

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 3 - 257 - 09

“4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动 特征与趋势

崔鹏¹ 陈晓清¹ 张建强¹ 杨宗佶¹ 游勇¹ 范建容¹ 苏凤环¹ 孔应德^{1,2} 朱兴华^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 2013-04-20 芦山县发生 7.0 级地震, 震源深度 13 km。截至 4 月 29 日地震共造成 196 人遇难, 21 人失踪, 13 484 人受伤, 200 余万人受灾。地震发生后, 我们立即开展了地震次生山地灾害的遥感解译、实地调查及危险性评估工作。作者定义了地震次生山地灾害, 分析了次生山地灾害的活动特征、形成机制与模式以及发展趋势, 并与汶川地震次生山地灾害进行了对比。初步查明芦山地震诱发了 1 460 余处崩塌和滑坡, 大量落石和 4 处堰塞湖。次生山地灾害具有规模小、群发性和高位破坏的特征。崩塌和落石成群发育于坚硬岩石形成的陡坡上, 主要发育区段有: 芦山县的宝盛乡金鸡峡、双石镇大岩峡以及省道 S210 线 K317 路段和灵关镇以北小关子段, 对沿河公路及救援生命通道影响严重。滑坡数量较少, 以中小规模为主, 主要发生于砂岩、页岩和松散堆积层中, 仅发现一处大型滑坡并转化为碎屑流。堰塞湖主要由崩塌、滑坡形成, 均为低危险性小型堰塞湖。芦山地震次生灾害的主控因素为构造、岩性、结构面和地形, 崩塌破坏主要表现为顺层滑动破坏型、切层倾倒破坏型和结构面控制破坏型 3 种模式。芦山地震诱发崩塌、滑坡的数量、分布范围和规模比汶川地震小得多, 其数量仅为汶川地震的 5.53%, 造成的地表破坏面积 (3.06 km²) 仅为 0.57%。芦山地震区两次地震扰动的叠加效应, 大大降低坡体的稳定性, 震后崩塌、滑坡和泥石流的活动性增加, 增幅有限, 活跃期也相对较短, 但震区山地灾害的潜伏性和隐蔽性强, 给隐患排查带来困难。

关键词: 芦山地震; 次生山地灾害; 崩塌; 滑坡; 落石; 泥石流; 堰塞湖; 减灾

中图分类号: P642.2, X141

文献标志码: A

北京时间 2013-04-20T8:02 在四川省雅安市芦山县 (30.3°N, 103.0°E) 发生 7.0 级地震, 震源深度 13 km, 破裂持续约 30 s, 成都、重庆、陕西的安康和宝鸡有强烈震感^[1]。截至 4 月 29 日芦山地震共造成 196 人遇难, 21 人失踪, 13 484 人受伤, 200 余万人受灾 (图 1)。

中国地震局地质研究所徐锡伟研究团队的科学考察认为^[2], 芦山地震是发生在青藏高原中东部巴彦喀拉块体东向逃逸东端与华南块体西北端四川盆地强烈挤压碰撞带内部典型的逆断层型地震, 块体

运动方向为由西北向东南推挤, 没有产生明显的地震地表破裂带, 发震断层尚未出露地表, 隐伏在地下, 属盲逆断层型地震。

芦山地震发生当日, 地震次生山地灾害的遥感解译、实地调查及危险性评估工作随即展开。先后在飞仙关镇、芦阳镇、龙门乡、宝盛乡、太平镇、双石镇、灵关镇、穆坪镇、高何镇等地以及联通这些乡镇的公路开展实地考察, 对地震重灾区芦山、宝兴和天全 3 个县的次生山地灾害进行了遥感调查。

收稿日期 (Received date): 2013-05-13。

基金项目 (Foundation item): 中国科学院重点部署项目: 泥石流动力过程及其调控模拟 (KZZD-EW-05-01) 和中国科学院山地灾害与环境研究所减灾专项支持项目。[Key project of Chinese Academy of Science (Grant No. KZZD-EW-05-01) and special support project by Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS.]

作者简介 (Biography): 崔鹏 (1957-) 博士, 研究员, 研究方向: 山地灾害与水土保持。[Peng Cui (1957-): Ph. D., Professor, Specialized in mountain hazards and soil erosion.] E-mail: pengcui@imde.ac.cn

1 地震次生山地灾害及其形成条件

1.1 地震次生山地灾害的概念

地震次生山地灾害是由地震动荷载导致坡体破坏以及破坏坡体产生的松散岩土体或扰动坡体在震后演化中所形成的具有危害作用的现象。地震次生山地灾害可分为同震次生灾害和震后次生灾害,同震次生灾害是由地震动荷载直接激发的坡体破坏,主要有滑坡、崩塌、落石、碎屑流、不稳定斜坡;震后次生灾害是斜坡岩土体破坏产生的松散固体物质运移或受地震扰动形成表层松动、结构破碎、发育裂缝的不稳定坡体在以降雨和地表水为主的作用下形成的灾害现象,除滑坡、崩塌、落石等外,主要有堰塞湖、泥石流、山洪。依据灾害发展演进的主要动力过程(兼顾业务主管部门分类),地震次生山地灾害可划分为次生地质灾害和次生水文灾害,前者主要包括滑坡、崩塌、落石、不稳定斜坡和泥石流,后者主要有堰塞湖和山洪。

2.2 地震次生山地灾害形成条件

2.2.1 构造和岩性

芦山地震区在地质构造上处于青藏滇缅印尼“歹”字型构造体系东缘、龙门山北东向推覆构造带西南端和四川盆地三个构造单元的结合部位。以宝兴县穆平镇和永富乡之间的赶羊沟断裂(龙门后山断裂)为界,地质构造分别属于北部的金汤弧形构造带和南部的龙门山构造带。地震强烈扰动区出露的地层较为齐全,除缺失寒武系和石炭系外,从前震旦系至第四系的其余各系地层都有出露。地层岩性以砂泥岩、砾岩为主,还有石灰岩、白云质灰岩等。

2.2.2 地貌

地震强烈扰动区芦山、宝兴和天全3县位于雅安市北部,地处四川盆地与青藏高原东南缘的过渡地带,地貌上属四川盆地西部的盆周山地,东部芦山一带属邛崃山南支余脉山地,中部宝兴和西部天全属邛崃山系夹金山脉山地。地势特点总体为西北高东南低,由西北向东南倾斜,河谷深切,地形起伏大,区内最大相对高度4754 m。地貌以山地为主,河谷平坝面积小。

2.2.3 气象气候

芦山、宝兴和天全县属于以亚热带湿润季风气候为基带的山地气候,雨量充沛,降雨集中,高强度降雨较多,局地降雨受地形影响突出,蒸发量相对较

小。年均降水量天全为1663 mm、芦山为1313.1 mm、宝兴为1101.5 mm,70%以上的降雨量集中在6—9月,丰富、集中和高强度的降水,为山洪/泥石流、滑坡形成提供了充足的水源条件,暴雨或高强度降雨常常成为灾害的主要诱发因素,一般大于55 mm/次降雨都会诱发灾害。另外,区内支沟沟床比降大,降雨易于汇集形成山洪,有利于沟谷型泥石流的形成。

芦山地震区地质构造复杂且新构造运动活跃,地质环境脆弱,地形起伏大,降雨丰沛,为崩塌、滑坡、泥石流等次生山地灾害的发育提供了有利条件。

3 地震次生山地灾害的活动特征与破坏模式

在“4·20”芦山强烈地震及其余震的荷载作用下,斜坡岩土体结构遭到破坏,直接引发大量崩塌、滑坡、落石等灾害。其堆积体进入狭窄的河道形成堰塞湖;产生的松散物质堆积在坡面和沟谷内,为震后泥石流活动提供固体物源,加上沟床比降大和高强度降雨的因素,容易形成泥石流。

3.1 类型特性

3.1.1 崩塌和滚石

本次地震同震激发的次生山地灾害主要为大量中小规模的崩塌和落石,分布范围广,数量多,对山区城镇、村寨、公路、水利电力及通讯设施造成危害,其中对公路的危害最为严重。这不仅进一步加重了地震灾害损失,还影响到震后交通安全,特别是在余震和降雨期间发生了大量落石和崩塌,对救援队伍、社会车辆和行人造成一定的危害和伤亡。

崩塌和落石主要发育于由硬岩形成的高陡斜坡上,在深切峡谷尤为发育,集中成群发育的区段有芦山县至宝兴县的省道S210线的高陡边坡,以及龙门乡玉溪村至宝盛乡(图2)、宝盛乡至太平镇、清仁乡至双石镇的峡谷地段。其中,芦阳镇—穆坪镇的省道S210公路崩塌、落石区长度约7 km,路段崩塌群成片发育(约40个),规模 $0.1 \times 10^4 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 不等,崩塌体原始坡向 $25^\circ \sim 290^\circ$,坡度 $5^\circ \sim 70^\circ$,高差400~600 m,岩性为厚层砾岩,受大川冲断层控制,岩体节理裂隙发育,构成崩塌体的有效结构面(图3)。

3.1.2 滑坡

芦山地震同震激发的滑坡数量不多,规模也不大。滑坡主要出现在砂岩和砂岩、页岩互层的岩层

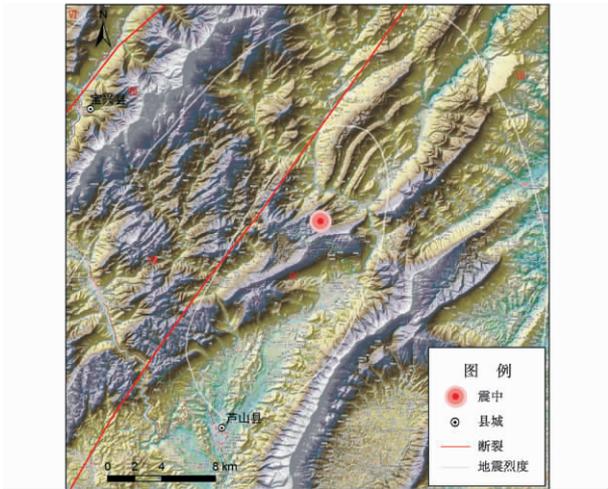


图 1 芦山地震灾区概况 (底图来源: 国家测绘地理信息局)
 Fig. 1 Overview of the Lushan earthquake (adopted from SBSM)

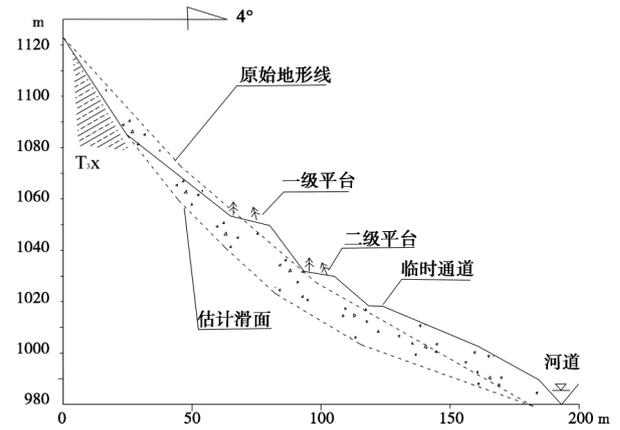


图 4 双石镇流水沟滑坡堆积剖面
 Fig. 4 Profile of landslide accumulation in Liushui Gully Shuangshi town



图 2 宝盛乡金鸡峡崩塌落石危害公路
 Fig. 2 Rockfalls threatening highway in Jinji gorge, Baosheng



图 5 宝兴县城烈士陵园滑坡毁坏城区道路
 Fig. 5 Landslide in martyr cemetery of Baoxing county, destroying urban road

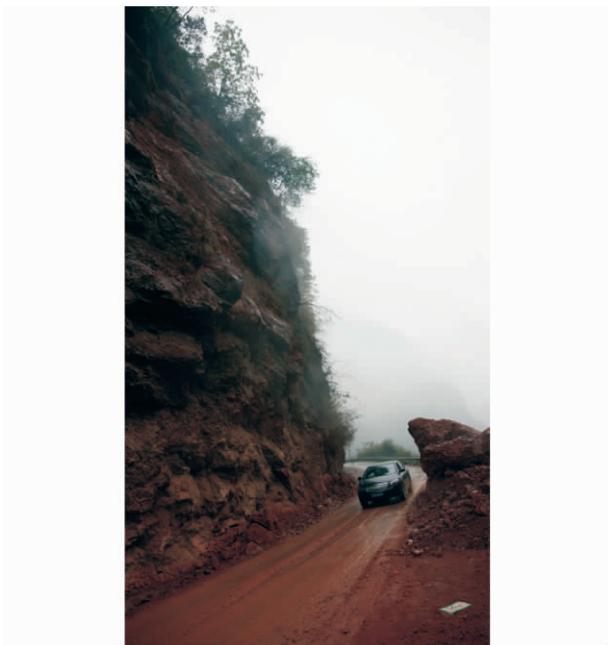


图 3 S210 公路穆坪镇 - 灵关镇段崩塌、落石
 Fig. 3 Collapses and rockfalls in Muping - Lingguan border of S210 highway

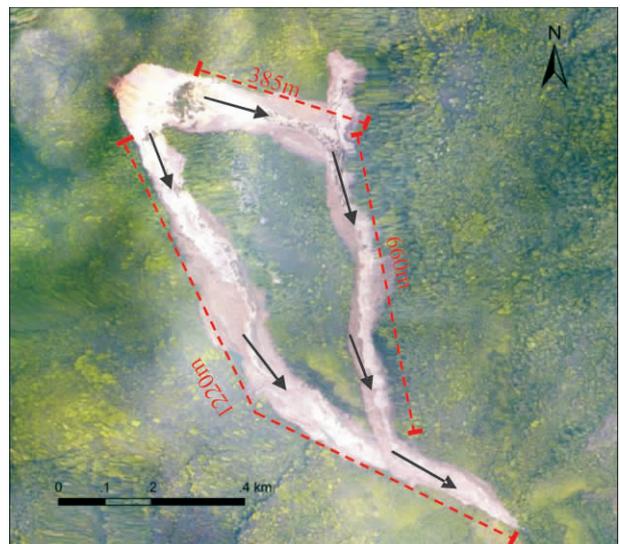


图 6 天全县老场乡汤家沟滑坡碎屑流平面形态和流动距离
 (影像来源: 国家测绘地理信息局)
 Fig. 6 Moving form and distance of landslide-turned clastic flow in Tangjia Gully, Tianquan county (from SBSM)

中,比较典型的有西川河右岸双石镇-灵关镇公路一侧的流水沟滑坡和大河左岸太平镇至大川镇公路一侧钟灵村滑坡。这两处滑坡均造成公路堵塞,太平至大川的公路直至4月24日下午才打通,双石至灵关的公路至今仍然艰难勉强通行。

流水沟滑坡位于西川河右岸,滑坡体宽约80 m,长约220 m,平均厚约15 m,总体积约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$;滑坡坡向 4° ,原始坡度 40° ,高差约143 m;滑坡为堆积层滑坡,滑面为基覆交界面,地层岩性为三叠系须家河组(T_{3x})粗砂岩;滑坡平面呈箕状,堆积剖面形态阶梯状,滑体上有2级台阶,原始河道宽40 m,堵河约30 m(图4)。

在第四系松散堆积层中也发生了比较典型的滑坡,宝兴县城烈士陵园滑坡就是其中一例。该滑坡长约50 m,宽约70 m,厚约3~5 m,规模约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$;坡向 310° ,坡度约 45° ,高差约30 m,滑坡平面呈不规则梯形,坡型和滑面均为直线型(图5)。滑坡物质为混杂松散堆积体,受地震作用由堆积台地前缘破坏,毁坏坡脚的公路、车辆,导致人员伤亡。

3.1.3 滑坡碎屑流

芦山地震激发的大型滑坡很少,截止目前,只在天全县老场乡汤家沟发现一处大型滑坡,估计规模 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该滑坡物源区高程为1535 m,在向下运动中遇到山嘴阻挡,分为左右两支向下运动,土体在运动中解体,形成碎屑流,右支直接向下运动1220 m,左支在运动385 m以后与正北方向的另一滑坡汇合,继续向下运动660 m,与右支汇合于主沟(图6)。

3.1.4 堰塞湖

2008年汶川地震期间发生了256处堰塞湖,成为当时最为严重的次生灾害^[3]。“4·20”芦山地震激发的崩塌、滑坡规模较小,形成的堰塞湖数量少,规模也小。目前,在芦山地震区共发现堰塞湖4处,分别位于宝盛乡的金鸡峡、清仁乡峡口、龙门乡大岩下和大川镇黑水河,均为崩塌、滑坡型堰塞湖。受崩塌、滑坡的规模限制,芦山地震形成的堰塞坝高度较小,一般低于10 m,库容小于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,而且坝体结构主要以大块石为主。其中,大川镇黑水河堰塞湖最大,堰塞坝约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,堵塞高度9 m,最大库容约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$,至4月29日已蓄水量 $>4000 \text{ m}^3$ (图7)。

3.1.5 泥石流

地震区本身就是我国泥石流多发区域,在历史

上发生过数次重大泥石流灾害事件。1979-11-02雨城区的陆王沟、干溪沟和五云沟在暴雨激发下暴发大规模泥石流^[5],造成169人丧生、300余间房屋和 50 hm^2 耕地被冲毁,通过陆王沟的川藏公路桥梁被冲毁,泥石流进入青衣江形成堰塞湖。国土资源部的县市地质灾害调查显示^[6-8]。在本次地震前,宝兴县有泥石流沟20条、天全县有7条、芦山县2条。截止4月27日,地震区的泥石流沟均未表现出活动的迹象。

根据遥感调查和野外考察,地震区芦山、宝兴、天全3县共发生崩塌和滑坡1460余处,有些已经堆积于河谷中,但大部分仍然堆积于坡面和支沟中,在沟道中累积了大量松散固体物质,为震后泥石流形成提供了松散固体物源。宝兴县城大水沟地震以前松散物质较少,本次地震期间净增物源近 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$;经初步调查,对县城穆坪镇威胁最大的冷木沟新增松散固体物质约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,校场沟也在地震期间发生多处崩塌、滑坡。天全县老汤沟大型滑坡碎屑流全部堆积于流域内,将成为该沟发育泥石流的良好物质条件。另外,还有受地震扰动破碎和破裂坡体,也将在降雨期间产生破坏,为泥石流发育提供新的物源。

依据上述分析,虽然在地震期间没有发生泥石流,震后泥石流将易于发生,危险性有所加剧。

3.2 活动特征

3.2.1 群发性

受构造、岩性和地貌的控制,构造部位、岩性和坡体形态相同或相近的区域,在地震的动力作用下,同时诱发多处崩塌和落石。主要崩塌、落石群发育区段有:芦山县的宝盛乡金鸡峡、双石镇大岩峡以及省道S210线K317路段和灵关镇以北小关子段。其中,灵关镇以北小关子崩塌群长度约600 m,由4个崩塌构成,位于灵关河左岸省道S210公路一侧,崩塌体原始坡向 265° ;山坡坡度,上部 $70^\circ \sim 90^\circ$,下部 $40^\circ \sim 50^\circ$;高差约200 m;岩性为灰岩和灰质白云岩,受小关子冲断层影响,岩层直立,倾角达到 90° ,岩体节理裂隙非常发育,同层面共同组成崩塌的有效结构面(图8)。

3.2.2 陡坡高位破坏

芦山地震灾区崩塌和落石具有地震诱发岩体高位破坏的特征。大部分破坏发生在山脊部位、陡崖和陡坡的凸出部位,高位破坏特征明显,图3、5、6、8、9中的破坏起始位置可以显示这一特征。

3.2.3 潜伏性和隐蔽性

芦山 Ms 7.0 地震较汶川 Ms 8.0 地震释放的能量小了约 30 倍,对地表的扰动强度显著小于汶川地震。因此,汶川地震区地表破坏表现为显性破坏,芦山地震区除部分易损坡体表现为显性破坏以外,隐性破坏特征比较明显。相当一部分坡体受到扰动,结构产生破坏,但尚未明显脱离原始坡体,这些扰动坡体成为震后次生山地灾害的源地。这说明虽然芦山地震同震激发的崩塌、滑坡规模不大,但震后次生山地灾害具有潜伏性。地震区植被较好,对灾害点特别是潜伏灾害具有遮蔽作用,这种灾害的隐蔽性为隐患点判识带来困难。

3.3 控制因素与破坏模式

3.3.1 控制因素

芦山地震区的同震次生灾害如滑坡、崩塌、落石主要受构造、岩性、结构面和坡位的控制。例如,双石镇大岩峡崩塌群由 7 组崩塌组成,集中沿断裂带分布且主要分布于断裂的上盘,规模 $0.2 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 不等,总长度约 300 m,坡向与断裂带近似垂直 $270^\circ \sim 320^\circ$,破坏均发生在山脊,原始坡度 $50^\circ \sim 60^\circ$,高差约 300 m,岩性为砾岩夹少量泥岩(图 9)。

3.3.2 破坏模式

汶川地震导致的崩塌按照发生机理和动态特征分为振动倾倒式、振动坠落式、振动流动式、振动弹射式等 4 种类型,这些类型在本次芦山地震区均有出现,落石还具有明显的散落式特点。从野外现场考察来看,滑坡为振动加载式滑坡,双石镇周家山滑坡就是一例(图 10)。该滑坡的动力来源于地震加载,斜坡中上部发生滑动,滑体对下部松散坡体强烈冲击并推动下部坡体产生滑坡。

崩塌破坏主要表现为顺层滑动破坏型、切层倾倒破坏型和结构面控制破坏型,主要特征见表 1。顺层滑动破坏型崩塌的破坏模式为原始斜坡在地震力作用下岩层软弱层面发生破坏,崩塌体首先顺层面产生滑动破坏,然后在陡倾坡面滑动-解体,最后在坡脚或坡面上堆积;切层倾倒破坏型的破坏模式为节理裂隙和层面软弱面在地震力作用下贯通破坏,崩塌体在重力作用下发生倾倒、运动解体,并以巨大滚石或倒石堆的形式在坡脚或坡面上堆积;结构面控制破坏型崩塌的破坏模式为原始斜坡在地震力作用下节理裂隙进一步扩展、延伸并最终在有效结构面贯通,在地震或重力的作用下发生倾倒或坠落破坏,在运动过程中可能解体,最终以巨大滚石或

倒石堆的形式堆积。

4 芦山地震次生山地灾害与汶川地震的对比

芦山地震比汶川地震释放能量小 30 倍,地震诱发崩塌、滑坡的数量、分布范围和规模比汶川地震小得多,主要以中、小型崩塌为主,大型的较少,目前还没有发现特大规模的。

4.1 影响范围

芦山地震诱发的崩塌、滑坡主要分布在距离震中 30 km 的范围内,集中分布于芦山县、宝兴县和天全县境内,其中芦山县宝盛乡、太平镇、龙门乡和宝兴县宝兴河沿岸(S210 沿线)分布密集。汶川地震主要沿龙门山中央断裂呈带状分布,受地形的限制,中央断裂下盘的崩塌、滑坡分布止于成都平原西缘,距离约 8 km;而在其上盘,地震诱发崩塌、滑坡的范围可延展到 130 km 处^[9];汶川地震龙门山中央断裂地表破裂长度达 200 km,前山断裂地表破裂长度约 80 km^[10],地震诱发的崩塌、滑坡沿断裂带方向的 350 km 都有分布。两次地震次生山地灾害的分布范围见图 11。

4.2 数量

芦山地震诱发的崩塌、滑坡 1 460 余处(利用分辨率在 0.5 m 及高于 0.5 m 的航片解译),而汶川地震诱发的崩塌、滑坡则多达 26 400 多处(部分地区利用分辨率为 0.5 m 的 ADS40 航片,大范围的使用了分辨率为 2.5 m 的 ALOS 影像和分辨率为 19.5 m 的 CBERS 影像),前者的数量仅为汶川地震的 5.53%。

4.3 规模

汶川地震诱发的崩塌、滑坡不仅数量多,而且规模也相对较大。芦山地震诱发的崩塌、滑坡造成的地表破坏面积为 3.06 km^2 ,而汶川地震诱发崩塌、滑坡造成的地表破坏面积达到 541.24 km^2 ,约为芦山地震的 177 倍。

对两次地震诱发的最大滑坡加以比较。芦山地震诱发的最大的滑坡位于天全县老场乡汤家沟内,滑坡覆盖面积约为 0.20 km^2 ,体积约 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。汶川地震诱发的最大的滑坡是位于安县高川乡泉水村的大光包滑坡,该滑坡距发震断裂龙门山中央断裂不足 7 km,航空影像上的投影面积为 7.8 km^2 ,宽 2.2 km,体积约为 $7.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,滑坡滑动的距离达 $4.5 \text{ km}^{[11-12]}$ 。



图7 大川镇黑水河堰塞坝^[4]

Fig. 7 Landslide dam in Heishui river ,Dachuan town

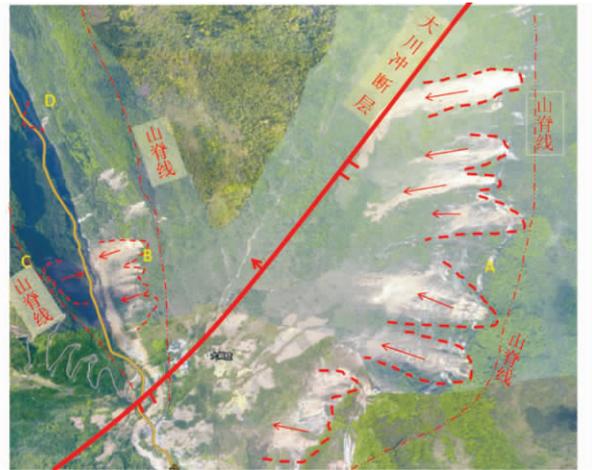


图9 宝盛镇大岩峡崩塌群与断裂的关系

(影像来源: 国家测绘地理信息局)

Fig. 9 Collapses and faults in Daya gorges Baosheng town(from SBSM)



图8 灵关镇以北小关子崩塌群

(影像来源: 国家测绘地理信息局)

Fig. 8 Collapses in Xiaoguanzi ,Lingguan town(from SBSM)



图10 双石镇流水沟滑坡

Fig. 10 Landslide in Liushui Gully ,Shuangshi

表1 崩塌破坏模式

Table 1 Patterns of collapse

破坏模式	地质模型		
顺层滑动破坏: 顺层斜坡,主要发生于芦山龙门乡中生代砂泥岩地层	原始斜坡	地震破坏,层面滑动破坏	滑动解体堆积
切层倾倒破坏: 主要发生于芦山中生代切层砂泥岩地层	原始斜坡	地震破坏,层面/节理面贯通	倾倒解体堆积
结构面控制破坏: 宝兴花岗岩斜坡以及芦山厚层砾岩斜坡	原始斜坡	地震破坏,节理裂隙贯通	倾倒解体堆积

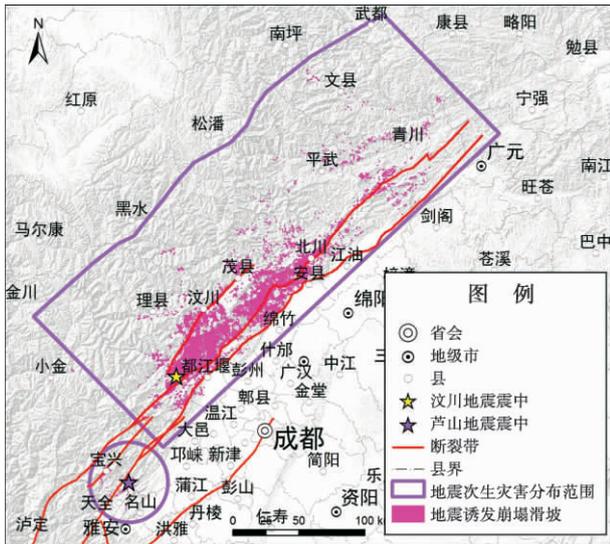


图 11 芦山地震与汶川地震次生山地灾害分布范围对比

Fig. 11 Comparison between stricken areas of Lushan and Wenchuan earthquake

5 山地灾害发展趋势

芦山地震区许多山体的整体性和稳定性在 2008 年汶川地震及其余震的作用下曾经遭到破坏,在本次芦山地震及其余震的频繁加载作用下,山体破坏程度加剧,出现很多裂而未滑的震裂坡体。在降雨作用下,这些亚稳定斜坡体容易失稳,形成新的崩塌、滑坡,给灾后重建造成威胁,也为泥石流活动提供新的物源。根据芦山地震区的地质、地貌、水文气象和植被条件,结合对汶川地震后山地灾害的发展趋势的认识^[13],初步分析芦山地震区的次生山地灾害发展趋势。

5.1 崩塌(滚石)和滑坡发展趋势

芦山地震区广泛分布陡坡,受构造影响,在断裂带附近岩层节理裂隙发育。在 2008 年汶川地震的激发下发生了大量的崩塌和落石,坡体受到一定程度的损伤;芦山地震诱发了大量崩塌和落石,并进一步加剧了坡体损伤。两次地震扰动的叠加效应,大大降低坡体的稳定性。因此,余震和降雨期间将会继续发生崩塌和落石,抗震救灾期间余震和降雨已经诱发了大量小规模崩塌和落石,造成车辆损毁和人员伤亡;随着时间的推移,崩塌和落石的数量将会逐渐减少。地震区广泛分布的砂、板、页岩是潜在的滑坡发育区,在降雨作用下,不稳定斜坡会发育成滑坡,仍以中小规模为主。

5.2 泥石流发展趋势

参照汶川地震后泥石流发展趋势分析的成因分

析法和类比分析法^[14],由于芦山地震区的松散物源量远小于汶川地震产生的松散物源量,地震区泥石流形成模式较地震以前总体变化不大,因松散固体物质新增数量的差异会出现不同的模式。在松散固体物质较少的沟谷,泥石流形成仍然为固体物源控制型;在地震诱发中小规模崩塌、滑坡较多的沟谷,为降雨控制型与松散物源控制型之间的过渡型;在新增松散物质较多的沟谷,如天全县老场乡汤家沟,则表现为降雨控制型,但这种类型的沟谷在地震区并不多。

泥石流发展趋势为:雅安为四川省的暴雨中心(别名雨城),降雨量大且多暴雨,激发泥石流的水量条件充足;地震作用导致山体松动和松散物源量增加,泥石流活动较震前有所增加,其激发雨量有所降低,暴发规模可能增加,除个别新增大量松散固体物质的流域外,一般而言,变化幅度不会太大,活跃期约为 10 a 左右。

5.3 漂木将成为重要灾害类型

由于地震区的森林覆盖率高,有大量的乔木分布于沟道两侧和不稳定斜坡上,在坡体破坏和泥石流形成期间,大量的乔木将随崩塌、滑坡进入沟道成为漂木,山洪也可能冲走沟道内的乔木而形成漂木。漂木对沟道沿程的堵塞和溃决作用,将放大山洪、泥石流规模,增加泥石流的危害能力。

6 结论与讨论

6.1 结论

1. “4·20”芦山地震次生山地灾害以小型崩塌为主,具有明显的群发性和高位破坏特征。通过野外考察与遥感调查查明,地震诱发了 1 460 余处崩塌和滑坡及大量落石和 4 处堰塞湖,同震期间没有发现泥石流。崩塌(滚石)规模小,成群分布在龙门-宝盛-太平、清仁-双石之间以巨厚砾岩为主的硬岩峡谷中,同时在芦山-宝兴的省道 S210 公路沿线砾岩、砂岩和灰岩地层中密集分布;滑坡数量很少,以中小规模为主,主要发生于砂岩、页岩和松散堆积层中,仅在天全县汤家沟发现一处体积大于百万立方米的大型滑坡并转化为碎屑流;堰塞湖主要为崩塌、滑坡型堰塞湖,按照堰塞湖风险等级划分标准^[15]和汶川地震单个堰塞湖危险性评估标准^[16],4 处堰塞湖均为低危险性的小型堰塞湖。

2. 构造、岩性、结构面和地形是芦山地震次生灾

害的主控因素。地震崩塌和滑坡主要分布于峡谷段和断层交汇附近的脆弱带,空间上呈带状分布,在峡谷区最为密集,对沿河公路及救援生命通道影响严重。地震导致的崩塌按照发生的机理和动态特征分为倾倒式、坠落式、流动式、弹射式 4 种类型,落石还具有明显的散落式特点,崩塌破坏主要表现为顺层滑动破坏型、切层倾倒破坏斜坡和结构面控制破坏型 3 种模式。

3. 芦山地震诱发崩塌、滑坡的数量、分布范围和规模比汶川地震小得多。芦山地震诱发的崩塌、滑坡主要分布在距离震中 30 km 的范围内,而汶川地震沿断裂带绵延 300 余 km;芦山地震诱发的崩塌、滑坡 1 460 余处,仅为汶川的 5.53%;芦山地震诱发崩塌、滑坡造成的地表破坏面积为 3.06 km²,仅为汶川的 0.57%;最大滑坡的体积相差 2 个数量级以上。

4. 两次地震扰动的叠加效应,大大降低坡体的稳定性,崩塌、滑坡和泥石流的活动性增加,但增幅有限。震后降雨会诱发小规模崩塌和落石;不稳定斜坡会发育成中小规模滑坡;泥石流活动较震前有所增加,其激发雨量有所降低,暴发规模可能增大,活跃期约为 10 a 左右。

6.2 减灾中应注意的问题

1. 由于震裂坡体并未表现出宏观破裂现象,很难及时发现,灾害更加隐蔽,滞后效应显著,加之较好的植被对隐患判识带来困难,震后山地灾害具有潜伏性和隐蔽性,这是潜在灾害判识中遇到的挑战。

2. 在芦山地震重灾区,除县城和乡镇以外,居民以分散聚落的形式零星分布,交通不便,采用目前山地灾害的防灾减灾措施投资高,投保比低。有必要探索政府、专业技术人员与当地居民有机结合的自主减灾社区模式,加强聚落防灾能力建设。

3. 芦山地震区降雨量大且多暴雨,森林植被好,泥石流中具有大量漂木,大大增加泥石流规模和破坏力。目前,还缺乏针对良好植被区含漂木泥石流的防治技术,需要探索漂木放大山洪、泥石流洪峰流量的机理,研发针对山区城镇的漂木防治关键技术。

致谢:中国科学院成都山地灾害与环境研究所对于芦山地震次生山地灾害的野外考察和遥感调查做了很好的组织,提供良好的支持,有效的保障了本项工作的完成。本文由崔鹏、陈晓清、张建强、杨宗信执笔,崔鹏、游勇、陈晓清、杨宗信和孔应德进行野

外考察,范建容、张建强和苏凤环进行遥感调查,工作期间得到四川省国土资源厅和四川省测绘地理信息局的大力支持,谨致谢忱。

参考文献(References)

- [1] The 20 April Lushan earthquake. China Earthquake Administration [OL]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/index.html> 2013-04-20 [中国地震局. 4·20 芦山地震专题报道 [OL]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/index.html> 2013-04-20]
- [2] China Earthquake Administration. Lushan earthquake field emergency team of China Earthquake Administration complete the seismic tectonic environment and seismogenic structure analysis [OL]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100347/20130427174324060108454/index.html> 2013-04-27 [中国地震局. 4·20 芦山地震专题报道 [OL]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100347/20130427174324060108454/index.html>, [OL]. 2013-04-27]
- [3] Peng Cui, Yingyan Zhu, Yongshun Han, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation [J]. *Landslides* 2009 6(3): 209-223
- [4] Xinhua News Agency. Rocks were blasted urgently in the dammed lake which located in Dachuan, Lushan county [OL]. 2013-04-30. http://www.gov.cn/jrzq/2013-04/30/content_2393872.htm [新华社. 四川芦山大川镇堰塞湖现场紧急爆破 [OL]. 2013-04-30. http://www.gov.cn/jrzq/2013-04/30/content_2393872.htm]
- [5] Xu Junming, Zhang Shengyi, Guo Huizhong, et al. Prevention and control of debris flows of Luwang gully and Ganxi gully in Ya'an city, Sichuan province [J]. *Mountain Research*, 1984, 2(2): 117-124 [徐俊名, 张生仪, 郭慧忠, 等. 四川雅安市陆王沟干溪沟泥石流治理 [J]. *山地研究(现山地学报)*, 1984, 2(2): 117-124]
- [6] Sichuan Chuanjian Geotechnical Survey and Design Institute. Report on geo-hazards investigation and zonal in Lushan county, Ya'an city, Sichuan province [R]. 2010. [四川省川建勘察设计院. 四川省雅安市芦山县地质灾害详细调查与区划报告 [R]. 2010.]
- [7] Sichuan Geological Engineering Survey Court. Report on geo-hazards investigation and zonal in Baoxing county after Wenchuan earthquake [R]. 2010 [四川省地质工程勘察院. 汶川地震灾区震后宝兴县地质灾害详细调查与区划报告 [R]. 2010.]
- [8] Sichuan Shutong Geotechnical Engineering company. Report on geo-hazards investigation and zonal in Tianquan county [R]. Sichuan province 2006. [四川省蜀通岩土工程公司. 四川省天全县地质灾害调查与区划报告 [R]. 2006.]
- [9] Peng Cui, Xiaoqing Chen, Yingyan Zhu, et al. The Wenchuan Earthquake (May 12 2008) Sichuan Province, China and resulting geohazards [J]. *Natural Hazards* 2011 56: 19-36
- [10] Li Haibing, Fu Xiaofang, VAN DER WOERD J, et al. Co-seismic Surface Rupture and Dextral-slip Oblique Thrusting of the M_S 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008 (12): 1623-1643 [李海兵, 付小方, VAN DER WOERD J, 等. 汶川地

- 震(M_S 8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J]. 地质学报 2008(12):1623-1643]
- [11] Huang Runqiu ,Pei Xiangjun ,Li Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at daguanbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology 2008 ,16(6) :730 - 741 [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]
- [12] Yin Yueping ,Cheng Yuliang ,Wang Jun et al. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rock-slide triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology 2011 ,19(5) :674 - 684 [殷跃平,成余粮,王军,等. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报 2011 ,19(5) :674 - 684]
- [13] Cui Peng ,He Siming ,Yao Lingkan ,et al. Formation mechanism and risk control of mountain hazards induced by Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press 2011. [崔鹏,何思明,姚令侃,等. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M]. 北京: 科学出版社 2011.]
- [14] Chen Xiaoqing ,Cui Peng ,Li Yong ,et al. Mountain Hazard Induced by Wenchuan Earthquake and Its Long-term Development Trends of Ganxi gully ,Beichuan [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 42(Suppl. 1) :22 - 31 [陈晓清,崔鹏,李泳,等. 汶川地震后北川干溪沟山地灾害及长期发展趋势初步分析[J]. 四川大学学报:工程科学版 42(Suppl. 1) :22 - 31]
- [15] Hydrologic Power Industry Standard of People's Republic of China. Standard classification for risk of dammed lake (SL 450 - 2009.) [S]. 2009 [中华人民共和国水利行业标准. 堰塞湖风险等级划分标准(SL 450 - 2009) [S]. 2009.]
- [16] Chen Xiaoqing ,Cui Peng ,Cheng Zunlan et al. Emergency risk assessment of dammed lakes caused by the Wenchuan earthquake on May 12 ,2008 [J]. Earth Science Frontiers 2008 ,15(4) :244 - 249 [陈晓清,崔鹏,程尊兰,等. 5·12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘 2008 ,15(4) :244 - 249]

Activities and Tendency of Mountain Hazards Induced by the Ms7.0 Lushan Earthquake April 20 2013

CUI Peng¹ ,CHEN Xiaoqing¹ ,ZHANG Jianqiang¹ ,YANG Zongji¹ ,YOU Yong¹ ,FAN Jianrong¹ ,
SU Fenghuan¹ ,KONG Yingde^{1,2} ,ZHU Xinghua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process ,Chinese Academy of Sciences/ Institute of Mountain Hazards and Environment ,
Chinese Academy of Sciences ,Sichuan Chengdu 610041 ,China; 2. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: An Ms7.0 earthquake focal depth of 13 km ,hit Lushan ,Ya'an ,Sichuan ,on April 20 2013. We have taken a survey of the resulted and potential mountain hazards immediately after the quake. We identified the earthquake-induced hazards in mountains ,analyzed the activity ,formation mechanism ,and developing tendency ,and compared them with the situations in Wenchuan earthquake. Field survey found 1 460 landslides and collapses and 4 dammed lakes ,which are small in scale and concentrated in groups. Collapses and rockfalls occurred in rocky cliffs ,mainly in gorges of Jinji in Baosheng country and Dayan in Shuangshi town ,and in K317 section of S210 provincial highway and Xiaoguanzi section north to the Lingguan town ,threatening rescue passage along the river. Landslides are scarce and in moderate scale ,mainly occurred in sandstone ,shale and colluviums. Only one large landslide was found ,which turned into flow. Dammed lakes were formed mainly by collapses and landslides ,all in small size and low danger. Major control factors of the hazards are structure ,lithology ,surface and landform. The collapses are consequent ,insequent ,and controlled by structure surface. Compared with the Wenchuan earthquake , the landslide number is only 5.53% and the impact area is as small as 0.57% . Superposition effect of quake has strongly reduced the stability of slope. Collapses ,landslides ,and debris flows are expected to be more frequent after the quake; but the active period will be relatively short. But potential hazards are hard to figure out.

Key words: Lushan earthquake; earthquake-induced hazards; collapses; landslides; rockfall; debris flow; dammed lake; hazard mitigation