

引用格式: 胡卸文, 周永豪, 何坤, 曹希超, 胡亚运. 不同岩性区火后泥石流成灾机理[J]. 山地学报, 2024, 42(4): 535-545.

HU Xiewen, ZHOU Yonghao, HE Kun, CAO Xichao, HU Yayun. Post-fire debris flow mechanisms in different lithological zones [J]. Mountain Research, 2024, 42(4): 535-545.

不同岩性区火后泥石流成灾机理

胡卸文^{1,2}, 周永豪¹, 何坤^{1,2}, 曹希超¹, 胡亚运³

(1. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756; 2. 四川省环青藏高原交通廊道地质灾害生态化防治工程技术研究中心, 成都 611756; 3. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 森林火灾后留下的火烧迹地, 在降雨条件下多发火后泥石流。林火燃烧破坏植被、改变土壤结构和土壤物理性质, 使得火烧迹地的土壤层容重、孔隙率和渗透性等发生显著变化, 造成火后泥石流成灾机制与普通泥石流有显著不同。此外, 不同地层岩性区域(以灰色千枚岩、浅色花岗岩、红层泥岩为代表)的火烧迹地在火后泥石流的启动模式、灾害演变过程、动力学特性以及泥石流的规模上均表现出较大差异。本文对不同岩性区域的火后泥石流沟道开展野外调查和采样分析, 探讨火烧迹地母岩、坡表风化坡残积土、植物根系以及不同影响深度对土壤物理力学性质和渗透特性的影响, 揭示不同岩性区域火后泥石流的成灾机理和规模差异的原因。研究发现: (1) 火后泥石流呈现出高重度、大粘度的流体特征。(2) 不同岩性区火后泥石流启动模式、成灾过程、动力学特性和冲出规模均表现出差异。不同岩性区域的首次火后泥石流物源补给主要来源于坡面灰烬泥沙; 在后续补给过程中, 变质岩区域主要表现为沟道下切和侧蚀滑坡补给; 火成岩区域主要为沟道下切揭底侵蚀补给; 而沉积岩区域则以沟道物源的铲刮裹挟和渐进夹带为特征。本研究可为中国山区火后泥石流防治提供科学依据。

关键词: 火后泥石流; 地层岩性; 岩土组合; 火烧迹地; 成灾机制

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

全球气候持续变暖, 森林火灾威胁加剧。据联合国粮农组织统计^[1], 全球森林火灾每年多达几十万次, 其中美国、加拿大和欧洲地中海地区是高发区。2010—2021年, 中国累计发生森林火灾 39 040 次, 平均每年发生 3312 次, 受灾森林总面积 20.13 万 hm^2 , 平均每年 1.72 万 hm^2 (资料来源: 应急管理部, www.mem.gov.cn)。

林火灾害不仅对生态环境、人类生命财产安全构成重大影响, 同时破坏森林植被系统, 造成地表松散固体物质暴露, 易于在降雨条件下引发火后泥石流(post-fire debris flow)灾害。火后泥石流是火烧迹地最危险的次生地质灾害类型, 其作为一种极端、快速的水土流失模式, 直接威胁火烧迹地下游居民区以及交通设施安全^[2]。据统计^[3-4], 在美国和澳

大利亚, 森林火灾后分别有约 40% 和 81% 的火烧迹地爆发了火后泥石流。在中国, 以四川省为例, 近 10 年内森林大火后的火后泥石流发生比例高达 70%^[5-6], 表明森林火灾后火后泥石流的暴发概率极高。

研究发现^[4, 6, 9, 13-18], 火后泥石流与非火后泥石流在物源类型、启动机理以及降雨阈值等方面存在显著差异。林火过后, 大量的灰烬与泥沙覆盖地表, 这些松散物质成为火后泥石流形成的重要物质基础^[7], 其储量远超一般泥石流。研究表明, 火后泥石流坡面松散物量相较于一般泥石流增加了 2~3 个数量级^[4], 火后当年流域内产沙量较火灾前增加了 8~9 倍^[8], 坡面灰烬泥沙物源的总量甚至可占泥石流总量的 74%^[9]。这种高浓度的物源条件, 使

收稿日期(Received date): 2024-03-05; 改回日期(Accepted date): 2024-08-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42377170); [National Natural Science Foundation of China (42377170)]

作者简介(Biography): 胡卸文(1963-), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 主要研究方向: 工程地质、环境地质。[HU Xiewen (1963-), male, born in Jinhua, Zhejiang province, Ph.D., professor, research on engineering geology and environmental geology] E-mail: huxiewen@163.com

得火后泥石流在触发机制上更倾向于径流侵蚀,且极易由滑坡转化或侧蚀作用进一步加剧其破坏力。

国际上普遍认为,火烧迹地前期泥石流多由径流侵蚀激发,后续转化为滑坡侵蚀触发^[7,10-13]。因此,火后泥石流物源起动模式可分为三类^[11]:单纯由滑坡转化的坡面泥石流、由边坡塌滑和沟道侵蚀触发的泥石流以及坡面径流冲刷形成的泥石流。统计调查显示^[12-13],76%~98%的火后泥石流由地表灰烬等径流侵蚀触发。案例研究表明^[7],不同时间尺度的火后泥石流成灾模式可划分为坡面灰烬泥沙侵蚀触发、侧蚀滑坡触发、侧蚀多级牵引式滑坡和表层滑坡触发三阶段。

火后泥石流以高易发性和低降雨阈值为显著特征^[14-15]。例如,火后泥石流降雨阈值显著低于汶川地震震后当年的泥石流最低降雨阈值^[15];火后泥石流激发降雨阈值均小于2年一遇降雨频率^[16];火后泥石流的激发雨强普遍小于峰值雨强^[17]。

不同地层岩性区火烧迹地泥石流在启动模式、成灾演变过程、动力学特性乃至一次泥石流冲出规模均存在显著差异^[7,10,18]。国外学者发现,在美国西部的75条火后泥石流沟中,变质岩区火后泥石流影响时间范围最长,其次为沉积岩区,影响时间最短的是火成岩区^[10];构造活跃地带变质岩区泥石流物源储量更大,泥石流规模显著大于另外两个岩性区^[18]。然而,中国学者针对不同岩性区火后泥石流发育方面的研究不足,对不同岩性区火后泥石流成灾特点及成灾机理的认识不充分。

本研究以2010—2021年,发生于中国西南山区不同岩性区的7次林火事件及相应火后泥石流发育特征为案例,采用野外调查和采样分析的研究方法,探讨中国西南山区不同岩性区火后泥石流成灾特点及成灾机理,以期火后泥石流灾害的预防和管理提供科学依据。

1 不同岩性区火后泥石流成灾特点及差异性

1.1 火烧迹地火烈度分布及泥石流发育特点

利用欧空局网站(<https://dataspace.copernicus.eu>)提供的10 m精度哨兵卫星光学遥感影像,通过SNAP平台计算火烧区的差分归一化燃烧指数(differenced Normalized Burn Ratio, dNBR),并根据

火烧迹地的林火烈度划分标准^[19],将其分为重度、中度、轻度和未火烧4个等级。结合现场实测与ArcGIS平台,计算各火烧迹地的平均坡度、火后泥石流暴发频率及火后泥石流总规模等特征参数。

中国西南山区广泛分布灰黑色千枚岩、板岩等变质岩,因岩石强度低、抗风化能力弱,常覆盖较厚的坡残积层^[20]。区内植被以针叶林和灌木为主,火灾后坡面残余大量灰烬泥沙(图1),为火后泥石流提供了丰富的物源。在该岩性区,火烧迹地沟道岸坡坡度一般为25°~33°(小冲沟沟道纵坡集中于200%~700%),坡残积层厚。泥石流发生后,沟道两岸侧蚀滑坡发育显著(图2),沟域内松散物源丰富(图3),整体表现为火后泥石流频繁暴发、规模大、成灾范围广、危害严重。例如,2014年6月1日,四川省甘孜州乡城县正斗乡仁额拥沟流域发生森林大火,火烧迹地过火面积5.33 km²,岩性以千枚岩为主,火烧后累计暴发泥石流17次,冲出固体物质规模超过52.1万m³。2018年2月16日,甘孜



图1 变质岩区火烧迹地灰烬泥沙层
Fig. 1 Ash and sediment layer of the burned area in metamorphic rock regions



图2 变质岩区沟岸侧蚀滑坡发育
Fig. 2 Lateral erosion-induced landslides along the channel in the metamorphic rock regions



图3 变质岩区沟道侧蚀滑坡及沟口堆积物质

Fig.3 Lateral erosion-induced landslides and debris flow deposits in the metamorphic rock regions

州雅江县恶吉乡恶吉溪流域发生森林大火,火烧迹地过火面积 20.59 km²,岩性以板岩和千枚岩为主,火后累计暴发泥石流 110 次,累计冲出规模达 600 万 m³。2020 年 3 月 28 日,四川省凉山州木里县项脚乡项脚沟发生森林大火,火烧迹地过火面积达 240 km²,岩性以板岩为主,火后累计泥石流暴发上千次,累计冲出规模达 800 万 m³。

横断山脉东缘还分布花岗岩、闪长岩等火成岩类,因岩石强度高、且抗风化,坡残积层一般较薄,仅局部全风化花岗岩地段较厚^[21]。火成岩区因抗风化能力强,地形陡峻,平均坡度在 30°~35°,小冲沟纵坡为 200‰~800‰。沟道下游缓坡段堆积大量早期泥石流物质,火后沟道下切强烈(图 4),沟口堆积物以大粒径块石为主(图 5),表现出泥石流冲击力强、冲淤范围广的特征。例如,2016 年 3 月 16



图4 火成岩区沟道下切痕迹和堆积特征

Fig.4 Traces of the channel undercutting and post-fire debris flow deposits in igneous rock regions

日,四川省甘孜州九龙县三岩龙乡柏林村发生森林火灾,过火面积 4.51 km²,岩性为印支期花岗闪长岩($\gamma\delta_5^1$),火后暴发 14 次泥石流,冲毁或淤埋 4 栋民房,累计规模达 1 万 m³;2020 年 5 月 7 日,四川省凉山彝族自治州喜德县鲁基乡中坝村发生森林火灾,过火面积约 6.7 km²,岩性以花岗岩为主,火后暴发 19 次泥石流,沟口堆积大量碎块石,冲毁 6 户民房,累计规模约 4.39 万 m³;2021 年 4 月 20 日,凉山州冕宁县石龙镇马鞍村发生森林火灾,过火面积约 12.45 km²,岩性为闪长岩,火后当年雨季连续暴发 30 余次泥石流,累计规模近 2.4 万 m³,淤埋大量农田。

除变质岩、火成岩区外,中国西南山区易发森林火灾区还包括沉积岩区,以红层泥岩、泥质粉砂岩为主,岩石强度和抗风化能力中等,坡残积层厚度介于变质岩与火成岩之间^[22](图 6)。沉积岩区火烧迹



图5 火成岩区沟口堆积物特征

Fig.5 Characterization of the debris flow deposits in the igneous rock regions



图6 沉积岩区火烧迹地灰烬泥沙层

Fig.6 Ash and sediment layer of the burned areas in sedimentary rock regions

地坡度主要分布在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 沟道较缓, 小冲沟纵坡为 $100\% \sim 400\%$, 冲刷痕迹显著低于变质岩与火成岩区, 且少见沟岸侧蚀滑坡(图 7)。火后泥石流频繁, 但单次冲出规模小于变质岩和火成岩地区。例如, 2020 年 3 月 30 日, 四川省凉山州西昌市经久乡泸山风景区发生森林火灾, 过火面积超 30 km^2 。火烧迹地为泥岩、泥质粉砂岩, 平均坡度 22.1° , 坡面堆积灰烬泥沙层厚 $1 \sim 5 \text{ cm}$ (图 6)。火后共发生泥石流 181 次, 累计规模 13.6 万 m^3 。



图 7 沉积岩区沟道和沟口堆积特征

Fig. 7 Characterization of the channels and debris flow deposits in the sedimentary rock regions

1.2 不同岩性区单沟泥石流成灾差异性

(1) 不同岩性区单沟泥石流规模、频率差异性

利用 ArcGIS 平台结合现场调查, 将以上 7 个火烧区划分为 425 条沟道, 选取中-重度火烧面积占比大于 50% 的 100 条沟道, 通过控制变量法, 定量分析不同岩性区火后泥石流的规模和堆积物性质差异。采用单位面积冲出规模(泥石流堆积体积/流域面积)^[23]对不同流域面积的泥石流事件进行标准化比较。通过 GEE 平台获取 GPM_3IMERGHH 06 卫星数据, 分析火烧迹地首个雨季内各次降雨事件的 30 min 激发雨强, 辅助对比不同岩性区泥石流的规模和频率差异。为控制无关变量, 本文以火烧后首个雨季内沟道暴发的泥石流事件为对象, 定量分析不同岩性区的火后泥石流成灾差异性(图 8)。

结果显示, 变质岩区火后泥石流暴发频率最高, 首个雨季最大暴发次数达 9 次, 而沉积岩和火成岩区暴发频率较低, 仅 2~3 次。沉积岩区单位面积暴发规模最小, 尽管其 30 min 激发雨强最大, 但单位面积冲出规模低于火成岩区和变质岩区(图 8)。变质岩区因暴发频率高, 单次泥石流单位面积冲出规模较大, 首个雨季累计暴发规模最大, 单位面积最大累计暴发规模达 12.14 万 m^3 , 是沉积岩区域的 11 倍(1.14 万 m^3), 火成岩区域的 1.5 倍(7.98 万 m^3)。

(2) 不同岩性区泥石流堆积物质差异性

通过现场调查和堆积物采样分析, 揭示了不同岩性区泥石流堆积物质特征。图 9 展示了乡城县正

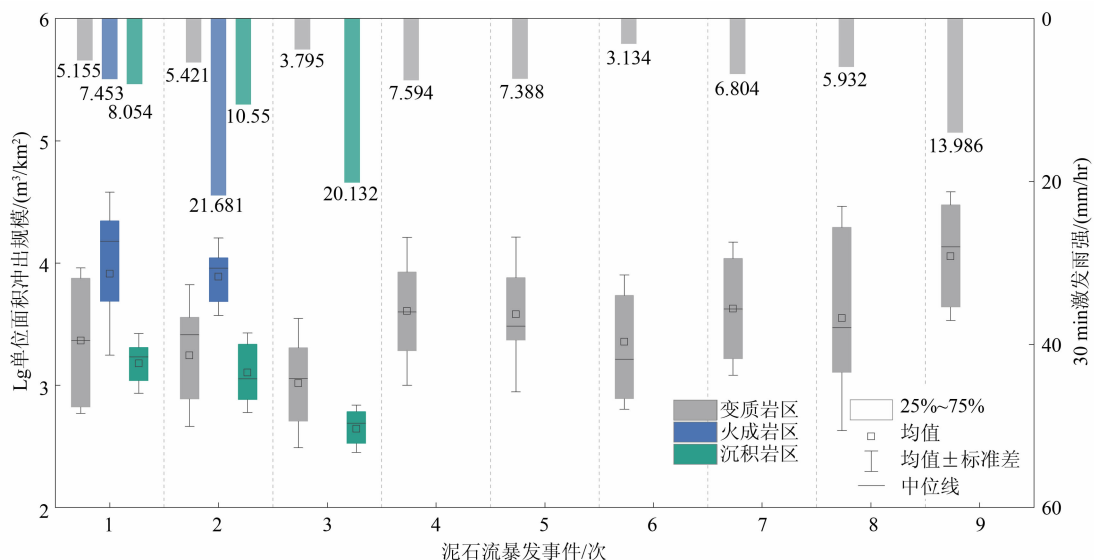


图 8 火后首个雨季内单沟各次泥石流事件单位面积冲出规模

Fig. 8 Scale of the deposits per unit area for each debris flow event in a single channel during the first rainy season following wildfire

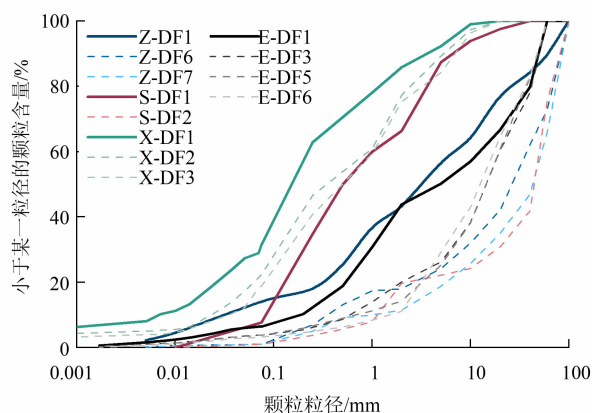


图9 不同岩性区各次泥石流堆积物颗粒分布曲线

Fig. 9 Particle size distribution curves of the debris flow deposits in different lithological regions

斗乡(Z-DF1、Z-DF6和Z-DF7,Z表示正斗乡拼音首字母大写,DF表示泥石流,数字表示第几次泥石流,其它分组表达类似)、九龙县三岩龙乡(S-DF1和S-DF1)、雅江县恶古乡(E-DF1、E-DF3、E-DF5和E-DF6)和西昌市(X-DF1、X-DF2、X-DF3)各次泥石流堆积物的颗粒级配曲线。图10展示了不同岩性区典型泥石流堆积物特征。

结果显示,三大岩性区泥石流堆积物均出现颗粒粗化现象,火成岩区最为显著(图9)。现场调查表明,三大岩性区首次泥石流堆积物以细颗粒为主,物源为坡面松散灰烬泥沙层。首次泥石流颗粒差异

可归因于岩性区坡表土壤类型不同(火后松散泥沙层源物质),如图10所示。变质岩区为碎石土(粒径0.1~2 cm);沉积岩区为颗粒均匀的砂土(以粉细砂为主);火成岩区为粉质砂土(含10%~30%的角砾和粗砂)。变质岩区因碎石含量高,首次泥石流堆积物颗粒最粗;沉积岩区以细颗粒为主,堆积物颗粒最小;火成岩区堆积物粒径介于两者之间。

在后期泥石流事件中,变质岩和火成岩区碎块石含量增加,火成岩区尤为显著,仅第二次泥石流堆积物就以块石为主;变质岩区堆积物颗粒逐渐粗化,块石含量随泥石流次数增加而增多,但低于火成岩。沉积岩区后期泥石流堆积物仍以细颗粒为主,物源补给以坡面坡残积土细颗粒为主。

2 不同岩性区火烧迹地土壤性质差异及火后泥石流成灾机理

2.1 不同岩性区火烧迹地土壤性质差异

针对不同岩性火后泥石流规模和颗粒组成差异,现场调查表明,各岩性区母岩性质、植被类型和气候环境不同,导致枯落物厚度、土壤类型、风化层厚度、土壤水理性质及对林火响应程度均存在显著差异(图11、图12)。结合2018年“2·16”恶古乡(变质岩区)、2016年“3·16”三岩龙乡(火成岩区)

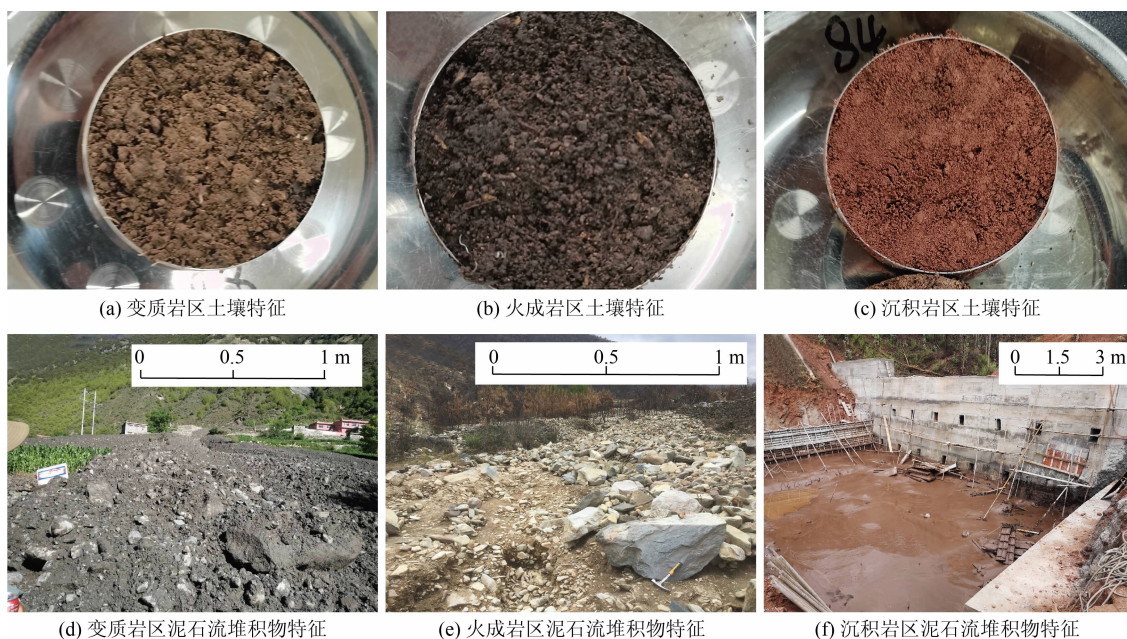


图10 不同岩性区土壤特征和泥石流堆积物特征

Fig. 10 Soil characteristics and debris flow deposit features in different lithological regions

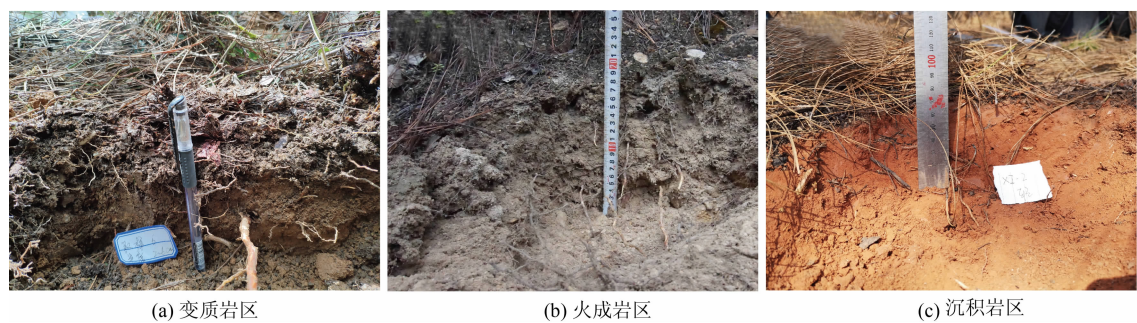


图 11 不同岩性区未火烧区域表层土壤结构揭示断面

Fig. 11 Profiles revealing surface soil structure in unburned areas of the different lithological regions

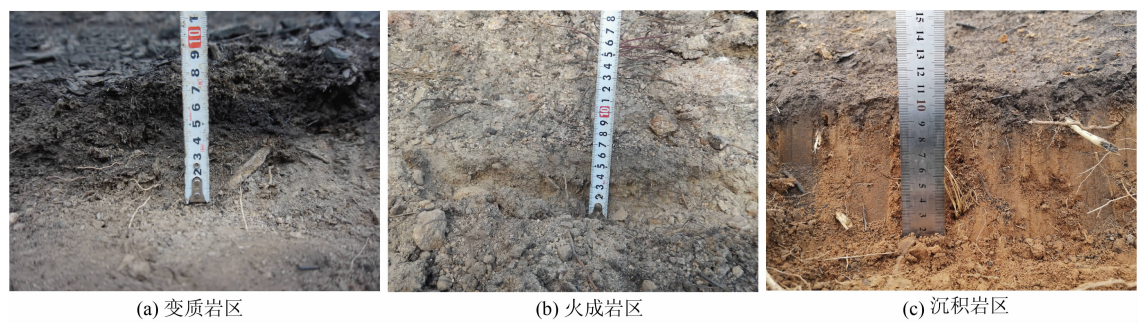


图 12 不同岩性区重度火烧区域土壤结构揭示断面

Fig. 12 Profiles revealing soil structure in high-severity burned areas of the different lithological regions

和 2020 年“3·30”西昌(沉积岩区)火烧迹地,进行野外调查和室内外试验,分析土壤物理、水理性质及可侵蚀性(表 1)。土壤抗侵蚀能力通过土壤可蚀性因子 K 表征, K 值越大,土壤越易被侵蚀,抗侵蚀能力越弱^[24]。各火烧迹地土壤的 K 值通过式(1)计算^[25]:

表 1 不同岩性区火烧迹地表层(0~2 cm)土壤物理力学性质
Tab. 1 Physical and mechanical properties of the surface soil (0~2 cm) in burned areas of the different lithological regions

火烧迹地	土壤类型 及厚度	土壤可蚀性因子/ ($\text{Mg} \cdot \text{hMJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	影响 深度/cm	火烈度	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	渗透系数/ ($10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	斥水土壤 占比/%
恶古乡 (变质岩区)	碎石土 (厚 3~5 m)	0.0275(0.001) A	0~4	未火烧(对照)	1.06(0.08) Ca	59.64(3.06) Aa	2.09(0.82) Aa	13.81
				轻度火烧	1.09(0.05) Ca	58.55(1.97) Aa	1.87(1.4) Aa	14.69
				中度火烧	1.09(0.09) Ca	58.47(3.58) Aa	0.75(0.80) Aab	46.67
				重度火烧	1.12(0.06) Cb	57.57(2.41) Ab	0.60(0.58) Ab	73.34
三岩龙乡 柏林村 (火成岩区)	粉质砂土 (厚 0~0.5 m)	0.0231(0.001) B	0~2	未火烧(对照)	1.12(0.03) Ba	57.62(0.96) Ba	0.93(0.14) Ba	0.00
				轻度火烧	1.14(0.02) Ba	57.15(0.67) Ba	0.85(0.13) Ba	0.00
				中度火烧	1.15(0.02) Bab	56.71(0.62) Bab	0.51(0.19) Bb	40.37
				重度火烧	1.16(0.02) Bb	56.61(0.77) Bb	0.35(0.16) Bb	71.22
经久乡 (沉积岩区)	砂土 (厚 1~3 m)	0.0201(0.003) C	0~2	未火烧(对照)	1.51(0.07) Aa	43.08(2.66) Ca	0.26(0.13) Ca	0.00
				轻度火烧	1.48(0.04) Aa	44.02(1.70) Ca	0.20(0.08) Ca	0.00
				中度火烧	1.48(0.06) Aa	44.15(2.44) Ca	0.35(0.12) Ca	39.94
				重度火烧	1.47(0.05) Aa	44.34(1.75) Ca	0.47(0.28) Ca	70.76

注:数据形式为“均值(标准差)+显著性”,显著性检验采用单因素方差分析,不同的小写字母表示同一个岩性区各火烈度土壤性质均值差异性显著,不同的大写字母表示不同岩性区土壤性质的差异性显著,显著的标准为 $P < 0.05$ 。斥水土壤占比:水滴渗透时间(Water Drop Penetration Time, WDPT) $> 60 \text{ s}$ 的土壤占比。

$$K = [0.2 + 0.3 \exp(-0.0256S_a(1 - \frac{S_i}{100}))] \times (\frac{S_i}{C_i + S_i})^{0.3} \times [1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 0.95C)}] \times [1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)}] \quad (1)$$

式中, K 为土壤可侵蚀因子, 单位为美制, 乘 0.1317 转化为国际制单位; S_a 为砂粒 (0.050 ~ 2.000 mm) 质量分数; S_i 为粉粒 (0.002 ~ 0.050 mm) 质量分数; C_i 为粘粒 (<0.002 mm) 质量分数; C 为土壤有机碳含量, C = 有机质含量/1.724; $S_n = 1 - S_a/100$ 。

(1) 不同岩性区火烧迹地地表覆盖层厚度。变质岩区植物丰度高, 枯落物和腐殖质土层厚 (约 6 cm), 有机质含量高, 根系密度大; 而沉积岩区枯落物和腐殖质土层薄 (约 3.2 cm), 根系密度最低; 火成岩区枯落物和腐殖质土层 (约 3.7 cm) 以及根系密度均介于二者之间。

(2) 不同岩性区火烧迹地土壤物理、水理性质。变质岩区风化土层厚 3 ~ 5 m, 土壤干密度 1.06 g/cm³, 孔隙度约 59.64%, 渗透系数 2.09×10^{-4} cm/s; 火成岩区风化土层厚 0 ~ 0.5 m, 干密度 1.12 g/cm³, 孔隙度约 57.62%, 渗透系数 9.3×10^{-5} cm/s; 沉积岩区风化土层厚 1 ~ 3 m, 干密度 1.51 g/cm³, 孔隙度约 43.08%, 渗透系数仅为 2.6×10^{-5} cm/s。

(3) 不同岩性区火烧迹地土壤抗侵蚀能力。沉积岩区土壤可侵蚀因子为 0.0201 (± 0.003) Mg · h/(MJ · mm), 抗侵蚀能力最强; 火成岩区土壤可侵蚀因子为 0.0231 (± 0.001) Mg · h/(MJ · mm), 抗侵蚀能力次之; 变质岩区土壤可侵蚀因子为 0.0275 (± 0.001) Mg · h/(MJ · mm), 抗侵蚀能力最弱。

(4) 不同岩性区火烧迹地对林火的响应程度。相同火烈度下不同岩性区对林火的响应存在显著差异, 变质岩区的土壤成分和结构变化最为显著, 其次为火成岩区, 而沉积岩区变化最小。随着火烈度的增加, 重度火烧区土壤性质变化最为明显, 中度火烧区次之, 轻度火烧区变化最小。火后, 变质岩区的灰烬-泥沙层最厚 (约 5 cm), 火成岩区次之 (约 3 cm), 沉积岩区最薄 (约 2.4 cm)。

表层 0 ~ 2 cm 土壤物理力学性质分析显示, 沉

积岩区在各火烈度下土壤性质变化均不显著, 而变质岩和火成岩区在中度和重度火烧区土壤性质显著变化, 轻度火烧区无显著变化。

变质岩区中度火烧区土壤孔隙度和渗透系数较未火烧区分别降低了 2.0% 和 64.11%, 土壤干密度增加了 2.8%, 表明林火会破坏土壤结构^[19, 26]; 火成岩区中度火烧区土壤渗透系数较未火烧区降低了 45.2%, 孔隙度和干密度无显著变化; 沉积岩区各土壤性质变化均不显著。

变质岩区重度火烧区土壤孔隙度和渗透系数较未火烧区分别降低了 3.5% 和 71.3%, 土壤干密度增加了 5.7%; 火成岩区相应降低了 1.8% 和 62.4%, 土壤干密度增加了 3.6%; 沉积岩区无显著变化。

对比分析表明, 林火后变质岩区土壤性质变化显著高于火成岩和沉积岩区 ($p < 0.05$), 沉积岩区受林火影响程度最小。斥水性分析显示, 变质岩区斥水性土壤比例从未火烧区的 13.81% 增加至重度火烧区的 73.34%; 火成岩区从 0 增至 71.22%; 沉积岩区从 0 增至 70.76%。火烧区对土壤结构影响深度显示, 变质岩区影响深度达 4 cm, 而火成岩与沉积岩区影响深度不超过 2 cm, 表明变质岩区土壤层对林火的敏感性较高。

2.2 不同岩性区火后泥石流成灾机理

(1) 不同岩性区火烧迹地物源起动特征

调查结果表明, 不同岩性区首次火后泥石流的物源均以坡表灰烬泥沙为主。变质岩区林火响应程度受枯落物厚度影响显著, 导致坡面灰烬泥沙层最厚。首次火后泥石流激发雨强最低, 易暴发, 但因地形坡度和激发雨强低于火成岩区, 单位面积冲出规模较火成岩区小 (图 8)。火成岩区林火响应程度和灰烬泥沙层厚度介于变质岩与沉积岩之间, 激发雨强和主沟纵比降最大, 水动力条件强, 使首次火后泥石流单位面积冲出规模最大。沉积岩区林火响应程度最低、灰烬泥沙层最薄、地形较缓, 虽激发雨强最大, 但泥石流规模最小。

后期火后泥石流物源起动模式在不同岩性区差异显著。变质岩区坡残积层厚、抗侵蚀能力弱, 沟道下切导致侧蚀滑坡和溯源侵蚀持续补给, 泥石流规模增大。物源由灰烬泥沙层转为坡残积层, 堆积物粒径随暴发次数逐渐粗化, 但激发雨强无显著变化, 表明泥石流活动性保持较高水平, 累计规模高于其

他岩性区(图8)。火成岩区流域地形陡、水动力强,首次泥石流将坡表灰烬泥沙输移至沟口,后期物源转为早期沟道堆积物源,以碎块石为主,颗粒粒径较大,激发雨强显著增加,泥石流活动性快速降低。沉积岩区坡度较缓,物源由初期坡面灰烬泥沙层转为坡残积层和沟道物源(以沟道物源为主)。由于沉积岩区坡残积土抗侵蚀能力强,物源补给能力减弱,激发雨强随泥石流次数增加,但单位面积冲出规模降低。坡残积土层颗粒细,沉积岩区后期泥石流堆积物颗粒粗化现象不明显。

(2) 不同岩性区火后泥石流成灾模式

火后泥石流成灾模式可分为三类^[7]:①强烈坡面灰烬泥沙径流侵蚀触发泥石流;②侧蚀滑坡转化为泥石流并沿途铲刮裹挟沟道物源;③浅表层滑坡转化泥石流。分析表明,各岩性区首次泥石流成灾模式均为坡面灰烬泥沙径流侵蚀触发,后期表现出不同成灾模式。变质岩区后期火后泥石流成灾模式转变为以沟道下切揭底、侧蚀滑坡汇入沟道形成泥石流;火成岩区后期泥石流物源主要来源于沟道,成灾模式转变为强降雨下沟道强烈冲刷侵蚀;沉积岩区后期泥石流成灾模式转变为沟道物源铲刮裹挟和渐进夹带^[27]。

(3) 不同岩性区火后泥石流成灾过程机制分析

火后泥石流形成过程可分为三个阶段:坡面灰烬泥沙侵蚀、高含沙水流沟道侵蚀和泥石流沟道刨蚀^[28]。变质岩区林火响应程度强烈,火后坡表灰烬泥沙残留多,土壤渗透性和强度降低,斥水性增强,增加径流并携带松散物源向沟道汇集,物源启动以坡面片蚀为主。坡面径流携带灰烬泥沙在沟道汇集形成高含沙水流,铲刮裹挟沟道松散物质,直至流体容重达到泥石流阈值,形成泥石流。泥石流进一步刨蚀沟道,流量和流速增大,侵蚀能力增加。后期泥石流沟道刨蚀下切加剧,沟道侧蚀增强,大量侧蚀滑坡发育并补给泥石流,部分堆积堵塞沟道,成为后续泥石流的重要物源,导致泥石流影响时间持续3~5 a。

火成岩区流域地形陡、灰烬-泥沙层薄,火后泥石流形成快,降雨后坡面流迅速汇集,携带灰烬泥沙形成高含沙水流冲刷沟道。较大水流坡降和径流功率使高含沙水流容重迅速达到泥石流容重阈值,形成火后泥石流刨蚀沟道。因此火成岩区坡面灰烬泥

沙侵蚀现象不明显(阶段持续时间短),沟道下切和堵溃现象显著。

沉积岩区林火响应最低,土壤渗透性和斥水性影响小,地形坡度缓、水动力弱、灰烬泥沙侵蚀阶段持续时间长,侵蚀现象明显。降雨达到激发阈值后,坡面侵蚀转为沟道侵蚀,渐进夹带增加流体容重,形成泥石流。由于物源少且坡缓,沉积岩区泥石流刨蚀能力弱,沟内侧蚀滑坡和堵溃现象均不发育。

3 结 论

(1)变质岩区火后泥石流暴发频率最高,单沟单位面积最大累计暴发规模是沉积岩区的11倍、火成岩区的1.5倍。火成岩区与沉积岩区暴发频率较低,单沟单次单位面积冲出规模火成岩区较大,沉积岩区最小。

(2)三大岩性区泥石流堆积物随泥石流次数增加普遍表现出颗粒粗化现象,火成岩区最显著。沉积岩区沟道缓,水动力弱,颗粒粗化现象不明显,颗粒粒径差异最小。

(3)不同岩性区土壤性质差异决定了火烧迹地林火响应程度和火后泥石流物源补给方式,林火响应程度表现为变质岩最强、火成岩次之、沉积岩最弱。

(4)各岩性区首次泥石流成灾模式均为坡面灰烬泥沙径流侵蚀触发,后期模式各异。变质岩区域主要表现为沟道下切和侧蚀滑坡补给,火成岩区域主要为沟道下切揭底侵蚀补给,而沉积岩区域则以沟道物源的铲刮裹挟和渐进夹带为特征。

(5)变质岩区火后泥石流形成经历三个阶段:坡面灰烬泥沙侵蚀、高含沙水流沟道侵蚀、泥石流沟道刨蚀。火成岩区形成过程为高含沙水流沟道侵蚀和泥石流沟道刨蚀两阶段,坡面灰烬泥沙侵蚀阶段持续时间短。沉积岩区形成过程为坡面灰烬泥沙侵蚀、高含沙水流渐进夹带、泥石流沟道侵蚀三阶段,高含沙水流沟道侵蚀以及泥石流沟道刨蚀现象均相对较弱。

参考文献(References)

- [1] FURDYCHKO O, DREBOT O, PALIANYCHKO N, et al. On the way to balance of forestry land use of ukraine: Ecological-and-economic aspect [J]. Agricultural and Resource Economics-International Scientific E-Journal, 2021, 7(4): 218-244. DOI:

- 10.22004/ag.econ.316829
- [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] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-073
- [3] CANNON S H. Debris-flow generation from recently burned watersheds [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2001, **7**(4): 321 – 341. DOI: 10.2113/gsegeosci.7.4.321
- [4] NYMAN P, SMITH H G, SHERWIN C B, et al. Predicting sediment delivery from debris flows after wildfire [J]. Geomorphology, 2015, **250**: 173 – 186. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.08.023
- [5] 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] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-224
- [6] 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. DOI: 10.3390/rs14061306
- [7] WANG Yan, HU Xiewen, WU Lijun, et al. Evolutionary history of post-fire debris flows in Ren'e Yong valley in Sichuan Province of China [J]. Landslides, 2022, **19**(6): 1479 – 1490. DOI: 10.1007/s10346-022-01867-x
- [8] LANE P N J, SHERIDAN G J, NOSKE P J. Changes in sediment loads and discharge from small mountain catchments following wildfire in south eastern Australia [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2006, **331**(3-4): 495 – 510. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.05.035
- [9] SMITH H G, SHERIDAN G J, NYMAN P, et al. Quantifying sources of fine sediment supplied to post-fire debris flows using fallout radionuclide tracers [J]. Geomorphology, 2012, **139** – **140**: 403 – 415. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.11.005
- [10] DEGRAFF J V, CANNON S H, GARTNER J E. The timing of susceptibility to post-fire debris flows in the western United States [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2015, **21**(4): 277 – 292. DOI: 10.2113/gsegeosci.21.4.277
- [11] COE J A, CANNON S H, SANTI P M. Introduction to the special issue on debris flows initiated by runoff, erosion, and sediment entrainment in western North America [J]. Geomorphology, 2008, **96**(3-4): 247 – 249. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2007.05.001
- [12] CANNON S H, GARTNER J E. Wildfire-related debris flow from a hazards perspective [G] // JAKOB M, HUNGER O. Debris flow hazards and related phenomena. Berlin: Springer-Praxis, 2005: 363 – 385. DOI: 10.1007/3-540-27129-5_15
- [13] PARISE M, CANNON S H. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds [J]. Natural Hazards, 2012, **61**(1): 217 – 227. DOI: 10.1007/s11069-011-9769-9
- [14] CANNON S H, GARTNER J E, HOLLAND-SEARS A, et al. Debris-flow response of basins burned by the 2002 Coal Seam and Missionary Ridge fires, Colorado [J]. Engineering Geology in Colorado-Contributions, Trends, and Case Histories; Association of Engineering Geologists Special Publication, 2003, **14**: 1 – 31.
- [15] GUO Xiaojun, CUI Peng, LI Yong, et al. Intensity-duration threshold of rainfall-triggered debris flows in the Wenchuan Earthquake affected area, China [J]. Geomorphology, 2016, **253**: 208 – 216. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.10.009
- [16] 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. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.03.019
- [17] STALEY D M, KEAN J W, CANNON S H, et al. Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California [J]. Landslides, 2012, **10**(5): 547 – 562. DOI: 10.1007/s10346-012-0341-9
- [18] OTT R F. How lithology impacts global topography, vegetation, and animal biodiversity: A global - scale analysis of mountainous regions [J]. Geophysical Research Letters, 2020, **47**(20): e2020GL088649. DOI: 10.1029/2020GL088649
- [19] 杨瀛, 胡卸文, 王严, 等. 八角楼乡火后泥石流流空间发育特征 [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 Bajialou Town [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, **56**(4): 818 – 827] DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200015
- [20] 侯羿腾. 仁额拥沟火后泥石流物源特征及滑坡物源启动机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019: 1 – 71. [HOU Yiteng. Study on source characteristics and start-up mechanism of shallow landslide in Reneyong post-fire debris flow [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019: 1 – 71] DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2019.000153
- [21] 孙梦宇. 断裂带构造损伤岩体对泥石流物源形成影响研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 1 – 79. [SUN Mengyu. Research on the influence of structural damage rock on the formation of debris flow; Taking Anninghe fault zone as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 1 – 79] DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000768
- [22] 陈少轩. 考虑风化效应的四川盆地红层岩石力学特性试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 1 – 99. [CHEN Shaoxuan. Experimental study on mechanical properties of red-

- bedded rocks in Sichuan Basin considering weathering effects [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 1 – 99] DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.001627
- [23] SANTI P, MORANDI L. Comparison of debris-flow volumes from burned and unburned areas [J]. Landslides, 2013, **10**: 757 – 769. DOI: 10.1007/s10346-012-0354-4
- [24] 李娅芸, 刘雷, 安韶山, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响 [J]. 自然资源学报, 2016, **31**(2): 287 – 298. [LI Yayun, LIU Lei, AN Shaoshan, et al. Research on the effect of vegetation and slope aspect on the stability and erodibility of soil aggregate in loess hilly region based on Le Bissonnais method [J]. Journal of Natural Resources, 2016, **31**(2): 287 – 298] DOI: 10.11849/zrzyxb.20141207
- [25] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion-sediment yield models [J]. Soil Technology, 1997, **11**(1): 43 – 55. DOI: 10.1016/s0933-3630(96)00114-6
- [26] 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] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.14
- [27] CANNON S H, KIRKHAM R M, PARISE M. Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado [J]. Geomorphology, 2001, **39**(3-4): 171 – 188. DOI: 10.1016/s0169-555x(00)00108-2
- [28] 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] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-197

Post-fire Debris Flow Mechanisms in Different Lithological Zones

HU Xiewen^{1,2}, ZHOU Yonghao¹, HE Kun^{1,2}, CAO Xichao¹, HU Yayun³

(1. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Ecological Mitigation of Geohazards
in Tibet Plateau Transportation Corridors, Chengdu 611756, China;

3. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., LTD., Ningbo, Zhejiang 315012, China)

Abstract: Post-fire debris flows are common in areas after wildfires under rainfall conditions. Wildfires destroy vegetation, alter soil structure, and change soil physical properties, leading to significant changes in soil bulk density, porosity, and permeability in the burned areas. These changes result in a distinct mechanism of debris flow formation compared to ordinary debris flows. Moreover, burned areas in different rock formation regions (represented by gray phyllite, light-colored granite, and red mudstone) exhibit considerable differences in the initiation mode, disaster evolution process, dynamic characteristics, and scale of post-fire debris flows.

In this study, it conducted field investigations and sampling analyses at debris flow channels in different rock formation areas to explore the physical and mechanical properties, as well as the permeability of the parent rock in the burned areas, weathered colluvial soil on slope surface, plant roots, and at different depths of influence. This study revealed the mechanism and the reasons for the scale differences of post-fire debris flows in different rock formation areas.

(1) Post-fire debris flows exhibited characteristics of high density and large viscosity fluids.

(2) There were differences in the initiation modes, disaster processes, dynamic characteristics, and runout scales of post-fire debris flows in different lithological regions. The primary source of material replenishment for the first surge of post-fire debris flow in different lithological regions mainly comed from ash and sediment on slope

surfaces; during subsequent replenishment processes, metamorphic rock regions were characterized by channel undercutting and lateral erosion-induced landslides; igneous rock regions were primarily supplied by channel undercutting and bedrock erosion; and sedimentary rock regions were characterized by scraping and gradual entrainment of channel-derived materials.

This research provides a scientific basis for prevention and control of post-fire debris flows in mountainous areas of China.

Key words: post-fire debris flow; bedrock type; rock-soil combination; burned area; disaster mechanism

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)