

梁玉飞, 裴向军, 崔圣华, 等. 汶川地震诱发黄洞子沟地质灾害链效应及断链措施研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 201 - 209. [LIANG Yufei, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Study on Geological Disaster Chain Effect of Huangdongzi Gully Induced by Wenchuan Earthquake and Breaking Measures [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 201 - 209. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.038.]

## 汶川地震诱发黄洞子沟地质灾害链效应及断链措施研究<sup>\*</sup>

梁玉飞, 裴向军, 崔圣华, 朱 凌, 高会会, 董 源

(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, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 黄洞子沟地区是汶川地震触发震害最为严重, 灾害链效应最为明显的地区。通过详细的实地调查、借助遥感影像、雨量数据分析, 揭示了震后地质灾害发育情况及特征, 并归纳出了地震-滑坡-堰塞湖; 地震-震裂山体-崩塌-碎屑流-泥石流; 地震-崩塌-滑坡-泥石流三种典型的地质灾害链模式。将灾害链成链动力过程划分为: 孕灾环、激发环、演化环和损害环, 孕灾环是前提, 激发环是启动因素, 演化环是过程, 损害环是结果。黄洞子沟灾害链是由内外动力作用联合形成的复合型灾害链, 仍处于不断演化的过程当中, 并从地形条件、地质条件、气象水文条件三个方面对灾害链的成链条件进行了分析, 最后针对黄洞子沟灾害链的现状 & 威胁对象, 建议从损害环采取主要断链措施。

**关键词:** 黄洞子沟; 汶川地震; 地质灾害; 灾害链; 断链措施

**中图分类号:** X43; P642.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0201-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.038

2008年5月12日, 四川汶川8.0级大地震, 激发了大量的崩塌、滑坡、堰塞湖等次生山地灾害, 经过一段时间的演化, 形成泥石流等链式灾害。地震诱发次生山地灾害呈现出广泛性、群发性、持续性及灾害链效应<sup>[1]</sup>。

大量的学者对地震诱发次生山地灾害开展深入研究。黄润秋等<sup>[2-3]</sup>通过GIS平台对灾害点的分布高程和密度进行了统计, 并提出单薄山脊的地震波具有显著放大效应, 以及明显的“上下盘效应”, 即逆断层上盘较下盘地质灾害分布密度高、范围广、规模大。崔圣华以牛眠沟滑坡为例, 探讨了地震滑坡的启动机理<sup>[4]</sup>。许强分析了震后泥石流的特点以及成因<sup>[5]</sup>。对单个灾害类型的研究取得了许多显著成果, 但以灾害链的角度对地震诱发次生山地灾害进行分析有待深入。

郭增建于1987年首先提出“灾害链就是一系列灾害相继发生的现象”<sup>[6]</sup>。史培军、肖盛燮、文传甲等学者<sup>[7-9]</sup>从不同的角度给出了灾害链的定义。综合说来, 灾害链是指原生灾害及其引起的

一种或多种次生灾害所形成的灾害系列。原生灾害是指由动力活动或环境异常变化直接形成的自然灾害; 次生灾害是由原生灾害引起的“连带性”或“延续性”灾害<sup>[10]</sup>。常见的灾害链类型包括台风灾害链、寒潮灾害链、干旱灾害链和地震灾害链等。地震灾害链是由地震诱发的一系列次生灾害, 对其研究主要集中在地震引发的地质灾害链<sup>[11]</sup>。韩金良对地质灾害链的基本类型进行了划分<sup>[12]</sup>; 李明提出了典型地质灾害的链式过程<sup>[13]</sup>; 彭建兵提出黄土地质灾害链的同源链生转化机制<sup>[14]</sup>; 冯玉涛研究了4种常见崩滑流灾害链的成灾条件和机理<sup>[15]</sup>; 徐梦珍以火石沟为例, 对汶川地震引发的地质和生态次生灾害链进行了分析<sup>[16]</sup>。

本文以黄洞子沟为例, 从灾害链的角度对汶川地震诱发的次生山地灾害进行分析。受映秀-北川断裂的影响, 研究区地震活动性较强, 历史上龙门山发生有记载的8.0级以上地震2次, 7.0~7.9级地震4次, 6.0~6.9级地震11次。汶川地震之前, 该区并无大的崩塌、滑坡和泥石流发

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-10-17    修回日期: 2018-01-01

基金项目: 国家创新研究群体科学基金(41521002); 国家自然科学基金资助项目(41572302)

第一作者简介: 梁玉飞(1993-), 男, 汉族, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事地质灾害机理方面的研究。

E-mail: 283763053@qq.com

通讯作者: 裴向军(1970-), 男, 教授, 内蒙古赤峰人, 博士生导师, 主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价及工程治理方面的教学和研究工作。E-mail: peixj0119@tom.com

生,汶川地震时该区地震烈度为X,黄洞子沟沟内山川巨变,巨大的滑坡体将深达百米的黄洞子沟几乎填平,滑坡摧毁了当地的一座磷矿、一个水电站和一个伐木场,造成38人遇难<sup>[17]</sup>。地震引起地面开裂及地表抬升,泉水村主街道、泉水河等多处可见宽10~50 cm的裂缝,延伸方向N35°E~N45°E,地表最高抬升4.5 m,造成多处房屋受损、桥梁开裂、垮塌。汶川地震改变了研究区的山地环境,在震后的9年内,仍然灾害频发。本文基于黄洞子沟震后的灾害发育情况,分析其灾害链效应,旨在为削减地震次生灾害提供参考。

## 1 研究区震后地质灾害概况

黄洞子沟位于四川省安县高川乡泉水村西北侧,沟口地理坐标为31°37′22″N,104°09′20″E,是涪江一级支流雕水河的上游段(图1),为常年性流水,在下游与三叉沟汇合后称泉水河。

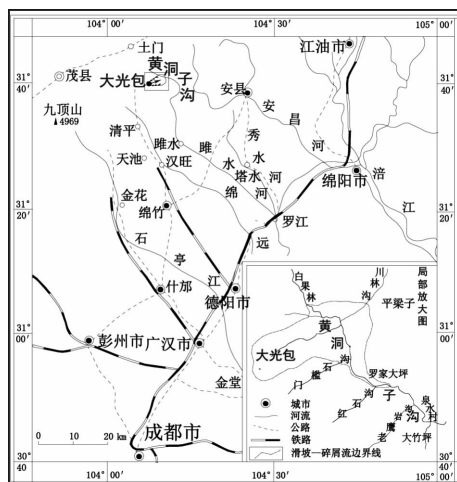


图1 研究区交通位置(据文献<sup>[18]</sup>,有改动)

### 1.1 滑坡和崩塌

黄洞子沟地势陡峻,构造侵蚀作用强烈,斜坡岩体强风化、强卸荷,物理力学性质较差,在强地震力作用下引发大量的崩滑灾害,发育3个千万方以上的大型滑坡,崩滑体阻塞黄洞子沟沟道,形成3个规模较大的堰塞湖(图2)。

大光包滑坡呈掌型,平面投影面积7.12 km<sup>2</sup>,最大长度4.6 km,最大宽度3.2 km,滑坡体厚度达521 m,体积11.59×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,滑动方位N63°E,运动距离0.9~4.5 km,为汶川地震触发的规模最大的滑坡<sup>[19]</sup>(图3)。

红石沟滑坡平面投影面积约0.6 km<sup>2</sup>,运动距离约2 km,宽0.2 km,平均厚度约60 m,堆积方量达到2.4×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,滑动方位N40°E,堆积体将红石沟原本的“V”型窄沟变成了现在的“U”型宽

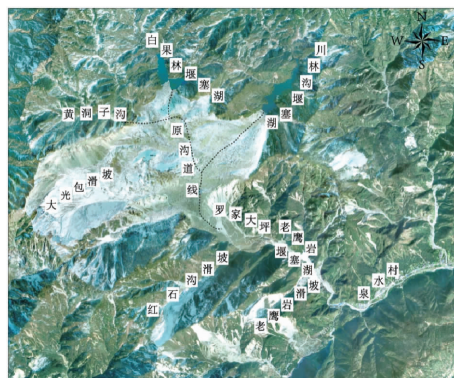


图2 黄洞子沟次生灾害卫星影像(据四川省测绘地理信息局2013年1月0.5m分辨率)

谷,沟道宽约150~200 m(图4)。

老鹰岩滑坡平面投影面积0.35 km<sup>2</sup>,滑源区长约450 m,最大展宽430 m,滑距约1 km,最大厚度约100 m,体积约1.5×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,滑动方向N50°E<sup>[20]</sup>(图5)。

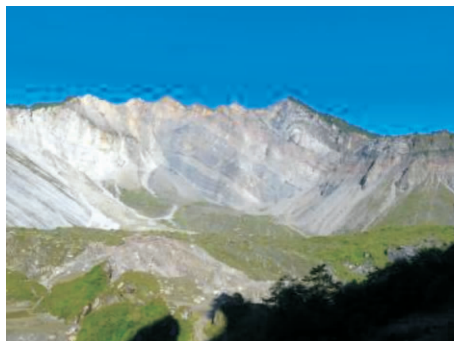


图3 大光包滑坡



图4 红石沟滑坡

### 1.2 泥石流

研究区在汶川地震之前未有发生过泥石流的记载。2008年5月地震之后至2013年的5年内,黄洞子沟于“2008.9.24”、“2009.7.17”、“2010.8.13”、“2011.7.21”、“2012.8.17”和“2013.7.9”多次爆发泥石流,均为暴雨沟谷型泥石流,集中爆发于每年7~9月份的多雨期。黄洞子沟地区泥石流原始激发雨强为105 mm<sup>[21]</sup>,



图5 老鹰岩滑坡

根据收集的降雨资料(图6),可以看出,震后泥石流激发雨强降至36~46.6 mm,下降了约60%,前期累积降雨量和总降雨量呈逐年增加的趋势。

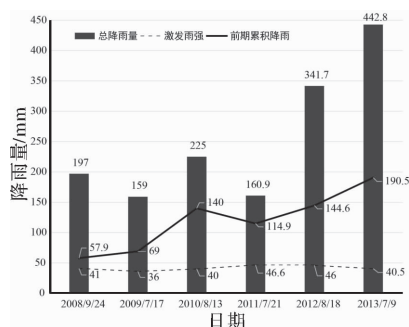


图6 历年泥石流激发雨量

## 2 灾害链模式和动力过程分析

黄洞子沟典型的地质灾害链分为以下三种:地震-滑坡-堰塞湖;地震-震裂山体-崩塌-碎屑流-泥石流;地震-崩塌、滑坡-泥石流。

### 2.1 地震-滑坡-堰塞湖

此类灾害链为地震山地灾害链最为常见的一种,受地震作用,往往于几十秒至几分钟内迅速完成,具体过程为地震-滑坡启动-运动-堆积-阻塞河道-堰塞湖。

地震时,大光包巨型滑坡以极快的速度溃滑下来,进入黄洞子沟,受对面山体的阻挡,惯性前冲,反翘堆积,超覆对岸山梁20 m左右,运移距离达4.5 km。滑体多数区域未解体,巨型滑体将黄洞子沟上游几乎填平,且向两侧漫流约3.2 km,阻塞沟道形成川林沟堰塞湖(图7)和白果林堰塞湖(图8)。

老鹰岩滑体从海拔1920 m高处急剧下滑,沿姜巴沟向沟底运动,在高速碎屑流的强大铲削作用下,引起姜巴沟两侧山体垮塌,汇入主滑体碎屑流向沟底高速滑动,受到黄洞子沟对岸阻挡后,折返停积,形

成老鹰岩堰塞湖(图9)。老鹰岩堰塞湖由两个堰塞体组成,上游堰塞体规模巨大,顺沟长约1~2 km,堵塞了整个沟床,下游堰塞体呈上宽下窄梯形,顶宽约240 m,底宽约60 m,两者相距约700 m。



图7 川林沟堰塞湖



图8 白果林堰塞湖



图9 老鹰岩堰塞湖

川林沟堰塞湖和白果林堰塞湖堰塞坝高达500 m,湖内补充地下潜水和大气降水等,通过潜流渗出,常年汇水量与渗流量基本保持平衡,水流梯度较小,冲刷能力弱,稳定性较好,现状下无溃坝的可能性。老鹰岩堰塞湖坝体结构以碎块石为主,呈碎块状~块体状,结构松散,属高危堰塞湖,已于2010、2011年进行疏导,未进一步形成地震-滑坡-堰塞湖-洪水(泥石流)灾害链。

### 2.2 地震-震裂山体-崩塌-碎屑流-泥石流

此类灾害链的发生具有隐蔽性和突发性,多



发生于高位岩体损伤部位，爆发时间难以预知，发生数量有逐年增加的趋势。

地震引起强烈的地震动造成岩体损伤，显著降低了岩体质量，部分未失稳岩体在重力、风化、降雨、地下水等多种因素作用下，极易产生震后崩塌灾害。在黄洞子沟沟内可见多处震后小型崩塌。作者在大光包基地期间，多次听到此类崩塌的发生，在降雨条件下更为频繁，崩塌产生的碎屑流在雨水作用下引发局部泥石流，冲毁道路，堆积于沟道内。

2.3 地震－崩塌、滑坡－泥石流

此类灾害链为地震山地灾害链演化最为彻底的一种类型，崩塌、滑坡产生的碎屑物质经过一段时间的物源积累，在降雨的作用下，形成泥石流。选取“2013.7.9”黄洞子沟爆发的大规模泥石流，分析其演化过程。

2013年7月8日9时起，高川乡遭遇特大暴雨，9日0时达到70 mm/h，泉水村安置点洪水上涨至公路面以上，凌晨1时左右，黄洞子沟泥石流启动，至3时结束，历时约2 h。通过现场调查，此次泥石流启动物源点有14个，主要集中于各支沟和滑坡、堰塞湖堆积区(图10，详见表1)。黄洞子沟上游段至老鹰岩滑坡区汇集物源量65.6万m<sup>3</sup>，堆积厚度2~15 m，大光包滑坡碎屑流局部形

成坡面流和拉槽下切(图11)；红石沟中下游冲出深30~50 m，宽约20 m的沟槽(图12)。老鹰岩滑坡堆积体结构松散，多呈碎块状~块体状，水流冲刷形成拉槽和局部滑塌(图13)。老鹰岩滑坡区至三叉沟沟口固体物质约15.3万m<sup>3</sup>，堆积厚度约3~8 m，另有少部分物质约9.8万m<sup>3</sup>与三叉沟泥石流冲出的5万m<sup>3</sup>物质汇合，冲入泉水村安置区外侧河道，致使河道淤积厚度达0.5~3 m，部分泥石流冲入安置区，使房屋和道路损毁严重(图14)。

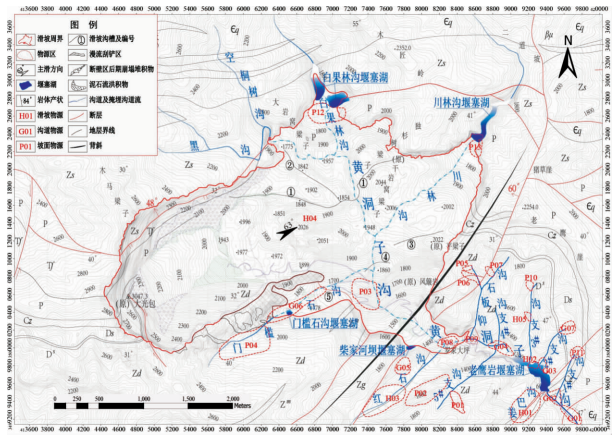


图10 黄洞子沟主要沟道及7.9泥石流源区  
(据文献<sup>[18]</sup>，有较大改动)



图11 H04 大光包滑坡拉槽



图12 G05 红石沟沟槽



图13 H01 老鹰岩滑坡沟槽



图14 泥石流冲入安置区

表 1 黄洞子沟“2013. 7. 9”参与泥石流活动的物源情况统计表

序号	编号	与沟道关系	启动量/ 万 m <sup>3</sup>	参与方式	可能启动参与泥石流活动方式	启动条件
1	H01	沟道下游 沟道两侧	21. 35	坡面冲刷、拉槽 下切、扩边侧蚀	斜坡堆积部分受面蚀、股蚀，前缘受拉槽 下切；沟道堆积部分受泥石流冲蚀下切	降雨冲刷及沟道 侧蚀
2	H02	沟道右侧坡脚	0. 00	未启动	面蚀、股蚀，前缘受拉槽下切、滑踏入沟	堆积体前缘被泥石 流或洪水侧蚀
3	H03	沟域中下游左 侧支沟红石沟内	22. 60	泥石流冲刷、 拉槽下切	斜坡堆积部分受面蚀、股蚀，前缘受拉槽 下切；沟道堆积部分受泥石流冲蚀下切	堆积区被泥石流 或洪水侵蚀
4	H04	沟域中游 主沟道内	40. 25	侧面拉槽、 下切扩边垮塌	面蚀，拉槽下切参与泥石流活动	滑坡碎屑流区被泥 石流或洪水侧蚀
5	H05	小沟上游左侧， 紧临沟道	0. 50	沟道冲刷、下切	面蚀、股蚀，前缘受拉槽下切、滑踏入沟	降雨冲刷及沟道 侧蚀
6	G01	下游沟道内	0. 00	未启动	泥石流(洪流)冲蚀下切、裹挟携带	上游泥石流或洪水 侵蚀
7	G02	下游沟道 内及左侧	0. 00	未启动	泥石流(洪流)冲蚀下切、裹挟携带	上游泥石流或洪水 侵蚀
8	G03	下游沟道内	0. 00	未启动	泥石流(洪流)冲蚀下切、裹挟携带	上游泥石流或洪水 侵蚀
9	G04	下游沟道内	0. 00	未启动	泥石流(洪流)冲蚀下切、裹挟携带	上游泥石流或洪水 侵蚀
10	G05	红石沟支沟左侧	0. 00	未启动	洪流冲蚀下切、裹挟携带	汇水少，水流冲刷
11	G06	门槛石支沟内	0. 80	冲刷、侧蚀	泥石流(洪流)冲蚀下切、裹挟携带	汇水少，水流冲刷
12	G07	2#支沟内	0. 60	冲刷下切	洪流冲蚀下切、裹挟携带	水流冲刷
13	P01	5#支沟 上游右侧	0. 40	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
14	P02	红石沟上 游右侧	0. 80	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
15	P03	门槛石沟 下游右侧	0. 00	未启动	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
16	P04	门槛石沟 上游右侧	0. 00	未启动	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
17	P05	仰板沟 上游右侧	0. 50	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
18	P06	仰板沟 上游右侧	1. 30	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
19	P07	仰板沟 上游右侧	0. 20	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
20	P08	仰板沟 上游右侧	0. 40	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
21	P09	仰板沟 上游右侧	0. 50	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
22	P10	3#支沟上游	0. 50	坡面冲刷	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
23	P11	1#支沟上游	0. 00	未启动	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
24	P12	白果林堰 塞湖左侧	0. 00	未启动	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷
25	P13	木桥沟堰 塞湖右侧	0. 00	未启动	面蚀、股蚀、小规模崩滑入沟	降雨冲刷

表 2 典型灾害链实例

孕灾环	激发环		演化环	损害环	实例
城市环境	内动力作用	火山喷发		火山灰掩埋	公元 79 年维苏威火山喷发掩埋庞贝古城
	外动力作用	台风	台风引发特大暴雨	洪灾	1975 年台风莲娜引发暴雨洪灾
	人类工程活动	过度采矿	形成地下采空区	地裂缝	山西煤矿采空区地裂缝、地面塌陷
海洋环境	复合型作用	地震、燃气	房屋倒塌天然气泄露	火灾	1923 年日本关东大地震引发火灾
	内动力作用	地震	地震引发破坏性海浪	海啸	2004 年印度洋地震引发海啸
	复合型作用	温室效应	极地冰川消融	海平面上升	图瓦卢国土面积逐渐缩小
山地环境	内动力作用	地震	重力变形	滑坡	2017 年茂县新磨村滑坡
	外动力作用	暴雨		泥石流	2010 年栾川暴雨引发泥石流
	人类工程活动	修建大坝	滑移-弯曲变形 <sup>[22]</sup>	滑坡	1963 年意大利瓦伊昂水库滑坡
		地震、暴雨	物源积累, 降雨激发	泥石流	2013 年 7 月 8 日黄洞子沟泥石流
	复合型作用	构造活动、冻融温室效应	风化、冻融、重力作用 冰雪消融	溜沙坡 冰崩滑坡	天山公路北侧溜沙坡 2000 年 4 月西藏易贡滑坡
沙漠环境	外动力作用	强风	风对沙尘的搬运作用	沙尘暴	1998 年 4 月西北沙尘暴

2.4 成链动力过程分析

由于灾害类型繁多，成灾过程复杂，对灾害链形成过程尚无统一的划分标准。李明将一个完整的链式过程分为致灾环、激发环、损害环和断链环<sup>[13]</sup>。作者在此基础上增加了演化环，将灾害链的成链过程分为：孕灾环、激发环、演化环和损害环，孕灾环是前提，激发环是启动因素，演化环是过程，损害环是结果，并将断链环作为断链措施单独提出。

孕灾环包括当地所处的环境条件，如城市环境、海洋环境、沙漠环境、山地环境等。激发环即灾害链的激发因素，分为内动力作用、外动力作用、人类工程活动和复合型激发作用<sup>[12]</sup>，内动力作用是指地球内部能量引起的作用，包括构造运动、岩浆作用等；外动力作用是指由地球以外的能源引起(太阳辐射能、日月引力能)，在重力的参与下，通过大气、水、生物因素等作用于地壳表层的作用，包括风的作用、水的作用等。人类工程活动包括采矿、边坡开挖、地下水开采等，为灾害的发生创造了人为条件。由两种或两种以上因素联合作用诱发的灾害链称为复合型灾害链。各个环节没有绝对的先后顺序，激发环起作用后，可能立即造成损害环，也可能经历风化剥蚀、重力变形等演化过程后形成损害环，损坏环即对人类的命财产造成损害的环节。

一般灾害链的成链过程如图 15 所示，表 2 列举了部分典型灾害链实例。

对于地震引发的山地灾害链，我们主要关注以地形地貌、地质构造等基本要素组成的地质环境。黄洞子沟处于典型的山地环境在地震前为一

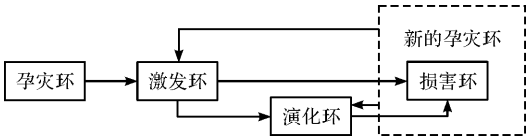


图 15 一般灾害链成链过程

条深切切割的“V”字型峡谷，地势险峻，纵坡降大，支沟多，地层岩性复杂，构造活动发育，雨量充沛，具备良好的孕灾环境。在地震作用下，孕灾环境被激发，产生了数处崩塌和三个规模巨大的滑坡，巨大的滑体冲入黄洞子沟，将 V 型谷变为 U 型谷，阻塞黄洞子沟形成了三个规模较大的堰塞湖。崩塌滑坡产生了大量的物源，形成新的孕灾环境，在降雨和风化作用下，滑坡滑面、堆积区等处产生强烈的拉槽下切，当暴雨来临时，这些物源汇集启动，形成泥石流，泥石流继续改变沟道环境，拉槽下切更加严重，碎屑物质在黄洞子沟中游(大光包滑坡前缘至老鹰岩堰塞体沟段)淤积严重，下游堆积强烈。物源不断积累，当降雨达到一定强度，不断积累的物源会重新启动，形成新一轮的泥石流。黄洞子沟灾害链是由内外动力作用联合形成的复合型灾害链，既有时间上的连续性，又有空间上的拓展性，仍处于不断演化的过程当中，其成链过程如图 16 所示。

3 灾害成链条件分析

黄洞子沟在地震后发育为一条典型的地震地质灾害链，灾害规模巨大，成灾特征鲜明，其成灾条件也具有一定的独特性。

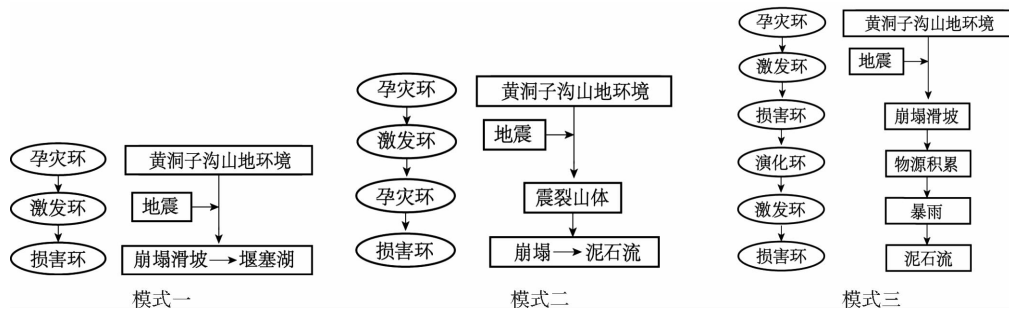


图 16 黄洞子沟灾害链成链过程

表 3 黄洞子沟主沟及支沟基本特征统计表

序号	名称	面积/km <sup>2</sup>	沟长/km	高差/m	平均纵坡降/‰	沟谷形态
主沟	黄洞子沟	32	9.5	1964	207	V、U 型谷均有
	空桐树沟	1.49	2.23	880	397	V 型谷
右岸	门槛石沟	3.06	3.83	1250	326	U 型谷
支沟	5#支沟	0.53	1.76	900	511	V 型谷
	姜巴沟	0.61	0.98	730	745	V 型谷
	川林沟	7.25	4.3	1150	267	V 型谷
	白果林沟	3.49	2.53	1225	484	V 型谷
	黑 沟	1.89	1.99	1050	525	V 型谷
	红石沟	2.36	2.88	1280	445	V 型谷下 U 型谷
左岸	仰板石沟	0.93	1.49	865	581	V 型谷
支沟	4#支沟	0.18	0.52	500	961	V 型谷
	3#支沟	0.82	1.40	830	593	V 型谷
	2#支沟	0.41	1.07	880	822	V 型谷
	1#支沟	0.27	0.81	700	864	V 型谷

### 3.1 地形条件

黄洞子沟原沟道呈“V”字型，地势北西高而南东低，属构造侵蚀、强烈切割的中高山地貌。研究区最高点位于大光包顶，海拔 3 047 m(现海拔 2 994.7 m)，最低点位于泉水村口，海拔 1 030 m，相对高差 1 964.7 m。左右岸不对称分布，右岸支沟主要发育在中下游，有门槛石沟、红石沟、姜巴沟等；左岸支沟分布有白果林沟、川林沟、黑沟等(图 10)，各支沟分布、汇水面积、纵坡降等基本情况见表 3。高海拔使地震放大效应显著加强，巨大的高差为黄洞子沟的物源启动储存了大量的势能，泥石流启动时转换为高动能，较大的沟道纵比降进一步增强了泥石流的流速和冲刷能力，多处支沟在后期降雨和地面径流的不断侵蚀作用下，提供了源源不断的物质基础。

### 3.2 地质条件

受推覆作用和后期剥蚀作用的影响，研究区地层岩性变化较大，出露地层从震旦系至三叠系均有，主要为碳酸盐岩，易风化、溶蚀，卸荷强烈；第四系松散地层广泛分布，主要有泥石流、滑坡堆积物、残坡积物和冲洪积物等。

黄洞子沟构造上位于龙门山逆冲推覆构造带

中段与四川盆地的过渡地带，距北川－映秀断裂仅 6.5 km，属龙门山前陆推覆体的大水闸推覆体，具逆冲－推覆－滑脱－走滑的特点，在推覆过程中产生了一系列推覆断裂和褶皱，处于小型断裂的集中分布区(图 17)。受断层上盘效应影响，汶川地震时，黄洞子沟震动强烈，部分断层破碎带及软弱夹层被激活联动，形成大规模次生山地灾害。

### 3.3 气象水文条件

研究区属亚热带湿润季风气候，气候温和，年平均气温 16.3℃，最高气温 36.5℃，最低－4.8℃。沟内研究区属亚热带湿润季风气候，气候温和，年平均气温 16.3℃，最高气温 36.5℃，最低－4.8℃。沟内有常年流水，枯水期流量～0.3 m<sup>3</sup>/s，最大洪水流量～60 m<sup>3</sup>/s，年平均径流量为 1.02 m<sup>3</sup>/s，每年 7－9 月流量较大，最高平均径流量为 2.34 m<sup>3</sup>/s，地下水主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水。工作区年平均水量 1 180 mm，主要集中在 6－9 月，月最大降水量可达 397 mm，多年月平均降雨量见图 18。多雨有利于物源的侵蚀和汇集，暴雨大大超过了震后泥石流的激发雨强，成为崩塌滑坡产生的碎屑物源启动形成泥石流的主要因素。

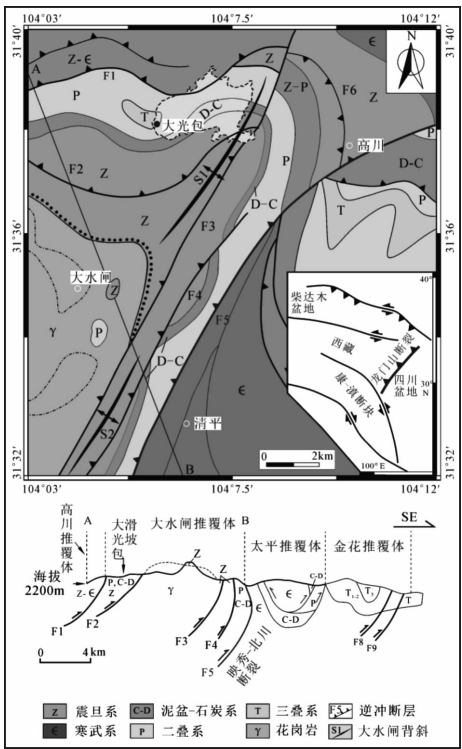


图 17 黄洞子沟区域构造纲要图(据文献<sup>[17]</sup>, 有改动)

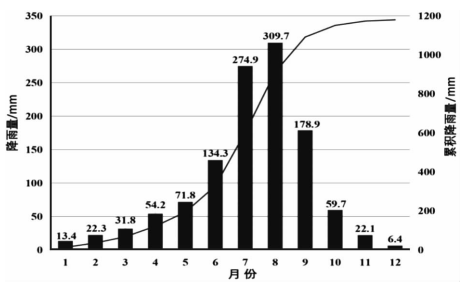


图 18 黄洞子沟区域降雨量

4 断链措施分析

断链即从灾害链的某一环节切断灾害链，使其不再往下发展。针对汶川地震山地灾害链，在不同环节采取不同的断链措施(表 4)。

黄洞子沟泥石流危险区范围大，威胁对象主要集中在黄洞子沟与三叉沟交汇后泉水河左侧居民区及道路、桥梁。泉水河段左侧有泉水村安置点及分散农户共 215 户，总威胁人口达 800 余人。危害方式主要是泥石流冲击、淤埋、洪水淹没等，对其进行灾害链的断链处理十分重要。由于黄洞子沟大量崩塌、滑坡的存在，以及震后不断累积的物源，从演化环进行断链处理，清理泥石流物源工程量浩大，不符合实际，建议从损害环采取措施，修建泥石流拦挡工程或者实施异地

搬迁，同时要加强监测预警，发生险情时及时疏散村民。

表 4 灾害链各个环节断链措施建议

灾害链环节	断链措施
孕灾环	对灾害易发点及时排查，快速有效识别，往往是最经济有效的；
激发环	普及地震临震预警，汛期做好监测；汲取失败工程的经验教训，正确评估人类工程活动对环境的影响，做到合理、适度、安全；采取必要的生态恢复措施，如植树造林、保持水土等；
演化环	阻止向有利于灾害链形成的方向发展，对变形山体的加固处理，清理的河流淤积等；
损害环	修建泥石流拦挡坝、河坝；滑坡、泥石流来临时做好人员疏散、及时救援；对地质灾害易发点的居民进行异地搬迁等；

5 结论

本文以黄洞子沟为例初步探讨了灾害链的成链过程和断链措施，得到了以下结论：

黄洞子沟地震诱发灾害链为一完整的复合型地质灾害链，形成地震－滑坡－堰塞湖；地震－震裂山体－崩塌－碎屑流－泥石流；地震－崩塌、滑坡－泥石流三种典型的灾害链类型，并且处于不断演化的过程当中；

将一般的灾害链分为孕灾环、激发环、演化环和损害环。黄洞子沟脆弱的地质环境为灾害链发生的前提，构成了孕灾环，地震作为启动因素，为激发环，形成的崩塌、滑坡、堰塞湖、泥石流为损害环，泥石流发生前的物质积累运移过程为演化环。

从不同的环节提出了断链措施，针对黄洞子沟，建议从损害环上采取断链措施，加强汛期监测预警，修建泥石流拦挡坝，或者实施异地搬迁。

参考文献：

[1] 陈宁, 王运生, 蒋发森, 等. 汶川县渔子溪地震地质灾害特征及灾害链生成分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 340-349.

[2] Huang R Q, Tang C, Li Y, et al. Geohazard assessment of the Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009: 236-237.

[3] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19-28.

[5] 崔圣华, 裴向军, 王功辉, 等. 基于环剪试验的汶川地震大



- 型滑坡启动机理探索[J/OL]. 岩土工程学报, 2017, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170526.1048.026.html>.
- [5] 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.
- [6] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987(2): 30–38.
- [7] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 11(4): 6–17.
- [8] 肖盛燮, 冯玉涛, 王肇慧, 等. 灾变链式阶段的演化形态特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2629–2633.
- [9] 文传甲. 论大气灾害链[J]. 灾害学, 1994, 9(3): 1–6.
- [10] 黄宗理. 地球科学大辞典[M]. 地质出版社, 2005: 479–480.
- [11] 尹卫霞, 王静爱, 余瀚, 等. 基于灾害系统理论的地震灾害链研究——中国汶川“5·12”地震和日本福岛“3·11”地震灾害链对比[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(2): 1–8.
- [12] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11–23.
- [13] 李明, 唐红梅, 叶四桥. 典型地质灾害链式机理研究[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 3–7.
- [14] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684–691.
- [15] 冯玉涛, 肖盛燮. 崩滑流地质灾害链式机理及其优化防治[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 22–26.
- [16] 徐梦珍, 王兆印, 施文婧, 等. 汶川地震引发的次生山地灾害链——以火石沟为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010(9): 1338–1341.
- [17] 黄润秋, 张伟锋, 裴向军. 大光包滑坡工程地质研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 557–585.
- [18] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730–741.
- [19] 张伟锋, 黄润秋, 裴向军. 大光包滑坡运动特征及其过程分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 866–885.
- [20] 裴向军, 郝永峰, 张军新, 等. 老鹰岩滑坡成因机制与运动特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(4): 28–32.
- [21] Li T T, Huang R Q, Pei X J. Variability in rainfall threshold for debris flow after Wenchuan earthquake in Gaochuan River watershed, Southwest China[J]. Natural Hazards, 2016, 82(3): 1967–1980.
- [22] 王兰生. 意大利瓦依昂水库滑坡考察[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 145–148.

## Chain Effect and Chain Breaking Measures of Geological Hazards in Huangdongzi Gou induced by Wenchuan Earthquake

LIANG Yufei, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, ZHU Ling, GAO Huihui and DONG Yuan  
(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The Huangdongzi Gou area is attacked most by serious earthquake disasters triggered by the Wenchuan earthquake and the most obvious disaster chain effect. Through the detailed field investigation, the use of remote sensing images and rainfall data analysis, the development and characteristics of the geological disaster after the earthquake are revealed, and the earthquake-landslide-barrier lake, seismic-earthquake cracked mountain-collapse debris flow-debris flow, and three typical geological disaster chain models of earthquake collapse, landslide and debris flow are revealed. The chain dynamic process of disaster chain is divided into pregnancy disaster ring, exciting ring, evolutionary ring and damage ring. The pregnancy disaster ring is the premise, the ring is the starting factor, the evolutionary ring is the process, and the damage ring is the result. The disaster chain of the Yellow cave ditches is a compound disaster chain formed by the combined internal and external dynamic action. It is still in the process of continuous evolution, and the chain forming conditions of the disaster chain are analyzed from three aspects of terrain conditions, geological conditions and meteorological and hydrological conditions. Finally, the present situation and threat objects of the disaster chain of the Yellow cave sub gully are suggested. The main broken chain measures are taken from the damage ring.

**Key words:** Huangdongzi Gou; Wenchuan earthquake; geological hazard; disaster chain; chain breaking measures