

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 4 - 502 - 11

## 汶川地震引发的次生灾害链

徐梦珍<sup>1</sup>, 王兆印<sup>1\*</sup>, 漆力健<sup>2</sup>

(1. 清华大学 水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084;

2. 四川农业大学 水利与建筑工程系 雅安 625014)

**摘 要:** 汶川地震造成了大量的滑坡、崩塌, 并诱发了多种地质和生态灾害链式发生。2008—2009 年期间, 在汶川地震震区开展了野外调查与试验, 研究了各种不同的灾害链的形成条件及其链生机制。识别出了 4 种类型的灾害链, 并重点研究了 7 起灾害链事件。发现灾害链中, 每一级灾害事件都由其前一级灾害事件诱发。各级次生灾害造成的物质搬运量都远小于其上一级灾害所造成的物质搬运, 灾害性沿灾害链呈现逐级衰减的趋势。由此定义灾害链衰减率为灾害链中某级次生灾害所造成的物质搬运或者灾害影响区面积与其上一级灾害所造成的物质搬运或灾害影响区面积之间的比值。汶川地震引起的次生灾害链衰减率在 2% ~ 30%。采用底栖动物作为指示物种, 评价次生灾害链对震区河流生态造成的影响, 发现受灾害链影响的河道中, 底栖动物物种数急剧降低, 生物多样性下降。

**关键词:** 汶川地震; 灾害链; 质量搬运; 灾害链衰减率; 底栖动物

**中图分类号:** P694, TV147, X43

**文献标识码:** A

青藏高原抬升运动使得青藏高原与四川盆地过渡区域地质活动频繁, 形成了龙门山断裂带。该区域内有许多河流, 如岷江、沱江、涪江、嘉陵江四大河, 且这些河流的大量支流为高陡边坡的下切型河流。汶川地震造成了震区内大量河流边坡失稳, 引发滑坡、崩塌。据调查, 汶川地震诱发了 1 701 处滑坡, 1 844 处岩石崩塌, 以及 1 093 处边坡失稳<sup>[1]</sup>。另有报告指出汶川地震引发的滑坡、崩塌总数超过 15 000 个<sup>[2]</sup>。滑动断裂带两侧 240 km 范围为高密滑坡区, 在断裂带的西南段, 高密滑坡区宽 25 ~ 30 km, 在东北段宽 3 ~ 5 km。

滑坡、崩塌又引发各种次生山地灾害连锁发生。滑坡过程中发生的物质搬运量往往超过百万立方米, 堵塞河道, 形成堰塞湖。由于堰塞坝的稳定作用, 上游河道泥沙淤积, 河道纵剖面变缓, 利于稳定<sup>[3]</sup>; 但某些堰塞坝发生溃决, 溃坝洪水将大量泥

沙物质搬运到下游, 甚至引发泥石流, 引起下游河道不稳定, 持续发生剧烈河床演变, 导致水生栖息地丧失, 水生生态受到严重影响<sup>[4-7]</sup>。此外, 滑坡、崩塌为流域提供了大量不稳定泥沙<sup>[8]</sup>, 导致流域产沙增加, 甚至持续 100 a<sup>[9]</sup>。Pearce 和 Watson<sup>[10]</sup>指出一半以上的地震滑坡松散物会被携带到河道中, 此侵蚀过程将持续 50 a 以上。Bruce 等发现地震活动引起的侵蚀率为 0.2 ~ 7 mm/a<sup>[11]</sup>。另外, 汶川震区的森林、草甸, 以及湿地总面积减少了 1 221 km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。

汶川地震直接诱发了许多次生山地灾害, 这些灾害又引发下一级灾害, 这些灾害逐级链式发生, 本文定义其为灾害链, 即由一系列连锁发生的次生山地灾害组成, 每一级灾害都是其下一级灾害的先导。为研究地震次生灾害链的发生过程及灾害链的形成机理, 笔者对 2008—2009 年期间震区发生的灾害链

收稿日期( Received date): 2011 - 07 - 11; 改回日期( Accepted): 2012 - 11 - 21。

基金项目( Foundation item): 水利部公益项目 200901078 [the Ministry of Water Resources of China, 200901078]; 2009 - 10—2012 - 10; 国家自然科学基金面上项目 41071001 [Natural Science Foundation of China, 41071001]; 2011 - 01—2013 - 12; 清华大学自主科研项目 2009THZ02234 [Tsinghua University, 2009THZ02234]; 2010 - 01—2011 - 12)。

作者简介( Biography): 徐梦珍( 1986 - ), 女( 汉族), 湖北人, 博士研究生。研究方向: 河流综合管理。[Xu Mengzhen ( 1986 - ), female, Ph D candidate. Be engaged in integrated river management. ] Tel: 15810372875; E - mail: xumz07@mails. tsinghua. edu. cn

\* 通讯作者( Corresponding author): 王兆印 教授。[Wang Zhao Yin, Professor. ] E - mail: zywang@tsinghua. edu. cn

事件开展野外调查与试验,识别出 4 种典型地震次生灾害链,并通过对 7 个灾害链事件的分析,研究了典型灾害链的发生模式及链生机制。第一种典型的灾害链(CI)可以描述为:滑坡→溃坝洪水(或伴随泥石流)→剧烈河床演变→栖息地丧失。第二种典型的灾害链(CII)可以描述为:滑坡→泥石流→新沟道发育→剧烈河床演变。第三种典型的灾害链(CI-II)可以描述为:崩塌→颗粒侵蚀→坡面泥石流。第四种典型灾害链(CIV)组成较为简单,只包含两级:崩塌→新崩塌。

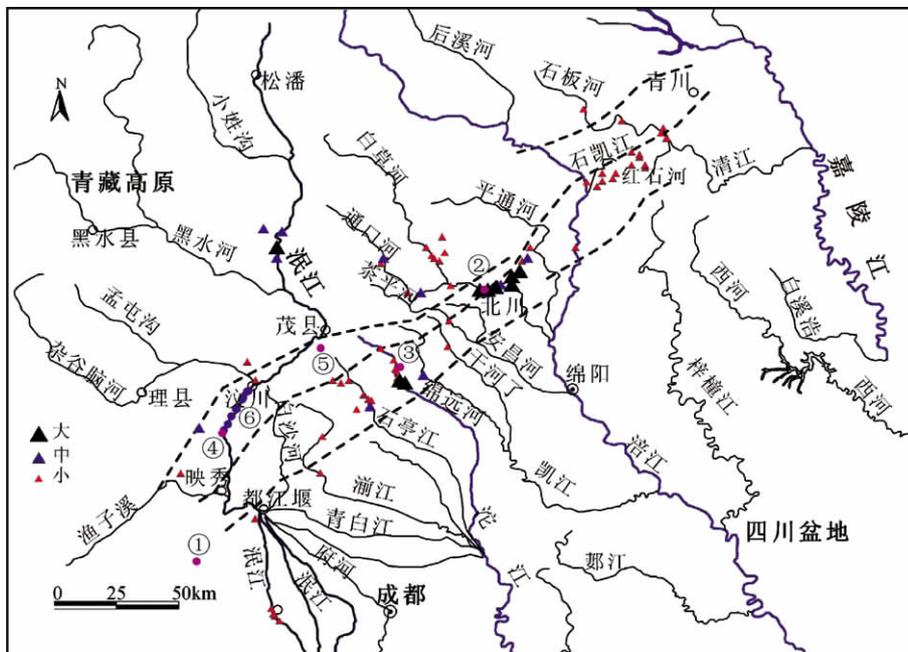
在整条灾害链中,下一级灾害的发生量(一般为泥沙搬运量,或者是灾害影响区的面积)一般小于上级灾害的发生量的,即灾害性沿灾害链逐级衰减。本文定义了灾害链衰减率,即下一级灾害发生量与其上一级灾害的发生量之间的比值,用以表示各级灾害发生量之间的衰减程度,对不同类型灾害链传递过程中灾害性强度具有一定的预测性。

### 1 研究区域及方法

龙门山断裂带由 3 条断裂组成(图 1): 中间的

一条是龙门山主断裂,也就是汶川地震所发生的位置,该断裂从映秀延伸到北川、青川;中央断裂北侧 2 条不连续的断裂构成了龙门山后山断裂;中央断裂南侧的 2 条不连续断裂构成了龙门山前山断裂。本区域内河流岸坡多处于临界失稳状态,在暴雨或者地震中极易发生滑坡、崩塌,阻塞江段形成堰塞湖,图 1 中给出了地震区许多大、中、小规模堰塞坝<sup>[13]</sup>,以及本文研究的 7 个灾害链事件的发生地点,分别是唐家山滑坡、火石沟滑坡、文家沟滑坡、彻底关大桥崩塌、棕渠沟崩塌,以及映秀渔子溪的颗粒侵蚀区。

对灾害链的调查研究主要是通过野外考察和野外试验实现。研究区域的地形特征及几何要素的现场测量采用了常规的地形测绘仪器,以及测量误差 < 1 m 的高精度 GPS 接收器和激光测距仪。结合 1995 年的 1: 25 万数据地形图和 1960 年代的 1: 5 万地形图,以及 2004 年数字地形高程数据等资料获得历史地形及高程数据,由此绘制研究区河流震前、震后纵剖面及横断面。另外,根据 2003 年及 2008 年震后的卫星图片确定滑坡区及滑坡堰塞坝的位置。



注: 虚线表示的是龙门山断裂带; ①火石沟滑坡; ②唐家山滑坡; ③文家沟滑坡; ④彻底关大桥; ⑤棕渠沟崩塌; ⑥渔子溪; ⑦草坡-映秀颗粒侵蚀段

Note: Dashed lines Longmenshan faults; Huoshigou; Tangjiashan; Wenjiagou; Chediguanbridge; Zongq-ugou; Grainerosion sites along the Minjiang River and its tributary Yuzixi River

图 1 研究区域, 堰塞坝以及灾害链实例发生位置

Fig. 1 Study area and location of landslide dams

2008年的5月、8月、10月及12月,2009年的3月、4月、7月和8月,分别对震区的颗粒侵蚀面积以及颗粒侵蚀堆积扇的体积进行了测量。用激光测距仪测量颗粒侵蚀堆积扇表面积,根据颗粒侵蚀堆积扇表面积及堆积厚度可以估算出裸露岩石面上发生颗粒侵蚀的体积。具有颗粒侵蚀灾害链的衰减率,可以采用发生颗粒侵蚀的裸露岩石面积与该区内全部裸露岩石面面积之比来表示。

底栖动物作为指示物种,被广泛应用于河流生态评价中<sup>[14-15]</sup>,本文将其用于评价灾害链对河流生态的影响。在同一河道中,分别在受到灾害链影响的河段及未受灾害链影响的河段进行底栖动物采样。采样工具是适用于山区河流底栖动物采样的踢网。将底栖动物样本带到实验室,在解剖镜及显微镜下进行鉴定,一般鉴定到科或者属级水平<sup>[16]</sup>。比较两河段中底栖动物群的生物多样性,进而对河流生态状况进行评价,从而说明灾害链对河流生态的影响。

## 2 灾害链

1. 灾害链类型 I (CI): 滑坡→溃坝洪水(或伴随泥石流)→剧烈河床演变→栖息地丧失

CI由4级灾害组成:1.与地震几乎同时发生的滑坡,堵塞河道,形成堰塞湖;2.随着堰塞湖的蓄水水位的升高,大约10~60d,堰塞坝发生溃决,伴随溃坝洪水,甚至引发泥石流;3.下游河段发生剧烈的泥沙运动及河床演变;4.水生栖息地丧失,鱼类及底栖动物多样性剧减。

汶川地震引发了大量的滑坡堰塞湖,其中最危险的唐家山堰塞湖是岷江沿岸两处相邻的巨大滑坡体夹杂巨石、碎屑冲向河道,堵塞岷江形成。该堰塞坝总长度为803m(沿河流方向),总宽度为612m(垂直河流方向),高度为82~124m,坝体总体积 $2\,037 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞湖的总库容为 $31\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于堰塞坝上游水系河网发达,多条支流入汇,水位迅速攀升,蓄水达 $20\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。一旦溃坝,溃坝洪水将对下游造成极大威胁。为了降低溃坝风险,在坝顶人为开挖了一条泄洪槽,引导水流由此下泄。泄洪槽内的巨石被炸开,以便水流下泄过程中冲刷泄洪槽,降低槽底高程。随着水流的冲刷,泄洪槽床底高程从740m降低到714m,宽度也由开挖时的10m扩展到100m,泄洪能力提高。堰塞

湖蓄水量由 $24\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 降低为 $8\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。尽管泄洪槽下切,洪水下泄过程中的洪峰流量达到 $6\,420 \text{ m}^3/\text{s}$ ,也并未造成危害。溃坝洪水将大量泥沙携带到下游河道中淤积,淤积高度超过20m,在淤积体上,泥沙运动剧烈。2008—2009年期间,强烈泥沙淤积与侵蚀过程不断发生。图2所示,是溃决后的唐家山堰塞坝下游500m范围内的岷江河段,洪水在下游淤积体上冲刷出一条深度达20m的深谷,新的河道逐渐形成。由于强烈的泥沙运动与河床演变过程,底栖动物和鱼类丧失了原有的稳定栖息地。

火石沟滑坡引发的次生灾害链也属于此类灾害链。火石沟是岷江的二级支流,位于崇州市鞍子河流域的上游。震前,火石沟为顺直深切河道,边坡极陡,两岸植被发育极好,归属鞍子河大熊猫自然保护区。汶川地震导致火石沟发生大型滑坡,随后又发生了一系列的次生山地灾害。图3给出了火石沟灾害链的发生地点及影响区域,包括滑坡发生区,滑动区,以及滑坡堆积区,堰塞湖,以及泥石流堆积区。图中标出了该区域地形测绘所用到的的小元宝高程点,以及在灾害链中受灾的肖家子槽村和薤子坪村。“O”点是滑坡堆积起点,“葫芦嘴”是堰塞坝末端。蓝线和绿线分别表示震前、震后河道。“H0”—“H11”是滑坡堆积体横断面,“N0”—“N10”是泥石流堆积体横断面。

火石沟滑坡属于快速远程滑坡,滑动距离较远,从滑坡起点二道坪到滑动区终点大约有2km。快速远程滑坡在滑动过程中产生巨大气浪,具有极强的摧毁性<sup>[17]</sup>,其运动途中将两岸山体一定厚度的表层推倒。火石沟沿岸数百家住房被掩埋,39人在滑坡及其后续灾害中牺牲。

火石沟滑坡运动到肖家子槽村附近,由于能量耗尽,又遇到该处右岸的凸出山体阻挡,最终停留在此处(图3中葫芦嘴),堵塞沟段,松散固体颗粒堆积成堰塞坝,其上游形成一个库容约 $75\,000 \text{ m}^3$ 的小型堰塞湖。由于震后暴雨,堰塞湖水位迅速攀升,地震次日凌晨,火石沟堰塞湖溃坝。随后,05—14及17的强降雨过程导致洪水进一步冲刷溃口,形成深切的“V”型切沟,截止2009—03,该切沟的下切深度超过50m,边坡坡度达到 $38^\circ$ 。随即发生3场泥石流,将大量碎屑物携带到下游淤积。在7km范围内,淤积厚度从30m逐渐减少到2m,形成楔形淤积体。由于淤积体中细颗粒泥沙含量较高,阻力结



图 2 唐山堰塞坝下游的泥沙淤积体上的新切河道 (2009 - 11)

Fig. 2 New incised channel on the downstream of the Tangjiashan Dam (November, 2009)

构不足,河床冲刷,河床演变剧烈,逐渐发育成新的河道。

根据对滑坡、泥石流堆积体横断面以及河道纵剖面的地形测量信息,结合震前地形资料,得到火石沟震前、滑坡初期,以及地震发生后 1 a 时的河道纵剖面(图 4)。图 5 给出了堆积体代表性横断面 H2, H4 震前、滑坡后即地震发生后一年的情况。通过河

道纵剖面及横断面地震前后变化量,得到滑坡堆积体体积  $721 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,泥石流堆积体体积  $125 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2009 - 03,对火石沟流域内受到灾害链影响的河段,以及未受灾害链影响的河段分别进行了底栖动物采样,带到实验室在显微镜下鉴定到科级水平。发现虽然两采样点的底质条件和水流条件都非常相似,但是底栖动物群落组成却相差甚远,未受灾害链影响的河段中采集到椎实螺科 *Lymnaeidae* (1),鱼蛉科 *Corydalidae* (1),原石蛾科 *Rhyacophilidae* (2),纹石蛾科 *Hydropsychidae* (1),瘤石蛾科 *Goeridae* (1),短尾石蝇科 *Nemouridae* (4),颤蚓科 *Tubificidae* (1),大蚊科 *Tipulidae* (4),蠓科 *Ceratopogonidae* (1),毛蠓科 *Psychodidae* (2),四节蜉科 *Baetidae* (57),长足摇蚊亚科 *Tanypodinae* (18),摇蚊亚科 *Chironomidae* (20),粗腹摇蚊亚科 *Pelopiinae* (14),其他亚科 (77),共 15 个类群。而在受灾害链影响的河段仅采到蚋科 *Simuliidae* (6),四节蜉科 *Baetidae* (7),石蝇科 *Perlidae* (2),短尾石蝇科 *Nemouridae* (1),长足摇蚊亚科 *Tanypodinae* (3),摇蚊亚科 *Chironomidae* (3),共 6 个类群(括号中卫各类群的密度,单位:个/ $\text{m}^2$ )。受灾害链影响的河段底栖动物多样性明显降低。

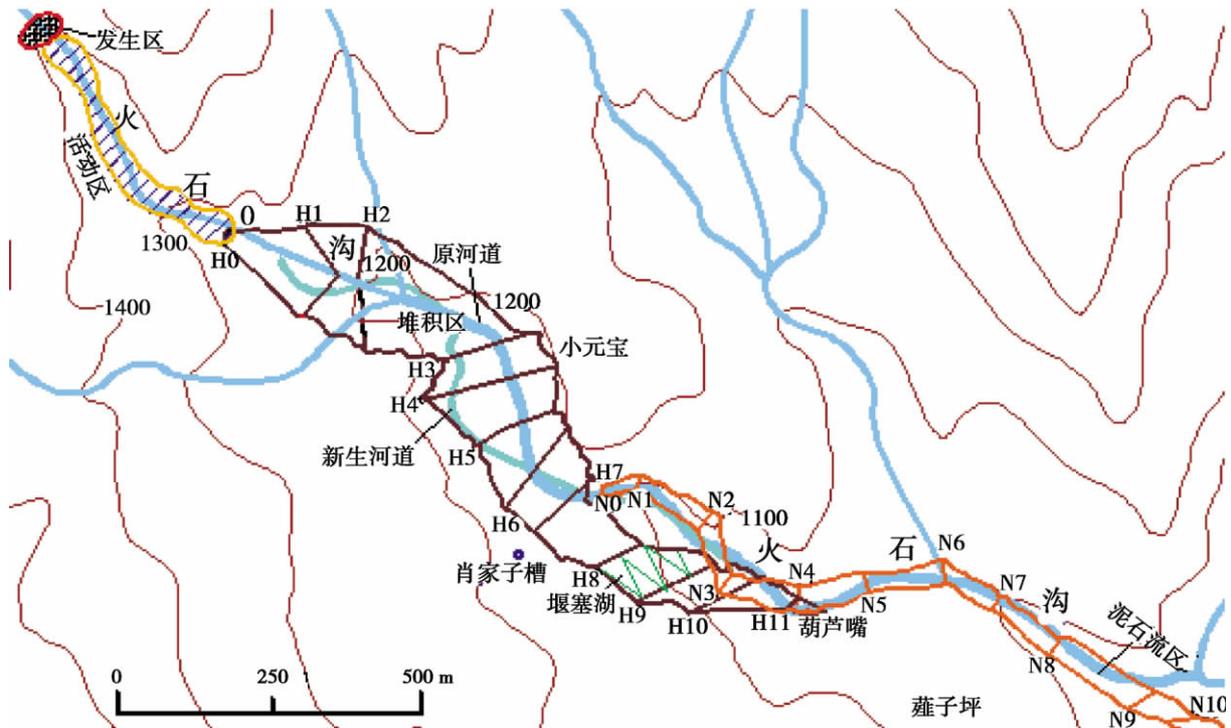


图 3 火石沟灾害链测绘图

Fig. 3 Huoshigou gully landslide and initiated disaster chain

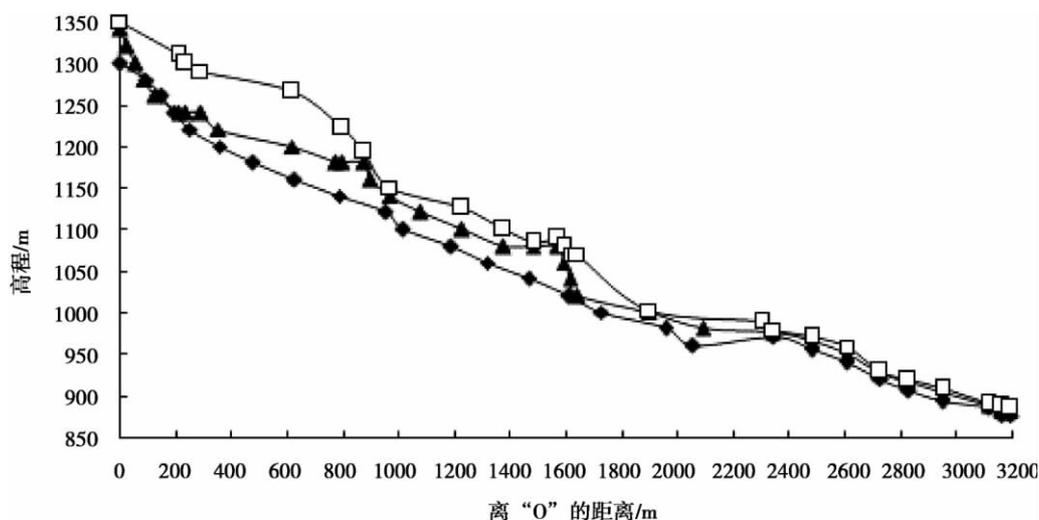


图4 震前、滑坡初期及震后1 a 火石沟纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal profiles of the Huoshigou ravine channel pre- and post-earthquake, and 1 year after the earthquake

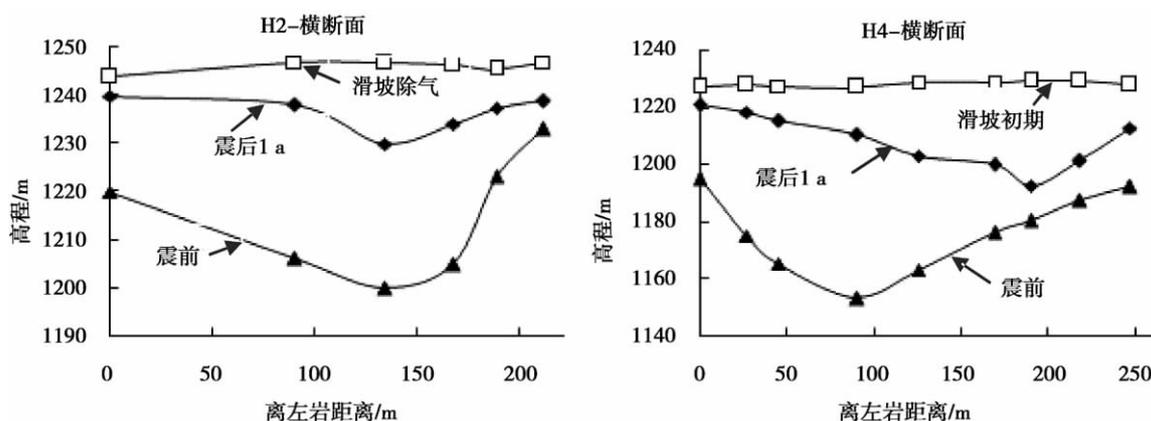


图5 震前、滑坡初期及震后1 a 火石沟代表性横断面

Fig. 5 Cross sections of the channel pre-earthquake, post-earthquake, and 1 year after the earthquake at H2 and H4

2. 灾害链类型 II (CII): 滑坡→泥石流→新沟道发育→剧烈河床演变

CII 由四级灾害组成: 1. 地震中发生巨型滑坡, 将原来沟谷掩埋; 2. 震后前 2 个洪水期内, 泥石流多发; 3. 震后几年内, 松散堆积体上逐渐发育出新沟道; 4. 新沟道稳定过程中发生新的沟道下切和剧烈河床演变。

文家沟巨型滑坡及其后续山地灾害就构成了此类灾害链。文家沟是绵远河的支流, 位于绵竹市清平乡绵远河左岸, 正位于汶川地震所在的龙门山活动断裂带上。震前, 沟道总长 3.25 km, 最低点位于沟口, 高程 890 m; 最高点位于东部分水岭处顶子崖, 高程 2402 m, 相对高度 1512 m, 流域面积 12.31 km<sup>2</sup>, 流域内的所有支沟均为深切支沟, 边坡约 30°~50°。根据地震前的 1:2.5 万地形图和震后对滑

坡体的测量, 文家沟大滑坡将  $4.450 \times 10^4$  m<sup>3</sup> 岩体和残、坡积物从山上带下, 将其整个主沟以及其他支沟均掩埋, 滑坡堆积厚度 20~180 m, 堆积物总方量达  $8.160 \times 10^4$  m<sup>3</sup> [18]。在滑坡中, 沟谷沿岸的 34 家农户被埋, 80 多人丧生。

震前文家沟在 100 多年内都未发生过泥石流。震后, 大滑坡为泥石流创造了松散物质, 加之降雨频繁, 松散堆积物与水流混合形成高容重泥石流。目前, 沟里没有水流, 降雨量较小时全部渗流, 降雨量较大时砂石俱下, 形成泥石流。距统计 2008 年中, 几乎所有降雨强度超过 30 mm/d 的降雨过程都引发了泥石流。尤其是 2008-09-22-23 发生的降雨强度达 88 mm/d 的暴雨过程导致了一场巨大的泥石流, 携带了约  $90 \times 10^4$  m<sup>3</sup> 的滑坡物质到沟口, 摧毁了道路, 民房和农田。截止到 2008 年底, 多场

泥石流导致滑坡堆积体上形成了深约 50 m 的“V”型冲沟,将约  $170 \times 10^4 \text{ m}^3$  的滑坡物质带到下游沟段,其中约  $100 \times 10^4 \text{ m}^3$  的泥沙一直被搬运到了沟口。在冲刷及泥石流作用下,滑坡堆积体上逐渐发育出新的沟道。

图 6 是根据震前、滑坡初期,以及震后 1 a 的地形情况绘制的文家沟纵剖面图。由于滑坡堆积体松散,颗粒级配范围广,在新沟道稳定过程中,发生着强烈的泥沙运动与河床下切。新切的沟道边坡极陡,逐步冲刷又继续导致岸坡崩塌,继续提供松散物质,因此,导致新的泥石流爆发。同时,被泥石流带入绵远河的泥沙又引起了绵远河强烈的泥沙运动与河床演变。

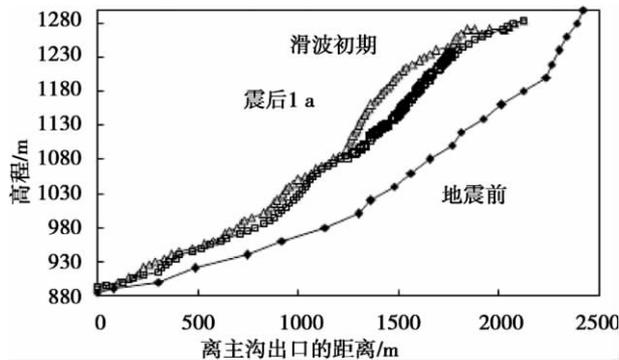


图 6 文家沟震前、滑坡初期及震后新切沟谷河道纵剖面

Fig. 6 Longitudinal profiles of the main channel before the earthquake, after the landslide in May 2008, and after the new drainage development in 2009

### 3. 灾害链类型 III(CIII):崩塌→颗粒侵蚀→坡面泥石流

汶川地震引发了河流沿岸大量的崩塌、落石,崩塌造成了大面积的裸露岩石。图 7 中,左图所示为岷江沿岸的花岗岩崩塌的裸露岩石,右图为绵远河沿岸白云质灰岩崩塌造成的裸露岩石。这些崩塌形成的裸露岩石极脆,在阳光暴晒及昼夜温度变化作用下,极易支解破碎。在岩石破碎过程中伴随着发生颗粒侵蚀,颗粒侵蚀定义为:地表植被完全破坏后,裸露的岩石表面在阳光暴晒和热胀冷缩直接作用下破碎,呈颗粒状脱离,在风力、雨水及余震等外力触发下沿坡面以滚石或碎屑流的方式滚下,在坡脚形成碎屑堆积体的现象。汶川地震发生后,江河沿岸无数的山体崩塌与滑坡造成了大片裸露的山体,可发生颗粒侵蚀的面积急剧扩大。颗粒侵蚀下来的碎石粒径均匀,一般为 1~5 cm,最大的颗粒也

可达 20 cm。颗粒侵蚀堆积扇非常松散,堆积坡度  $30^\circ \sim 40^\circ$ ,极易失稳形成坡面泥石流,对公路造成很大危害<sup>[19-20]</sup>。

汶川地震后,汶川一带岷江干旱河谷中,几乎所有的崩塌滑坡面都成了颗粒侵蚀面,甚至不少非干旱河谷里的崩塌滑坡面也成了颗粒侵蚀面。在颗粒侵蚀体上,植被的修复速度低于侵蚀速度,颗粒侵蚀不断破坏和埋没新生植被。笔者通过调查发现了颗粒侵蚀的规律,并通过野外试验证实了颗粒侵蚀主要造成 3 种灾害:破坏植被、破坏交通和形成坡面泥石流。汶川震区的颗粒侵蚀面表层不断发生脱落,每年剥蚀厚度数十厘米。颗粒侵蚀物覆盖在原来的崩塌、滑坡堆积物上,二者粒径明显不同。图 8 左显示的是汶川附近岷江岸坡上的一个崩塌堆积体上发生颗粒侵蚀。一般来讲,颗粒侵蚀包括三部分:上部侵蚀面;中段的颗粒流滑动段;下方的颗粒堆积扇。发生颗粒侵蚀的裸露岩石面的坡度约  $45^\circ \sim 60^\circ$ 。颗粒侵蚀面上没有植被覆盖。颗粒流滑动段的坡度约为  $40^\circ$ 。坡脚堆积扇的坡度约为  $35^\circ$ ,与颗粒物质堆积体的自然休止角相等。颗粒侵蚀的碎石粒径远小于地震中崩塌体岩石粒径。图 8 右是汶川附近岷江河段发生颗粒侵蚀的河段:上层堆积的是震后 1 a 来发生的颗粒侵蚀物,颗粒大小都在 1 cm 左右,形状相似;下部是地震崩塌堆积体,其颗粒级配极为不均,形状各异,最大的巨石直径达数 m,最小颗粒粒径小于 1 mm。由于颗粒侵蚀和地震崩塌形成的堆积物的差异,颗粒侵蚀堆积物的厚度及表面积清晰可测。对颗粒侵蚀堆积体的 3 个不同位置进行厚度测量,计算平均值作为其堆积厚度。颗粒侵蚀堆积扇的表面积采用激光测距仪测量。颗粒侵蚀堆积扇表面积与堆积厚度的乘积近似为过去 1 a 中颗粒侵蚀的体积,因此,颗粒侵蚀率即可通过颗粒侵蚀的体积与裸露岩石表面积之比来得到。

根据 2009 年不同月份对震区颗粒侵蚀体的测量发现,绵远河流域裸露岩石面的颗粒侵蚀率在 3~53 cm/a,平均值约为 17 cm/a<sup>[19]</sup>。因此,震区颗粒侵蚀率是湿润地区或者寒冷地区发生的普通的岩石破碎造成的侵蚀率的 1 000 倍以上<sup>[21-22]</sup>。而且,震区的颗粒侵蚀率也比其他具有颗粒侵蚀的地区颗粒侵蚀率高,这主要是因为地震造成了大量新鲜的裸露岩石面。根据野外调查,震区大约 30% 的崩塌、落石、滑坡的裸露岩石表面遭受了颗粒侵蚀。而且,以滚石或碎屑流形式发生的颗粒侵蚀也是一种

危害性极大的物质运动形式。碎石沿着山坡流下,形成长达数百米的颗粒流段,沿途将大部分树木击倒,甚至对植被造成毁灭性破坏。

颗粒侵蚀也容易导致坡面泥石流和飞石事故,堵塞交通要道,甚至造成人员伤亡。震区常见 1~20 cm 碎石颗粒滚下,跃起约 50 cm,速度很快,对人畜造成威胁。笔者在考察过程中亲历过飞石打破车窗造成司机重伤事故。因此,在震区的公路上,随处可以看到“飞石路段”这样的标志,尤其是在岷江沿岸的高速公路上,路政部门还专门雇佣了当地人员对这些受到颗粒侵蚀威胁的路段实施监控,在飞石严重的情况下,高速公路会被迫关闭。

由于颗粒侵蚀堆积体物质材料均匀,堆积坡度

陡峭,降雨强度超过 20 mm/d 时,颗粒物就会发生运动。这种物质运动形式像泥石流,但是运动距离比普通的泥石流短,一般只运动几十米到上百米。这种运动形式被称为坡面泥石流,它将大量的颗粒侵蚀物带入河中或者是堆积在岸边高速公路上,导致河道局部泥沙淤积或公路交通堵塞。河道中泥沙淤积对河流生态造成不利影响,甚至会导致鱼类和底栖动物栖息地丧失。

#### 4. 灾害链类型 IV( CIV): 崩塌→新崩塌

CIV 灾害链只由两级灾害组成:由于河流下切作用,大部分岸坡坡脚都处于临界失稳状态,在地震作用下,靠近河床的山体(距河底高度 100~800 m)失稳崩塌;崩塌后,崩塌体上部山体继续崩塌。



图 7 汶川地震触发岷江(左图)及绵远河(右图)沿岸崩塌形成的裸露岩石表面(2008-05 拍摄)

Fig. 7 A grain erosion site on the Minjiang River (left); grain erosion on avalanches along the Mianyuan River (May 2008)



图 8 汶川附近的岷江河段的颗粒侵蚀(左)及该颗粒侵蚀堆积体厚度测量(右)(2009-06 拍摄)

Fig. 8 A grain erosion site on the Minjiang River near Wenchuan (left); Depth of the grain erosion deposition (June 2009)

渔子溪是岷江的支流,在映秀附近汇入岷江。岷江及渔子溪流域内的山体岩性主要是花岗岩,汶川地震中,这两个流域内大量山体发生了崩塌。据统计,震后两条河沿岸的 0~500 m 高程范围内的岸坡大面积被崩塌覆盖。图 9(a) 是渔子溪从映秀到七层楼河段沿岸峡谷边坡崩塌面积比,图 9(b) 是地震前及 2008 年崩塌后的河道纵剖面图。震前河道纵剖面是根据 1960 代的 DEM 数据所绘;2008 年崩塌后的河道纵剖面是采用 GPS 及激光测距仪测量数据所绘;崩塌体的高度及高程范围也是根据 GPS 及激光测距仪测量所得。这些崩塌大部分都发生在河床以上 100~800 m 范围内,崩塌物质材料坠入河中,堵塞河段形成了许多小型堰塞湖,导致河床在不同位置抬升数十米。

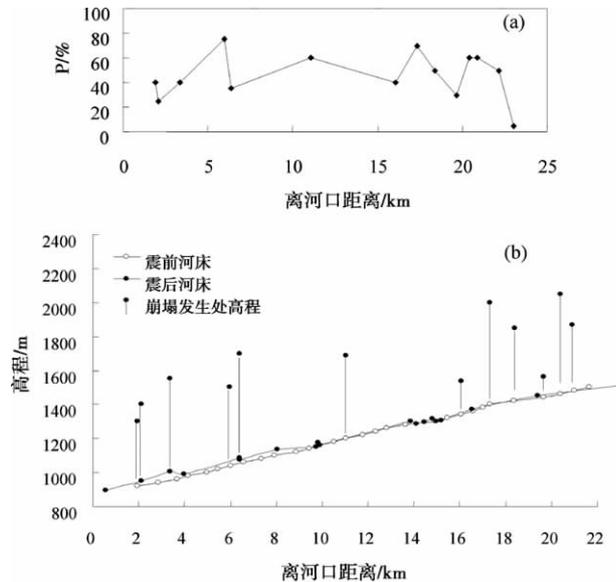


图 9 (a) 渔子溪从映秀到七层楼河段峡谷边坡发生崩塌的面积比; (b) 震前,崩塌发生后的河底纵剖面,以及沿岸崩塌发生处距离河底高程图

Fig. 9 (a) Area percentage of avalanches on the valley slopes along the Yuzixi River from Yingxiu (river mouth) to Qicenglou; (b) Riverbed profile before the earthquake, after the avalanches, and the elevation of the avalanches from the riverbed

在岷江流域,由于地震中靠近河岸附近峡谷岸坡发生了大面积崩塌,导致上部山体(距河底高程 400~1 500 m)失去了支撑,甚至悬空。且地震中,岩石裂缝、破碎,形成了大量危岩悬挂的现象。在震后几年内,暴雨和余震会经常性地引发新崩塌。2009 年里就发生了几起新崩塌事故,如岷江干流上彻底关崩塌毁桥事故,岷江支流棕渠沟上的巨型崩

塌事故等。

彻底关大桥是都汶公路跨越岷江的咽喉要地。地震中大桥上方山体(距离河床高度均在 100~500 m)发生此灾害链的第一级灾害,使大桥破坏。随着底部崩塌的发生,上部山体及危岩所处部位坡度增加,逐渐进入临界失稳状态。震后进行了重建,自地震一周年纪念日开始投入使用。然而,2009-07-24T13:00,彻底关大桥岷江右岸山体又开始发生小规模崩塌落石(发生位置距离河床高度 200~400 m)(如图 10(a)),导致上部岩体更易失稳。2009-07-25 凌晨,在暴雨作用下,该灾害点高位危岩发生大面积崩塌(发生位置距离河床落差达 500~600 m),崩塌滑坡体总方量超过  $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。垮塌的山体夹带大量巨石,其中一重达 200 t 左右的巨石击断大桥桥墩,导致 60 m 桥面坍塌,使正行驶在桥面上的 6 辆车辆坠落桥底,1 辆车悬挂桥面断裂处,事件共导致 6 人死亡、12 人受伤,直接经济损失 1 500 万元。此次崩塌属此灾害链的第二级灾害。

图 10(b) 所示为此崩塌灾害链的横断面。由于岷江长期下切,河岸边坡极陡,右岸边坡甚至达  $40^\circ \sim 50^\circ$ ,十分不稳定。地震中发生的第一级崩塌使得上部山体和岩石的坡度更陡,因此,暴雨作用下诱发了此次新崩塌,造成了严重灾难。

茂县附近的岷江支流棕渠沟也发生了此类崩塌灾害链。震前,棕渠沟为深切的峡谷,两岸边坡极陡,尤其是左岸边坡达  $40^\circ \sim 50^\circ$ (图 11)。该河流两岸山体主要是花岗岩岩性,在汶川地震中,大部分岩体崩裂,距河底高度 400~800 m 范围的山体发生了崩塌。粒径 1~15 m 的巨石崩塌体坠入河中,堵塞河道,形成了一个库容约  $20 \times 10^4 \text{ m}^3$  的堰塞湖。2009-03,在第一级崩塌发生区的上部,距河底高度超过 800 m 的山体再次发生巨石崩塌,直径超过 10 m 的巨石坠落,砸到原来的崩塌堰塞坝上,导致堰塞坝部分毁坏,发生溃坝洪水,所幸洪水流量不大,没有造成下游人员伤亡。

### 3 讨论

在 4 种灾害链类型中,随着灾害链的延续,每一级灾害发生的时间均较其上级灾害所持续的时间长。图 12 是笔者根据对多种地震次生灾害活动时间调查的结果所绘。滑坡和崩塌几乎与地震同时发生,持续时间极短。滑坡堰塞坝溃坝如果发生,一般

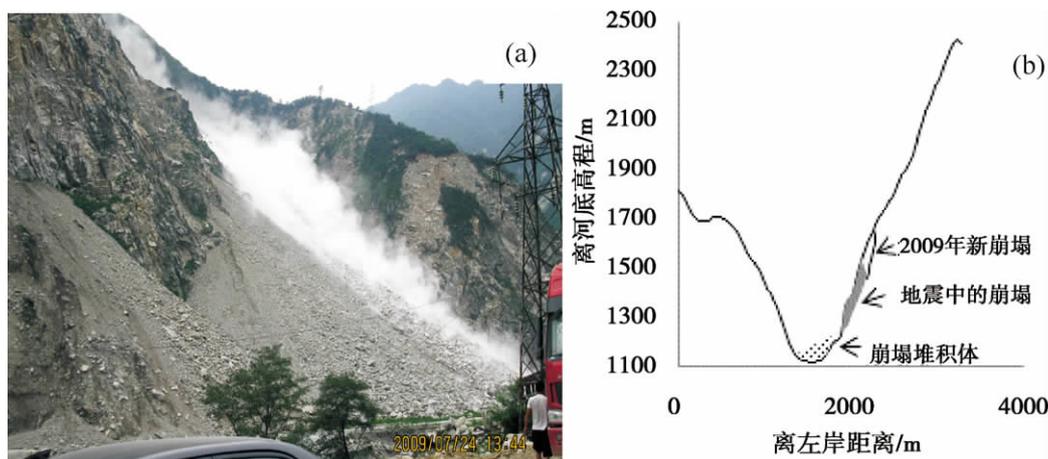


图 10 (a) 2009 - 07 - 24 彻底关大桥先行小规模崩塌; (b) 彻底关崩塌灾害链发生示意图

Fig. 10 (a) Small-scale avalanches and rock falls at Chediguan on 24 July 2009;

(b) Cross section of the Chediguan avalanche chain

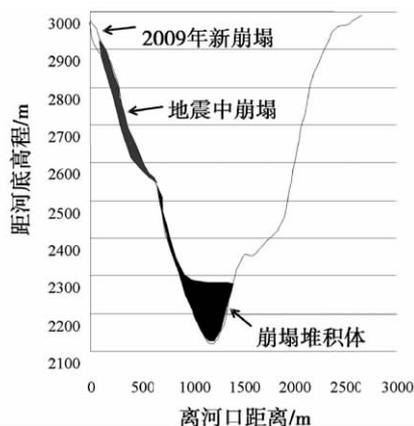


图 11 棕渠沟崩塌灾害链发生示意图

Fig. 11 Cross section of the Zongqugou avalanche chain

是在滑坡后 10 ~ 60 d 内发生。泥石流灾害及剧烈河床演变活动一般会持续 5 ~ 10 a ,甚至更长 ,例如台湾“9. 21”地震所引发的泥石流频繁活动了约 10 a<sup>[8]</sup>。剧烈河床演变过程对河流生态产生不利影响 ,泥石流河道及泥沙强烈运动的河道中几乎无底栖动物生活<sup>[23]</sup>。因此 ,灾害对河流生态的影响所持续的时间与河床演变活动持续的时间直接相关 ,一般也会持续上超过 10 a。地震增加了土壤侵蚀与颗粒侵蚀强度 ,且对侵蚀的影响会持续上百年<sup>[9]</sup>。由于下部山体崩塌或岩石崩裂形成的二次高位崩塌持续时间可能有近 10 年 ,裸露崩塌面上发育植被能够减少发生新崩塌的风险。

通过对所识别出的这 4 种类型的灾害链的研究发现 ,灾害性(一般用灾害发生量或者是发生面积来表示)沿灾害链逐级衰减 ,各级灾害之间以某

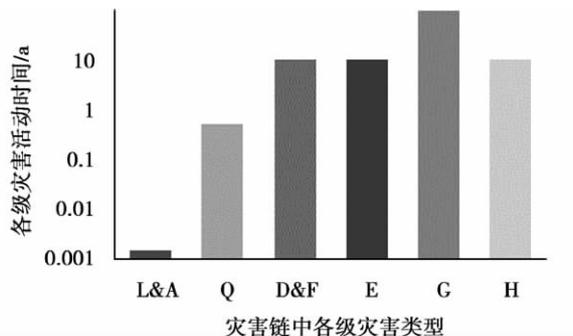


图 12 灾害链中各级灾害活动时间图

Fig. 12 Estimated time of chain disasters induced by the Wenchuan earthquake

L and A landslide and avalanches; Q failure of Quake lake dam; D and F debris flows and intensive fluvial process; E impacts on ecology , G erosion , especially grain erosion; H new avalanches at high elevations

一衰减率衰减传递。若以各级灾害中发生的质量转移体积表示灾害量 ,那么灾害链衰减率就表示为某级灾害发生的体积与其上级灾害发生的体积之间的比值。例如 ,在火石沟灾害链中 ,滑坡发生的物质搬运体积量为  $721 \times 10^4 \text{ m}^3$  ,其下一级灾害泥石流发生的泥沙搬运量为  $125 \times 10^4 \text{ m}^3$  ,因此 ,衰减率为 0. 17。而且 ,此灾害链的后续灾害剧烈河床演变还在继续 ,火石沟下游河段泥沙运动还非常强烈 ,但是对于薤子坪村上游超过 700 m 的基本达到稳定的河段 ,其上因河床演变发生的泥沙侵蚀量为  $6 \times 10^4 \text{ m}^3$  ,也大约为本段泥石流堆积量  $40 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 0. 15 倍。因此 ,火石沟整条灾害链的衰减率几乎相等 ,平均为 0. 16。

在文家沟灾害链中,滑坡总体积为  $8\ 160 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而下级泥石流发生的泥沙物质的总体积为  $170 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,由于泥石流灾害还在继续发生,本段灾害链衰减率还将增大,因此,估计该灾害链衰减率约为  $0.02 \sim 0.03$ 。在CIII中,由于发生崩塌及颗粒侵蚀的面积较大,不同位置的崩塌堆积体和颗粒侵蚀堆积体的厚度相差不大,因此,可以直接采用灾害发生面积来表示灾害发生量,那么灾害链衰减率就可以用颗粒侵蚀面积与崩塌面积之比表示。从岷江沿岸草坡到汶川段,颗粒侵蚀面积为崩塌裸露岩石面积的30%,也就是说本灾害链的衰减率为0.3。在灾害链类型IV中,目前只有少数几处的第二级灾害高位崩塌已经发生,其余位置还处于高位危岩状态,因此目前的衰减率还很小,随着灾害链的延续,灾害率将增加。

#### 4 结论

汶川地震引发了4种类型的次生山地灾害链,CI:滑坡→溃坝洪水(或伴随泥石流)→剧烈河床演变→鱼类及底栖动物栖息地丧失;CII:滑坡→泥石流→新沟道发育→剧烈河床下切及河床演变;CIII:崩塌→颗粒侵蚀→坡面泥石流;CIV:崩塌→上部坡度变陡,岩石崩裂,发生新崩塌。

不同灾害链类型中各级灾害活动时间有所不同。一般下级灾害持续的时间会比上级灾害持续的时间长。整条灾害链延续的时间取决于灾害链的长度及各级灾害的类型,可能长达100 a之久。

灾害链的灾害性会随着灾害链的延续逐级减弱。如果用某级灾害的物质输运量与其上一级灾害的物质输移量之间的比值来表示灾害链衰减率的话,震区所识别出的4类灾害链的衰减率均在  $0.02 \sim 0.3$  范围内。

#### 参考文献(References)

- [1] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan Earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards[J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(1): 19-36
- [2] Yin Y-P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. *J Eng Geol*, 16(4): 3-12 [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(4): 3-12]
- [3] Yin Sung Hsu, Yu Hsiung Hsu. Impact of earthquake-induced dammed lakes on channel evolution and bed mobility: case study of the Tsaoling landslide dammed lake [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374: 43-55
- [4] Xu Qiang, Fan Xuanmei, Huang Runqiu, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, south west China [J]. *Bulletin of Engineering and Geological Environment*, 2009, 68: 373-386
- [5] Cui Peng, Zhu Yingyan, Han Yongshun, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation[J]. *Landslides*, 2009, 6: 209-223
- [6] Perotto-Baldivieso H L, Thurow T L, Smith CT, et al. GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2004, 103: 165-176
- [7] Wen Tzu Lin, Chao Yuan Lin, Jing Shyan Tsai, et al. Eco-environmental changes assessment at the Chiufenershan landslide area caused by catastrophic earthquake in Central Taiwan [J]. *Ecological engineering*, 2008, 33: 220-232
- [8] Ohmori H. Dynamics and erosion rate of the river running on a thick deposit supplied by a large landslide [J]. *Z. Geom., N. F.*, 1992, 36: 129-140
- [9] Koi T, Hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan [J]. *Geomorphology*, 2008, 101: 692-702
- [10] Pearce A J, Watson A J. Effects of earthquake-induced landslides on sediment budget and transport over a 50-yr period [J]. *Geology*, 1986, 14: 52-55
- [11] Bruce D Malamud, Donald L Turcotte, Fausto Guzzetti, et al. Landslides, earthquakes, and erosion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 229: 45-59
- [12] Ouyang Zhiyun, Xu Weihua, Wang Xuezi, et al. Impact assessment of Wenchuan earthquake on ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5801-5809 [欧阳志云, 徐卫华, 王学志 等. 汶川大地震对生态系统的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 5801-5809]
- [13] National Panel of Wenchuan Earthquake (2008) Atlas of geological and earthquake disasters of the Wenchuan Earthquake [M]. Sino-maps Press, Beijing (in Chinese) [汶川地震图版. 汶川地震地质及地震灾害图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2008]
- [14] Smith M J, Kay W R, Edward D H D, et al. AusRivAS: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia [J]. *Freshwater Biol.*, 1999, 41: 269-282
- [15] Karr J R. Defining and measuring river health [J]. *Freshwater Biol.*, 1999, 41: 221-234
- [16] Duan Xuehua, Wang Zhaoyin, Xu Mengzhen, et al. Effect of streambed sediment on benthic ecology [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(3): 325-338
- [17] Zhang Yongshuang, Lei Weizhi, Shi Jusong, et al. General Characteristic of 5.12 earthquake-induced geohazards in Sichuan [J]. *J Geomech*, 2008, 14(2): 109-116 [张永双, 雷伟志, 石菊松 等. 四川5.12地震次生地质灾害的基本特征初析[J]. *地质力学学报*, 2008, 14(2): 109-116]
- [18] Sichuan Geological Engineering Corporation. Emergency geological

- prospecting project for 5. 12 earthquake and earthquake-triggered disasters: exploration , feasibility study , design reports of the Wenjiagou Gully [R ] 2009 [四川省地质工程集团公司. 四川省地震灾区 2008 年重大地质灾害应急勘查设计项目: 绵竹市文家沟泥石流勘查、可研、初设报告[R ], 2009]
- [19] Wang Zhaoyin , Shi Wenjing , Liu Dandan. Continual erosion of bared rocks after the Wenchuan Earthquake and control strategies [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 2011 , 40( 4) : 915 – 925
- [20] Wang Zhaoyin , Liu Dandan , Shi Wenjing. Grain erosion induced by the Wenchuan Earthquake and its control [J]. *Science of Soil and Water Conservation* , 2009 , 7( 6) : 1 – 8 [王兆印, 刘丹丹, 施文婧. 汶川地震引发的颗粒侵蚀及其治理. *中国水土保持科学*, 2009 7( 6) : 1 – 8]
- [21] Saas O , Krautblatter M. Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slopes: Genetic models derived from GPR measurements [J]. *Geomorphology* , 2007 , 86: 176 – 192
- [22] Matsuoka N. Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term ( 1994 – 2006) observations [J]. *Geomorphology* , 2008 , 99: 353 – 368
- [23] Duan Xuehua. Ecological impacts of water and sediment transportation on macroinvertebrate community in rivers [D]. Beijing: Dissertation of Tsinghua University 2009 [段学花. 河流水沙对底栖动物的生态影响研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文 2009]

## Disaster Chains Initiated by the Wenchuan Earthquake

XU Mengzhen<sup>1</sup> , WANG Zhaoyin<sup>1</sup> , QI Lijian<sup>2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China;

2. Department of Hydraulic and Architecture Engineer , Sichuan Agricultural University , Ya'an 625014 , Sichuan , China)

**Abstract:** The Wenchuan Earthquake caused numerous landslides and avalanches , which initiated causal chains of secondary disasters. Field investigations and field experiments were performed in the earthquake area during 2008—2009 to study the disaster chains. Four types of disaster chains have been identified. In all of these disaster chains , each episode was caused by the previous episode. Moreover , the amount of mass movement decreased along the disaster chains. This paper defined an attenuation factor of disaster chain , which is expressed as the ratio of the volume of mass movement or affected area in one episode of a chain to the volume or affected area in the causal episode to express the decreasing. The attenuation factor of disaster chains caused by the Wenchuan Earthquake ranges from 2% to 30% . Macroinvertebrates were used to evaluate the ecological effect of the disaster chains , and it found that the species taxa were greatly reduced in the affected reach.

**Key words:** Wenchuan Earthquake; disaster chain; mass movement; attenuation factor of disaster chain; macroinvertebrate