a post-fire debris flow

该阶段是目前大部分学者研究火后泥石流最关心的问题,如MOODY等^[27]研究发现,火灾过后土壤的抗冲刷能力下降,并存在灰烬层,面对显著增大的坡面径流,泥石流启动的降雨阈值显著降低;黄健等^[11]在探讨四川西昌“3·30”响水沟火后泥石流成灾机理时,降雨阈值最小为5.4 mm/h,明显低于该区域5年一遇的降雨强度;吉日伍呷等^[28]研究发现,凉山州喜德境内火后泥石流暴发所需的降雨阈值急剧降低,10 min及1 h降雨阈值分别降低55.62%与76.62%。显然,此阶段并不能完全代替火后泥石流全过程发育机制问题,“火后泥石流降雨阈值显著降低”并不是一个共性规律,只适用于火后泥石流初期的泥石流灾害预测预警,在下垫面灰烬物源消失殆尽后,该观点便不再正确。MCGUIRE等^[9]已经认识到该问题,指出山火发生1 a内,泥石流15 min降雨量阈值为15~30 mm/h,第3 a则增加到60 mm/h。由于灰烬物源存留时间短,一般3~5场暴雨便可冲蚀80%左右,2 a左右基本消失,进一步研究中,必须转变泥石流研究传统思路:一是采用现场勘测与室内模拟试验相结合,深入开展火后物源研究,构建火后物源储量确定方法,研究火后物源释放方式、机理及速率;二是综合考虑引发泥石流的降雨阈值与火后物源的关联性,探讨火后泥石流动态降雨阈值问题,彻底厘清“火后泥石流降雨阈值会显著降低”的观点。

2) 沟蚀演化阶段 灰烬物源基本耗散完后,火煨裂隙网络地表开口端(图8中A、B、C、D处)开启,大量地表径流进入火煨裂隙内,火煨层在入渗水体的潜蚀作用下,在边坡表层产生强烈沟道侵蚀作用,引发群发性地表滑塌体、小型滑坡,汇集到沟谷,形成规模较大的沟谷泥石流。由于火煨层物源则存留时间长,甚至可达到千年及万年时间尺度,进一步研究,应采用地貌侵蚀理论研究该阶段泥石流发育问题,尤其需要采用岩土力学方法研究火煨物源的稳定性及其启动问题。

3.2 关于火后泥石流防治问题

不同学科对泥石流灾害防治侧重点存在差异,水土保持领域强调泥石流全流域综合防控,监测预警与工程治理相结合,控源、拦挡、排导、淤积,多技术综合应用;在公路、铁路交通领域,陈洪凯提出“礼

让出境”公路泥石流防治新思路,将泥石流流体从道路内侧有效排泄到道路外侧深沟或河道内,保障道路挡防结构安全及交通运输营运安全^[29]。而防控火后泥石流灾害,应该以烧猪皮效应理论为指导,客观面对火后物源,尤其应将火后泥石流视为局部文明,重视灰烬物源土壤肥力加速迁移及存储问题,研发稳固火煨层、拦挡枯枝滚石、灰烬水流沉淀固肥、山洪排泄等新技术新方法,构建“控源-拦挡-淤沉-排导”综合防控技术体系。

4 结论

1)发现火后泥石流存在烧猪皮效应,其核心是山火对下垫面植被及岩土介质的火煨作用。数值模拟表明,山火对下垫面的影响深度可达到3 m,温度应力可达到405 MPa,易使下垫面岩土体发生热裂分解。

2)火后泥石流形成机理研究应该从火后物源失稳启动着手,包括针对灰烬物源的面洗演化阶段和针对火煨层的沟蚀演化阶段,前者出现在山火后2 a左右时间内,后者出现的时间跨度大,可及千年至万年时间尺度。

3)从火后泥石流烧猪皮效应角度,探讨开展火后泥石流防治思路问题,重视灰烬物源土壤肥力加速迁移及存储问题,研发稳固火煨层、拦挡枯枝滚石、灰烬水流沉淀固肥、山洪排泄等新技术新方法,构建“控源-拦挡-淤沉-排导”综合防控技术体系。

参考文献:

- [1] 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.
- [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 X W, WANG Y, YANG Y. Research actuality and evolution mechanism of post-fire debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6):1562-1573.
- [3] MOODY J A, EBEL B A. Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire[J]. Catena, 2012, 93:58-63.
- [4] BADÍA-VILLAS D, GONZÁLEZ-PÉREZ 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.
- [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 X W, HOU Y T, WANG Y, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(5):106-112.
- [6] GARTNER J E, CANNON S H, SANTI P M, et al. Empirical models to predict the volumes of debris flows generated by recently burned basins in the western U.S [J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4):339-354.
- [7] HYDE K D, WILCOX A C, JENCOS K, et al. Effects of vegetation disturbance by fire on channel initiation thresholds[J]. *Geomorphology*, 2014, 214:84-96.
- [8] 邸雪颖, 陶玉柱. 火后泥石流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8):2383-2392.
- DI X Y, TAO Y Z. Research progress in post-fire debris flow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8):2383-2392.
- [9] MCGUIRE L A, RENGERS F K, OAKLEY N, et al. Time since burning and rainfall characteristics impact post-fire debris-flow initiation and magnitude[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2021, 27(1):43-56.
- [10] 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 Y, HU X W, WANG Y, et al. Disaster mechanism of the Sejiao post-fire debris flow in Jiulong County of Sichuan [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45(6):150-156.
- [11] 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 J, HU X W, JIN T, 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.
- [12] 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 S K, HU X W, WANG Y, 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.
- [13] 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 X B, HU X W, CAO X C, 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.
- [14] 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 Y, HU X W, WANG Y, et al. Spatial development characteristics of post-wildfire debris flow in Bajiaolou Town [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(4):818-827.
- [15] 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 Y, HU X W, JIN T, et al. Material initiation of debris flow generation processes after hillside fires [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6):1415-1423.
- [16] 杨瀛, 胡卸文, 王严, 等. 火后泥石流流域坡面侵蚀物源启动储量估算方法探讨[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(1):151-161.
- YANG Y, HU X W, WANG Y, et al. Preliminary study on methods to calculate dynamic reserves of slope eroding materials transported by post-wildfire debris flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(1):151-161.
- [17] 周永豪, 胡卸文, 金涛, 等. 火烧迹地土壤团聚体稳定性原位快速测定方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(6):97-104.
- ZHOU Y H, HU X W, JIN T, et al. An in situ method for assessing soil aggregate stability in burned landscapes [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(6):97-104.
- [18] DIBIASE R A, LAMB M P. Dry sediment loading of headwater channels fuels post-wildfire debris flows in bedrock landscapes [J]. *Geology*, 2020, 48(2):189-193.
- [19] GORR A, MCGUIRE L, YOUNBERG A. Empirical models for postfire debris-flow volume in the southwest United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129(11):e2024JF007825.
- [20] STALEY D M, WASKLEWICZ T A, KEAN J W. Characterizing the primary material sources and dominant erosional processes for post-fire debris-flow initiation in a headwater basin using multi-temporal terrestrial laser scanning data [J]. *Geomorphology*, 2014, 214:324-338.
- [21] GUILINGER J J, GRAY A B, BARTH N C, et al. The evolution of sediment sources over a sequence of postfire sediment-laden flows revealed through repeat high-resolution change detection [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(10):e2020JF005527.
- [22] FELLING G, MYERS A, MCCOY S W. Post-wildfire debris-flow hazard analysis for Interstate 80, Truckee

- River Canyon, near the California-Nevada state line, USA [J]. Association of Environmental and Engineering Geologists, 2019.
- [23] ROBICHAUD P R, LEWIS S A, BROWN R E, et al. Evaluating post-wildfire logging-slash cover treatment to reduce hillslope erosion after salvage logging using ground measurements and remote sensing [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(23): 4431-4445.
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 2010年中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
Statistics Bureau of the People's Republic of China. 2010 China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [25] 胡卸文, 余斌, 陈洪凯, 等. 强震区特大泥石流综合防控理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2024年.
HU X W, YU B, CHEN H K, et al. Theory and practice of comprehensive prevention and control of massive debris flow in strong earthquake area [M]. Beijing: The Science Press, 2024.
- [26] 陈洪凯, 唐红梅, 马永泰, 等. 公路泥石流研究及治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004年.
CHEN H K, TANG H M, MA Y T, et al. Research and control for highway debris flow [M]. Beijing: The People's Communications Press, 2004.
- [27] 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.
- [28] 吉日伍呷, 田宏岭, 刘雅琴. 喜德县“6.4”山火泥石流灾害特征与防治建议 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 6880-6887.
JIRI W, TIAN H L, LIU Y Q. Characteristics of the “6.4” forest fire-induced debris flow in Xide County and disaster preventing advices [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 6880-6887.
- [29] 陈洪凯. 重力地貌过程力学描述与减灾(泥石流) [M]. 北京: 科学出版社, 2024.
CHEN H K. Mechanics description and disaster mitigation of geomorphological processes (Debris flow) [M]. Beijing: The Science Press, 2024.

(上接第344页)

- [23] 桂婕, 王平. 含复杂形态柔性植被水流水力特性的试验研究 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2023, 38(6): 974-986.
GUI J, WANG P. Experimental study on hydraulic characteristics of water flow with complex flexible vegetation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Series A), 2023, 38(6): 974-986.
- [24] 陈启刚, 李丹勋, 钟强, 等. 基于模式匹配法的明渠紊流涡结构分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 95-102.
CHEN Q G, LI D X, ZHONG Q, et al. Analysis of vortex structure in open channel turbulence based on model matching [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 95-102.
- [25] CHEN Q G, YANG Z L, WU H J. Evolution of turbulent horseshoe vortex system in front of a vertical circular cylinder in open channel [J]. Water, 2019, 11(10): e2079.
- [26] GUAN D W, CHIEW Y M, WEI M X, et al. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier [J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(2): 118-124.
- [27] 王浩, 陈铭, 彭国平, 等. 基于SFM方法的不同倾角桥墩绕流局部冲刷特性试验 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 155-164.
WANG H, CHEN M, PENG G P, et al. Experiment of local scour characteristics of flow around bridge piers with different inclination angles based on SFM [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 155-164.
- [28] 季铭昱, 程年生, 李奇骏. 坡面流流速分布及紊动特性实验研究 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2023, 38(4): 655-661.
JI M Y, CHENG N S, LI Q J. Experimental study of velocity distribution and turbulence characteristics of overland flows [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Series A), 2023, 38(4): 655-661.