

文章编号: 1008-2786-(2018)2-260-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000321

# 震后小流域重力侵蚀产沙效应

## ——以汶川震中莲花芯沟为例

韩用顺<sup>1,2</sup>, 吴淼<sup>2</sup>, 曹泽辉<sup>2</sup>, 张东水<sup>1</sup>, 陈勇国<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;

3. 湖南科技学院 土木与环境工程学院, 湖南 永州 425199)

**摘 要:** 震后小流域重力侵蚀过程与机制复杂, 具有显著的产沙输沙效应, 造成强烈的水土流失, 严重威胁灾后重建和重大工程安全, 是泥石流和土壤侵蚀领域研究的热点与难点之一。本文以震中莲花芯沟为典型研究区, 选取 2008—2010 年的三场泥石流, 采用多源遥感和 GIS 等手段, 建立数字坡沟系统, 融合 D-InSAR 和偏移量跟踪技术, 生成不同场次泥石流前后的三维地形变形场, 研究震后泥石流在不同类型“坡体—沟道—流域”上的多尺度侵蚀产沙特征与物质迁移过程。结果表明: 1) 2008—2010 年三场泥石流, 坡体侵蚀总量分别为  $6.44 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $3.36 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $3.02 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 输入沟道的泥沙总量分别为  $3.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $1.56 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $5.16 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 流域侵蚀总量分别为  $6.736 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $5.217 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $5.540 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 流域输沙总量分别为  $3.84 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $2.24 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $2.96 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; 2) 坡体重力侵蚀产沙量占各级沟道总来沙量的 50% 以上, 是各级沟道泥沙的主要来源, 其中以凸凹型坡、凸型坡和混合型坡三类坡体产沙最多, 占坡体总产沙量的 85% 以上, 且随沟道级别升高(三级→二级→一级)而呈递减趋势, 二级沟道在各级沟道中输沙贡献率最大, 达 45%, 是主沟泥沙重要来源; 3) 坡体侵蚀量与侵蚀面积及堆积量与堆积面积的比值均存在指数函数关系, 坡体产沙量与坡体单元面积的比值呈线性正相关关系, 坡体侵蚀量、堆积量、产沙量均随其对应面积的增大而增大; 4) 震后坡体侵蚀速率呈先减小后增大趋势, 最大侵蚀速率在凸凹型坡体单元, 达 0.24m/次; 流域侵蚀速率也呈先减小后增大趋势, 同时, 存在由低到高逐级递增趋势, 其中主流域侵蚀速率最大, 达 0.39m/次; 5) 各级流域泥沙输移比随流域级别增高而减小, 其中主流域泥沙输移比最低, 为 0.28, 三级流域最高, 达 0.93。研究结果可以为灾区小流域泥沙调控、重大工程选址选线、河流整治和次生山地灾害风险评估及防治工程设计提供依据和参考, 对保障山区公共安全具有重要意义。

**关键词:** 震后泥石流; 侵蚀产沙效应; D-InSAR; 偏移量跟踪技术; 数字坡沟系统; 莲花芯沟

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

汶川地震强烈扰动了灾区地质环境和岩土体结构, 产生了数十亿至数百亿巨量松散堆积物<sup>[1]</sup>, 改变了泥石流形成条件和活动特征, 导致震后泥石流爆发阈值降低、频率和强度加剧, 产生了大规模的泥沙输移和强烈的水土流失, 其侵蚀速率达到了通常状态下坡面土壤侵蚀速率的百万倍, 造成河道淤积、

道路损毁、水电工程失效、生态环境破坏, 并严重威胁城镇与公共安全。2008-9-24 西山坡沟和魏家沟泥石流约 150 万方, 淤埋北川县城 5~10 m, 造成 35 人死亡和失踪; 2010-8-7 舟曲泥石流总量约 181 万方, 淤积 2~7 m 厚, 造成 1765 人伤亡、直接经济损失近 20 亿元; 2010-8-13 汶川县红椿沟泥

**收稿日期** (Received date): 2017-11-28; **改回日期** (Accepted date): 2018-3-22

**基金项目** (Foundation item): 岩土力学与工程安全湖南省重点实验室开放基金(16GES06); 交通运输部科技计划项目(20153161T906); 特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金(kfj120404)。[Hunan Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety(16GES06); Ministry of Transport Science and Technology Program(20153161T906); Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan province(kfj120404).]

**作者简介** (Biography): 韩用顺(1974-), 男, 河南信阳人, 博士, 教授, 主要研究方向: 山地灾害与 3S 技术及应用研究。[Han Yongshun(1974-), male, born in Xinyang, Henan province, Ph. D professor, mainly engaged in mountain hazards, 3S technologies and applications.] E-mail: yongshunhan@126.com

泥石流冲出量约 70 万方,阻断岷江并迫使江水改道冲进映秀新区,造成 72 人死亡<sup>[2]</sup>;绵竹市文家沟泥石流总量约 310 万方,形成长约 1600 m、宽约 350 m 的淤积体,造成 51 人伤亡<sup>[4]</sup>;2008—2013 年汶川县境内 G213/317、都汶公路、映卧公路沿线平均每年遭受 2~3 次大规模泥石流灾害,造成道路严重损毁并多次重建,已恢复重建的草坡乡被迫异地搬迁到水磨镇等地,岷江上游河道泥沙平均淤积 10~20 m。震后泥石流重力侵蚀产沙已成为灾区面临的突出问题和江河上游最剧烈、最复杂、最严重的产沙输沙方式。

国内对重力侵蚀的研究主要集中在黄土高原区,相关学者从重力侵蚀与高含沙水流的关系<sup>[3]</sup>、坡沟中重力侵蚀机理、重力侵蚀产沙时空分布及其与下垫面的关系等方面进行了大量研究,另有学者利用实测资料分析了重力侵蚀频发的部位及时段<sup>[4]</sup>。当前国内外学者对泥石流侵蚀产沙的研究仍比较薄弱,大多数从地理地貌学角度或者利用三维激光扫描、3S 技术等手段对沟道重力侵蚀特征及演化规律进行一定程度的量化研究<sup>[5]</sup>,仍停留在基于沟道或断面调查的数据分析<sup>[6]</sup>。有学者研究了泥石流侵蚀产沙的流体<sup>[7]</sup>、沟床、水动力<sup>[8]</sup>、降雨<sup>[9]</sup>和径流<sup>[10]</sup>等影响因素、泥沙来源和输沙特征;也有学者对泥石流产沙进行了分区分类研究<sup>[11]</sup>,并从沟坡系统力学稳定性<sup>[12]</sup>、重力侵蚀类型及其物源<sup>[13]</sup>等角度,开始尝试用土力学、水力学、灰色系统、室内外模型实验等方法进行泥石流产沙机制研究<sup>[14-15]</sup>。总体而言,泥石流侵蚀产沙成因复杂、随机性大、时空分布不均,其研究正在从定性描述转向定量分析。但由于缺乏长期系统的实验观测资料,震后泥石流侵蚀产沙的定量研究仍然较少,对不同时空尺度的“坡体-沟道-流域”产沙过程及特征尚不明晰<sup>[16]</sup>。传统的实验观测方法难以满足流域尺度及大范围重力侵蚀精确测量,而雷达遥感不受光照和气候条件限制,可全天候监测不同尺度与精度的地表形变过程<sup>[17]</sup>,目前鲜少有学者将该技术用于小流域泥石流侵蚀产沙研究<sup>[18]</sup>。

本文以震中莲花芯沟为典型研究区,选取 2008—2010 年的三场泥石流,采用多源遥感和 GIS 等手段,在流域下垫面与侵蚀类型划分、微地貌与小流域单元提取以及不同尺度“坡体-沟道-流域”建模的基础上,建立数字坡沟系统,融合高精度的差分干涉测量和低相干性的偏移量跟踪技术,生成不同场次泥石流发生前后的三维形变场,研究震后泥

石流在不同类型“坡体-沟道-流域”上的多尺度侵蚀产沙特征与物质迁移过程,量化不同坡沟单元对小流域侵蚀产沙的贡献,阐明震后小流域重力侵蚀产沙的时空变化规律,确定不同尺度的泥石流产沙规模与速率。研究成果可深化对震后泥石流产沙过程与规律的认识,并可为高烈度地震区及其他类似山区的泥石流灾害防治与泥沙调控提供科学依据和工程设计参数。

## 1 研究区概况

莲花芯沟为牛圈沟流域的一级支沟,地处青藏高原东缘的龙门山系向四川盆地的过渡地带,  $E103^{\circ}26'13''-103^{\circ}27'51''$ 、 $N31^{\circ}02'31''-31^{\circ}02'59''$ ,位于汶川县映秀镇西南方向 1.5 km,汶川地震震源中心在该沟上游(图 1)。研究区在龙门山中央断裂带上,新构造运动强烈,地层以二叠系和奥陶系为主,闪长岩广布,断裂发育;地势总体西北高东南低,以侵蚀构造高中山地貌单元为主,山高坡陡,沟谷深切,流域面积 1.94 km<sup>2</sup>,主沟长 2.81 km,沟床比降 486‰,海拔 1029~2394 m、相对高差 1365 m,平均坡度 33.97°;该区为山地亚热带湿润季风气候区,年均降水量 1285 mm,24 h 降雨量可达 160 mm,是川西多雨中心和暴雨地区之一,地下水赋存条件好,沟内常年流水。汶川地震极大地改变了区内地质环境条件和“坡体-沟道-流域”背景,造成山体震裂,诱发了大规模崩塌、滑坡、碎屑流等次生山地灾害,形成的巨量固体松散物质堆积在坡体和沟道。其中,震源喷射物及滑坡物质转化的高速碎屑流,形成长约 2100 m、宽约 50~80 m、厚约 20~40 m 的松散堆积体,超过 350 万方,为震后泥石流形成提供了丰富的物源,是研究震后小流域重力侵蚀产沙的理

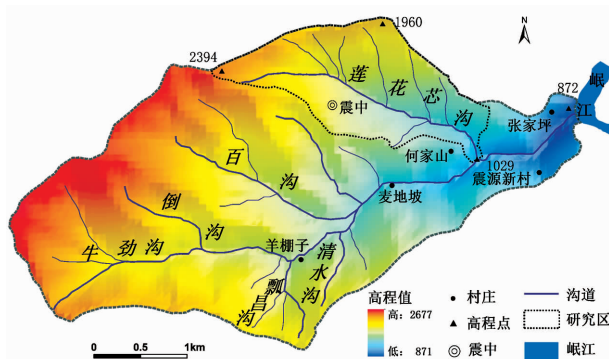


图 1 牛圈沟与莲花芯沟流域三维数字高程模型

Fig. 1 Three-dimensional Digital Elevation Model of Lianhuaxin Gully at Niujuan Catchment, Sichuan, China

想场所。震后强降雨作用下,2008-5-12、2008-6-27、2008-9-29、2008-10-14、2009-8-22、2010-7-15、2010-8-14、2011-7-3、2011-8-21、2012-5-4、2012-8-18、2013-7-8 共爆发了 12 场大规模泥石流灾害,产生了强烈的重力侵蚀和产沙输沙效应,改变了坡体、沟道、河床及流域地貌形态,造成沿途道路及沟内建筑物损毁和严重的堵江事件<sup>[19]</sup>。

2 数据源及其处理

本研究的数据源主要包括雷达遥感数据、航空遥感影像和 1:1 万数字地形图。雷达遥感数据采用日本 ALOS 卫星 PALSAR 传感器 6 景 L 波段的 FBS 升轨数据(表 1)。经过 1×3 的多视处理,方位向地面分辨率 9.55 m、距离向地面分辨率 7.9 m,用于 2008-5-12、2009-8-22 和 2010-7-15 至 8-14 四场泥石流发生前后的形变场提取和重力侵蚀产沙分析。由于仅获得了 2010 年 2 月 9 日和 12 月 29 日的 SAR 数据,缺失 7 月 14 日至 8 月 15 日之间的数据,因此 2010 年 SAR 数据提取的形变场包含了 2010-7-15 和 2010-8-14 两场泥石流的侵蚀产沙信息。对初始雷达影像进行聚焦处理以提高其空间分辨率,获取单式复数数据,采用多视处理抑制斑点噪声后,基于多普勒距离方程将影像的雷达坐标转换为地理坐标以完成地理编码,裁剪出研究区作为后续形变场提取的基础雷达数据。

表 1 雷达遥感影像信息  
Tab. 1 Information of SAR images

影像名称	获取时间 (年.月.日)	数据类型	分辨率/m
ALPSRP108320610	2008.02.05	FBS	10
ALPSRP128450610	2008.06.22		
ALPSRP162000610	2009.02.07		
ALPSRP202260610	2009.11.10		
ALPSRP215680610	2010.02.10		
ALPSRP262650610	2010.12.29		

航空遥感数据采用中国科学院遥感与数字地球研究所提供的 2008—2010 年的 3 期 ADS40 影像,用于流域下垫面信息提取和重力侵蚀类型划分,同时为雷达数据处理提供分区掩膜,并为数字坡沟系统建模和形变分析提供参照。将影像进行几何校正和图像增强等预处理后,采用面向对象方法提取流

域内的森林、灌丛、草地、新增裸地、原状裸地等下垫面信息以及崩塌、滑坡、泥石流沟道、堆积体等重力侵蚀类型区。

1:1 万数字地形数据主要用于建立数字坡沟系统和各类数据配准。制作形成统一的空间数据框架,生成 DEM,进行水文与地形分析,提取不同类型和层级的坡体、沟道和流域单元,建立小流域尺度的数字坡沟系统,以研究震后重力侵蚀“坡体→沟道→流域”的物质迁移过程与产沙效应。

3 研究方法

3.1 数字坡沟系统

不同类型和层级的“坡体-沟道-流域”形成的坡沟系统是泥石流物质迁移的通道与尺度转换单元,表征了重力侵蚀产沙的路径、过程和时空特征,而目前鲜有从坡沟系统的角度研究震后重力侵蚀产沙过程与规律。任一流域单元,山谷线可将其分为左、右两个坡体,根据地表起伏度或曲率,进一步将各坡体逐级分为直线型、凸型、凹型及其组合型的坡体单元;各坡体单元,是重力侵蚀产沙赋存、发生和运移的主要场所。

基于微坡体单元、地理编码、水文分析算法和 GIS 空间分析技术,提出坡沟系统分类分级标准(表 2)和自动提取方法,建立震后泥石流重力侵蚀产沙综合数据库、数字化“坡体-沟道-流域”模型和数字坡沟系统。其核心算法与主要过程如下:

表 2 坡体单元分类标准  
Tab. 2 Classification standard of slopes

坡体单元类型	定性描述	曲率及占比
直线型	集中分布的直线型坡所占面积最大	$0.3 > C_V > -0.3, \geq 70\%$
凸型	集中分布的凸型坡所占面积最大	$C_V \geq 0.3, \geq 70\%$
凹型	集中分布的凹型坡所占面积最大	$C_V \leq -0.3, \geq 70\%$
凸凹型	以凸、凹型坡为主,呈上凸下凹	$C_V \geq 0.3, \geq 35\%;$ $C_V \leq -0.3, \geq 35\%$
凹凸型	以凸、凹型坡为主,呈上凹下凸	$C_V \leq -0.3, \geq 35\%;$ $C_V \geq 0.3, \geq 35\%$
混合型	凸型与凹型多次组合	其他

1)提取沟道体系和流域单元。运用 ArcGIS10.2

的三维建模、空间分析和水文模型,将 1:1 万数字地形图,转换为 1 m 间隔的 DEM,经试验分析,采用 4 邻域流向算法,确定莲花芯沟主沟、二级支沟和三级支沟的流量阈值分别为 10000、1000、200;进行汇流分析、洼地填充和流域识别等计算与处理,提取研究区各级水系及其流域单元,并进行拓扑重构,生成初步的“沟道-流域”系统;结合高分遥感影像、野外调查资料和重力侵蚀产沙综合数据库,对各实体的部分逻辑错误和空间错误进行拓扑检查与人工编辑,消除数据精度、参数率定和相关模型概化程度等因素的影响,从而建立完整的数字“沟道-流域”系统;根据最小尺度的分水线与汇水线,将流域划分为不同的坡体。

2) 坡体单元划分与建模。按地表起伏度或曲率大小,将坡体分为直线型坡、凹型坡、凸型坡和复合型坡等四种类型,其中前三类为坡体的基本类型,复合型坡常由基本类型的坡体组合而成。定义基本类型坡体为  $S$ ,将其分为上、下两部分(即  $S_a$ 、 $S_b$ ),斜率分别为  $K_a$ 、 $K_b$ ,二者相交处为破折线  $L_{ab}$ ,则  $K_a = K_b$  当时,称  $S$  为直线型坡,当  $K_a > K_b$  时,称  $S$  为凹型坡,当  $K_a < K_b$  时,称  $S$  为凸型坡(图 2)。研究区地形复杂,少有曲率为 0 的直线型坡;通过 DEM 进行曲率计算,经反复试验对比,确定凹型坡、直线型坡和凸型坡的曲率范围分别为:  $C_v < -0.3$ 、 $-0.3 \leq C_v \leq 0.3$  和  $C_v > 0.3$ ,据此进行坡体单元的提取,并将提取结果与基本坡型图进行叠置分析,统计区内坡体中的坡体类型、集中分布所占最大面积等指标,进行坡体单元重分类和分级制图,从而建立研究区坡体系统和基于“坡体-沟道-流域”的数字坡坡系统(图 3)。

### 3.2 泥石流形变场

不同雷达遥感技术与方法用于提取地表形变时具有不同的精度和适用性。其中, D-InSAR 技术的精度和地物相干性敏感度高,通过相位解缠和干涉测量可有效提取地表微变形,能满足地表形变小或变形缓慢区域的精确测量,但却对地物相干性要求高,不适用于大变形测量;而偏移量跟踪技术不需进

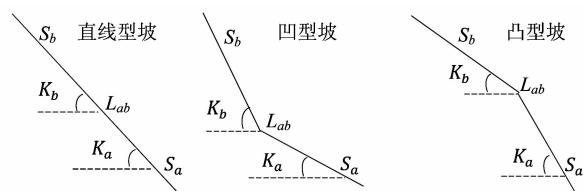


图 2 坡体三种基本类型

Fig. 2 Three basic types of slopes

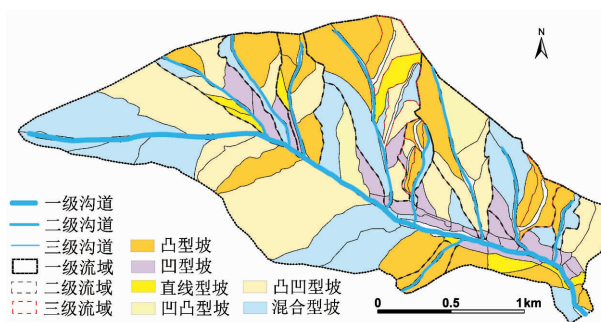


图 3 莲花芯沟数字坡沟系统分类图

Fig. 3 Classification map of digital slope-gully system of Lianhuaxin gully

行相位解缠,可监测形变量大、时间跨度较长的形变场,可提供研究区失相干严重部位的形变细节,但精度和地物相干性敏感度低。研究区震后地质地貌环境复杂多变,部分相对稳定的山体形变较少,而大部分震裂山体及重力侵蚀产沙敏感区形变剧烈,地物相干性差异大。因此,单独采用一种雷达遥感技术难以准确提取流域内各场泥石流前后的形变值。

本文在数字坡沟系统的基础上,采用面向对象方法进行高分影像的地物与地貌分类分级,将山体稳定、未发生大形变、地物相干性较高的区域定义为高相干区,采用 D-InSAR 的二轨法进行干涉处理,获取干涉相位,结合 DEM 计算高相干区的微小形变值;而将崩塌、滑坡、泥石流等重力侵蚀剧烈、地表形变大、地物相干性低的区域定义为低相干区,采用偏移量跟踪技术,将 DEM 作为地理编码参考,选择泥石流发生前后两幅影像整体配准的搜索范围为地物匹配窗口,经反复实验分析,得地物匹配窗口大小为  $256 \times 256$ ,获取最佳形变信息,计算低相干区的大形变值。运用 ArcGIS 空间分析与矢栅数据转换功能,将低、高相干区的大、小形变场进行合并,提取研究区各场泥石流不同尺度与精度的序列形变信息,构建震后重力侵蚀三维形变场模型(图 4)。将形变场与不同类型重力侵蚀区进行叠置计算,可定量分析各场泥石流重力侵蚀产沙特征与规律(表 3)。

由表 3 可知:2008-5-12 汶川地震产生的重力侵蚀产沙效应强烈,以强烈下切侵蚀为主,主要分布在流域中上游大部分区域及下游沟道左侧下部,总侵蚀量达 63.36 万方;强震造成流域中上游边界附近的震裂山体及其垮塌的松散物质顺坡迁移堆积,而流域下游中部左侧山体阻挡震中喷发物及其碎屑流而落淤堆积,总堆积量达 24.97 万方;研究区总产沙量达 38.89 万方。震后强降雨作用下,2009-8-22 泥石流导致大量松散物质从坡体向坡脚并



经沟道沿程输移,流域总体上以下切侵蚀为主,集中在左侧山体及右侧山体的上部和下部,具有溯源侵蚀和沿程下切侵蚀搬运特征,总侵蚀量 52.17 万方,其中自沟口进入牛圈沟下游主沟总输沙量达 22.41 万方,另有 9.4 万方泥沙冲入岷江,这与实测的该流域 9.6 万方流域产沙量基本一致。2010-7-15 及 8-14 泥石流在流域内仍以侵蚀产沙为主且强烈下切侵蚀区集中在沟道两侧,总侵蚀量达 69.8 万方,但侵蚀强度减弱,部分坡体中下部有趋稳态势;59.17 万方泥石流冲出物进入牛圈沟下游主沟,沿

程产生强烈的侵蚀搬运能力,但在沟道弯曲部位的凹岸和宽度变化地段,产生明显的堆积现象,总堆积量 51.63 万方。

4 结果分析

根据莲花芯沟四场泥石流地表形变场,计算不同坡沟尺度的侵蚀量、堆积量和产沙量,分析不同尺度的“坡体→沟道→流域”侵蚀产沙过程特征。因 2010 年缺少 7—8 月间的雷达数据,而野外实测的 2010-7-15 及 8-14 两场泥石流规模相当,为保证合理性,文中分析 2008—2010 年场次泥石流侵蚀产沙特征时,均将 2010-7-15 和 2010-8-14 两场泥石流侵蚀产沙量的平均值作为 2010-7-15 泥石流侵蚀产沙数据。

4.1 坡体侵蚀产沙特征

4.1.1 坡体产沙输沙定量过程

计算 2008—2010 年三场泥石流前后形变场,可得不同类型坡体单元的侵蚀产沙信息(表 4)。

由表 4 和图 5 可知:2008-5-12、2009-8-22 和 2010-7-15 三场泥石流的坡体侵蚀总量分别为  $6.44 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $3.36 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $3.02 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,坡体堆积总量分别为  $2.91 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $1.80 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $5.50 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,相应的坡体产沙总量分别为  $3.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $1.56 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $5.16 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。2008-5-12 泥石流的坡体侵蚀量、堆积量和产沙量均最大,缘于强震诱发大规模重力侵蚀,造成大量固体松散物质堆积在坡体和沟道,震后强降雨则导致坡体强烈侵蚀、堆积和产沙。2008-5-12、2009-8-22 和 2010-7-15 三场泥石流坡体侵蚀量、堆积量均呈减小趋势,而相应的产沙量则先减后增,说明产沙量与侵蚀量和堆积量具有非相关性。

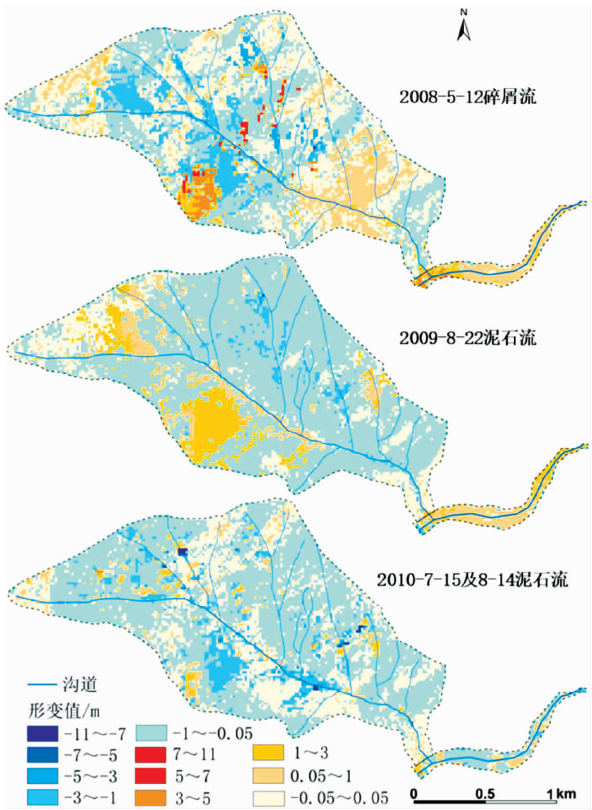


图 4 研究区 2008-2010 年震后四场泥石流形变场

Fig. 4 Four times of debris flows occurred in study area between 2008 and 2010

表 3 研究区震后不同场次泥石流侵蚀产沙统计表

Tab. 3 Erosion and sediment yield of debris flows in study area from 2008 to 2010

泥石流场次	侵蚀区					堆积区					稳定区		总产沙量
	面积 /ha	占比 /%	规模 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	平均深 度/m	最大深 度/m	面积 /ha	占比 /%	规模 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	平均厚 度/m	最大厚 度/m	面积 /ha	占比 /%	
2008-5-12	63.16	63.62	63.36	1.07	4.87	22.75	22.91	24.97	0.98	10.73	13.37	13.47	38.39
2009-8-22	77	77.56	52.17	0.68	4.26	18.63	18.76	29.76	1.59	2.97	3.65	3.68	22.41
2010-7-15& 2010-8-14	69.8	70.31	110.8	3.05	13.31	14.18	14.28	51.63	3.64	4.97	15.3	15.41	59.17

表4 不同类型坡体单元侵蚀产沙统计表

Tab.4 Erosion and sediment yield of different types of slopes

泥石流场次	坡体类型	面积/ha	侵蚀面积/ha	侵蚀量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	最大侵蚀深度/m	平均侵蚀深度/m	堆积面积/ha	堆积量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	最大堆积厚度/m	平均堆积厚度/m	产沙量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
2008-5-12	直线型	7.69	4.43	-1.65	-2.97	-0.37	3.15	0.27	2.64	0.08	-1.38
	凸型	51.70	30.68	-10.65	-5.36	-0.35	20.60	3.11	2.54	0.15	-7.54
	凹型	19.30	9.45	-3.17	-4.09	-0.34	9.60	0.50	2.58	0.05	-2.68
	凸凹型	66.22	44.36	-32.08	-4.87	-0.72	19.90	16.39	8.52	0.82	-15.69
	凹凸型	9.11	6.51	-1.10	-4.33	-0.17	2.50	0.83	10.74	0.33	-0.27
	混合型	61.84	43.98	-15.79	-4.84	-0.36	16.90	7.99	10.18	0.47	-7.80
	合计	215.86	139.41	-64.44	-5.36	-0.46	72.65	29.09	10.74	0.40	-35.36
2009-8-22	直线型	7.69	3.86	-1.10	-3.03	-0.29	4.88	0.55	0.38	0.01	-0.55
	凸型	51.70	25.35	-6.71	-3.80	-0.26	32.75	2.96	2.04	0.02	-3.74
	凹型	19.30	10.97	-2.53	-2.96	-0.23	11.38	1.06	0.69	0.01	-1.47
	凸凹型	66.22	36.98	-15.27	-3.50	-0.41	47.69	8.27	3.16	0.02	-6.99
	凹凸型	9.11	5.69	-0.66	-1.66	-0.12	5.42	0.32	1.93	0.01	-0.35
	混合型	61.84	28.14	-7.30	-2.49	-0.26	41.50	4.82	2.71	0.03	-2.48
	合计	215.86	110.99	-33.57	-3.80	-0.30	143.62	17.99	3.16	0.02	-15.58
2010-7-15 及8-14	直线型	7.69	6.60	-1.59	-5.16	-0.24	1.02	0.36	0.55	0.36	-1.22
	凸型	51.70	42.90	-12.20	-8.72	-0.28	8.65	0.84	2.57	0.10	-11.37
	凹型	19.30	16.40	-5.54	-12.00	-0.34	2.76	0.69	3.51	0.25	-4.85
	凸凹型	66.22	56.52	-24.22	-8.17	-0.43	9.58	3.91	4.32	0.41	-20.31
	凹凸型	9.11	8.30	-1.16	-2.51	-0.14	0.80	0.10	1.05	0.12	-1.06
	混合型	61.84	52.52	-15.65	-12.51	-0.30	9.17	2.84	4.50	0.31	-12.81
	合计	215.86	183.24	-60.36	-12.51	-0.33	31.98	8.74	4.50	0.27	-51.62

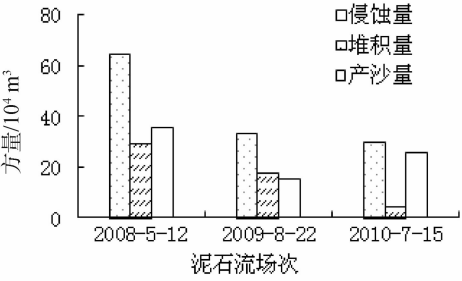
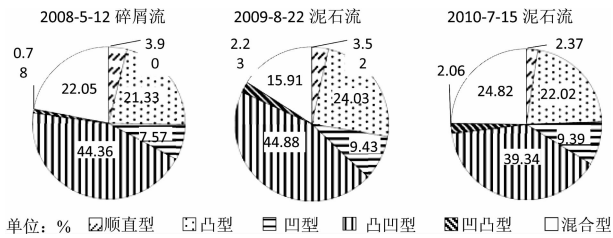


图5 三场泥石流坡体侵蚀量、堆积量和产沙量统计图  
Fig.5 Statistical chart of erosion, accumulation, sediment yield of different slopes after every debris flows in study area



单位: % 顺直型 凸型 凹型 凸凹型 凹凸型 混合型

图6 三场泥石流的不同类型坡体单元重力侵蚀产沙贡献率  
Fig.6 Contribution rate of sediment yield to erosion amount in different slopes of three debris flows

坡体输沙量与侵蚀量的比值定义为产沙率。2008—2010 年三场泥石流的坡体产沙率分别为 54.86%、46.42%、85.52%，即 2010-7-15 泥石流的坡体产沙率明显大于前两场，说明该场泥石流规模较大，其坡体产沙基本输移到沟道，且震后坡体产沙率与其产沙量、侵蚀量、堆积量均不具有明显不相关性，而与该场泥石流的发生条件及规模有关。

4.1.2 不同类型坡体单元侵蚀产沙特征

坡体单元重力侵蚀产沙量占研究区内各类坡体总重力侵蚀产沙量的比值定义为坡体的重力侵蚀产沙贡献率。结果表明:1)震后泥石流中,凸凹型、凸型和混合型坡体单元侵蚀产沙贡献率总和达 85%，因此,这三类坡体单元是坡体产沙的主要来源(图 6);同时,这三类坡体面积占研究区总面积的 83.3%，说明坡体产沙量与坡体面积有关。2)2008—2010 年三场泥石流的坡体单元侵蚀量与侵蚀面积、堆积量与堆积面积之间均存在指数函数关系,产沙量与坡体单元面积存在线性正相关关系(表 5、图 7)。

表 5 震后三场泥石流的坡体单元侵蚀量、堆积量、产沙量与其相应面积之间的函数关系表

Tab.5 Function table of relationship between erosion, accumulation and sediment yield and corresponding area of different slopes about three debris flows

泥石流 场次	侵蚀		堆积		产沙		说明
	拟合方程	拟合优度	拟合方程	拟合优度	拟合方程	拟合优度	
2008-5-12	$y_1 = 1.13e^{0.07x_1}$	0.93	$y_2 = 0.24e^{0.17x_2}$	0.73	$y_3 = 0.19x_3 - 1.08$	0.83	式中, $y_1$ 为侵蚀量、 $y_2$ 为堆积量、 $y_3$ 为产沙量/ $10^4 \text{ m}^3$ ; $x_1$ 为侵蚀面积、 $x_2$ 为堆积面积、 $x_3$ 为坡体单元面积/ha
2009-8-22	$y_1 = 0.67e^{0.09x_1}$	0.94	$y_2 = 0.35e^{0.07x_2}$	0.96	$y_3 = 0.08x_3 - 0.23$	0.72	
2010-7-15	$y_1 = 0.60e^{0.05x_1}$	0.91	$y_2 = 0.09e^{0.28x_2}$	0.77	$y_3 = 0.14x_3 - 0.56$	0.92	

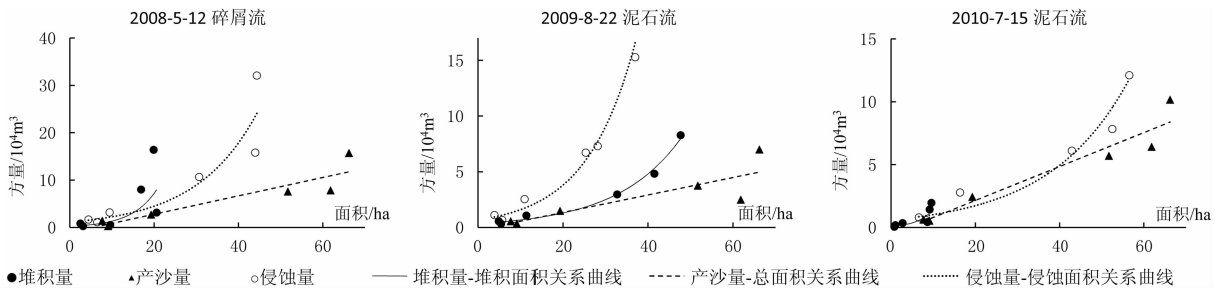


图 7 三场泥石流的坡体单元侵蚀量、堆积量和产沙量与其相应面积关系图

Fig.7 Relationship between erosion, accumulation and sediment amount and corresponding area in different slopes of three debris flows

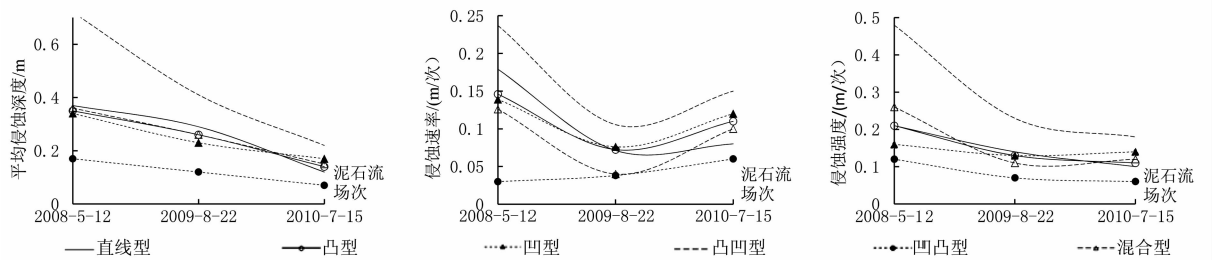


图 8 震后三场泥石流的不同类型坡体侵蚀特征

Fig.8 Erosion characteristics of different type of slopes in debris flows

定义坡体平均侵蚀深度为坡体侵蚀量与其侵蚀面积的比值,坡体侵蚀速率为坡体产沙量与其产沙面积的比值,坡体侵蚀强度为坡体侵蚀量与坡体面积比值。由图 8 可知:1)震后三场泥石流中,各类坡体单元的平均侵蚀深度、侵蚀速率和侵蚀强度均呈递减趋势。2)凸凹型坡体单元侵蚀深度、侵蚀速率和侵蚀强度均最大,而凹凸型坡体单元的最小,这表明坡体侵蚀效应与坡体单元类型与结构有关,凸凹型坡体单元上部凸型结构不稳定,易侵蚀崩落,同时坡脚处受泥石流侧蚀作用强烈,易破坏失稳,另外泥石流掏蚀作用进一步加深坡体单元侵蚀程度,故该类坡体整体呈极不稳定状态,侵蚀强度最大;而凹凸型坡体单元上部凹型结构较为稳定,侵蚀强度相对较小。3)凹凸型坡体单元的侵蚀速率随震后时间变化呈增大趋势,其他类型坡体单元的侵蚀速率均呈先减小后增大趋势。4)震后泥石流的坡体

侵蚀量与侵蚀面积及坡体面积均呈现正相关关系,因此泥石流侵蚀产沙治理措施应重点针对大面积坡体单元,且重点防治凸凹型坡体单元。

#### 4.2 沟道侵蚀产沙特征

计算研究区震后三场泥石流的各级沟道产沙输沙及其泥沙来源与泥沙量(表 6)。结果表明:1)三级沟道的侵蚀产沙总面积最小,且其泥沙来自临沟坡体侵蚀产沙输沙,震后三场泥石流中各级沟道的临沟坡体重力侵蚀输沙量均达  $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$  以上,沟道侵蚀量与平均侵蚀深度逐渐递减。二级沟道泥沙来自临沟坡体输沙和三级沟道输沙,坡体输沙量占二级沟道泥沙总量的 84% 以上,这表明二级沟道泥沙仍主要来自其临沟坡体的重力侵蚀。一级沟道(主沟)泥沙来自临沟坡体输沙和二级沟道输沙,坡体输沙量约占 50%,沟道来沙量与坡体来沙量趋于平衡;震后一级沟道的平均侵蚀深度与平均堆积厚

表 6 震后泥石流在不同级别沟道的侵蚀产沙统计表

Tab. 6 Statistics of erosion and sediment yield of gullies at different level about three debris flows

泥石流 场次	沟道级别	面积 /ha	最大侵蚀 深度/m	最大堆积 厚度/m	平均侵蚀 深度/m	侵蚀量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	坡体来沙		三级沟道来沙		二级沟道来沙	
							泥沙量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	比重 /%	泥沙量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	比重 /%	泥沙量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	比重 /%
2008 - 5 - 12	三级沟道	2.25	-3.80	4.76	-0.43	-0.63	1.35	100%	/	/	/	/
	二级沟道	7.89	-4.60	4.73	-0.70	-3.54	15.23	89.42%	1.80	10.58%	/	/
	一级沟道	6.40	-3.58	5.54	-1.03	-3.17	18.78	54.13%	/	/	15.91	45.87%
	总计	16.54	/	/	-0.76	-7.34	35.36	/	1.80	/	15.91	/
2009 - 8 - 22	三级沟道	2.25	-1.61	0.96	-0.43	-0.55	1.16	100%	/	/	/	/
	二级沟道	7.89	-4.36	1.50	-0.93	-3.85	7.90	84.75%	1.42	15.25%	/	/
	一级沟道	6.40	-2.59	2.16	-0.91	-3.56	6.51	39.23%	/	/	10.09	60.77%
	总计	16.54	/	/	-0.85	-7.97	15.58	/	1.42	/	10.09	/
2010 - 7 - 15 及 8 - 14	三级沟道	2.25	-4.06	0.11	-0.24	-0.50	1.35	100%	/	/	/	/
	二级沟道	7.89	-6.38	2.72	-0.59	-3.80	18.14	90.33%	1.94	9.67%	/	/
	一级沟道	6.40	-10.81	3.70	-1.11	-5.33	32.13	58.57%	/	/	22.73	41.43%
	总计	16.54	/	/	-0.72	-9.63	51.62	/	1.94	/	22.73	/

度均呈递减趋势。

综上可知,随沟道等级增高,泥石流流量增大,对沟道侵蚀作用增强,平均侵蚀深度加大,主沟平均侵蚀深度可达 1 m。沟道泥沙主要来自临沟坡体重力侵蚀,占 50% 以上,且沟道等级越低,坡体输沙占比越高。震后三年,流域主沟表现为先堆积后侵蚀,2008 - 5 - 12 泥石流产生大量泥沙淤积在主沟,为后续泥石流发生储备了丰富的物源,即沟道内前期泥沙输移状态对后续泥沙输移影响较大。

4.3 小流域侵蚀产沙特征

计算 2008—2010 年三场泥石流在不同级别流域单元的侵蚀产沙信息(表 7)。结果表明:流域侵蚀量和输沙量从一级流域向三级流域逐级递减。二级流域和三级流域面积之和为 51.04 ha,占一级流域总面积(99.28 ha)的 51.4%,但震后每场泥石流作用下的二级流域和三级流域的侵蚀量之和与输沙量之和均小于一级流域的侵蚀量和输沙量的 50%。由此可见,虽然一级沟道的临沟坡体面积占比小,但其贡献给流域的侵蚀产沙量却占一级流域总侵蚀产沙量的 50% 以上,这说明一级流域侵蚀产沙以其临沟坡体为主;同样可得,二级流域侵蚀产沙也以其临沟坡体为主。因此,坡体侵蚀产沙是流域侵蚀产沙的主要形式和主要泥沙来源。

重力侵蚀速率从一级流域向二级流域再到三级流域呈逐级递减趋势,即流域等级越低其重力侵蚀速率也越低。2008 - 5 - 12 泥石流各级流域侵蚀速

表 7 震后泥石流在不同级别流域单元的侵蚀产沙统计表

Tab. 7 Statistics of erosion and sediment yield of catchments at different level about three debris flows

泥石流场次	流域级别	面积 /ha	侵蚀量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	输沙量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
2008 - 5 - 12	三级流域	5.86	-2.16	-1.80
	二级流域	45.18	-28.44	-15.91
	一级流域	99.28	-67.36	-38.39
2009 - 8 - 22	三级流域	5.86	-1.64	-0.99
	二级流域	45.18	-15.50	-10.09
	一级流域	99.28	-52.17	-22.41
2010 - 7 - 15 及 8 - 14	三级流域	5.86	-2.08	-1.94
	二级流域	45.18	-27.52	-22.73
	一级流域	99.28	-110.80	-59.17

率均大于后续两场泥石流对应的各级流域侵蚀速率,其中一级流域侵蚀速率最大达 0.39 m/次(图 9)。定义泥沙输移比为流域产生量与侵蚀量的比值。震后泥石流在各级流域泥沙输移比从三级流域向一级流域随流域级别升高而呈递减趋势,即流域等级越高,其泥沙输移比越小,反之越大。其中三级流域的泥沙输移比最大、达 0.93,这表明三级流域的侵蚀产沙经沟道几乎都输移到二级流域;而一级流域泥沙输移比最小、为 0.28,表明震后小流域泥沙大部分堆积在流域内而输出相对较小,仍存在爆发大规模泥石流的风险。考虑地形因素,二级流域



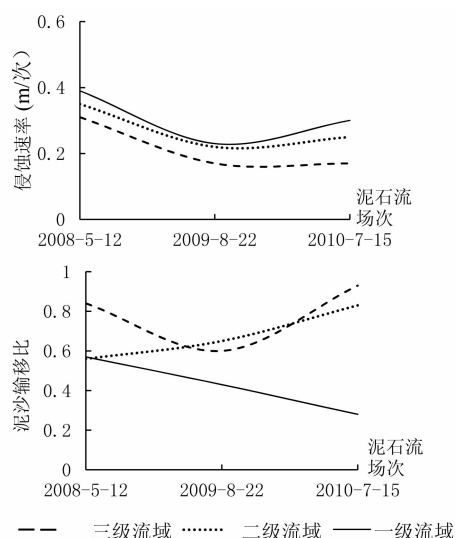


图9 震后三场泥石流的各级流域产沙输沙关系图

Fig. 9 Graph of erosion and sediment yield of catchments at different level about three debris flows

和三级流域的沟床比降相对较大,便于泥沙输出,而一级流域的沟床比降相对较小,故其输沙能力较弱。2008—2010年三场泥石流,二级流域泥沙输移比呈递增趋势,而一级流域泥沙输移比则呈递减趋势,即一级流域输沙能力逐年减弱,泥沙以堆积为主,但大量泥沙淤积后,在震后强降雨作用下,发生泥石流的规模会突增,潜在风险和危害会加剧,事实表明,2011-8-21泥石流规模大,危害严重。

## 5 结论与讨论

本项研究的初步结论如下:

1) 2008—2010年三场泥石流,坡体侵蚀总量分别为  $6.44 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $3.36 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $3.02 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,坡体输入沟道的泥沙总量分别为  $3.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $1.56 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $5.16 \times 10^5 \text{ m}^3$ ;流域侵蚀总量分别为  $6.736 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $5.217 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $5.540 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,流域输沙总量分别为  $3.84 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $2.24 \times 10^5 \text{ m}^3$  和  $2.96 \times 10^5 \text{ m}^3$ ;2008-5-12泥石流的坡体侵蚀总量、流域侵蚀总量、流域输沙总量均大于后续泥石流的相应侵蚀产沙值。

2) 凸凹型、凸型和混合型三种坡体单元的输沙总量占各类坡体总输沙量的85%,是坡体产沙的主要来源,其中又以凸凹型坡体输沙量最大,占坡体总输沙量40%以上;坡体输沙量占各级沟道总来沙量的50%以上,是各级沟道主要泥沙来源;从三级沟道到一级沟道,坡体泥沙贡献率呈递减趋势;二级沟

道在各级沟道中输沙贡献率最大达45%左右,为主沟泥沙重要来源。

3) 坡体单元侵蚀量与侵蚀面积、堆积量与堆积面积分别呈指数函数关系,而产沙量与坡体单元面积呈线性正相关关系;总体而言,坡体侵蚀量、堆积量和产沙量均随相应面积的增大而增大。凸凹型坡体的结构最不稳定,其侵蚀深度、侵蚀速率和侵蚀强度均为最大,而凹凸型坡体的结构相对稳定,其侵蚀深度、侵蚀速率、侵蚀强度均为最小。因此,小流域泥石流的泥沙治理与调控应重点针对大面积凸凹型坡体单元。

4) 各级流域泥沙输移比随流域级别增大而减小,即流域级别越高,泥沙输移比越小,其输沙能力越弱,其中三级流域的泥沙输移比最高、达0.93,一级流域的泥沙输移比最低、为0.28;震后泥石流在三级流域的泥沙输移比呈逐年递增趋势,而在一级流域的泥沙输移比呈逐年递减趋势。

利用雷达遥感数据与技术方法,可定量研究震后泥石流在不同类型与尺度的“坡体-沟道-流域”侵蚀产沙过程与特征。但重力侵蚀产沙是多因素耦合作用的非线性过程,需要在野外调查、试验分析和综合对地观测基础上,定量分析不同类型与尺度的“坡体-沟道-流域”重力侵蚀产沙影响因素与机理规律、侵蚀产沙速率及其定量表达式、时空尺度效应与转换关系,这也是该领域的研究重点和难点。雷达遥感技术,结合地基雷达、三维激光扫描和无人机等多源对地观测技术方法,可进一步提高震后小流域泥石流重力侵蚀产沙及其监测评估的精度和效率。

## 参考文献 (References)

- [1] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608. [XU Qiang. The 13 august 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596-608.]
- [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]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(1): 172-180. [TANG Chuan, LI Weile, DING Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 172-180.]
- [3] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J]. 泥沙研究, 2013(6): 28-37. [XU Jiongxin. Erosion and sediment yield of 10 small tributaries joining Inner Mongolia reach of upper Yellow River in relation with coupled wind-water processes and hyperconcentrated flows [J]. Journal of Sediment

- Research, 2013(6): 28–37. ]
- [4] MONTRASIO L, VALENTINE R. Experimental analysis and modeling of shallow landslides [J]. Landslides, 2007, 4(3): 291–296.
- [5] KIM H, LEE S W, YUNE C Y, et al. Volume estimation of small scale debris flows based on observations of topographic changes using airborne LiDAR DEMs[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 578–591.
- [6] 王涛,陈宁生,邓明枫,等. 沟道侵蚀型泥石流起动临界条件研究进展[J]. 泥沙研究, 2014(02): 75–80. [WANG Tao, CHENG Ningsheng, DENG Mingfeng, et al. Progress in study of mechanism and critical condition for initiation of debris flows due to bed failure [J]. Journal of Sediment Research, 2014(02): 75–80. ]
- [7] LIYong, LIU Jingjing, HU Kaiheng, et al. Probability distribution of measured debris-flow velocity in Jiangjia Gully, Yunnan Province, China [J]. Natural Hazards, 2012, 60(2): 689–701.
- [8] GUO C X, ZHOU J W, CUI P, et al. A theoretical model for the initiation of debris flow in unconsolidated soil under hydrodynamic conditions [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions, 2014, 2(6): 4487–4524.
- [9] YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, LI Zhanbin, et al. Piecewise prediction model for watershed-scale erosion and sediment yield of individual rainfall events on the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(21): 5322–5336.
- [10] STOFFEL M, MENDLIK T, SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILE M, et al. Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps [J]. Climatic Change, 2014, 122(1–2): 141–155.
- [11] YANG Jishan, YAO Wenyi, MA Xingping, et al. Progress of the gravity erosion and sediment yield study in the Loess Plateau [J]. Yellow River, 2011, 9(33): 77–79.
- [12] CHE Xiaoli, WANG Wenlong, GUO Junquan, et al. Effects of up-slope runoff and sediment on ephemeral gully erosion sediment and hydraulic parameters [J]. Science of Soil & Water Conservation, 2011, 9(3): 26–31.
- [13] 松永光平,甘枝茂. 黄土高原重力侵蚀的地质地貌因素分析——从发生的规模频度看区域特征[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 55–57. [MATSUNAGA Kouhei, GAN Zhimao. Geological and geomorphological conditions of mass movements in the Loess Plateau—Regional characteristics from the viewpoint of magnitude and frequency of event occurrence [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 55–57. ]
- [14] NI H, SONG Z, XU W. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flows originated predominately from gully erosion: Taking the 2013–07–04 clustered debris flows in Shimian County as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(2): 97–106.
- [15] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等. 岔巴沟淤地坝小流域重力侵蚀产沙量分析[J]. 水利学报, 2017(02): 241–245. [YANG Jishan, YAO Wenyi, ZHENG Mingguo, et al. Analysis on gravitational sediment yield in the check-dam controlled basins of Chabagou Watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017(02): 241–245. ]
- [16] CHEN C L. Generalized viscoplastic modeling of debris flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 114(3): 237–258.
- [17] SHORT N, LEBLANC A M, SLADEN W, et al. RADARSAT-2 D-InSAR for ground displacement in permafrost terrain, validation from Iqaluit Airport, Baffin Island, Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 141(2): 40–51.
- [18] 郭兆成,童立强,郑雄伟,等. 四川芦山地震次生地质灾害遥感调查及灾害特征初探[J]. 国土资源遥感, 2014(03): 99–105. [GUO Zhaocheng, TONG Liqiang, ZHEN Xiongwei, et al. Remote sensing survey of secondary geological disasters triggered by Lushan earthquake in Sichuan Province and tentative discussion on disaster characteristics [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014(03): 99–105. ]
- [19] 韩用顺,黄鹏,朱颖彦. 震区山洪泥石流野外监测与侵蚀产沙研究[J]. 水利学报, 2012(S2): 133–139. [HAN Yongshun, HUANG Peng, ZHU Yingyan, et al. Field monitoring and erosion-deposition sediment of flash-flood debris flow in suffered areas—A case study at Lianhuaxin Gully [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(S2): 133–139. ]

## Gravitational Erosion and Associated Effects of Sediment Yield in a Small Post-shock Catchment Based on SAR Remote Sensing

—A Case Study in Lianhuaxin Gully, Sichuan, China

HAN Yongshun<sup>1,2</sup>, WU Miao<sup>2</sup>, CAO Zehui<sup>2</sup>, ZHANG Dongshui<sup>1</sup>, CHEN Yongguo<sup>3</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

3. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, China)

**Abstract:** Gravity erosion in small watershed after earthquake is one of the research hotspots and difficulties in the

field of debris flow and soil erosion, for its process and mechanism are complicated with significant sediment yield and transportation effect, thus causing strong soil erosion and threatening post-disaster reconstruction and major engineering safety. In this paper, Lianhuaxin gully in the epicenter of Wenchuan Earthquake is taken as a typical study area and three debris flow occurring between 2008 and 2010 are selected. By means of multi-source remote sensing and GIS technologies, the system of digital slope-channel-watershed is established. Combined D-InSAR with offset tracking technology, three-dimensional surface deformation fields are created before and after different scene of debris flows. Correspondingly, multi-scale erosion and sediment characteristics and the material migration process of debris flows after earthquake in different types of slope, channel and watershed is analyzed. The results show that: a. considering three scenes of debris flows between 2008 and 2010, the total amount of slope erosion is respectively  $6.44 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,  $3.36 \times 10^5 \text{ m}^3$  and  $3.02 \times 10^5 \text{ m}^3$ , the total amount of sediment from slope to channel respectively  $3.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,  $1.56 \times 10^5 \text{ m}^3$  and  $5.16 \times 10^5 \text{ m}^3$ , and the total amount of sediment transportation in watershed  $3.84 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,  $2.24 \times 10^5 \text{ m}^3$  and  $2.96 \times 10^5 \text{ m}^3$ . b. the yield amount of slope sediment accounts for more than 50 percentage of the total incoming sediment amount of channels at all levels. So the gravity erosion and sediment from slopes is the main sediment source of channels at all levels; among them, most of yield sediment amount comes from convex-concave, convex and mixed slopes, which accounts for more than 85 percentage of the total slope yield sediment amount and presents a decreasing trend with channel level increasing. The secondary channel has the largest contribution rate of sediment transport in all levels of channels and is the main sediment source of the main channel. c. There are exponential function relationships between the ratio of slope erosion amount and corresponding erosion area as well as that of slope accumulation amount and accumulation area; there is a linear positive correlation between the ratio of slope sediment yield and slope unit area; slope erosion, accumulation and sediment yield amount increases with its corresponding area increasing. d. After the earthquake, the slope erosion rate decreases firstly and then increases, and the maximum erosion rate appears in convex-concave slopes, up to 0.24 m each time; the watershed erosion rate also shows the same trend, additionally, it takes on an increasing trend from low to high levels and the largest erosion rate is in the main watershed, up to 0.39 m each time. e. The sediment transport ratio at all levels of watersheds decreases with increasing watershed level, which is the lowest in the main watershed with 0.28 while the highest in the third level watershed with 0.93. The research results have great significance to safeguard public safety in mountain areas, and can provide basis and reference for sediment control in small watersheds in earthquake-stricken area, site selection for major projects, river rehabilitation, risk assessment for secondary mountain disasters and prevention and control engineering design.

**Key words:** debris flows in earthquake-stricken area; erosion and sediment effect; D-InSAR and offset-tracking technologies; digital slope-channel-watershed system; Lianhuaxin gully