

文章编号: 1008-2786-(2019)5-728-09  
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000463

## 强震区泥石流物源演化特征分析

熊江, 唐川\*, 史青云, 龚凌枫

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘 要:** 探讨震区泥石流物源演化特征是进一步揭示泥石流物源供给条件和演化阶段划分的基础, 为探究强震区泥石流物源演化特征, 本文将物源分为 4 级, 利用 ArcGIS 软件对 4 期影像进行详细解译, 并基于流域水系理论和方法计算物源面积、密度和连接度。在此基础上探讨泥石流物源演化特征, 结果表明: 四期影像物源解译面积分别为  $10.91 \text{ km}^2$ 、 $12.34 \text{ km}^2$ 、 $12.70 \text{ km}^2$  和  $9.71 \text{ km}^2$ , 增长率分别为 13%、3% 和 -24%, 物源数量分别为 1516 处、1751 处、1943 处和 1853 处, 增长率为 16%、11%、-5%; 物源面积以二次函数模式演化, 于 2012 年前后物源面积增加到最大值, 且经过近十年恢复, 物源面积较震初减少了 11%, 物源数量增加了 22%; 一级物源密度、二级物源密度、三级物源密度以二次函数形式先增大后减小, 而其他物源密度以指数形式逐渐减小; 物源连接度随时间增长呈现出先增大后减少趋势; 根据物源面积、物源密度和物源连接度变化规律将物源演化过程大致划分为四个阶段。研究结果对于进一步研究震区泥石流物源演化具有一定参考意义。

**关键词:** 泥石流; 物源演化; 水系理论; 物源密度; 物源连接度

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

5.12 汶川特大地震引发近 20 万处滑坡<sup>[1]</sup>, 造成大量松散碎屑物堆积在坡面和沟道中, 在强降雨条件下易暴发群发性泥石流。震后崩塌、滑坡等不良地质现象呈逐渐减弱趋势, 而泥石流却进入高暴发期, 其持续时期长达 5 ~ 10 年, 影响时期长达 30 ~ 40 年<sup>[2-4]</sup>。泥石流暴发的主要条件为陡峭地形、丰富物源和充沛水源, 而强降雨成为震区泥石流暴发最活跃的影响因素。特别在强降雨作用下斜坡及沟道表层松散土体极易被冲刷带走, 从而诱发泥石流。经过震后十年恢复, 震区泥石流暴发的物源条件得到一定程度改善, 物源变化影响着泥石流暴发规模、频率。目前关于震区泥石流物源变化研究主要是利用多期遥感影像解译, 对物源类型和规模进行统计分析, 从而探讨崩塌和滑坡物源数量、面积

变化特征以及泥石流敏感性评价<sup>[5-6]</sup>。由于地震造成大量松散堆积体悬挂在岸坡上, 在降雨冲刷作用下极易进入流域支沟或经支沟排入主沟<sup>[7]</sup>, 如果仅采用上述统计滑坡、崩塌物源变化来代表泥石流物源演化特征则不够完善。鉴于震后崩塌、滑坡等物源在降雨冲刷、侵蚀、搬运作用下汇入流域支沟沟道中, 在强降雨形成径流的巨大势能带动下逐渐向下运移排入主沟<sup>[7]</sup>, 即物源是沿树枝状水系网络运移的<sup>[8]</sup>, 因此可采用水文学相关理论作为研究依据和思路。

泥石流是流域水系发育过程中进行能量调整的重要方式, 而水系分形则表示流域地貌侵蚀发育阶段<sup>[9]</sup>, 因此近几年很多学者将水文学中水系分形理论运用到泥石流活动强度和危险性评价中并获得较好结果<sup>[10-11]</sup>。这说明将适当合理的水文理论运用

收稿日期 (Received date): 2018-08-09; 改回日期 (Accepted date): 2018-11-20

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501004); 国家自然科学基金项目 (41672299) [National Key Basic Research and Development Program of China (2017YFC1501004); National Natural Science Foundation of China (41672299)]

作者简介 (Biography): 熊江 (1991-), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面研究。[XIONG Jiang (1991-), male, was born in Luzhou, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on geological disaster prevention] E-mail: 2029476606@qq.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 唐川 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害与环境地质等方面研究。[TANG Chuan (1961-), male, Ph. D., Professor, research on geological disasters and environmental geology] E-mail: tange@cdut.edu.cn

到泥石流研究工作中不仅可以达到学科交叉发展目的,还能更好地提出解决问题的方法和思路。本文通过野外调查发现,震后大量松散物源散乱堆积在远离主沟的岸坡上,在重力和降雨作用下,这些物源逐渐向下汇聚,进入泥石流流域各支沟沟道中,在强降雨作用下,这些小流域易暴发群发性泥石流<sup>[12]</sup>,将物源输入泥石流主沟。该过程与河流水系发育演化规律几乎是一致的,因此文章参照河网水系演变的相关理论与方法<sup>[13-14]</sup>,以七盘沟作为实例,将泥石流物源分为一级物源、二级物源、三级物源和其他物源四类,利用 ArcGIS 软件对多期遥感影像物源进行分类解译、统计并计算物源密度和物源连接度,在此基础上探讨震区泥石流物源动态演化过程。通过以上研究进一步认识震后物源演化特征,为震区防灾减灾工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

本文选择七盘沟作为典型流域,其位于四川省汶川县威州镇七盘沟村,沟口地理坐标为

103°32′44.71″E, 31°26′51.64″N, 海拔高度 1305 m (图 1)。该流域位于九顶山华夏系构造带内,受茂汶断裂和九顶山断裂影响,构造复杂<sup>[15]</sup>。地貌上该流域属于深切峡谷地貌,沟道侵蚀深度大,沟道剖面呈“V”型,主沟长达 15.8 km,宽为 50~120 m,沟床纵比降 192‰,沟内支沟发育,其中超过 1 km 的支沟就有 18 条<sup>[16-17]</sup>。流域出露地层为震旦系上统灯影组、陡沱山组,泥盆系月里寨群,第四系的松散堆积层<sup>[15]</sup>。气候上,七盘沟属于温带大陆性半干旱季风气候区,平均年降雨量 526.3 mm,年最大降雨量 648.6 mm,最小降雨量 369.8 mm<sup>[15,17]</sup>。地震造成大量松散堆积体堆积在沟道和岸坡上,总物源量达 3000 万 m<sup>3</sup> 以上,其中沟道两侧物源在降雨和重力作用下逐渐向下运移,堆积在沟道中,在降雨作用下暴发了泥石流,输出大量泥石流物源,其中以“7·11”溃决型泥石流为典型<sup>[17]</sup>。该次泥石流灾害共造成 4183 名群众受灾,15 名群众失踪和伤亡,沟内 90% 以上居民房屋以及 7 家企业被冲毁,给居民造成巨大经济损失<sup>[17]</sup>。由于该沟具有山高坡陡、物

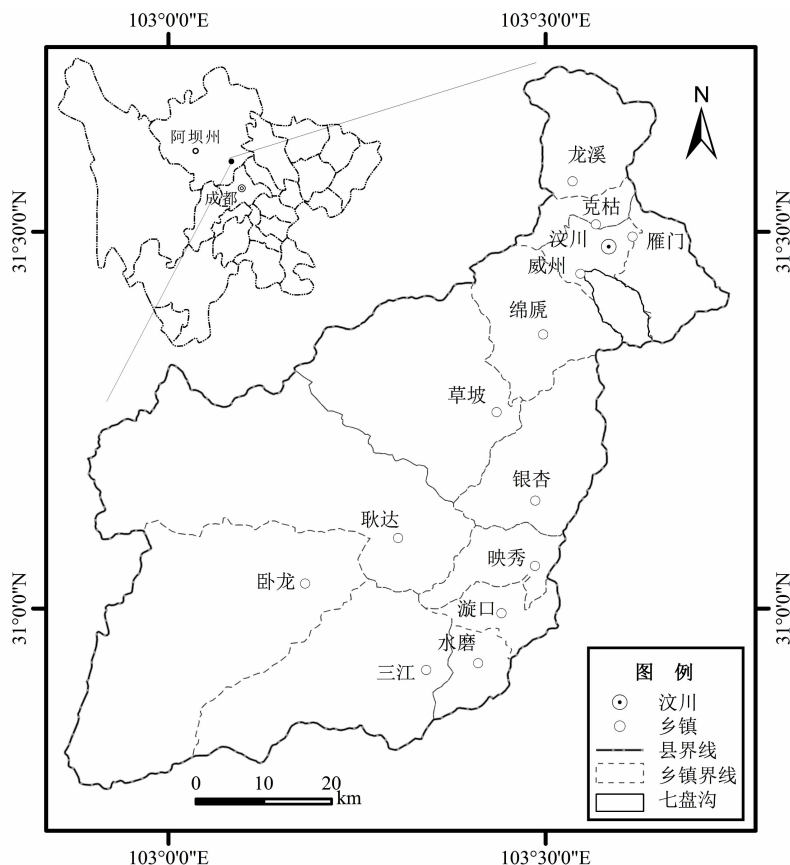


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location map of the study area

源丰富、支沟发育、降雨充沛等特点,且具有较高危险性,极易暴发高频率和大规模泥石流,并且其流域内泥石流物源变化特征极其显著,因此本文选择其作为研究对象。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文在谷歌地球上获取 4 期高分辨率遥感影像数据,包括震后第 1 期(2008 年 7 月 1 日)影像,分辨率为 2 m,用于解译地震引起崩塌、滑坡等物源面积、数量和分布等信息;为了获取七盘沟“7·11”泥石流前后物源变化信息,选择泥石流暴发前 2010 年 4 月 4 日和泥石流暴发后 2014 年 12 月 7 日两期影像,分辨率均为 2 m;为了获取物源分布、面积、数量等最新信息,选择了最新一期(2018 年 4 月 1 日)影像,分辨率为 2 m。所获取 4 期影像质量较好,数据完整,云层遮盖较少。另外还有等高距为 10 m 的等高线基础数据,将其绘制成高精度 DEM 与影像叠加,使目视解译结果更为准确。

### 2.2 数据处理

为了获取物源信息,同时降低或去除干扰信息,一个常用方法就是图像增强,通过对比度变换、多光谱变化、色彩变换等图像增强方法来加强判别和识

别效果<sup>[18]</sup>。另外遥感影像信息提取时主要通过地物颜色、形态、植被和纹理等特征建立解译标志<sup>[19]</sup>。经过近十年演化,有些物源在重力和降雨冲刷作用下向下运移进入支沟中,相邻的物源在向下运移过程中逐渐相接、融合。因此本文解译时除了参考前人解译标志外,主要沿河流水系逐步解译出物源,即沿主沟物源、支沟物源、坡面物源逐级解译,并将其命名为一级物源(泥石流主沟中物源)、二级物源(流域支沟中物源)、三级物源(坡面直接进入或未进入支沟物源)和其他物源(主沟两侧直接进入主沟坡面物源)(图 2)。

### 2.3 研究方法

参照水系指标相关理论,对泥石流物源密度、物源连接度进行定义并对相关指标计算公式做出说明(表 1)。利用 ArcGIS 将一级物源、二级物源、三级物源和其他物源进行解译,结合前人解译结果、野外调查以及影像特征将属于基岩的解译结果剔除,然后统计物源面积和数量,由此探讨震后物源演化特征。同时将物源连接情况分为组内连接(同级物源之间相互连接)和组外连接(不同级物源之间相互连接)两种情况,利用软件属性标注功能,将连接物源属性计为“1”;不连接记为“2”,利用 ArcGIS 强大空间统计功能获取文章所需基础数据,由此探讨物源演化过程。



图 2 物源解译标志

Fig. 2 The marks of source interpretation

表 1 物源演化量化指标

Tab.1 Quantitative indicators of source evolution

指标	计算公式	定义
物源密度 ( $R$ )	$R = A_R / A$	物源面积与流域总面积比值。式中, $A_R$ 为某级物源面积; $A$ 为流域总面积。
物源连接度 ( $P$ )	$P = L / V$	不同级物源间连接数与最大可能连接数比值。式中 $L$ 为节点连接数; $V$ 为可能最大连接数。

3 物源演化特征分析

3.1 物源时空演化特征分析

通过对七盘沟四期高精度遥感影像解译(图 3)。利用 ArcGIS 软件计算功能和统计功能计算出物源面积并统计物源数量(表 2)。结果可知汶川地震造成大量松散物源堆积或悬挂在七盘沟两侧岸坡上,其中其他物源直接进入主沟,而三级物源在降雨和重力作用下逐渐向各支沟汇聚,经支沟汇入主沟。由解译结果图 3a 和统计结果表 2 可知地震发生后到 2008 年 7 月 1 日泥石流物源面积为 10.91 km<sup>2</sup>,物源数量为 1516 处。其中一级物源面积为 0.16 km<sup>2</sup>,主要为主沟两侧大型滑坡堆积体散乱堆积在主沟中;二级物源面积为 0.49 km<sup>2</sup>,由解译结果图 3(a)可看出其主要来源于靠近支沟的部分三级物源以滑坡、崩塌等形式直接进入支沟;三级物源面积为 8.39 km<sup>2</sup>,主要是滑坡、崩塌等松散物源堆积在岸坡上;其他物源面积为 1.87 km<sup>2</sup>,沿主沟两侧分布,该部分物源是形成七盘沟泥石流主要物源。

到 2010 年 4 月 4 日物源数量由 1516 处增加到 1751 处,增长了 16%,面积增加到 12.34 km<sup>2</sup>,增长了 13%,其中除了其他物源面积保持不变外其他三类物源面积都有所增加(表 2),从图 3b 可以看出主沟中上游三级物源数量有所增加,二级物源在原来基础上逐渐向两端扩展。

物源演化至 2014 年 12 月 7 日时,物源面积为 12.70 km<sup>2</sup>,物源数量 1943 处,分别增长了 3% 和 11%,由解译结果图 3c 和统计结果表 2 看出一级物源已经充满整个主沟,面积增加到 0.89 km<sup>2</sup>,二级物源面积增加到 0.91 km<sup>2</sup>,而三级物源和其他物源面积有所减少。从解译结果看出二级物源发育比较完整,充分与主沟物源相连接,有利于物源排出。

截至到 2018 年 4 月 1 日物源面积为 9.71 km<sup>2</sup>,数量为 1853 处,面积减少 24%,数量减少 5%,其中二级物源、三级物源面积减少幅度较大,由解译结果

图 3d 可以发现部分远离主沟二级物源已经消失,且主要是由于其周围三级物源逐渐减少所致。另外将四期影像物源面积进行统计分析(图 4),结果显示物源面积以二次函数模式演化,于 2012 年前后物源面积达到最大值。这主要是因为地震改变了流域地质环境,造成山体破碎,同时降雨入渗增加岩体孔隙水压力,降低了岩体稳定性,进一步诱发滑坡等不良地质现象,增加了泥石流物源数量和面积。同时在降雨和重力作用下物源向下运移汇聚增大物源面积。经过十年恢复,截止到目前,七盘沟物源面积较震初减少了 1.20 km<sup>2</sup>,约 11%,物源数量增加了 337 处,约 22%。说明震后在降雨等作用下虽然滑坡、崩塌等不良地质现象的数量较震初有所增加,但是经过物源逐渐趋向稳定、输出,流域内泥石流物源面积较震初已有所减少。

表 2 物源面积和数量统计表

Tab.2 The statistic results of area and quantity of source

时间	物源面积/km <sup>2</sup>					物源数量 /处
	一级	二级	三级	其他	合计	
2008-7-1	0.16	0.49	8.39	1.87	10.91	1516
2010-4-4	0.21	0.60	9.65	1.87	12.34	1751
2014-12-7	0.89	0.91	9.58	1.31	12.71	1943
2018-4-1	0.87	0.70	6.92	1.22	9.71	1853

3.2 物源演化过程分析

将四期影像解译结果按一级物源、二级物源、三级物源、其他物源四个类别统计其面积(表 2)。采用方法介绍中物源密度、物源连接度计算公式分别计算各级物源密度和连接度(表 3、表 4)。其中组内连接度是指同级物源内相互连接个数与该级物源总数比值,反映同级物源内部汇聚程度;组外连接度是指不同级别物源连接个数与可能最大连接数比值,反映不通物源之间转换程度。将物源密度计算结果进行拟合分析(表 5、图 5)。结果显示一级物源密度、二级物源密度、三级物源密度随时间变化以



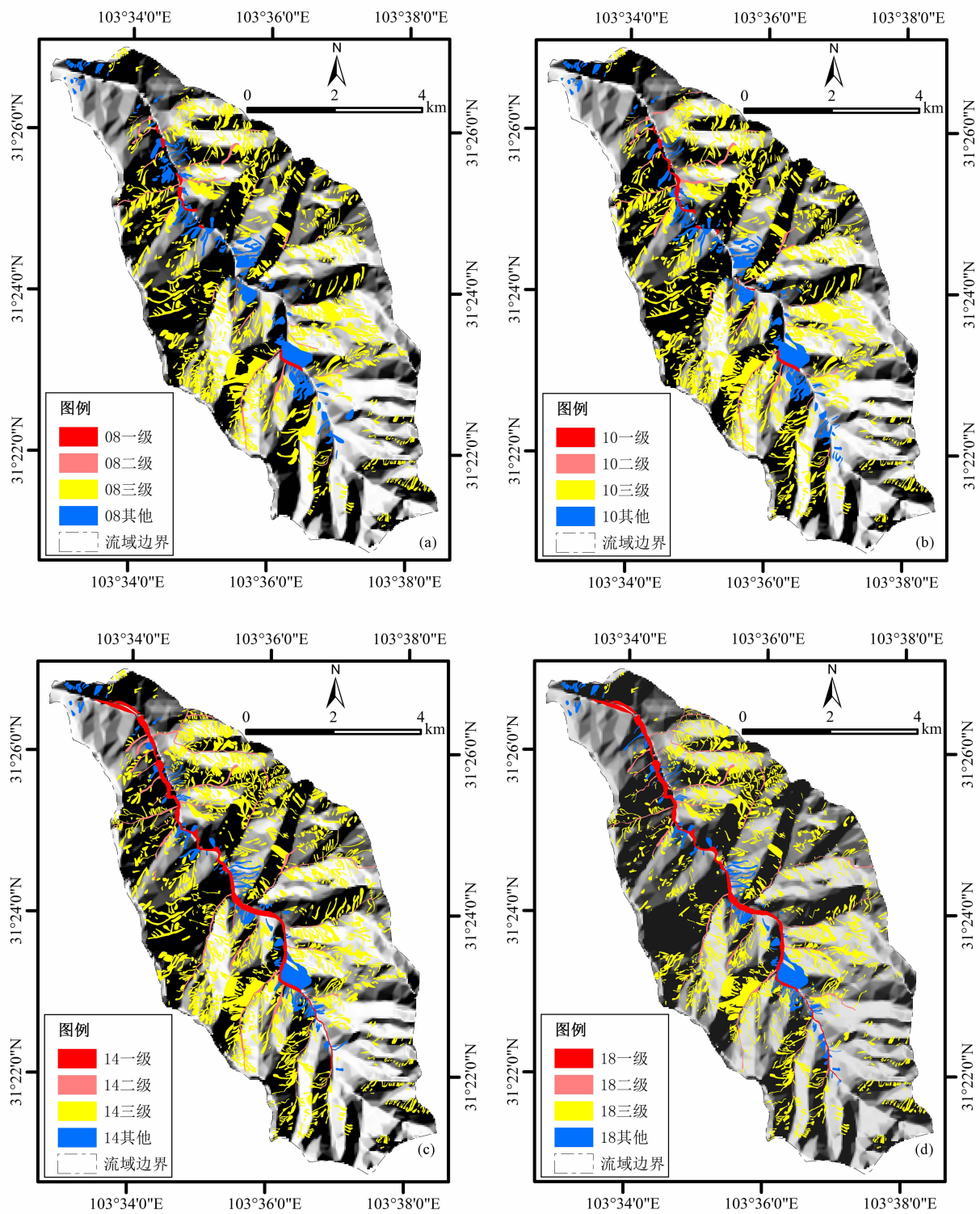


图 3 物源解译结果

(a)2008 年 7 月 1 日物源解译结果;(b)2010 年 4 月 4 日物源解译结果;  
(c)2014 年 12 月 7 日物源解译结果;(d)2018 年 4 月 1 日物源解译结果)

Fig. 3 Interpretation results of source

(a) Interpretation results of source on 1 July 2008; (b) Interpretation results of source on 4 April 2010;  
(c) Interpretation results of source on 7 December 2014; (d) Interpretation results of source on 1 April 2018

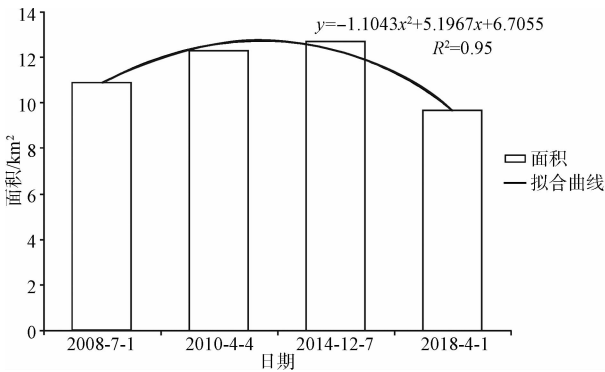


图 4 物源演化趋势图

Fig. 4 Evolution trend of source

二次函数形式先增大后减少的规律演化,约 2012 年前物源密度达最大值;而其他物源密度以指数形式逐渐减小。由连接度计算结果可以看出一级、二级物源组内连接度随时间逐渐增大,而三级物源组

内连接度先增大后减小;二级、三级、其他物源组外连接度随时间逐渐增大。通过分析物源密度、物源连接度变化过程,可以将物源演化过程大致分成四个阶段:

(1)第一阶段,即物源演化之初。物源主要是由于地震引起崩塌、滑坡造成大量松散物源,其中靠近沟道物源直接进入沟道呈断续状分布。另外由于震后导致山体稳定性较低,在降雨和重力作用下,不断发生新的滑坡和崩塌,物源呈散乱状分布。因此该时期表现为物源面积不断增大,但一级、二级物源呈断续状分布,其组内连接度为 0。

(2)第二阶段。在震后一段时间内,在降雨冲刷和重力作用下物源逐渐向下移动、连接、汇聚。同时由于地震导致山体稳定性、岩体抗剪切强度降低,降雨持续诱发新的滑坡、崩塌等不良地质现象。其

表 3 物源密度计算结果

Tab. 3 The calculation results of source density

编号	日期	物源密度			
		一级物源	二级物源	三级物源	其他物源
1	2008 - 07 - 01	0.0031	0.0096	0.1626	0.0363
2	2010 - 04 - 04	0.0041	0.0117	0.1871	0.0363
3	2014 - 12 - 07	0.0173	0.0176	0.1858	0.0254
4	2018 - 04 - 01	0.0168	0.0137	0.1342	0.0236

表 4 物源连接度计算结果

Tab. 4 Calculation results of source connectivity

编号	日期	组内连接度			组外连接度		
		一级物源	二级物源	三级物源	二级物源	三级物源	其他物源
1	2008 - 07 - 01	0.0000	0.0000	0.3381	0.3478	0.6218	0.1975
2	2010 - 04 - 04	0.2000	0.3333	0.3406	0.4074	0.6355	0.1973
3	2014 - 12 - 07	1.0000	0.6429	0.3235	0.8750	0.7970	0.6667
4	2018 - 04 - 01	1.0000	0.6923	0.3075	0.8750	0.8137	0.7349

表 5 物源密度拟合结果

Tab. 5 The fitting results of source density

编号	名称	拟合公式	相关系数 $R^2$
1	一级物源密度	$y = -0.0004x^2 + 0.0074x - 0.0052$	0.8142
2	二级物源密度	$y = -0.0015x^2 + 0.0095x + 0.0009$	0.7355
3	三级物源密度	$y = -0.0015x^2 + 0.0095x + 0.0009$	0.7355
4	其他物源密度	$y = 0.045e^{-0.165x}$	0.8632

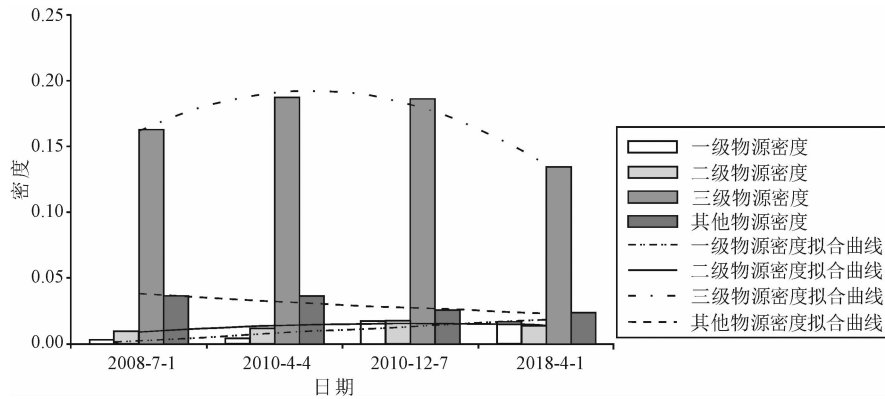


图5 物源密度及其拟合曲线图

Fig. 5 The map of source density and fitting curves

中靠近主沟和支沟的物源在降雨和重力作用下分别进入主沟和支沟中。该阶段表现为物源逐渐向下转移过程中逐渐与其他级别物源相互连接,物源数量,物源密度、物源连接度不断增大。

(3)第三阶段,是前期物源向下流动、相接、汇聚基础上的进一步发展阶段。由于前期不同物源之间连接度增加,降雨形成坡面流进一步带动大量物源进入支沟堆积。随着支沟物源量增加,在强降雨情况下,坡面流持续输入物源,而支沟在山洪强大势能作用下暴发泥石流,将大量物源输入主沟,其中一级物源、二级物源迅速向两端生长、相接。该阶段表现为一级、二级、三级物源密度迅速达最大值,其他物源密度持续减小;物源组内、组外连接度增加至最大值。

(4)第四阶段,属于演化最后阶段。该阶段大量三级物源逐步趋于稳定,甚至停止流动,演化速度和进程缓慢。该阶段表现为一级、二级、其他物源面积在不断减少,连接度逐渐降低,物源密度以二次函数形式逐渐减小。

## 4 结论

通过解译震后四期影像物源,将解译结果分为一级物源、二级物源、三级物源、其他物源四类,分别计算各级物源面积、物源密度、物源组内、组外连接度,以此分析物源演化特征和演化过程,并得出以下几点结论。

(1)通过解译四期影像获得物源面积分别为  $10.91 \text{ km}^2$ 、 $12.34 \text{ km}^2$ 、 $12.71 \text{ km}^2$ 、 $9.71 \text{ km}^2$ 、物源面积增长率分别为 13%、3%、-24%;物源数量分别

为 1516 处、1751 处、1943 处、1853 处,增长率为 16%、11%、-5%。

(2)物源面积以二次函数模式演化,即面积先增加后减少,在 2012 年前后达最大值,约为  $13 \text{ km}^2$ 。经过十年恢复发展,七盘沟物源面积较震初减少了  $1.20 \text{ km}^2$ ,约 11%,物源数量增加了 337 处,约 22%。说明震后在降雨等作用下仍有崩塌、滑坡等不良地质现象发生。

(3)一级、二级物、三级物源密度随时间变化以二次函数形式先增大后减少规律变化,在 2012 年前后物源密度达最大值;而其他物源密度以指数形式逐渐减小。这是由于地震导致山体破碎、岩体稳定性较差,在降雨入渗情况下,使得孔隙水压力增大,降低岩体抗剪强度,从而引起新的滑坡、崩塌,形成新的物源。同时在降雨冲刷和重力作用下一级、二级、三级物源不断向下流动排入主沟,因此其密度呈现出增大趋势,而其他物源由于其靠近主沟,其在降雨和重力作用下直接进入支沟。随着输出物源量越来越大,以及物源稳定性发展,使得物源密度会不断减少。

(4)在一定时间内连接度随时间逐渐增大,然后逐渐减小,其中以三级物源连接度变化最为明显,因为其分布分散,演化进程变化最快。

(5)物源演化过程大致可以分为四个阶段。第一阶段,主要是由于地震引起崩塌、滑坡等物源随机分布在主沟和各支沟两侧岸坡上,其中部分靠近主沟和支沟物源直接进入沟道内,呈散乱状分布。第二阶段,在降雨冲刷和重力作用下物源逐渐向下移动、连接、汇聚,同时在降雨和重力作用下诱发新的崩塌、滑坡,使得物源面积和物源连接度大大提高。

第三阶段,随着物源运移、汇聚、连接,降雨形成坡面径流进一步带动大量物源进入支沟,同时支沟在洪流强大势能作用下暴发泥石流,将大量物源输入主沟,导致一级物源、二级物源迅速向两端生长、相接,连接度和物源面积达最大值。第四阶段,随着物源输出、稳定,物源密度以二次函数形式逐渐减小;物源组内和组外连接度持续减少至最小值,物源演化不断衰退。

## 参考文献 (References)

- [1] 许冲, 徐锡伟. 2008年汶川地震导致的斜坡物质响应率及其空间分布规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(S2): 3888–3908. [XU Chong, XU Xiwei. Response rate of seismic slope mass movements related to 2008 wenchuan earthquake and its spatial distribution analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3888–3908]
- [2] 黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, **20**(3): 1–7. [HUANG Runqiu, LI Weile. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, **20**(3): 1–7]
- [3] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(2): 145–151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(2): 145–151]
- [4] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, **28**(3): 341–349. [TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the wenchuan earthquake areas [J]. Mountain Research, 2010, **28**(3): 341–349]
- [5] 唐川, 丁军, 梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 1–7. [TANG Chuan, DING Jun, LIANG Jingtao. Remote sensing images based observation analysis on characters of debris flow source areas in beichuan county of wenchuan earthquake epicenter region [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 1–7]
- [6] 常鸣, 唐川, 蒋志林, 等. 强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J]. 山地学报, 2014, **32**(1): 89–97. [CHANG Ming, TANG Chuan, JIANG Zhilin, et al. Dynamic evolution process of sediment supply for debris flow occurrence in longchi of dujiangyan, wenchuan earthquake area [J]. Mountain Research, 2014, **32**(1): 89–97]
- [7] 姚维益, 常鸣, 李为乐. 都江堰龙溪河流域典型泥石流物源演化特征遥感监测[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(3): 205–209+2. [YAO Wei-yi, CHANG Ming, LI Weile. Dynamic evolution characteristics of material of typical debris flow using remote sensing technology, in longxi catchment, dujiangyan, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(3): 205–209+2]
- [8] 胡凯衡, 李泳, 韦方强. 泥石流流域集水区面积限值与一级水系数目关系[J]. 地理科学, 2005, (4): 91–95. [HU KaiHeng, LI Yong, WEI Fangqiang. Relationship between firstorder stream number and area threshold for debris flow basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, (4): 91–95]
- [9] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, (2): 124–128. [HE Longhua, ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, (2): 124–128]
- [10] 张晨, 陈剑平, 王清, 等. 基于分形理论和流域水系分布特征的泥石流研究[J]. 水利学报, 2011, **42**(3): 351–356. [ZHANG Chen, CHEN Jianping, WANG Qing, et al. Study on debris flow based on fractal theory and characteristics of water system [J]. Shuili Xuebao, 2011, **42**(3): 351–356]
- [11] 张晨, 陈剑平, 王清, 等. 基于水系三维模型及分形理论对泥石流活动强度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1214–1221. [ZHANG Chen, CHEN Jianping, WANG Qing, et al. Study of activity intensity of debris flow based on three dimensional drainage system model and fractal theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1214–1221]
- [12] Gregoretti C, Degetto M, Bernard M, et al. Runoff of small rocky headwater catchments: field observations and hydrological modeling [J]. Water Resources Research, 2016, **52**, 8138–8158.
- [13] 吕慧华, 周峰, 李娜, 等. 苏北里下河典型区河网水系演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(2): 380–385. [LYU Huihua, ZHOU Feng, LI Na, et al. Evolution characteristics of the river network in the typical area of lixiahe region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(2): 380–385]
- [14] 周峰, 吕慧华, 刘长运. 江苏里下河平原城镇化背景下河网水系变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, **16**(1): 144–150. [ZHOU Feng, LYU Huihua, LIU Changyun. Change of river system in the Lixiahe region during urbanization [J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Technology, 2018, **16**(1): 144–150]
- [15] 向国萍, 张丹丹, 常鸣, 等. 七盘沟堰塞体溃决后水动力特征及沟内泥石流启动条件分析[J]. 水电能源科学, 2015, **33**(4): 143–146. [XIANG Guo ping, ZHANG Dandan, CHANG Ming, et al. Hydrodynamic and debris flow triggering conditions after dam break in Qipangou gully [J]. Water Resources and Power, 2015, **33**(4): 143–146]
- [16] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, **36**(2): 81–91. [ZHENG Chao, CUI Peng, GE Yonggang, et al. Characteristics and mechanism of building



- damaged by debris flow on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, **36**(2): 81–91]
- [17] 杨秀元, 蔡玲玲, 田运涛. 四川汶川七盘沟泥石流现状与危险性评价[J]. 人民长江, 2014, **45**(S1): 60–63. [YANG Xiuyuan, CAI Lingling, TIAN Yuntao. The present risk assessment of debris flow in Qipan Gully, Wenchuan, Sichuan [J]. Yangtze River, 2014, **45**(S1): 60–63]
- [18] 朱书凡. 基于遥感影像分块提取地物方法的研究[D]. 西安科技大学, 2014. [ZHU Shufan. Research on the extraction of terrain block feature based on remote sensing image [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2014]
- [19] 蒋志林. 基于RS的震区泥石流物源演化特征分析[D]. 成都理工大学, 2014. [JIANG Zhilin. Research on the materials evolution characteristics of debris flows based on RS in earthquake area-case study in yingxiu area of wenchuan in Sichuan Province [D]. Chengdu University of Technology, 2014]

## Evolution Characteristics of Debris Flow Sources in Strong Earthquake Area

XIONG Jiang, TANG Chuan\*, SHI Qingyun, GONG Lingfeng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** A strong earthquake usually cause a large number of landslide deposits on steep slope, which providing sufficient materials for debris flow initiation. Under the action of rain and gravity, these materials may mitigate to the branch and translate to debris flow gully. However, with the stability of source increasing, a large amount of materials are translated out mountain outlets and vegetation restoration, the number and area of source will change over time. Also, evolution characteristics of debris flow source are the basis for further revealing the sediment supplying and evolution stages division. In order to explore the evolution characteristics of debris flow source in strong earthquake area, the sources were divided into four types, such as primary source (deposit in channel of debris flow gully), secondary source (deposit in tributary of debris flow gully), tertiary source (deposit on steep slop that along the tributary) and other sources (deposit on steep slop that along the main channel). Four-phase images were interpreted by ArcGIS software, and the source area, density and connectivity were calculated based on the theory and method of watershed water system. According to analyze, the following conclusions were summarized. The source areas of the four stage images were 10.91 km<sup>2</sup>, 12.34 km<sup>2</sup>, 12.70 km<sup>2</sup>, 9.71 km<sup>2</sup>, respectively, with the growth rate of 13%, 3%, and -24%, respectively; The numbers of source were 1516, 1751, 1943, 1853, and the growth rate were 16%, 11%, -5%, respectively; The source area evolves as a quadratic function, and increasing to the maximum value around 2012. After nearly a decade of recovery, The source area decreasing by 11% compare with the beginning of the earthquake, and the number of sources increases by 22%; The density of primary source, secondary source and tertiary source increases firstly and then decrease in the form of quadratic function. The density of other source decreases gradually as an exponential function. The source connectivity increases first and then decreases over time. According to the evolve laws of source area, density and connectivity, the evolution process of the source were roughly divided into four stages. The research results provide a reference for further study of the evolution of debris source in the earthquake zone.

**Key words:** debris flow; source evolution; water system theory; source density; source connectivity