

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)4 - 483 - 10

汶川地震触发的绵远河流域崩塌滑坡的特征

李为乐, 黄润秋, 唐 川, 许 强

(成都理工大学 地质灾害与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 利用地震后 ALOS 影像自动提取了汶川地震重灾区绵远河流域内的崩塌滑坡, 结合野外调查共确定地震触发崩塌滑坡 1 073 处, 面积 48.5 km²。其中分布最广、数量最多的是浅层崩滑体; 同时由于地震力作用强烈, 触发了许多深层、高速、远程滑坡, 并形成了大量的滑坡堰塞湖。汶川地震诱发的第二大滑坡文家沟滑坡就位于流域内, 该滑坡是本次地震中滑动距离最远的滑坡。地震导致大量的碎屑物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡上, 为泥石流的发生提供了有利条件。基于 GIS 的统计分析表明, 地震滑坡的空间分布主要受发震断层的控制, 流域内的崩塌滑坡受到了映秀 - 北川断裂和江油 - 都江堰断裂的双重影响, 主要分布于两断裂上盘的一定范围内; 地层岩性影响着地震滑坡的类型, 岩浆岩、白云岩等硬岩主要发育浅层崩滑体, 而上硬下软的地层多发生大型滑坡; 大部分崩塌滑坡都发生在海拔 1 000 ~ 2 000 m 的高程内; 坡度是崩塌滑坡发生的主要控制因素之一, 大部分崩塌滑坡发生在 25° ~ 55° 的范围内; 坡向对滑坡的分布也有一定的影响, 背靠震源(发震断层)方向的斜坡比面向震源(发震断层)方向更容易发生滑坡。

关键词: “5.12”汶川大地震; 绵远河; 崩塌滑坡; 高速远程; 分布规律

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

“5.12”汶川大地震发生于青藏高原东部、四川盆地西缘的龙门山构造带。龙门山构造带由 3 条近于平行 NE 向展布的主干大断裂及次级断裂系组成, 3 条主干大断裂分别是龙门山前主边界断裂带(江油 - 都江堰断裂)、中央断裂带(映秀 - 北川断裂)和后龙门山大断裂(茂 - 汶断裂、青川 - 平武断裂)^[1]。汶川 Ms 8.0 地震的地表破裂带主要出现在映秀 - 北川断裂和江油 - 都江堰断裂上(图 1), 在地震发生的短短 120 s 时间内, 形成了一条长约 330 km 的地表破裂带^[2], 其中映秀 - 北川断裂地表破裂带长约 240 km, 该带从映秀镇以南开始向 NE 方向延伸, 经北川县, 过平通镇和南坝镇, 终止在青川县的石坎乡附近, 而江油 - 都江堰断裂在彭州、绵竹、安县境内产生了一条长约 90 km 的地表破裂^[3]。

由于地震灾区原本地质环境就比较脆弱, 加之本次地震震级高, 震源浅, 持续时间长, 因而触发了大量的崩塌滑坡灾害, 造成了惨重的人员伤亡。截至 2008 - 09 - 25, 地震共造成 69 227 人死亡, 17 923 人失踪^[4], 其中地震次生地质灾害造成的死亡和失踪人数约占地震总死亡和失踪人数的 1/3, 其数量远远超过了过去 20 a 中国一般性地质灾害导致人员伤亡的总和, 其中导致 100 人以上死亡的重大灾难性滑坡就达 20 余处^[5]。本次地震地质灾害主要分布在地震烈度大于Ⅶ的山区, 分布范围约 10 × 10⁴ km²^[6], 戴福初等利用航空相片和遥感影像共圈定了地震滑坡 56 000 处, 滑坡面积达 811 km²^[4]。

近 20 年来, 世界上地震触发大量地质灾害的事

收稿日期(Received date): 2010 - 07 - 15; 改回日期(Accepted): 2010 - 11 - 20。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2008CB425801)和地质灾害防治地国家重点实验室自主研究基金。

[This research is supported by National 973 program (2008CB425801) and Independent research foundation of the State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention.]

作者简介(Biography): 李为乐(1982 -), 男, 安徽太湖人, 在读博士生, 助理研究员; 主要从事 3S 技术在地质灾害防治中的应用研究工作。[Li Weile(1982 -), male, Taihu Anhui, Ph. D, assistant experimentalist, majoring in “3S” technologies and geological hazards.] E-mail: whyl-wl01@163.com

件主要有:1989 年美国加州 Loma Prieta 地震 (Mw 6.9), 1994 年美国加州 Northridge 地震 (Mw 6.7), 1999 年台湾集集地震 (Mw7.5), 2004 年日本 Mid Niigata prefecture 地震 (MJMA 6.8), 2005 年 Kashmir 地震 (Mw 7.6)。各国学者对这些地震地质灾害的空间分布特征进行了充分的统计分析和研究^[7-13], 形成了许多地震滑坡的统计分布规律。黄润秋等^[14-17]结合野外调查和遥感解译获取的地震地质灾害点, 对此次地震地质灾害的空间分布规律进行了统计分析, 得出了汶川地震地质灾害具有沿地震发震断裂条带状和沿水系线状分布, 断层上盘效应显著等认识。通过对地震灾区遥感影像的仔细分析, 发现地震诱发的地质灾害主要集中分布在以下几个发震断层附近的流域范围内: 岷江流域映秀-茂县段、白沙河流域 (彭州、都江堰市境内)、湔江流域 (彭州)、金河流域 (什邡、绵竹交界)、绵远河流域 (绵竹)、茶坪河流域 (安县)、干河子流域 (安县)、老场口流域 (安县)、湔江流域唐家山-陈家坝段 (北川县)、洪溪沟流域 (平武县)、清水河流域 (青川县曲河乡-苏河乡段及马公乡段) 等流域内。本文选取其中的绵远河流域 (图 2) 为研究区, 利用 ALOS (10 m) 影像自动识别提取流域内的地质灾害, 重点区域用航空影像进行解译分析, 并多次到现场进行调查, 获得了丰富的一手资料。在此基础上, 对流域内的地震地质灾害类型特征、分布规律进行研究。

1 研究区地质条件概况

绵远河流域位于四川省绵竹市境内, 属沱江支流, 距震中东北方向约 80 km, 正好位于本次地震 2 个 XI 区的中间位置 (见图 1), 地理位置 $103^{\circ}54'46'' \sim 104^{\circ}11'14''\text{E}$, $31^{\circ}26'42'' \sim 31^{\circ}42'03''\text{N}$ (图 2)。研究区东西方向长 26 km, 南北向长 29 km, 汇水总面积约 400 km², 主河长约 40 km, 最高海拔 4 400 m, 最低 702 m, 高差近 3 700 m。流域支流众多, 呈树枝状分布, 河流切割强烈, 切割深度一般为 500 ~ 1 000 m, 山高谷深。地震在该流域内触发了大量的滑坡、崩塌、泥石流和堰塞湖等灾害, 是本次地震受灾最严重的区域之一。流域范围内有汉旺镇、天池乡、清平乡 3 个集镇, 均损失惨重。大量的地震崩塌滑坡不仅摧毁了区内的道路, 使交通中断 3 个月之久, 还堵塞河道形成了多处堰塞湖, 威胁下游居民的生命财产安全。

流域内出露的地层岩性包括花岗岩、震旦系的白云岩、砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩; 寒武系的砂岩、页岩、磷质灰岩、粉砂岩; 志留系的变质砂岩、板岩、千枚岩; 泥盆系白云岩、石英砂岩、页岩和石炭系的泥晶灰岩夹少量粉砂岩; 二叠系石灰岩; 三叠系岩屑砂岩、粉砂岩; 第四系砂质粘土、泥质砂砾卵石层 (图 3)。

映秀-北川断裂从流域中部穿过, 江油-都江堰断裂从山口位置通过 (见图 3)。研究区属四川盆地西北部的龙门山推覆构造带前缘, 地质构造作用



图 1 汶川地震地震烈度图及研究区位置图

Fig. 1 Map of seismic intensity and location of study area

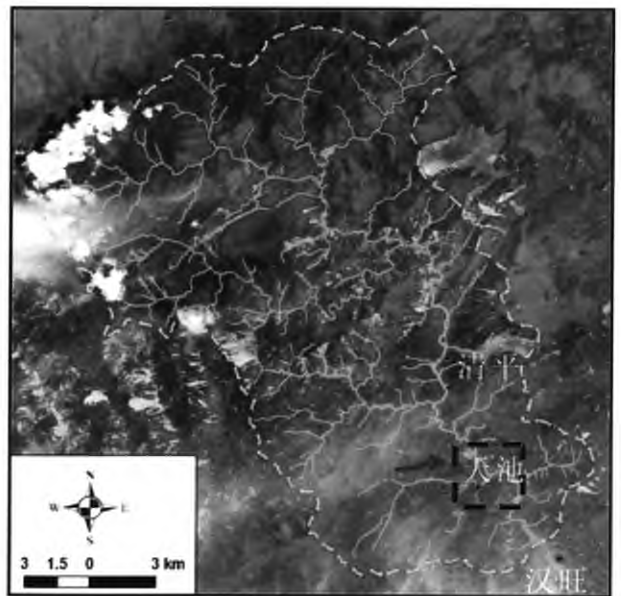


图 2 研究区 Alos 432 影像图 (时间: 2008-06-04)

Fig. 2 ALOS 432 Image of the study area

(date: 4th June 2008; copyright: JAXA, Japan)

强烈,断裂发育,岩层多陡倾、直立乃至倒转,裂隙发育,岩体破碎(图4),为崩塌滑坡的形成与发生提供了有利的地质条件。

2 地震崩塌滑坡的基本特征

利用2008-06-04的ALOS 4、3、2波段组合假彩色影像在ENVI软件下自动识别地震诱发的崩塌滑坡,我们获取了流域内1 073处崩塌滑坡,平均密度2.7个/ km^2 ,崩塌滑坡总面积48.5 km^2 ,占研究区总面积的12.1%。

本文根据厚度将流域内的崩塌滑坡简单的分为浅层崩滑体和深层崩滑体两大类。分布最广泛、个数最多的是浅层崩滑体,其特点是崩塌滑坡体高度破碎,坡度较陡,滑坡厚度较小。此外,流域内也分布着数量众多的深层崩滑体,这类灾害体坡度一般较缓,厚度十几米至几十米,体积数万方至几千万方,如文家沟滑坡体积约 $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[18],许多深层高位滑坡还表现出了高速远程的运动特点,部分大型深层滑坡还堵塞河道,形成堰塞湖。

2.1 浅层崩滑体

流域内绝大多数的崩塌滑坡为浅层崩滑体。该类型滑坡主要是斜坡表面的松散层在强震作用下,被震裂而顺坡产生溜塌,其厚度一般 $<3 \text{ m}$,体积数立方米至数千立方米(图5(a))。从图5(b)可以看出大量的浅层滑坡发生在坡顶位置,且沿山脊线串珠状分布。此外还可以发现,山脊两侧浅层崩塌滑坡的发育程度相差很大。众多的浅层崩塌滑坡形成的大量碎屑物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡上,为泥石流的发生提供了足够的物源,只要降雨条件达到,便会形成泥石流。2008-09-24、2009-09-08和2010-08-13的强降雨,都在流域内诱发了众多的泥石流。

2.2 深层滑坡

在强大地震力的作用下,诱发了很多大型深层滑坡,其中面积 $>50\,000 \text{ m}^2$ 的大型滑坡就有25处,大多数都表现出了高速远程的特点。此外,大量的大型深层滑坡堵塞河道形成了堰塞湖。

1. 文家沟高速远程滑坡

滑体物质在高速运动过程中,如果前部地形开阔,或具有能使滑体继续保持运动状态的与滑动方向呈非垂直相交的沟谷,其在运动过程中往往会自

行解体(或通过与沟岸的碰撞解体),转化为碎屑物质,呈流态状作长距离运动^[19]。汶川地震诱发了大量的高速远程滑坡,典型的高速远程滑坡有安县大光包滑坡、青川东河口滑坡、汶川牛圈沟滑坡等,绵远河内有13处大型滑坡表现出了明显的高速远程的特点,其中清平乡文家沟滑坡是这次地震中运动距离最远的滑坡。

文家沟滑坡地理位置为 $104^{\circ}09'E, 31^{\circ}33'N$ 。滑坡体总长约4 km,总面积2.9 km^2 ,体积约 $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[18]。滑源区长1.3 km,宽1.0 km,面积1.2 km^2 ,滑坡后缘震前高程2 240 m,前缘高程880 m,高差达1 360 m。文家沟滑坡是这次地震触发的第二大滑坡(第一大为安县大光包滑坡)。文家沟滑坡表现出了明显的高速、远程、临空抛射、碎屑流化的特点。

文家沟滑坡滑源区为石炭系灰岩,下伏砂岩。地震发生时,山体首先被震裂松动,然后在强大的地震力作用下,顶部物质被临空抛射后,与右侧山体高速撞击,部分解体,改向SW运动并铲削、裹挟坡面及沟道内松散物质呈流体状继续沿沟谷运动约1 km,与右岸突出山体碰撞,进一步解体并向左岸爬高,然后又改向NW顺主河道方向边运动边堆积,直至能量耗尽在沟口停止了运动(图6),与本次地震诱发的东河口、牛圈沟等高速远程滑坡的启动、运动机制类似。滑源区为光滑陡峭的岩面,而没有典型的滑面和滑带;沿主滑方向,碎屑流堆积区粒径具有从后向前逐渐减小的趋势,这也是地震区其他高速远程滑坡的共同特点^[19]。

滑坡发生后,大量的松散物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡之上,为泥石流的发生提供了充足的物源。2010-08-13凌晨,绵竹市境内普降大雨,引发文家沟发生特大型泥石流(图7)。截止08-14T13:00,共造成9人死亡,5人失踪,100多户农房和卫生院、学校等设施严重受损或被掩埋^[20]。

2. 小岗剑堰塞湖滑坡

小岗剑带河谷狭窄,大量的滑坡崩塌堵塞河道,在绵远河主河道和支沟内形成37处滑坡堰塞湖。如图8,在短短的3.5 km范围内就有3处大型的滑坡,分别为小岗剑堰塞湖滑坡、一把刀堰塞湖滑坡和小天池堰塞湖滑坡,其中影响最大的是小岗剑堰塞湖滑坡。

小岗剑滑坡堰塞坝地理位置为 $104^{\circ}07' 37'' E$,

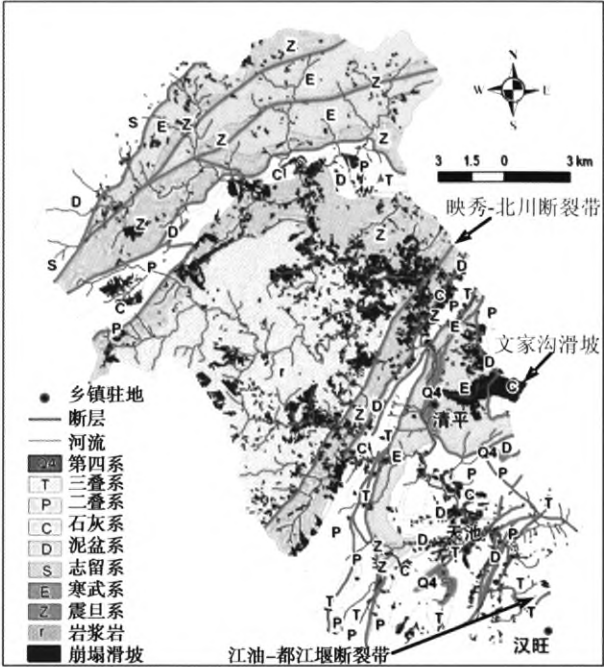


图 3 研究区地层岩性、地质构造图

Fig. 3 Lithology and geological structure map of the study Area



图 4 研究区直立的岩层

Fig. 4 Vertical dip rocks within the study area

31°30'11"N, 滑坡发生于绵远河左岸。滑坡体总长约 550 m, 总面积 0.12 km², 滑坡后缘震前高程 1 200 m, 前缘高程 800 m, 高差达 400 m。滑源区长 230 km, 宽 250 m, 基岩为泥盆系唐王寨群厚层-巨厚层白云岩夹白云质灰岩, 地层产状 N15°W/NE ∠75°。堰塞体横河向长约 260 m, 顺河向长约 330 m, 坝高约 70~120 m, 总方量约 250 × 10⁴ m³, 坝顶距滑坡后缘高差约 300 m (图 9)。堰塞坝物质组成主要为孤、块碎石。孤石一般 1~3 m, 最大达 10 m

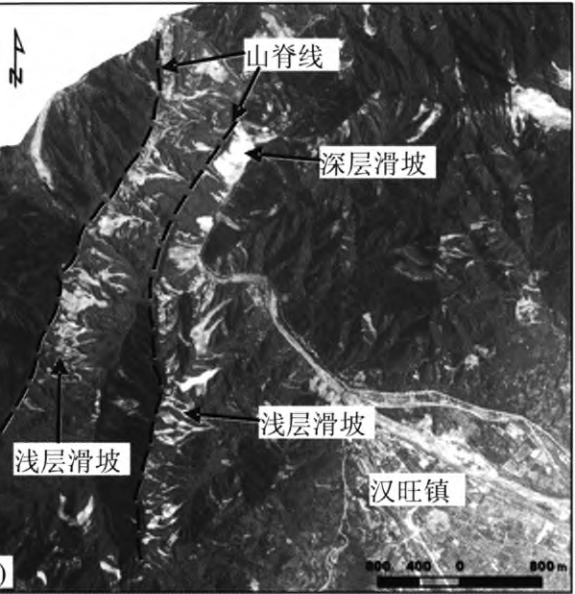


图 5 流域内典型浅层崩塌滑坡和分布

Fig. 5 Shallow falls and slides in the river basin

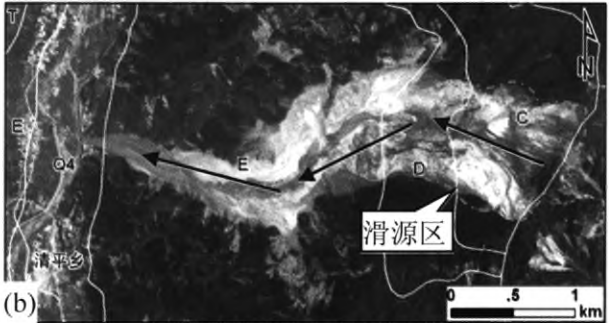


图 6 文家沟滑坡照片 (a) 及航空影像图 (b)

Fig. 6 Photos (a) and Aerial Images (b) of Wenjiagou Landslide



图7 2010-08-13 文家沟暴发特大型泥石流
Fig. 7 The super-large debris flow in Wenjiagou gully triggered by the rainstorm on 13th Aug 2010



图8 小岗剑、一把刀和小天池堰塞湖位置图

Fig. 8 Locations of Xiaogangjian, Yibedao and Xiaotianchi barrier lakes

余, 约占50%; 块石一般30~60 cm, 约占25%; 碎石一般10~20 cm, 约占10%; 另有约占15%的砾石土等碎屑物质充填在孤、块碎石空隙之间^[21]。2008-06-04的ALOS影像显示, 堰塞湖回水长度约4 km; 水深约70 m, 蓄水量达 $1\,100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.3 崩塌滑坡分布规律

地震崩塌滑坡的空间分布直接或间接地受到自然和人类因素的影响, 这些因素包括: 地层岩性、地质构造、斜坡结构、地形地貌、降雨、温度、地表径流、渗透、植被覆盖、道路开挖等^[13]。从图2可以看到, 流域内地震滑坡在某些区域极其发育, 而在其他地

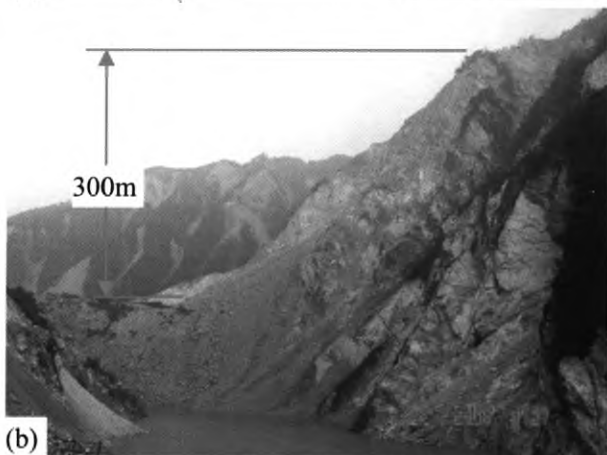
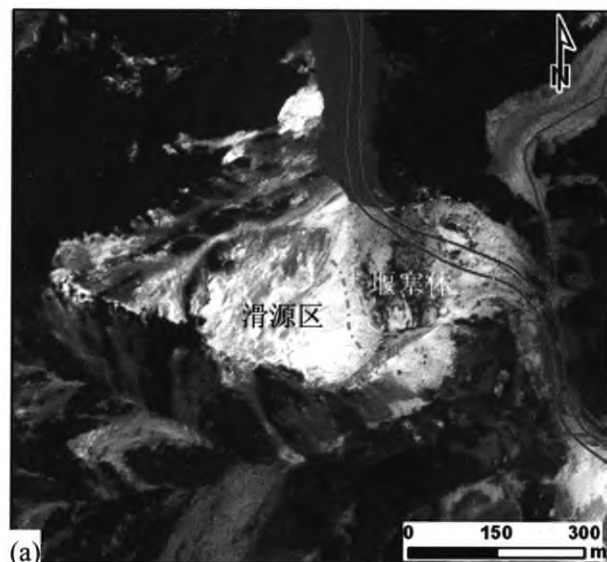


图9 小岗剑堰塞湖航空影像图(a)及照片(b)

Fig. 9 Aerial images (a) and photos (b) of Xiaogangjian barrier lake

方崩塌滑坡很少发育, 这必然是受到上述因素的控制的。本文选取距发震断层距离、地层岩性、高程、坡度、坡向5个因子进行分析。

2.3.1 崩塌滑坡分布与发震断层的关系

“5.12”汶川地震的主地表破裂沿映秀-北川断裂展布, 最大垂直位移6.2 m, 最大右旋走滑位移4.9 m; 沿江油-都江堰断裂展布的地表破裂带为典型的逆断层型地表破裂, 最大垂直位移3.5 m^[3], 因而汶川地震属于逆断层型地震, 与1999年的集集地震类似^[10]。以往的地震崩塌滑坡的研究表明, 地震崩塌滑坡的空间分布与发震断层有密切关系, 虽然地震崩塌滑坡的分布范围很广, 但主要还是集中分布在发震断层两侧一定范围内。对于逆断层型地震, 其崩塌滑坡的空间分布往往表现出显著的“上盘效应”, 即发震断层上盘的崩塌滑坡的分布密度

远大于下盘,汶川地震诱发的崩塌滑坡的“上盘效应”表现得非常显著^[14]。映秀-北川断裂的地表破裂带为中心,以1 km 间隔做缓冲区并按上下盘分别统计不同距离缓冲区内崩塌滑坡的分布情况,结果见表1和图10。

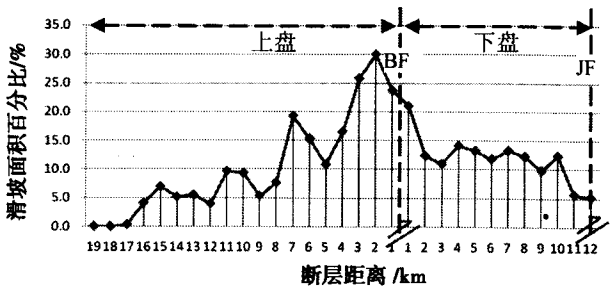


图 10 断层上下盘崩塌滑坡分布差异
(BF: 映秀-北川断裂;JF:江油-都江堰断裂)

Fig. 10 Distribution difference between collapses and landslides in the hanging wall and footwall of fault

(BF: Yingxiu-Beichuan Fault;JF:Jiangyou-Dujiangyan Fault)

从表1可以看出,研究区内崩塌滑坡面密度最大区不是距离发震断层最近的0~1 km 范围,而是在发震断层上盘1~2 km 范围内达到最大值30%,以1~2 km 为中心,崩塌滑坡面密度迅速向两侧直线降低,上盘在5 km 处降至10.9%,下盘在3 km 处降至11%。黄润秋、李为乐对汶川地震灾区的青川县马公-红光典型区的分析同样是1~2 km 范围内滑坡面密度最大^[17]。Kamp 对2005年克什米尔地震(Mw 7.6)发震断层距离100 m、200 m、300 m 的缓冲区进行分析,发现在发震断层的近距离范围内崩塌滑坡分布密度是随距发震断层的距离的增大而增大的^[13]。这表明地震诱发的崩塌滑坡的空间分布对发震断层附近的一定距离比较敏感,汶川地震崩塌滑坡的敏感区为发震断裂上盘1~2 km 范围内。

距发震断裂<7 km 范围内(4~5 km 除外),断层上盘崩塌滑坡的面密度均要大于下盘,尤其是距发震断层1~3 km 范围,断层上盘的崩塌滑坡面密度约为下盘的2倍多,表现出显著的“上盘效应”。但在7~10 km 缓冲区下盘的崩塌滑坡面密度反而大于上盘,这与整个区域的滑坡分布规律^[14]是不符合的,这可能与该区域前山断裂在地震中被激活,崩塌滑坡的发生受到中央断裂和前山断裂错动的叠加作用有关。仔细研究发现,在中央断裂下盘7~10

km 范围正好是一系列纵横交错的小断裂的集中分布区,这些区域原本岩土体就比较破碎,加之小断层在地震时被激活联动,因而更容易发生崩塌滑坡。

表 1 崩塌滑坡分布与距断层距离的关系

Table 1 The relationship of landslides to the distance from the fault

断层距离 /km	盘位	面积 /km ²	百分比 /%	崩塌滑坡面积 /km ²	百分比 /%	密度
1	上盘	15.0	3.7	3.6	7.3	23.7
	下盘	15.5	3.9	3.3	6.7	21.0
2	上盘	15.3	3.8	4.6	9.4	30.0
	下盘	14.9	3.7	1.8	3.8	12.4
3	上盘	14.7	3.7	3.8	7.8	25.9
	下盘	14.5	3.6	1.6	3.3	11.0
4	上盘	13.8	3.4	2.3	4.7	16.5
	下盘	14.4	3.6	2.0	4.2	14.2
5	上盘	13.8	3.4	1.5	3.1	10.9
	下盘	14.5	3.6	1.9	4.0	13.3
6	上盘	14.1	3.5	2.2	4.5	15.3
	下盘	14.0	3.5	1.7	3.4	11.8
7	上盘	14.8	3.7	2.8	5.9	19.3
	下盘	12.2	3.0	1.6	3.3	13.3
8	上盘	16.4	4.1	1.3	2.6	7.7
	下盘	10.4	2.6	1.3	2.6	12.3
9	上盘	19.0	4.7	1.0	2.1	5.4
	下盘	9.3	2.3	0.9	1.9	9.9
10	上盘	20.1	5.0	1.9	3.9	9.3
	下盘	8.3	2.1	1.0	2.1	12.4
11	上盘	21.1	5.3	2.0	4.2	9.7
	下盘	7.9	2.0	0.4	0.9	5.6
12	上盘	18.0	4.5	0.7	1.5	3.9
	下盘	3.8	1.0	0.2	0.4	5.2
13	上盘	17.3	4.3	1.0	2.0	5.5
14	上盘	14.6	3.6	0.8	1.6	5.2
15	上盘	12.2	3.0	0.8	1.7	6.9
16	上盘	11.4	2.8	0.5	1.0	4.1
17	上盘	7.2	1.8	0.0	0.0	0.3
18	上盘	3.1	0.8	0.0	0.0	0.0
19	上盘	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
合计		401.6	100.0	48.5	100.0	12.1

2.3.2 崩塌滑坡分布与地层岩性的关系

研究区共有9个地质年代的地层出露(表2),

表 2 崩塌滑坡分布与地层岩性的关系

Table 2 Relationship between lithology and landslides in the study area

地层	岩性描述	总面积 /km ²	面积 /%	崩塌滑坡		
				面积/km ²	面积/%	密度/%
第四系	含砾(碎)石砂质粘土、泥质砂砾卵石层	4.4	1.1	0.1	0.2	2.4
三叠系	岩屑砂岩、粉砂岩、灰岩、生物碎屑灰岩	35.7	8.9	2.2	4.6	6.3
二叠系	含燧石灰岩、铝铁岩、煤、泥晶灰岩夹页岩	54.3	13.5	5.0	10.4	9.3
石炭系	泥晶灰岩夹少量粉砂岩	12.7	3.2	2.8	5.7	22.0
泥盆系	白云岩夹灰岩、礁灰岩、石英砂岩、页岩	33.6	8.4	5.5	11.3	16.3
志留系	变质砂岩、板岩、千枚岩夹灰岩	11.8	2.9	0.1	0.2	0.9
寒武系	含砾砂岩、砂岩、灰硅质页岩、磷块岩、磷质灰岩	70.8	17.6	5.7	11.8	8.1
震旦系	鲕粒白云岩、葡萄状富藻白云岩、紫红色砾岩、砂岩	91.3	22.7	12.5	25.9	13.7
岩浆岩	花岗岩类	87.1	21.7	14.5	29.8	16.6
合计		401.6	100.0	48.5	100.0	12.1

分布最广的三种地层是震旦系、寒武系和岩浆岩地层,占了总面积的 62%。由于研究区构造活动强烈,岩浆岩岩体较破碎,在本次地震中发生了大量的浅表层崩滑和深层的岩崩,崩滑体总面积 14.5 km²,约占研究区崩塌滑坡总面积的 1/3,崩塌滑坡面密度达 16.6%。震旦系地层上部主要为白云岩(硬岩),下部为砂岩、页岩等(软岩)。该地层内同样有大量的崩塌滑坡发生,崩塌滑坡面积 12.5 km²,约占总滑坡面积的 1/4。寒武系地层主要出露在清平乡附近一带和流域的东北角,由含砾砂岩、砂岩、灰硅质页岩、磷块岩、磷质灰岩、粉砂岩、页岩组成。该地层内崩塌滑坡总面积 5.7 km²,文家沟滑坡的流动和堆积区正好在该地层内。此外,泥盆系(白云岩夹灰岩)和二叠系(含燧石灰岩、铝铁岩、煤、泥晶灰岩夹页岩)中也有较多崩塌滑坡分布,其面积均>5 km²。石炭系地层分布较零散,上部由泥晶灰岩,下部由粉砂岩构成。文家沟滑坡的滑源区位于该地层中,该地层的崩塌滑坡面密度是最大的(22.0%)。三叠系地层主要分布于映秀-北川断裂下盘,崩塌滑坡面积 2.2 km²,面密度 6.3%,只有研究区平均面密度的一半。志留系和第四系中很少有崩塌滑坡发生。可见硬岩中容易发生崩塌,而上硬下软的地层则对大型滑坡的发生十分有利,这与野外调查结果是吻合的。

2.3.3 崩塌滑坡分布与高程的关系

由研究区 1:5 万地形图等高线在 ARCGIS 软件下生成 DEM,对崩塌滑坡分布与高程的关系进行分析。研究区的高程范围由沟口平原的 702 m 迅速升高至西北部高山区的 4 400 m,在约 30 km 的范围内迅速拔高了 3 700 m。研究区 80% 的区域都位于

1 000~3 000 m 的高程范围,低于 1 000 m(4.8%)和高于 3 500 m(5.3%)的区域面积非常小(表 3)。

表 3 崩塌滑坡分布与高程的关系

Table 3 The relationship of landslides to elevation within the study area

高程	总面积 /km ²	崩塌滑坡			
		面积/%	面积/km ²	面积/%	密度/%
<1 000	19.2	4.8	3.5	7.2	18.3
1 000~1 500	87.9	21.9	16.5	34.0	18.7
1 500~2 000	86.2	21.5	14.1	29.1	16.4
2 000~2 500	82.9	20.6	6.9	14.1	8.3
2 500~3 000	64.4	16.0	4.5	9.2	6.9
3 000~3 500	39.5	9.8	2.0	4.1	5.0
3 500~4 000	19.0	4.7	1.1	2.3	5.8
>4 000	2.6	0.6	0.0	0.0	0.0
合计	401.6	100.0	48.5	100.0	12.1

大部分(63.1%)的崩塌滑坡都发生在海拔 1 000~2 000 m 的高程范围内,这与整个重灾区的崩塌滑坡分布规律是吻合的^[14],与 2005 年克什米尔地震(Mw 7.6)的研究结果也类似^[13]。实地考察发现,研究区 1 500 m 高程附近正好是河谷深切峡谷向两岸上部宽谷的过渡区,岩体卸荷最为强烈,地震响应最为突出,因而地震崩塌滑坡也最为发育。2 000~3 000 m 范围崩塌滑坡也较发育,约 23.3%的崩塌滑坡分布在该区域。>3 500 m 的区域崩塌滑坡非常稀少。

2.3.4 崩塌滑坡分布与坡度的关系

地形坡度是崩塌滑坡发生的控制性因素之一,当斜坡坡度大于自然休止角并且没有足够大的抗滑

力时,斜坡就会发生变形破坏^[13]。由研究区的DEM生成坡度图进行统计分析,结果见表4。

表 4 崩塌滑坡分布与坡度的关系
Table 4 The relationship between landslides and slope gradient within the study area

坡度	总面积 /km ²	面积 /%	崩塌滑坡		
			滑坡面积/km ²	面积/%	密度/%
<15	27.7	6.9	0.0	0.0	0.0
15~25	36.8	9.2	4.7	9.7	12.8
25~35	98.0	24.4	7.4	15.3	7.6
35~45	131.4	32.7	14.3	29.4	10.9
45~55	74.5	18.6	12.7	26.2	17.1
55~65	25.8	6.4	6.8	14.1	26.5
65~75	6.7	1.7	2.3	4.8	34.8
>75	0.6	0.1	0.2	0.5	39.7
合计	401.6	100.0	48.5	100.0	12.1

研究区整体坡度都较陡峭,75.7%的区域坡度在25°~55°间。70.9%的崩塌滑坡发生在25°~55°范围内,与整个重灾区的崩塌滑坡分布规律类似(20°~50°)^[14],而2005年克什米尔地震(Mw 7.6)崩塌滑坡最容易发生的坡度是25°~35°^[13]。

2.3.5 崩塌滑坡分布与坡向的关系

由研究区DEM生成坡向图与获取的崩塌滑坡进行统计分析,结果见表5。可见对于整个流域范围,崩塌滑坡的分布与坡向之间没有明显的关系,只是SW向崩塌滑坡相对较少,其他方位的崩塌滑坡面积相当。但对航空影像的分析,我们发现同一个山脊的两侧崩塌滑坡的发育密度相差很大,背向中央断层的斜坡发育的崩塌滑坡明显比面向中央断层的多。在中央断层的上盘表现为NW向斜坡比SE向崩塌滑坡发育(图11),在中央断层的下盘,则反之(见图5(b))。

我们又对流域内25个面积>50 000 m²的大型滑坡进行统计(图12),发现滑向垂直于发震断层的明显多于平行于发震断层的;NW向(背向发震断层)多于SE向(面向发震断层);NE向(背向震源)多于SW向(面向震源)。Kamp对2005年Kashmir地震(Mw 7.6)滑坡的统计结果发现^[13],>70%的滑坡发生在坡面朝南、西南和东南方向,即背对震源方向。这可能是由于地震发生过程中不同坡向对地震波的响应程度不一样的缘故。唐春安等运用动力学理论对地震作用下斜坡破坏过程进行了数值模拟,得出了背靠震源方向的斜坡比面向震源方向更容易发生滑坡的结论^[22]。

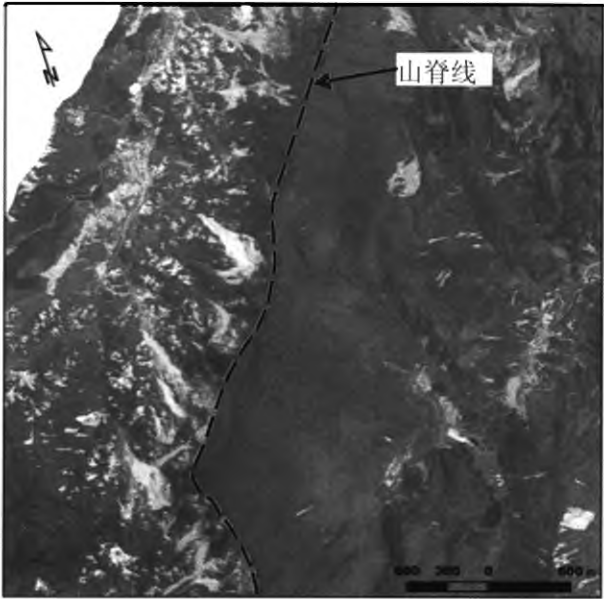


图 11 映秀-北川断裂上盘 NW 向斜坡滑坡明显比 SE 向斜坡发育
Fig. 11 In the hanging wall of central fault the number of landslides in the NW slopes is higher than that in the SE slopes.

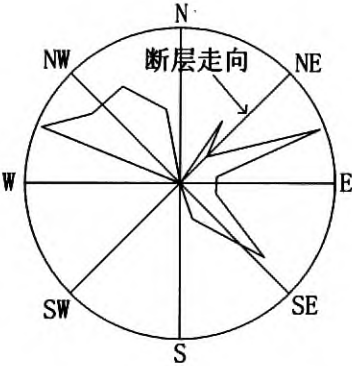


图 12 大型滑坡滑向玫瑰图
Fig. 12 Rose diagram of large landslides sliding direction in study area

表 5 崩塌滑坡分布与坡向的关系
Table 5 The relationship between landslides and slope aspect within the study area

坡向	总面积 /km ²	崩塌滑坡			
		面积/%	面积/km ²	面积/%	密度/%
0~45	61.9	15.4	7.3	15.0	11.8
45~90	50.1	12.5	5.0	10.2	9.9
90~135	65.8	16.4	7.3	15.1	11.2
135~180	54.6	13.6	7.5	15.4	13.7
180~225	37.8	9.4	5.1	10.5	13.5
225~270	31.1	7.8	4.4	9.1	14.2
270~315	45.2	11.2	6.0	12.3	13.2
315~360	55.1	13.7	6.0	12.4	10.9
合计	401.6	100.0	48.5	100.0	12.1

3 结论

利用地震后 ALOS 以及航空影像自动提取了绵远河流域内的崩塌滑坡,共确定崩塌滑坡 1 073 处,面积 48.5 km²。通过统计分析得出以下结论:

1. 地震诱发的崩塌滑坡中分布面积最广、数量最多的是浅层崩滑体,主要发生于坡顶位置,且沿山脊线串珠状分布。众多浅层崩塌滑坡形成的大量碎屑物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡上,为泥石流的发生提供了足够的物源,只要降雨条件达到,便会形成泥石流。未来一段时间内研究区泥石流灾害风险很大。

2. 崩塌滑坡的空间分布主要受到发震断层的控制,流域内的崩塌滑坡受到了映秀-北川断裂和江油-灌县断裂的双重影响,主要集中分布于两断裂上盘的一定范围内。

3. 地层岩性影响着地震滑坡的类型,岩浆岩、白云岩等硬岩主要发育崩塌,而上硬下软的地层多发生大型滑坡。

4. 大部分崩塌滑坡都发生在海拔 1 000~2 000 m 的高程范围内,这一高程范围与该区域宽谷进入峡谷的高程范围大体相当,是河谷岸坡地形坡度较陡,岩体卸荷强烈,地震响应最为突出的部位。

5. 地震崩塌滑坡主要发生在 25°~55° 的范围内,具体部位与微地貌形态有密切的关系,通常发生在地形坡度由缓变陡的过渡转折部位、单薄山脊和孤立山头或多面临空的山体部位等,这些部位地震波的放大效应最为突出。

6. 地震发生过程中不同坡向对地震波的响应程度不一样,背向发震断层(震源)的斜坡发育的崩塌滑坡明显比面向中央断层(震源)的多。

参考文献 (References)

- [1] Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444 [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): 433-444]
- [2] Chen Yuntai. Why was Wenchuan Earthquake so serious? [EB/OL] (2008-06-26). <http://www.sciencenet.cn/htmlnews/2008/6/200862781145413208421.html> [陈运泰. 汶川地震何以如此严重[EB/OL]. (2008-06-26). <http://www.sciencenet.cn/htmlnews/2008/6/200862781145413208421.html>]
- [3] Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2009, 30(3): 657-629 [徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 MS 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2009, 30(3): 657-629]
- [4] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences (2010), doi: 10.1016/j.jseae.2010.04.010
- [5] Huang Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 30(3): 657-629 [黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩塌灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249]
- [6] Huang Runqiu, Li Weile. Analysis on the number and density of landslides triggered by the Wenchuan Earthquake, China[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 1-7 [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]
- [7] Keefer D K, Manson M W. Regional distribution and characteristics of landslides generated by the earthquake [G]//The Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989 - landslides, US Geol. Survey Prof. Paper, 1998. C7-C32
- [8] Keefer D V. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 2000, 58, 231-249
- [9] Parise M & Jibson R W. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 251-270
- [10] Wang W N, Nakamura H, Tsuchiya S, et al. Distributions of landslides triggered by the Chi-Chi earthquake in Central Taiwan on September 21, 1999[J]. Journal of the Japan Landslide Society, 2002, 38(4): 318-326
- [11] Chigira, Yagi. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan[J]. Engineering Geology, 2006, 82: 202-221
- [12] Owen L A, Kamp U, Khattak G A, et al. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. Geomorphology, 2008, 94: 1-9
- [13] Kamp U, Growley B J, Khattak G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. Geomorphology, 2008, 101, 631-642
- [14] Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution of geo-hazards induced by the Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592 [黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592]
- [15] Huang Runqiu, Li Weile. A study on the development and distribution rules of geo-hazards triggered by “5.12” Wenchuan Earthquake[J]. Science in China: Edition E, 2009, 52(4): 810-819
- [16] Huang Runqiu, Li Weile. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May (2008) Wenchuan Earthquake, China [J]. Bull. of

- Engineering Geology and the Environment, 2009b, 68: 363–371
- [17] Huang Runqiu, Li Weile. Fault effect analysis of geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19–28 [黄润秋, 李为乐. 汶川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]
- [18] Huang Heqing, Zhao Qihua. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstrom at Wenjiagou triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering geology, 2010, 18(2): 168–177 [黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 168–177]
- [19] Xu Qing, Huang Runqiu. Dynamic characters of large-scale landslides triggered by “5. 12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721–729 [许强, 黄润秋. 5. 12 汶川大地震诱发大型崩塌灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721–729]
- [20] Wei He. The rescue and relief work for Mianzhu Qingping super-large debris flow occurred on 13th August 2010 is in an orderly way [EQ]. People's Daily Online, 2010, 8. 14: <http://society. people. com. cn/GB/12440638. html> [魏贺. 绵竹市清平乡“8. 13”特大泥石流灾害抢险工作正有序推进[EQ]. 人民网, 2010–08–14; <http://society. people. com. cn/GB/12440638. html>]
- [21] Qiu Zhixing, Li Shujian. Emergency treatment of Xiaogangjian barrier lake within Mianyuan River[J]. Water Resources and Hydro-power Technique, 2008, 39(8): 36–38 [邱炽兴, 李书健. 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理[J]. 水利水电技术, 2008, 39(8): 36–38]
- [22] Tang Chunan, Zuo Yujun, Qin Sifeng, et al. Spalling and slinging pattern of shallow slope and dynamics explanation in the 2008 Wenchuan earthquake[C]//Proceedings of the 10th conference on Rock Mechanics and engineering, China. 2009: 258–262 [唐春安, 左宇军, 秦泗凤, 等. 汶川地震中的边坡浅层散裂与抛射模式及其动力学解释[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 2009: 258–262]

Landslides Triggered by “5. 12” Wenchuan Earthquake in the Mianyuan River Basin, China

LI Weile, HUANG Runqiu, TANG Chuan, XU Qiang

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

Abstract: Due to the high magnitude, long duration of vibration, and complicated environment of the disastrous area, “5. 12” Wenchuan earthquake triggered a large number of landslides. A spatial database, which included 1 073 landslides, was developed and analyzed using ALOS satellite imagery and GIS within the Mianyuan River basin. These landslides covered the area of 48. 5 km², of which shallow falls and slides occupied the widest area and the largest number. The strong seismic wave caused the occurrence of many deep, rapid and long-runout landslides as well as the formation of numerous barrier lakes. The second largest landslide triggered by the earthquake, Wenjiagou Landslide was located within this area and it had the farthest sliding distance. After the earthquake, a large number of debris accumulated in the gullies or on the slopes, many debris flows occurred in the river basin. It was indicated in the GIS statistic analysis that the spatial distribution of earthquake-triggering landslides was dominated by the seismogenic fault. Owing to the duel effect of Yingxiu-Beichuan Fault and Jiangyou-Guanxian Fault, the landslides were mainly distributed in the hanging wall of two faults; the lithology of stratum determined the type of landslides. Shallow falls and slides were mainly formed in the hard rocks such as magmatic rocks and dolomites, while large landslides were likely to occur in the strata with hard upper layer and soft lower layer. Most landslides occurred within the elevation range from 1 000 to 2 000 m above sea level. Gradient was one of the main controlling factors of landslide distribution, for most landslides occurred in the gradient range from 25 to 55 degrees; slope direction also affected the distribution of landslides. The slopes opposing the direction of seismic source (co-seismic fault) were more likely to have landslides than the slopes facing the direction seismic source (co-seismic fault).

Key words: “5. 12” Wenchuan Earthquake; Mianyuan River; landslide; rapid and long-runout; distribution

作者: 李为乐, 黄润秋, 唐川, 许强, LI Weile, HUANG Runqiu, TANG Chuan, XU Qiang
作者单位: 成都理工大学地质灾害与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都, 610059
刊名: 山地学报 **ISTIC PKU**
英文刊名: Journal of Mountain Science
年, 卷(期): 2011, 29(4)
被引用次数: 4次

参考文献(22条)

1. 殷跃平 汶川八级地震地质灾害研究[期刊论文]-工程地质学报 2008(04)
2. 陈运泰 汶川地震何以如此严重 2008
3. 徐锡伟;闻学泽;叶建青 汶川MS 8.0地震地表破裂带及其发震构造[期刊论文]-地震地质 2008(03)
4. Dai F C;Xu C;Yao X Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake,China 2010
5. 黄润秋 汶川8.0级地震触发崩塌灾害机制及其地质力学模式[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2009(06)
6. 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[期刊论文]-地质灾害与环境保护 2009(03)
7. Keefer D K;Manson M W Regional distribution and characteristics of landslides generated by the earthquake 1998
8. Keefer D V Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution--the 1989 Loma Prieta,California event[外文期刊] 2000(3-4)
9. Parise M;Jibson R W A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January,1994 Northridge,California earthquake[外文期刊] 2000(3-4)
10. Wang W N;Nakamura H;Tsuchiya S Distributions of landslides triggered by the Chi-Chi earthquake in Central Taiwan on September 21,1999 2002(04)
11. Chigira Yagi Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan[外文期刊] 2006(4)
12. Owen L A;Kamp U;Khattak G A Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake[外文期刊] 2008(1/2)
13. Kamp U;Growley B J;Khattak G A GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [外文期刊] 2008(4)
14. 黄润秋;李为乐 “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2008(12)
15. Huang Runqiu;Li Weile A study on the development and distribution rules of geo-hazards triggered by “5.12” Wenchuan Earthquake[期刊论文]-Science China(Technological Sciences) 2009(04)
16. Huang Runqiu;Li Weile Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May (2008) Wenchuan Earthquake,China 2009
17. 黄润秋;李为乐 汶川地震触发地质灾害的断层效应分析[期刊论文]-工程地质学报 2009(01)
18. 黄河清;赵其华 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[期刊论文]-工程地质学报 2010(02)
19. 许强;黄润秋 5.12汶川大地震诱发大型崩塌灾害动力特征初探[期刊论文]-工程地质学报 2008(06)
20. 魏贺 绵竹市清平乡“8.13”特大泥石流灾害抢险工作正有序推进 2010
21. 邱炽兴;李书健 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理[期刊论文]-水利水电技术 2008(08)
22. 唐春安;左宇军;秦泗凤 汶川地震中的边坡浅层散裂与抛射模式及其动力学解释 2009

引证文献(5条)

1. 张文丰, 曾小宏 崩塌滑坡的工程治理探索[期刊论文]-科技创新与应用 2014(2)
2. 徐伟, 倪化勇, 王德伟, 徐如阁 鬼招手滑坡的特征及失稳机制[期刊论文]-山地学报 2013(4)
3. 常鸣, 唐川, 李为乐, 张丹丹, 贾涛, 马国超, 周志远 “4·20”芦山地震地质灾害遥感快速解译与空间分析[期刊论文]-成都理工大学学报(自然科学版) 2013(3)
4. 肖建国, 李化, 兰志勇, 朱渊 四川李家坪泥石流形成机理和危险度评价[期刊论文]-中国水运(下半月) 2013(12)

5. 袁志忠, 周耀渝, 唐旺旺 基于齐波夫定律的我国滑坡泥石流灾害分析[期刊论文]-中国地质灾害与防治学报 2013(4)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201104013.aspx