

## 四川都江堰龙溪河流域泥石流成因、特征和危险性评价

李彩侠, 马 煜

成都理工大学 工程技术学院, 四川 乐山 614000

**摘 要:** 在汶川地震影响下,截至 2011 年龙溪河流域共计有 45 条泥石流沟暴发泥石流,造成重大经济财产损失. 在龙溪河流域泥石流灾害野外调查的基础上,对形成泥石流的地形、降水、物源成因进行了研究,认为物源和降水是激发龙溪河流域泥石流的主要原因. 龙溪河流域泥石流具有群发性和小流域暴发性特征,构造带耦合特征,破坏性大和灾害链作用特征. 采用 MFCAM 模型对龙溪河流域泥石流沟进行危险性评价,结果显示有 1 条沟危险性大,14 条危险性中等,30 条危险性小.

**关键词:** 泥石流;成因;危险性评价;龙溪河流域;四川省

## CAUSES, CHARACTERISTICS AND HAZARD ASSESSMENT OF THE DEBRIS FLOWS IN LONGXI RIVER BASIN, SICHUAN PROVINCE

LI Cai-xia, MA Yu

*School of Engineering & Technology, Chengdu University of Technology, Leshan 614000, Sichuan Province, China*

**Abstract:** Under the influence of the Wenchuan Earthquake, debris flows have taken place in a total of 45 gullies in Longxi River Basin by 2011, causing heavy economic and property losses. The landform, precipitation and provenance are studied based on the field investigation of debris flow disasters. It is believed that the latter two are the main causes for debris flows in the area. The debris flows are characterized by group occurrence, small river basin outbreak, structural belt coupling, huge destructiveness and disaster chain. The MFCAM model is used for the hazard assessment of debris flow gullies. The results show that there is one gully with high risk, 14 with moderate risk and 30 with low risk in the area.

**Key words:** debris flow; cause; hazard assessment; Longxi River Basin; Sichuan Province

### 0 引言

汶川地震后,区域性群发泥石流频频暴发<sup>[1]</sup>. 2008 年 5 月 12 日龙溪河流域暴发 8 条泥石流沟; 2008 年 6 月 11 日,九寨沟县暴发 17 条泥石流沟;

2008 年 9 月 24 日,北川县暴发 72 条泥石流沟; 2010 年 8 月 13 日,汶川映秀暴发 21 条泥石流沟,都江堰龙溪河流域暴发 45 条泥石流沟,绵竹清平暴发 11 条泥石流沟; 2011 年 7 月 6 日,杂谷脑河流域暴发 9 条泥

收稿日期:2018-04-23;修回日期:2018-08-06. 编辑:张哲.

基金项目:四川省教育厅科研基金(18ZA0076,16ZB0407);成都理工大学工程技术学院青年科学基金(C122016020,C122017009);成都理工大学工程技术学院院级教改项目(2016-YY-JG16).

作者简介:李彩侠(1986—),女,硕士,讲师,主要从事地质学和地质工程教学工作,通信地址 四川省乐山市市中区肖坝路 222 号成都理工大学工程技术学院资源勘查与土木工程系 315 办公室,E-mail//licaixiac@126.com

泥石流沟。这些群发性泥石流由于同一时间暴发,给当地交通、农业、建筑和人民生活安定造成很大破坏。汶川地震后,位于强震区的都江堰龙溪河流域在强降雨条件下多次发生泥石流地质灾害,泥石流冲出方量约 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,使该流域在中下游段以淤积为主,掩埋房屋和河道,河道高程平均上升约5 m,对龙溪河流域内原有旅游建筑的灾后恢复与重建带来了一定影响,对原有公路、市政管线、河道及农田造成了严重破坏,造成经济损失约54687.5万元<sup>[2]</sup>。本文在2010年8月13日该流域暴发泥石流沟之后,在对45条泥石流沟进行现场调查的基础上,分析泥石流灾害形成的原因及泥石流特征,并对该区域泥石流进行危险性评价,为区域性泥石流灾害的形成和防治提供借鉴与参考。

## 1 研究区地质环境条件

都江堰龙池镇龙溪河流域属中亚热带湿润季风气候区,气候温和,降水充沛,阴雨天气频繁。通过对龙池镇近60年(1957~2006)的气温和降雨资料统计,龙池镇极端最高温 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,极端最低温 $-4.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均气温 $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;年均降水量 $1134.8 \text{ mm}$ ,最多年达 $1605.4 \text{ mm}$ (1978年)。最大月降水量为 $592.9 \text{ mm}$ ,最大日降水量达 $245.7 \text{ mm}$ ,最大小时降水量为 $83.9 \text{ mm}$ 。十年一遇小时降水量为 $71.3 \text{ mm}$ ,二十年一遇小时降水量为 $74.8 \text{ mm}$ 。一次连续最大降水量 $457.1 \text{ mm}$ ,一次连续最长降水时间为28 d。月降水平均最多的8月降水量为 $289.9 \text{ mm}$ ,降水集中的5~9月降水量占全年总降水量的80%以上。降水具有降水集中、雨强大和频率高的特点,这些特点往往成为洪水和泥石流等灾害的诱发因素。

龙溪河流域内地形变化大,整体地势北高南低,相对高差较大,在地形上属低—中山及河谷平坝阶梯状分布,地貌上属构造侵蚀低—中山地貌、堆积侵蚀低山地貌及构造侵蚀溶蚀中山地貌。龙溪河流域具有以下地形特征:1)流域高差大,全流域内最高点海拔 $3072 \text{ m}$ ,最低点海拔 $770 \text{ m}$ ,相对高差 $2274 \text{ m}$ ,流域内各泥石流沟海拔 $723 \sim 1605 \text{ m}$ ;2)纵坡陡,整个龙溪河流域平均纵比降 $126\%$ ,泥石流沟纵比降 $376\% \sim 573\%$ ;3)山坡坡度大,流域山坡坡度在 $30 \sim 70^\circ$ 间。由此可见,该流域具有山高、坡陡、沟床比降大的特征。巨大的地形高差,使沟道的松散堆积物具有较大的势能,陡峭的沟床和山坡为松散物质的启动提供了有利

的条件。

龙溪河流域内的虹口—映秀断裂(映秀—北川断裂带的一部分)是汶川地震的发震断裂。在汶川地震主震发生后,映秀—北川断裂带相继发生3.4万余次的余震,其中4级以上的余震200多次。虹口—映秀断裂3~5 km宽带状区内地震最高烈度达XI度。该流域内出露的岩性以砂岩、泥岩、碳质页岩为主,安山岩、凝灰岩及安山玄武岩次之。由于龙溪河流域内有虹口—映秀断裂、桐麻坎—南狱庙断裂和灌县断裂穿过,流域内岩层破碎,极易产生崩塌滑坡。汶川地震后,龙溪河流域发育了大量的崩塌滑坡及松散堆积物。龙池“8·13”群发泥石流后的龙溪河流域仍然发育崩塌滑坡66个,物源量约 $1692 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这些为泥石流的发生提供了大量的物源条件。

受降水、地形、地质条件影响,龙溪河流域于2008年5月12日、6月24日、9月25日和2009年7月17日等相继有13条泥石流沟暴发泥石流<sup>[3]</sup>,危害公路 $780 \text{ m}$ ,74栋民房受损,造成经济损失5200万元。2010年8月13日特大群发泥石流中,新增泥石流灾害点31处,危害公路 $4240 \text{ m}$ ,河堤 $3130 \text{ m}$ ,233栋民房受损,造成经济损失5.5亿元(图1、表1)。

## 2 泥石流成因分析

### 2.1 地形因素

龙溪河流域地势北高南低,从北到南地貌呈中高山、中山及低山分布。地形上该流域具有以下特点:1)高差大。从最北端海拔 $3072 \text{ m}$ 的龙池岗山顶到最南端海拔 $770 \text{ m}$ 的紫平铺水库,高差约 $2274 \text{ m}$ <sup>[4]</sup>。高差越大泥石流体运动时势能转换的动能就越大,泥石流运动能力会越大,较易形成泥石流。2)坡降大。整个流域平均坡降 $126\%$ ,以冷浸沟为界,上游坡降 $132\%$ ,下游 $45\%$ 。沟道坡降的大小反映了松散物源由势能转化动能的难易程度,坡降越大,松散物源在降水作用下越容易向下运动形成泥石流。3)流域面积小。除主沟龙溪河流域面积 $96.78 \text{ km}^2$ 外,支沟面积在 $0.05 \sim 8.7 \text{ km}^2$ ,其中小于 $1 \text{ km}^2$ 的泥石流沟占总数的78%。流域面积的大小反映了汇水区域形成泥石流的难易程度,较小面积的汇水区更容易形成泥石流。4)流域山坡坡度大。大多数沟道两侧山坡坡度在 $20 \sim 40^\circ$ 之间。以上地形特征均对泥石流的启动提供有利条件。

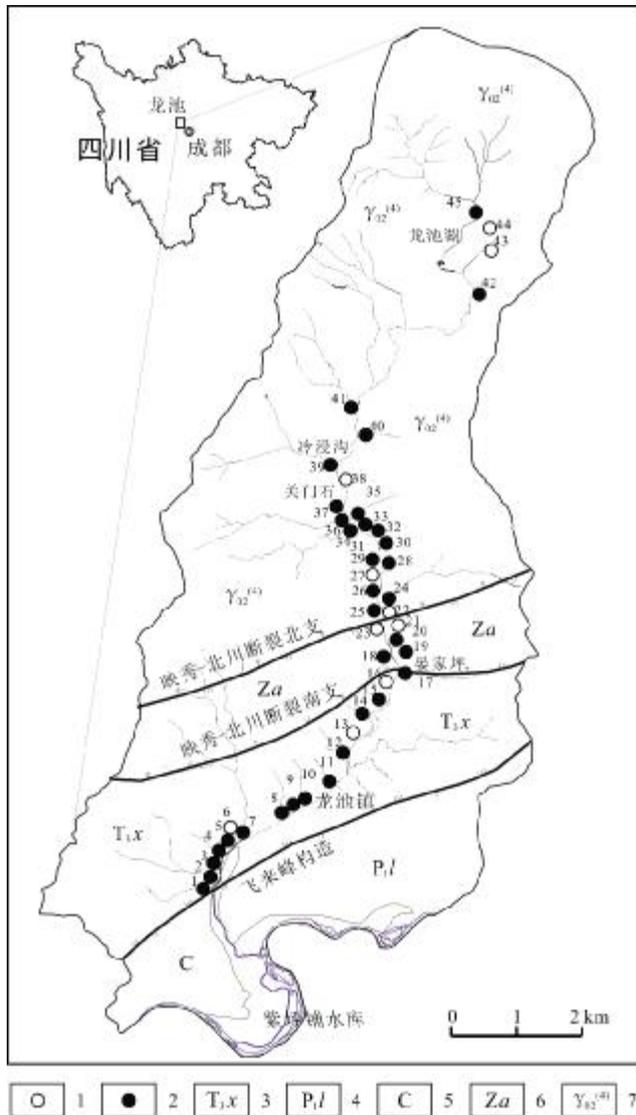


图1 龙溪河流域及泥石流分布图

Fig. 1 Sketch map of Longxi River Basin with distribution of debris flows

1—坡面泥石流(slope debris flow); 2—沟谷泥石流(gully debris flow); 3—三叠系砂岩(Triassic sandstone); 4—二叠系砂岩、灰岩(Permian sandstone and limestone); 5—石炭系灰岩(Carboniferous limestone); 6—震旦纪安山岩(Sinian andesite); 7—澄江-晋宁期花岗岩(Chengjiang-Jinningian granite)

### 2.2 岩性因素

以区域内断裂带为界可将该流域内的岩性从北到南划分为3部分: 1) 北部高山区为澄江-晋宁期花岗岩, 中高山区为震旦纪安山岩, 花岗岩和安山岩均为块状结构, 遍布区域广, 覆盖该流域70%的面积, 地震时这类厚层或块状的硬质岩层以发生崩塌为主, 为泥石流提供了大量的松散物质; 2) 中部和西部低山、低中

山、中山区为三叠系的变质岩、砂岩、泥岩、页岩(或碳质页岩夹煤层)、砾岩等碎屑岩沉积, 岩体为不等厚的层状结构, 以发育泥石流为主; 3) 南部为石炭系和二叠系的灰岩、砂岩和页岩, 基本没有发生泥石流.

该流域距离汶川地震震中直线距离11 km, 地震时破坏了岩土体的稳定性, 极易产生崩塌、滑坡, 为泥石流的发生提供了物源, 在降雨条件下极易形成泥石流.

### 2.3 降雨因素

降雨是龙溪河流域泥石流灾害的主要诱发因素, 在地震后表现尤为明显. 该流域属四川盆地中亚热带湿润季风气候区. 通过对该流域近60年降雨资料统计分析, 年均降雨量在1000 mm以上, 其中70%的降雨量集中在6~8月, 最大小时降雨量在80 mm左右. 因此降雨充沛、集中和雨强大是该流域降雨的最大特点. 2009年7月17日, 该流域突降暴雨, 降雨强度达68 mm/h, 强降雨使流域内泥石流群发; 2010年8月13日降雨超过229 mm/d, 强降雨造成该流域暴发泥石流45处; 2010年8月18日, 245.7 mm/d的降雨再次导致沟内发生泥石流灾害. 可见在该流域地形条件不变, 物源条件也基本不变的前提下, 降雨量是激发泥石流的一个关键条件.

### 3 龙溪河流域泥石流暴发特征

#### 1) 群发性, 规模多元化, 以偏黏性为主

群发性是震后流域泥石流发生的一大特征. 地震震动使山坡上堆积了大量的松散固体物质, 在降雨激发下, 极易形成泥石流. 2008年5月12日, 在55 mm/h的降雨条件下该流域暴发了8条泥石流沟; 2009年的7月17日, 在60~70 mm/h的降雨条件下暴发3条泥石流沟; 2010年8月13日, 在75 mm/h的降雨条件下暴发了45条泥石流沟; 2010年8月18日在65 mm/h的降雨条件下该区域又暴发6条泥石流沟; 2013年7月9日, 在53 mm/h的降雨条件下由于该流域泥石流治理工程的作用, 此次并未暴发泥石流灾害.

通过现场调查泥石流堆积扇上的堆积量, 按照泥石流堆积区堆积物储量多少划分泥石流规模, 可知该流域泥石流暴发规模不一, 以小型为主, 中型次之, 大型最少. 以2010年8月13日该区域暴发的45条泥石流沟为例, 堆积物储量在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以内的共25条,

表1 龙溪河流域泥石流沟参数

Table 1 Parameters of the debris flow gullies in Longxi River Basin

| 编号 | 泥石流沟   | 流域面积/km <sup>2</sup> | 纵比降   | 堆积扇体积/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 距断裂带距离/km | 规模 | 性质  | 类型 | 岩性    | 危害对象     |
|----|--------|----------------------|-------|--------------------------------------|-----------|----|-----|----|-------|----------|
| 1  | 王家沟    | 3.40                 | 0.305 | 0.71                                 | 1~4       | 小型 | 稀性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 道路、水库    |
| 2  | 磨刀沟    | 2.89                 | 0.384 | 0.19                                 | 1~4       | 小型 | 稀性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房       |
| 3  | 三神公沟   | 0.11                 | 0.532 | 0.24                                 | 1~4       | 小型 | 过渡性 | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 道路       |
| 4  | 农家乐沟   | 0.24                 | 0.519 | 0.04                                 | 1~4       | 小型 | 稀性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路    |
| 5  | 燕子窝沟   | 0.08                 | 0.470 | 0.19                                 | 1~4       | 小型 | 过渡性 | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 道路       |
| 6  | 公家沟    | -                    | 0.483 | 0.03                                 | <1        | 小型 | 稀性  | 坡面 | 砂岩、泥岩 | 道路       |
| 7  | 八一沟    | 8.63                 | 0.361 | 31.00                                | <1        | 大型 | 过渡性 | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路、水库 |
| 8  | 煤炭坪    | 0.26                 | 0.425 | 0.27                                 | <1        | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房       |
| 9  | 簸箕沟    | 0.09                 | 0.434 | 3.36                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房       |
| 10 | 曹家岭沟   | 0.14                 | 0.428 | 0.48                                 | <1        | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房       |
| 11 | 栗子坪    | 0.15                 | 0.430 | 0.96                                 | <1        | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 道路       |
| 12 | 麻柳沟    | 1.22                 | 0.420 | 12.00                                | <1        | 大型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路    |
| 13 | 水井槽    | -                    | 0.739 | 0.25                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路    |
| 14 | 黄夹沟    | 0.88                 | 0.521 | 5.30                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路    |
| 15 | 水打沟    | 0.39                 | 0.494 | 3.16                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 砂岩、泥岩 | 民房、道路    |
| 16 | 白果堂    | -                    | 0.414 | 0.36                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 砂岩、泥岩 | 民房、河道    |
| 17 | 水鸠坪沟   | 2.74                 | 0.438 | 9.60                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 安山岩   | 河道       |
| 18 | 麻柳槽沟   | 0.91                 | 0.478 | 0.75                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 沟谷 | 安山岩   | 民房       |
| 19 | 蒋家沟    | 0.39                 | 0.502 | 4.20                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 安山岩   | 民房       |
| 20 | 陈家坡    | 0.05                 | 0.553 | 5.00                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 安山岩   | 民房       |
| 21 | 廖家沟    | -                    | 0.533 | 0.30                                 | <1        | 小型 | 黏性  | 坡面 | 安山岩   | 民房       |
| 22 | 黄柏槽    | -                    | 0.373 | 1.98                                 | <1        | 中型 | 过渡性 | 坡面 | 安山岩   | 农田、电力站   |
| 23 | 沙子坪    | -                    | 0.650 | 0.60                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 安山岩   | 河道       |
| 24 | 碱坪沟    | 3.35                 | 0.395 | 11.60                                | <1        | 大型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 25 | 李泉太沟   | 0.30                 | 0.620 | 1.20                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路       |
| 26 | 木瓜园沟   | 0.58                 | 0.583 | 0.11                                 | <1        | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 27 | 桂花树    | -                    | 0.589 | 0.19                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 花岗岩   | 道路       |
| 28 | 核桃树沟   | 0.26                 | 0.614 | 0.52                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 29 | 马家屋脊   | 0.34                 | 0.421 | 0.39                                 | <1        | 小型 | 稀性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路       |
| 30 | 核桃树 3# | 0.16                 | 0.640 | 3.6                                  | <1        | 中型 | 稀性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路       |
| 31 | 覃家屋脊   | -                    | 0.414 | 0.15                                 | <1        | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 花岗岩   | 道路       |
| 32 | 峰洞岩 1# | 0.26                 | 0.703 | 6.7                                  | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 民房、道路    |
| 33 | 峰洞岩 2# | 0.11                 | 0.623 | 0.5                                  | <1        | 小型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 民房、道路    |
| 34 | 纸厂沟    | 2.12                 | 0.452 | 6.75                                 | <1        | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 35 | 孙家沟    | 2.23                 | 0.468 | 7.00                                 | 1~4       | 中型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 36 | 双养子沟   | 1.94                 | 0.408 | 12.4                                 | 1~4       | 大型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 37 | 椿芽树沟   | 0.66                 | 0.560 | 12.5                                 | 1~4       | 大型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 38 | 陡洪口    | -                    | 0.441 | 0.4                                  | 1~4       | 小型 | 黏性  | 坡面 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 39 | 冷浸沟    | 2.50                 | 0.453 | 4.8                                  | 1~4       | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 道路、河道    |
| 40 | 漆树坪沟   | 0.61                 | 0.449 | 1.6                                  | 1~4       | 中型 | 过渡性 | 沟谷 | 花岗岩   | 河道       |
| 41 | 猪槽沟    | 2.57                 | 0.482 | 2.2                                  | 4~8       | 中型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 河道       |
| 42 | 斑鸠岗 1# | 0.17                 | 0.584 | 0.38                                 | 4~8       | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 河道       |
| 43 | 斑鸠岗 2# | -                    | 0.428 | 0.40                                 | 4~8       | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 花岗岩   | 道路       |
| 44 | 斑鸠岗沟   | -                    | 0.560 | 0.40                                 | 4~8       | 小型 | 过渡性 | 坡面 | 花岗岩   | 道路       |
| 45 | 长河坝沟   | 2.01                 | 0.427 | 0.18                                 | 4~8       | 小型 | 黏性  | 沟谷 | 花岗岩   | 河道       |

占 55.6%；堆积物在  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  以内的共 40 条，占 90%；堆积物量在  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  以上的大型泥石流仅占 10%左右。

按照堆积区的沉积状态可以间接判断泥石流的性质，若堆积物有一定分选性，砾石为主的多为稀性；相反若堆积物无分选性，有泥包石且混杂堆积现象的多为过渡性—黏性。就容重而言，通过对该流域 8 条泥石流取样测量，容重值大多在  $18.5 \sim 22.5 \text{ kN/m}^3$  之间。按照容重划分泥石流性质，该流域泥石流基本属于过渡性—黏性（过渡性  $18.0 \text{ kN/m}^3$  以上）。

#### 2) 小流域沟道集中暴发

汶川地震前，该流域只有 5 条泥石流沟，其中八一沟流域面积  $8.63 \text{ km}^2$ ，碱坪沟流域面积  $3.35 \text{ km}^2$ ，均属于流域面积大于  $3.0 \text{ km}^2$  的泥石流沟。而汶川地震后共计暴发的 45 条泥石流沟中除了王家沟流域面积  $3.4 \text{ km}^2$  以外，其余暴发的泥石流沟流域面积均小于  $3.0 \text{ km}^2$ 。这类流域面积较小的泥石流沟在“5·12”地震前或“8·13”前从未暴发过泥石流，而且暴发之前沟道内植被丰富，无崩滑体堆积物，因此在地质灾害调查工作中难以发现。这些流域面积小并且沟道长度比较短的沟道，在暴发泥石流时有着很强的搬运能力，一次泥石流搬运固体松散物质的总量可达上万立方米，具有流域面积小、难以发现、隐蔽性强、危害性大的特征<sup>[4]</sup>。

#### 3) 构造带是泥石流集中暴发区

区域内有 3 条构造带通过：映秀—虹口断裂、灌县断裂和飞来峰构造带，其中映秀—虹口断裂是“5·12”地震发震断裂。受断裂带影响，流域内岩层破碎，通过现场调查和遥感分析，在映秀—虹口断裂带两侧  $3 \text{ km}$  范围内存在地质灾害点 104 处<sup>[5]</sup>，物源量约  $1692 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，为泥石流提供了大量物源。以 2010 年 8 月 13 日该区域暴发的 45 条泥石流沟为例，在断裂带两侧  $3 \text{ km}$  范围内暴发泥石流 41 条，占全流域泥石流的 91.1%，可见地质构造破碎带在一定程度上也是泥石流集中暴发带。

#### 4) 破坏性强

龙溪河流域在汶川地震后 5 年内共计发生 6 次泥石流灾害，相继暴发 45 条泥石流沟，共掩埋公路  $7800 \text{ m}$ ，冲毁或掩埋民房和板房 233 间，危害 74 户 458 人。龙溪河河道及两侧泥石流冲出量共  $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，掩埋龙溪河河道，使河床高程抬高约  $5 \text{ m}$ ，对龙溪流域内原有旅游建筑的灾后恢复与重建更是雪上加

霜，对流域内公路、市政管线、河道及农田造成了严重破坏，造成经济损失约 5.5 亿元。

淤积和冲击是泥石流最基本的两种破坏方式。以冷浸沟为界，河道上半段坡度较陡且河道狭窄，以冲刷为主；而河道下游坡度较缓且河道宽阔，以淤积为主。经过调查，龙溪河河道及两侧泥石流沟冲出量固体物质量约  $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，掩埋龙溪河河道，使河床高程抬高约  $5 \text{ m}$ ，造成多处房屋、道路和河道被埋。

#### 5) 灾害链效应明显

龙溪河流域群发性泥石流产生了严重的次生灾害及明显的灾害链效应。降雨诱发泥石流灾害，泥石流堵塞河道、抬高河床，产生淤埋危害，后续的洪水冲出河道，产生洪涝灾害。淤埋和洪涝灾害对河道内以及其他较低位置的各类建筑物、交通基础设施和农田庄稼等造成严重损毁甚至完全报废。灾害链如图 2 所示。

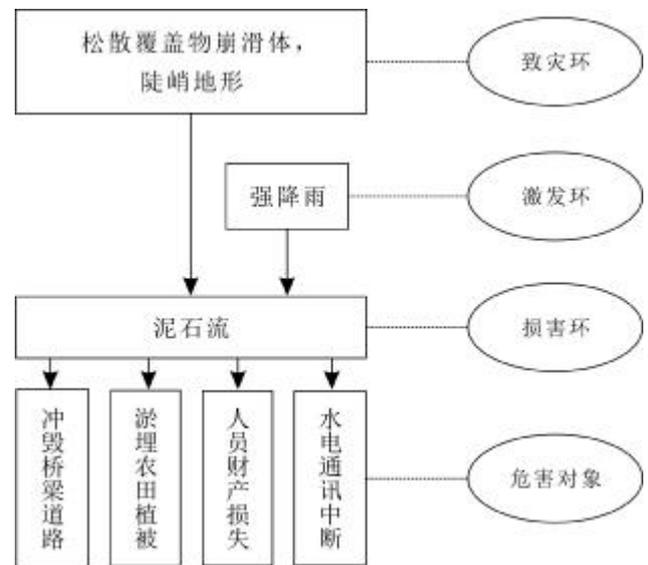


图 2 龙溪河流域泥石流灾害链作用

Fig. 2 Disaster chains of the debris flows in Longxi River Basin

#### 4 龙溪河流域泥石流危险性评估

地质灾害危险性是地质灾害发育密度、活动规模、活动频次的综合性反映<sup>[6]</sup>。对龙溪河流域泥石流沟进行危险性评价，可为该流域泥石流工程防治提供设计依据，为灾后建筑恢复选址提供依据。本文采用刘希林提出的 MFCAM 模型对单沟泥石流危险度进行评价<sup>[7-9]</sup>。该方法选取规模  $M$ 、发生频率  $F$ 、流域面积  $S_1$ 、主沟长度  $S_2$ 、相对高差  $S_3$ 、切割密度  $S_6$  及不稳定沟床

表2 龙溪河流域沟谷泥石流危险性评价结果

Table 2 Hazard assessment results of the gully debris flows in Longxi River Basin

| 编号 | 沟名     | $M/10^3 \text{ m}^3$ | F/%   | $S_1/\text{km}^2$ | $S_2/\text{km}$ | $S_3/\text{km}$ | $S_4/\text{km}$ | $S_5/\%$ | 危险度   | 危险性 |
|----|--------|----------------------|-------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------|-----|
| 1  | 王家沟    | 0.284                | 0.349 | 0.377             | 0.358           | 0.527           | 0.128           | 0.508    | 0.345 | 低   |
| 2  | 磨刀沟    | 0.093                | 0.349 | 0.356             | 0.412           | 0.687           | 0.202           | 0.640    | 0.317 | 低   |
| 3  | 三神公沟   | 0.127                | 0.349 | 0.114             | 0.156           | 0.167           | 0.200           | 0.887    | 0.253 | 低   |
| 4  | 农家乐沟   | 0                    | 0.349 | 0.149             | 0.235           | 0.240           | 0.182           | 0.865    | 0.229 | 低   |
| 5  | 燕子窝沟   | 0.093                | 0.349 | 0.102             | 0.138           | 0.153           | 0.098           | 0.783    | 0.211 | 低   |
| 7  | 八一沟    | 0.850                | 0.349 | 0.522             | 0.631           | 1.000           | 0.292           | 0.601    | 0.606 | 大   |
| 8  | 煤炭坪    | 0.143                | 0.349 | 0.153             | 0.231           | 0.287           | 0.210           | 0.708    | 0.267 | 低   |
| 9  | 簸箕沟    | 0.509                | 0.349 | 0.105             | 0.223           | 0.230           | 0.103           | 0.723    | 0.352 | 低   |
| 10 | 曹家岭沟   | 0.227                | 0.349 | 0.124             | 0.228           | 0.300           | 0.008           | 0.713    | 0.473 | 中   |
| 11 | 栗子坪    | 0.327                | 0.349 | 0.126             | 0.218           | 0.300           | 0.100           | 0.716    | 0.305 | 低   |
| 12 | 麻柳沟    | 0.693                | 0.349 | 0.263             | 0.310           | 0.573           | 0.274           | 0.700    | 0.473 | 中   |
| 14 | 黄央沟    | 0.575                | 0.349 | 0.236             | 0.311           | 0.600           | 0.148           | 0.868    | 0.376 | 低   |
| 15 | 水打沟    | 0.499                | 0.349 | 0.177             | 0.288           | 0.359           | 0.080           | 0.823    | 0.376 | 低   |
| 17 | 水鸠坪沟   | 0.661                | 0.349 | 0.349             | 0.393           | 0.680           | 0.257           | 0.730    | 0.490 | 中   |
| 18 | 麻柳槽沟   | 0.292                | 0.349 | 0.238             | 0.310           | 0.614           | 0.289           | 0.797    | 0.364 | 低   |
| 19 | 蒋家沟    | 0.541                | 0.349 | 0.177             | 0.310           | 0.455           | 0.269           | 0.836    | 0.418 | 中   |
| 20 | 陈家坡    | 0.566                | 0.349 | 0.086             | 0.143           | 0.556           | 0.184           | 0.921    | 0.400 | 中   |
| 24 | 碱坪沟泥   | 0.688                | 0.349 | 0.375             | 0.399           | 0.667           | 0.267           | 0.658    | 0.498 | 中   |
| 25 | 李泉太沟   | 0.359                | 0.349 | 0.161             | 0.214           | 0.434           | 0.121           | 1.000    | 0.346 | 低   |
| 26 | 木瓜园沟   | 0.013                | 0.349 | 0.203             | 0.273           | 0.554           | 0.083           | 0.971    | 0.259 | 低   |
| 28 | 核桃树沟   | 0.238                | 0.349 | 0.153             | 0.191           | 0.233           | 0.189           | 1.000    | 0.304 | 低   |
| 29 | 马家屋脊   | 0.197                | 0.349 | 0.168             | 0.223           | 0.300           | 0.078           | 0.702    | 0.271 | 低   |
| 30 | 核桃树 3# | 0.519                | 0.349 | 0.129             | 0.148           | 0.160           | 0.210           | 1.000    | 0.376 | 低   |
| 32 | 峰洞岩 1# | 0.608                | 0.349 | 0.153             | 0.303           | 0.583           | 0.236           | 1.000    | 0.448 | 中   |
| 33 | 峰洞岩 2# | 0.233                | 0.349 | 0.113             | 0.157           | 0.207           | 0.230           | 1.000    | 0.296 | 低   |
| 34 | 纸厂沟    | 0.609                | 0.349 | 0.319             | 0.413           | 0.824           | 0.311           | 0.753    | 0.488 | 中   |
| 35 | 孙家沟    | 0.615                | 0.349 | 0.325             | 0.375           | 0.720           | 0.243           | 0.780    | 0.475 | 中   |
| 36 | 双养子沟   | 0.697                | 0.349 | 0.309             | 0.421           | 0.760           | 0.308           | 0.680    | 0.505 | 中   |
| 37 | 椿芽树沟   | 0.699                | 0.349 | 0.212             | 0.282           | 0.573           | 0.100           | 0.933    | 0.460 | 中   |
| 39 | 冷浸沟    | 0.560                | 0.349 | 0.339             | 0.345           | 0.500           | 0.307           | 0.755    | 0.451 | 中   |
| 40 | 漆树坪沟   | 0.401                | 0.349 | 0.207             | 0.249           | 0.380           | 0.219           | 0.748    | 0.361 | 低   |
| 41 | 猪槽沟    | 0.447                | 0.349 | 0.342             | 0.292           | 0.373           | 0.213           | 0.803    | 0.400 | 中   |
| 42 | 斑鸠岗 1# | 0.193                | 0.349 | 0.132             | 0.217           | 0.260           | 0.124           | 0.973    | 0.283 | 低   |
| 45 | 长河坝沟   | 0.085                | 0.349 | 0.313             | 0.443           | 0.340           | 0.075           | 0.711    | 0.281 | 低   |

比例  $S_9$  共计 7 个评价因子的转换值进行危险度评价. 计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$H=0.29M+0.29F+0.41S_1+0.09S_2+0.06S_3+0.11S_6+0.03S_9 \quad (1)$$

按公式(1)对龙溪河 45 条泥石流沟进行单沟危险性评价, 结果如表 2. 表 2 显示有 1 条沟危险性大, 14 条危险性中等, 30 条危险性小. 这与刘清华<sup>[10]</sup>采用堆积扇淤积厚度代替泥石流规模评价泥石流危险性结果基本一致.

## 5 结论

通过对龙溪河流域泥石流沟的成因分析、灾害特征分析和危险性评价之后得出以下结论.

1) 该流域泥石流的发生受地形、岩性、降雨的三者耦合作用, 其中降雨充沛、集中和雨量大的特征是泥石流的激发条件; 岩性的破碎性为泥石流提供了大量的物源; 高差大、坡降陡、坡度大的地形特征为泥石流的启动提供有利条件.

2) 该流域泥石流灾害具有群发性、小流域爆发性. 地震后共计发生 6 次泥石流事件, 每次都是多条泥石流沟同时发生, 具有群发性; 地震后暴发的多条沟道均为震前没有暴发过的沟道且流域面积均小于  $3 \text{ km}^2$ , 具有小流域爆发性.

3) 该流域泥石流沟的分布与构造带有一定相关性. 在断裂带两侧  $3 \text{ km}$  范围内暴发泥石流沟 41 条, 占全流域泥石流的 91.1%.

4) 该流域泥石流危害性大且有灾害链作用. 多次

泥石流共掩埋公路 7800 m, 冲毁或掩埋民房和板房 233 间, 危害 74 户 458 人. 每次泥石流堵塞河道, 阻断公路, 冲毁和掩埋建筑物、交通基础设施和农田庄稼等造成一系列链状效应.

5) 采用刘希林单沟泥石流评价方法对该流域的 45 条泥石流进行危险性评价, 结果显示危险性大的有 1 条沟, 危险性中等的有 14 条, 危险性小的有 30 条.

## 参考文献:

- [1] 马煜, 余斌, 李彩侠, 等. 汶川强震区群发性泥石流特征研究——以四川省都江堰龙池“8·13”群发泥石流为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 218-223.
- [2] 余斌, 马煜, 张健楠, 等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 738-747.
- [3] 张自光, 张志明, 张顺斌. 都江堰市八一沟泥石流形成条件与动力学特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 34-38.
- [4] 程思. 都江堰市龙池地区震后多沟同发泥石流危险性及其易损性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [5] 游勇, 柳金峰, 陈兴长. “5·12”汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 358-366.
- [6] 张春山, 张业成. 中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 27-32.
- [7] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 35-61.
- [8] 刘希林. 沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 241-245.
- [9] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 13-32.
- [10] 刘清华, 余斌, 唐川, 等. 四川省都江堰市龙池地区泥石流危险性评价研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 670-677.