

四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理

李钰¹, 甘滨蕊², 王协康², 陈明亮¹, 周家文¹

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: [目的] 对四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害成因机理进行分析, 为山区山洪泥石流灾害防控减灾提供参考。[方法] 对2019年甘洛县山洪泥石流灾害开展现场调查, 并结合相关影像和雨情数据等资料, 对山洪泥石流灾害的影响因素以及形成机理进行分析。[结果] 2019年甘洛县山洪泥石流主要是由于短期强降雨所诱发的, 加之区内有丰富的固体物源以及有利的地形地貌条件; 山洪泥石流灾害是洪水与固体物质相互作用共同致灾的产物; 山洪泥石流运动过程中受到地形以及一些工程设施的影响比较明显; 同时山洪泥石流会挤压主河道甚至阻断河道, 从而导致更大灾害。[结论] 基于甘洛县山洪泥石流灾害的形成机理与致灾特征, 应该以加强灾区生态修复与水土保持为本, 采取工程防治与生态防治相结合的治灾措施。

关键词: 山洪泥石流; 影响因素; 形成机理; 致灾模式; 防控措施; 甘洛县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)06-0281-07

中图分类号: P642.23

文献参数: 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 281-287. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.040; Li Yu, Gan Binrui, Wang Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 281-287.

Formation Mechanism of Group Flash Flood/Debris Flow Disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019

Li Yu¹, Gan Binrui², Wang Xiekang², Chen Mingliang¹, Zhou Jiawen¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: [Objective] The formation mechanism of the group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County of Sichuan Province in 2019 was analyzed in order to provide a reference for the prevention and mitigation of flash flood/debris flow disasters in mountainous areas. [Methods] Based on the field investigation of the group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County in 2019, combined with relevant images and rainfall data, the influencing factors and formation mechanism of flash flood/debris flow disasters were analyzed. [Results] The flash flood/debris flow disasters in Ganluo County were mainly caused by short-term heavy rainfall, in addition, there were abundant solid resources and favorable landform conditions in the area. The flash flood/debris flow disasters were the production of the interaction between flood and solid materials. The flash flood/debris flow movement was affected by terrain and some engineering facilities. Meanwhile, the flash flood/debris flow squeezed the main channel or even blocked the channel, thus leading to more disasters. [Conclusion] Based on the formation mechanism and disaster-causing characteristics of flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, the disaster control measures should be based on strengthening ecological restoration and soil and water conservation in disaster-stricken areas, and combining engineering prevention and ecological control.

收稿日期: 2020-06-24

修回日期: 2020-07-17

资助项目: 国家重点研发计划项目“山区暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台构建与示范”(2019YFC1510705); 国家自然科学基金重点项目“西南山区暴雨诱发泥沙补给突变下的山洪灾害研究”(51639007)

第一作者: 李钰(1996—), 女(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害防治。Email: li_yu_9612@163.com。

通讯作者: 周家文(1982—), 男(汉族), 江西省吉安市人, 博士, 教授, 主要从事岩土灾害机理与防控方面的研究。Email: jwzhou@scu.edu.cn。

Keywords: flash flood/debris flow; formation mechanism; disaster mode; prevention and control measures; Ganluo County

我国山地面积占比大,尤其是西南山区地势起伏大、地层结构复杂、地质构造运动活跃,加之每年汛期降雨集中、雨量丰沛,使得山洪泥石流灾害频发,给人民的生命财产安全带来了巨大威胁。近年来,西南山区发生了多次强震事件,导致本就脆弱的西南山区地质环境发生剧烈改变,同时产生了丰富的松散固体物质,为山洪泥石流灾害的发生提供了有利的条件。中国西部山区已成为世界上山洪泥石流最发育、危害最严重的地区之一,仅已查明的泥石流沟就15 797条^[1]。山洪泥石流是山区较为典型的一种自然灾害,具有强大的冲刷与阻塞能力,其造成的人畜伤亡、房屋垮塌、交通破坏、耕地淹埋等生命财产损失是不容忽视的。如2010年8月14日汶川震区映秀镇红椿沟暴发山洪泥石流,泥石流堰塞堆积体堵断岷江主河道,引发洪水泛滥,造成13人死亡、59人失踪,受灾群众8 000余人^[2];2012年8月13日至18日,四川省清平乡雍家沟连续降雨,致使区内多处暴发了山洪泥石流,造成绵远河全部堵塞,沟口的堆积区内有15户共56人的生活受到严重影响^[3];再如2017年8月8日,四川省普格县境内发生山洪泥石流灾害,造成巨大人员伤亡和财产损失(25人死亡,约1.6亿元经济损失)^[4]。

山洪泥石流含有大量泥沙、石块,既具有暴发骤然、活动速度快、破坏力强、危害范围广等特征,又存在规模大小不一、影响因素复杂、预测和判别困难等不确定性,防治工作难度较大。因此,研究山洪泥石流的形成机理、动态演进过程及成灾、致灾模式是山洪泥石流灾害早期识别、监控预警、应急抢险与防控减灾等工作的重要基础。目前,已有许多学者对山洪泥石流的形成、运动与堆积特征作了大量研究与分析。亓星等^[5]通过物理模拟试验研究发现,沟道的坡度对于山洪泥石流的起动特征影响显著;有研究揭示,震后山洪泥石流启动的小时雨强和临界累积雨量均比震前有所降低^[6];崔鹏等^[7]分析总结出,地表产流量激增、土体破坏物质供给激增、沟道堵塞体级联溃决流量放大以及动床侵蚀规模增大,是山洪泥石流形成演化的4个关键过程;郭志学等^[8]以支流入水槽试验为基础,讨论了泥石流堵江的影响因素,揭示了泥石流入汇角、泥石流与主河的流量比、泥石流入汇总量等参数的增大有利于堵江现象的发生,而主河宽度和主河比降的增大则不利于泥石流堵江的发展规律。

2019年7月28日至7月29日,四川省甘洛县

持续遭受强降雨,诱发多起山体滑坡,并引发山洪泥石流灾害,共计12个乡镇,39个村落受灾。灾害致使多处房屋倒塌,农田受灾,道路中断,桥梁损毁,水利工程及水电站厂区受损,河道堵塞,确认造成3人死亡,9人失踪。2019年8月2日21时至3日10时,该县再次普降大雨,灾情加剧,增加失踪人数1人。截至8月9日,全县经济损失约15亿元。本文以四川省凉山州甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害为例,通过现场调查与影像资料解译,结合雨情数据和理论分析,多方面剖析了甘洛县山洪泥石流的形成机理、演变机制与成灾及致灾模式,针对其成灾原因、灾情扩大等问题进行分析,探讨了工程防治与生态防治相结合的防灾减灾对策。

1 山洪泥石流形成条件

山洪泥石流灾害形成过程的主要影响因素有:陡峭的地形条件、丰富的松散固体物源补给以及短时间内充沛的降雨量。下文结合甘洛县2019年汛期发生的群发性山洪泥石流灾害现场调查以及监测资料针对上述3类影响因素进行分析。

1.1 地形地貌

甘洛县位于一级阶梯青藏高原到二级阶梯川西高原山地的过渡带上,属于深切割山区,全县山地面积约占90%左右。境内最高海拔4 288 m,最低海拔570 m,相对高差3 718 m,总体表现出“四周高、中间低”的地形地貌特征。同时,因受横断山脉褶皱、隆起与断裂等地质构造作用影响,境内山峦起伏、沟壑纵横,沟床纵坡比降大,河流切割作用强烈。因此,甘洛县境内呈现出的山岭高耸,坡面陡峭,沟谷深邃,水流湍急的地貌特征,极其有利于松散固体物质的堆积、雨后地表径流的汇集,从而为暴雨条件下山洪泥石流的迅速形成提供了有利的地形条件。

1.2 固体物源

丰富的松散固体物质来源是山洪泥石流形成、发育的基础。现场调查显示,甘洛县境内地层自前震旦系至第四系均有出露,出露地层的岩性复杂。部分岩层性质软弱,岩体卸荷,风化强烈;部分岩层坚硬却因受构造活动影响,易于在应力集中部位产生断裂、崩落;部分软弱岩层和坚硬岩层构成互层,差异风化强烈,易产生滚石和崩塌^[9]。该县处于扬子地台西缘的凉山拗褶带,汉源—甘洛—昭觉大断裂和石棉—普雄大断裂纵贯县境,构造十分发育^[9]。岩层长期受构造运动的作用,岩石破碎,节理裂隙发育,风化剥蚀强

烈。因此,当地的地层岩性与地质构造运动利于产生大量松散固体物质。其次,四川省近年来强烈、频繁的地震作用,如 2008 年汶川县 8.0 级地震,2013 年芦山县 7.0 级地震,2017 年九寨沟县 7.0 级地震,2019 年长宁县 6.0 级地震等,使得部分岩体进一步松动、破碎,地质条件再度恶化。再者,人类长期生产活动对山区坡地的不科学开垦、森林植被的过度砍伐所造成的水土流失,不合理的开矿采石致使边坡失稳、岩体崩落,以及随意堆放兴建各类工程所产生的弃石弃渣,均为山洪泥石流的形成提供了又一物质基础。上述内外因素的综合作用表明,甘洛地区具有储蓄量大、补给量足的松散固体物质来源。

1.3 降雨条件

降雨是山洪泥石流形成过程中不可忽视的因素。甘洛县地处北纬 28°38′—29°18′,属亚热带气候,降雨丰沛。该地区降雨特征主要表现为:①局部性暴雨频繁,雨量集中;②气候垂直变化明显,“形成区”的降雨强度远远超过“流通区和堆积区”^[10]。因而,在此降雨特点下迅速产生的集中而又丰沛的水源是甘洛山洪泥石流形成极其有利的驱动条件。以甘洛县前进乡自物村测站点雨情数据为例。图 1 显示了该测站点自 2019 年 7 月 28 日 21:00 到 29 日 15:00 的每小时降雨量及累积降雨量。降雨始于 28 日 22:00,雨量高达 37 mm/h;在 29 日 10:00,11:00 之间达到最大雨强 45.5 mm/h,此后降雨强度逐渐下降;从降雨开始至 29 日 15:00,累积降雨量达到 144 mm。数据表明,该区域有着“短历时、强暴雨”的降雨特征。

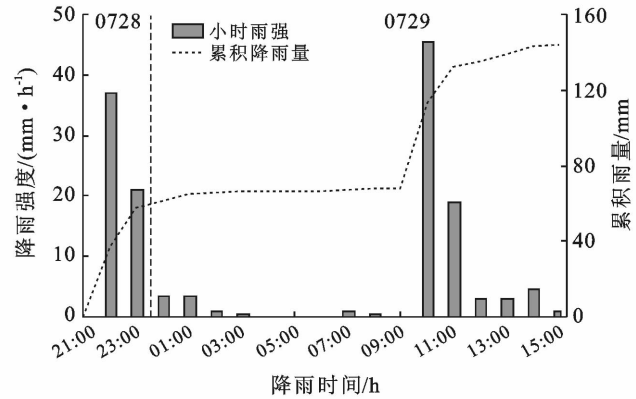


图 1 甘洛县前进乡自物村测站点 2019 年 7 月 28—29 日降雨数据

2 山洪泥石流形成机理分析

山洪泥石流灾害是洪水与固体物质相互作用共同致灾的产物。由上述固体物源分析可知,多方面因素导致甘洛山区坡面、沟道内堆积着丰富的松散固体物质。研究^[11]表明,震后沟道松散堆积体失稳并形成山洪泥石流,是降雨作用导致堆积体内潜水位不断抬升、水力环境不断劣化的结果。如图 2 所示,伴随着强降雨的发生,一部分雨水形成地表径流,不断冲刷结构松散的坡面土石体,使其迅速汇集于沟道内;同时沟道内各类松散堆积物的强度也因受雨水浸泡而急剧降低。另一部分雨水则入渗岩土体,增加岩土体自重同时导致岩土体饱和和软化,致使其孔隙水压力升高,有效应力减小,抗剪强度等力学性能大幅度降低,直至土体结构破坏,成为山洪泥石流又一物质补给。

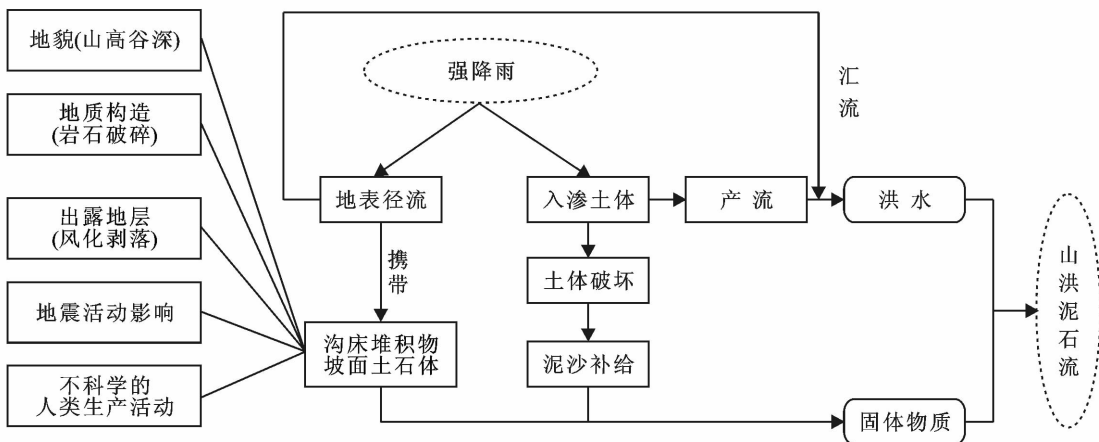


图 2 甘洛县山洪泥石流形成机理示意图

当降水量充足时,各类物源开始随地势向下输移。地表水通过其搬运作用不断冲刷、侵蚀、裹挟着沿程的软弱岩体、砂石、碎屑参与运动,翻滚、奔涌向地势较低处。此时,充足的降雨补给,使得物源量不

断增多,流体规模由小变大,流体的力学特性也发生了本质变化:密度增大,动能不断发育,侵蚀能力、淤堵能力增强,使得山洪泥石流的破坏力不断增强,灾害规模也随之扩大。有研究者^[12-13]将上述山洪泥石

流形成与运动机理分析归纳为:雨水汇集—二次堆积—物源饱水开始运动(强度降低)—支沟物源冲出—汇入主沟—揭底下切和侧缘冲刷—山洪泥石流形成。

3 人类活动的影响

除自然环境因素以外,山洪泥石流在运动过程中受到人类活动的影响也较为显著,主要表现在人居选址阻滞和工程建设阻滞两个方面^[14]。现场勘查与影像解译表明,甘洛县田坝河流域前进乡尔姑村位于勒古沟沟口处,正好处于山洪泥石流的行洪通道上,阻滞了此次山洪泥石流的流动进程,最终山洪泥石流使得该村落道路被掩埋,两侧民房均遭受不同程度的冲毁、淤埋或填充(图3)。此外,田坝河流域前进乡也因阻滞甘家沟山洪泥石流而导致大量的泥土、砂粒、石块涌入居民区内,部分民房被直接冲毁或掩埋过半(图3);上述研究表明,由于部分山洪泥石流沟

道难以避让或前期勘察、判别工作不够详尽等,导致人居选址阻滞了山洪泥石流进程,最终诱发山洪泥石流灾害,并对人居选址造成掩埋、淤堵等影响。

人类活动中工程建筑的修建也会对山洪泥石流致灾演化造成影响。此次研究区域中,位于尼日河流域的凉红电站,正好位于山洪泥石流沟出山口处,主厂房受损严重。在该电站旁修建的一条桥梁由于缩减了山洪泥石流的过流能力,从而导致水、沙在该处的不断停积,能量不断蓄积。在水沙不断冲刷桥面,蓄积能量达到桥梁的临界承载点后,桥梁被冲毁(图4)。工程建筑物对山洪泥石流的作用,主要表现为不同程度地改变了山洪泥石流的行进速度、阻碍其行洪路径、制约其过流能力,最终导致山洪泥石流的能量蓄积。停积的水沙对工程建筑产生冲刷、撞击等多种作用,蓄积能量的释放甚至会造成工程建筑物的剧烈损毁,导致更大的灾害发生。



前进乡尔姑村勒古沟山洪泥石流



前进乡甘家沟山洪泥石流

图3 典型山洪泥石流民房致灾情况



图4 山洪泥石流进入主河道时典型泥沙淤积致灾情况

4 山洪泥石流入汇河道

通过现场调查发现,山洪泥石流入汇河道所引起的次生灾害是导致甘洛灾情规模进一步扩大的重要

原因(图5)。山洪泥石流具有高强度的输沙能力和强烈的冲淤作用,能在很短的时间内将大量大小混杂的固体物质输入主河,改变主河水沙特性和河道形态,影响主河河床演变^[15]。因此,山洪泥石流入汇河流所带来的间接影响也不容小觑。

在山洪泥石流的流量和密度都相对较大,且动能充足的条件下,山洪泥石流汇入主河时能够克服主河河床的阻力及其水流的冲击力,大量固体物质不断向对岸运移,最终以堰塞坝的形式堵塞河道,截断主河(图6)。此时,洪水将在上游迅速形成堰塞湖,导致上游居民住房、农作耕地、交通线路受灾。更严重的是,此堰塞坝本身强度不足,极易发生溃坝事件,造成大规模溃决洪水入侵下游区域。这将严重威胁下游人民的生命财产安全,以及沿岸交通线路和建筑工程,使得灾情规模再次扩大。

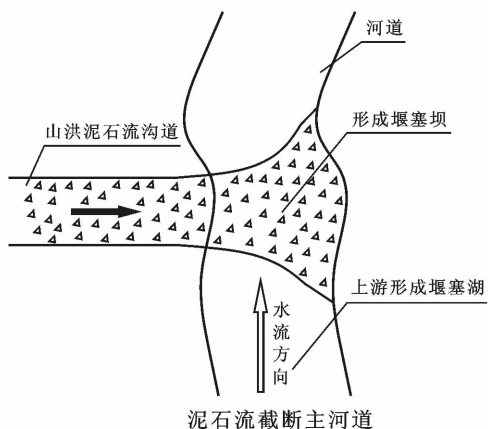


苏雄乡埃岱村勒觉沟

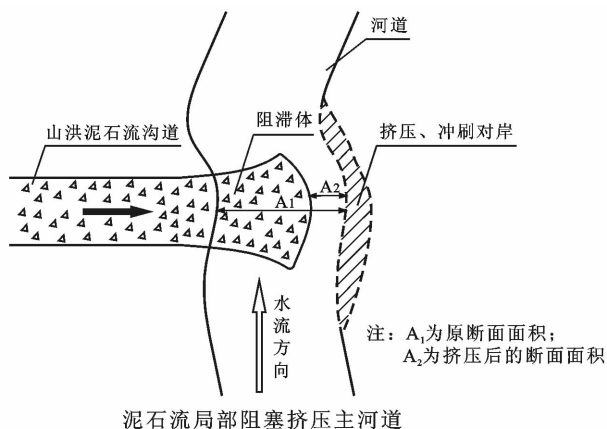


前进乡甘家沟

图 5 甘洛县山洪泥石流汇入河道



泥石流截断主河道



泥石流局部阻塞挤压主河道

注: A_1 为原断面面积;
 A_2 为挤压后的断面面积

图 6 山洪泥石流汇入主河道示意图

有的山洪泥石流因固体含量相对较少、动能不充分、河道水流冲击力强等因素,涌入河流而无法运移到对岸,在交汇区入口附近或河床中部停积下来形成堆积体,局部堵塞河道(图 6)。此类情况下,河道的过流断面由 A_1 缩减到 A_2 ,河道水流受到束窄,导致泄洪能力骤降;主河水流受挤压后流速剧增,使得洪

水不断淘刷对岸,推移河道,改变河流路径,致使对岸受灾。山洪泥石流局部堵塞河道同样可导致水位上升而造成淹没灾害。2019 年 7 月 29 日 10 时,甘洛县苏雄乡埃岱村发生山洪泥石流,约 70 000 m^3 泥石流进入尼日河并造成河道部分阻塞,河床水位上升约 8 m,淹没沿岸工矿企业及民房(图 7)。



图 7 泥沙突变补给下诱发尼日河两岸民房受灾情况

5 防灾减灾对策分析

山洪泥石流灾害严重威胁着山区人民群众的

生命财产安全,极大程度上制约着山区经济的发展、生态的修复。因此,如何采取行之有效的防灾减灾措施,成为了人们关注的焦点。山洪泥石流就是水土流

失“慢性病”在特定条件下的“急性发作”^[16]。一方面,水土流失导致土体破损严重,土质软弱松散,为山洪泥石流的形成提供了丰富物源;另一方面,水土流失使得失去植被的山坡一定程度上丧失了固土蓄水、调节径流的能力。若不采取有效的防治措施,则研究区将陷入水土流失诱发山洪泥石流、山洪泥石流暴发加剧水土流失的恶性循环之中。山洪泥石流的防灾减灾措施,应以加强生态修复与水土保持为本,工程防治与生态防治相结合,综合治理、全面防治。

(1) 加强山洪泥石流监测预警工作。准确划分山洪泥石流危险区,根据危险性分区指导生产、生活活动;建立山洪泥石流灾害监测网络,对危险区域进行灾害信息采集与处理,尤其在暴雨季节,还应加强危险区的巡查、监视工作,综合分析山洪泥石流发生的概率及规模;健全山洪泥石流报警系统,并充分利用现代通讯技术与手段,及时向居民发布预警信息,提醒其做好必要的防灾避险措施;根据各村落实情况,规划撤离路线,制定应急避难措施,最大程度地降低山洪泥石流可能造成的生命财产损失。

(2) 加强拟建工程的灾害评价工作。基于西南山区的现实情况,在进行城镇规划,道路、桥梁、水利等基础设施建设时,必须在可行性研究阶段详细开展山洪泥石流灾害专项勘察与评估工作,合理选址,尽量避让山洪泥石流沟谷以及可能存在灾害隐患的不良地段;针对无法完全避让山洪泥石流危险区的拟建工程,则应合理评估山洪泥石流灾害的影响程度,提前采取必要的排导、拦截等工程措施,或充分考虑来沙量,预留足够的空间作为山洪泥石流停淤场地。

(3) 修建必要的工程防护设施。山洪泥石流的工程治理措施主要是在其形成区、流通区和堆积区,根据山洪泥石流特征与防护对象的不同,有针对性地修建拦挡、支护、排导、治水、停淤等工程设施,通过控制山洪泥石流的来沙条件、行洪路径和输沙能力等,制约山洪泥石流的发展与危害。甘洛县境内沟谷切割作用强烈,沟床堆积物丰富。因此,采用拦挡与排导工程相结合,如修建实体拦沙坝、格栅坝以及导流堤等工程,可使山洪泥石流发生频率及规模得到有效控制,并防治山洪泥石流发生时粗粒物质堵塞河道。

(4) 采取适宜的生态防治措施。甘洛县山洪泥石流沟谷众多,且大小不一,若每条沟谷都采取工程设施进行治理,经济成本大。因此,加强对受灾区以及可能存在灾害隐患的危险区域的生态修复工作,切实有效地进行水土保持工作,从而改善山区生态系统的环节也必不可少。生态防治主要是指通过林业措施、农业措施以及种植措施,固结松散土体,全面控制

水土流失的发生与发展。生态防治可采取积极倡导当地百姓退耕还林、巩固封山育林成果、规划实施陡坡阶梯化工程等措施,如政府投入一定资金,在退耕还林、坡改梯的地方引导、鼓励百姓种植果树、药材等经济作物。这样,既协调了人类生产活动与自然环境的关系,改良和科学利用了水土资源,又增添了百姓的致富渠道。

(5) 开展宣传教育工作,增强水土保持意识。西南山区境内山洪泥石流灾害频发,但山区人民对山洪泥石流的形成、发展、致灾特征以及防治、应对措施等却缺乏了解。因此,广泛宣传山洪泥石流的基础知识,普及防灾减灾的知识与技能,增强民众的自我防范意识、水土保持意识也尤为重要。

6 结论

(1) 四川省甘洛县境内山高沟深的地形、储备丰富的物源、集中高强的降雨等孕育条件有利于山洪泥石流灾害的发生。其中,短期强降雨是该区山洪泥石流暴发的主要驱动条件。

(2) 山洪泥石流灾害是洪水与固体物质相互作用共同致灾的产物。固体物质的过量供应迅速改变着流体的力学特性,形成大密度、高速度、强侵蚀的山洪泥石流,从而对灾害规模产生放大效应。

(3) 由于受工程建设、民房修建等人类活动的影响,山洪泥石流在运动过程中受到部分民房、道路、电站等建筑的阻滞影响比较明显。

(4) 山洪泥石流对灾区的危害有直接与间接之分。山洪泥石流入汇主河导致河道局部堵塞或全面截断,造成水流淘刷对岸、河道变迁、水位抬升、溃决洪水等一系列次生灾害,使得灾情规模加剧。

(5) 甘洛县频发的山洪泥石流灾害,很大程度上成为其社会经济发展、人民安居乐业的阻碍。因此,以防为主,工程防治与生态防治相结合,改良和科学利用水土资源,采取更加强力、更加务实的举措加强灾区生态修复与水土保持,改善生态系统,是防灾减灾工作的根本所在。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,韦方强,谢洪,等.中国西部泥石流及其减灾对策[J].第四纪研究,2003,23(2):142-151.
- [2] 唐川,李为乐,丁军,等.汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J].中国地质大学学报(地球科学),2011,36(1):172-180.
- [3] 乐茂华,朱静,黄勋,等.雍家沟泥石流活动特征与堵江[J].山地学报,2013,31(5):573-579.

- [4] 陈宁生,黄娜.普格县荞窝镇8·8泥石流灾害应急调查研究[J].山地学报,2018,36(3):482-487.
- [5] 亓星,余斌,王涛.沟道坡度对泥石流起动模式影响的模拟试验研究[J].水电能源科学,2014,32(7):116-119.
- [6] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71 (1/2):49-61.
- [7] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,2016,35(2):137-147.
- [8] 郭志学,曹叔尤,刘兴年,等.泥石流堵江影响因素试验研究[J].水利学报,2004,35(11):39-45.
- [9] 钟敦伦,谢洪,李斌,等.四川省甘洛县泥石流[J].山地研究,1990,8(2):107-113.
- [10] 高翔.甘洛县的泥石流类型和防范措施[J].水土保持通报,1998,8(4):35-43.
- [11] 吴永,何思明,裴向军,等.震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析[J].岩土力学,2012,33(10):3043-3050.
- [12] 李安润,邓辉,余天彬,等.汶川极震区锄头沟泥石流发育特征及启动机理[J].四川地质学报,2019,39(2):285-288.
- [13] 高波,任光明,王军,等.四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):1-5.
- [14] Gan Binrui, Liu Xingnian, Yang Xingguo, et al. The impact of human activities on the occurrence of mountain flood hazards: Lessons from the 17 August 2015 flash flood/debris flow event in Xuyong County, Southwestern China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, 9(1):816-840.
- [15] 崔鹏,何易平,陈杰.泥石流输沙及其对山区河道的影响[J].山地学报,2006,24(5):539-549.
- [16] 付兴盛,罗万福,龙启林,等.水土保持综合治理是防治山洪泥石流的根本措施:“7·6”山洪泥石流灾害中两条小流域受灾程度不同的原因分析措施[J].中国水土保持,2011(9):56-59.

(上接第272页)

- [21] Foltete J C, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012,38:316-327.
- [22] Xiao Sun, Crittenden J C, Feng Li, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services: A case study in Atlanta Metropolitan area, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,622/623:974-987.
- [23] Yang Bai, Wong C P, Jiang Bo, et al. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning [J]. *Nature communications*, 2018, 9(1):3034.
- [24] 董晓峰,刘申,刘理臣,等.基于熵值法的城市生态安全评价:以平顶山市为例[J].西北师范大学学报(自然科学版),2011,47(6):94-98.
- [25] 谢亦欣,袁章帅,邹怡,等.基于PSR模型—熵权法的土地生态安全评价:以上海市为例[J].北京印刷学院学报,2019,27(8):94-98.
- [26] 韩雅琴,白中科,张继栋,等.“一带一路”背景下东南亚地区生态安全评价研究[J].生态经济,2020,36(6):181-187.

(上接第280页)

- [38] 赵文智,庄艳丽.中国干旱区绿洲稳定性研究[J].干旱区研究,2008,25(2):155-162.
- [39] 王雅,蒙古军.黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J].干旱区研究,2017,34(1):200-207.
- [40] 高鹏文,阿里木江·卡斯木,图尔荪阿依·如孜,赵孟辰.哈密市生态环境效益时空分析[J].干旱区研究,2020,37(4):1057-1067.
- [41] 鲁晖,颜耀文,张文培,等.1986—2015年民勤县绿洲时空变化分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1410-1417.
- [42] 廖杰,王涛,薛娴.近55年来黑河流域绿洲演变特征的初步研究[J].中国沙漠,2012,32(5):1426-1441.
- [43] 罗格平,周成虎,陈曦.从景观格局分析人为驱动的绿洲时空变化:以天山北坡三工河流域绿洲为例[J].生态学报,2005,25(9):2197-2205.
- [44] 王小军,陈翔舜,刘晓荣,等.河西走廊区沙漠化年度趋势变化分析研究[J].甘肃科技,2014,30(9):1-4,23.
- [45] 孙朋,巩杰,高彦净,等.干旱区流域绿洲时空变化及其景观响应[J].干旱区研究,2014,31(2):355-361.
- [46] 王耀斌.基于可持续发展的额济纳绿洲生态环境变化研究[J].甘肃联合大学学报(自然科学版),2010,24(1):58-63,66.
- [47] Zhang Hong, Wu Jianwei, Yu Yunjiang, et al. A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(3):545-553.