

汶川地震次生山地灾害 及其减灾对策*

崔鹏 韦方强 陈晓清 何思明

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

摘要 2008年5月12日的中国四川汶川8.0级地震发生于青藏高原东缘的龙门山断裂带。龙门山断裂带主要由3条北东—南西向的平行断裂构成,主震发生在其中中央断裂即映秀—北川断裂,属单向破裂。余震在3条断裂上皆有发生,由南西向北东方向推移。地震引发了大量的次生灾害,主要为滚石、崩塌、滑坡、堰塞湖和泥石流,其中,滚石、崩塌、滑坡成为阻断交通的主要灾害。堰塞湖不仅对上游造成淹没,而且对下游形成巨大的洪水威胁。地震诱发的山地灾害形成灾害链,即崩塌、滑坡→(泥石流→)堰塞湖→溃决洪水或泥石流。次生灾害沿破裂带及两侧密集分布,并随距破裂带的距离增大而急剧减少。震后次生灾害将进入活跃期,崩塌滑坡的活跃期将持续5—10年,泥石流的活跃期将持续10—20年。文章根据次生灾害的特征和发展趋势,提出了震后次生灾害的应急减灾措施和恢复重建中的减灾措施。

关键词 汶川,地震,滑坡,泥石流,堰塞湖,灾害链,减灾



中国科学院



崔鹏研究员

1 汶川地震 概况

5月12日14时28分,中国四川汶川发生里氏8.0级地震,根据中国地震台网的监测数据,震中位于四川省汶川县映秀

镇(30.986° N, 103.364° E)(图1)。地震波及大半个中国,四川、甘肃、陕西、重庆、云南、山西、贵州、湖北8个省市受灾。主震区沿四川西部的龙门山断裂带展布,长约300公里,四川省的汶川、北川、都江堰、彭州、什邡、绵竹、安县、江油、青川、平武、理县、茂县,甘肃省文县和陕西省宁强县等受灾严重。主震区房屋、道路、水利水电工程和通讯设施等遭到严重破坏。据国务院抗震救灾指挥部信息,截至6月19日,地震已经造成69 180人遇难,17 406人失踪,374 008人受伤,重灾区80%—90%房屋倒塌(536.25万间房屋倒塌),2 142.66万间房屋严重损坏,北川县城、映秀镇、漩口镇等城镇几乎被夷为平地,500余万人无家可归。

* 本研究得到国家自然科学基金项目(40841011)、中国科学院抗震救灾应急减灾项目和中国科学院山地灾害与环境研究所应急减灾项目的支持。本文作者还有游勇、党超、李占鲁
收稿日期:2008年7月7日

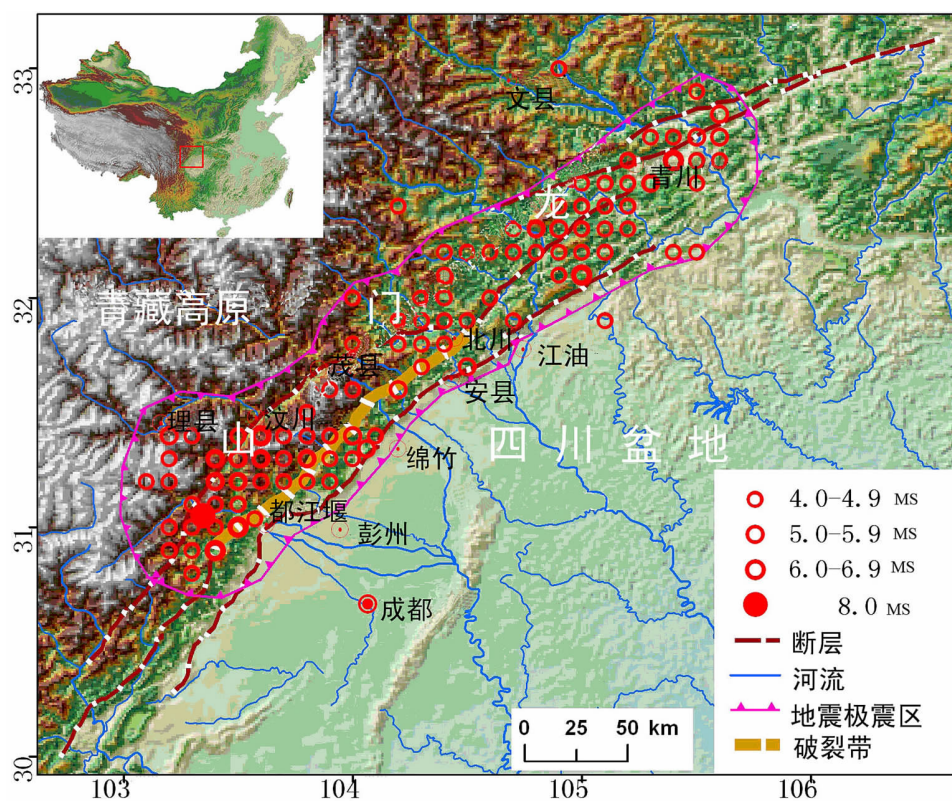


图1 5.12汶川地震主震、余震和破裂带(地震数据来自中国地震局)

汶川地震发生于逆冲断裂带——龙门山断裂带上,这是活动强烈的青藏高原块体与活动较弱的四川盆地块体之间的界线。龙门山断裂带是一个巨大的复合型构造带,主要包括后山断裂、中央断裂和前山断裂(图1)。它形成于中生代,新生代以来在印度板块与欧亚板块强烈碰撞而产生的强大推挤力作用下,发生大规模的逆掩推覆构造变形,使龙门山继续抬升,山前强烈拗陷^[1,2],造成构造应力能量的长期积累,最终沿龙门山中央断裂北川—映秀断裂带突然释放。首震位于映秀镇,为单向逆冲、右旋、走滑型破裂,由南西向北东运动,总破裂长度约300公里。这次地震属于宏观线性断层地震,烈度呈条带状由破裂带向两侧扩散。

汶川地震余震具有活动频繁和活动强烈等特点。截至6月19日,发生余震13136次,其中4.0—4.9级为183次、5.0—5.9级

为28次、6.0—6.4级为5次,最大余震为6.4级。余震主要发生在龙门山断裂的中段和北段,以中央断裂为轴线,在后山断裂和前山断裂扩展。余震有沿龙门山断裂带向东北方向推移的趋势,直至甘肃文县和陕西宁强县,但余震极少向南西方向推移(图1),值得引起注意。

2 地震引发的主要次生山地灾害及其危害

2.1 概况

汶川地震的主震区位于西部山区,其主震强烈,震中烈度达到11度,断裂带出现明显的逆冲走滑,对山体造成了严重的破坏;余震频繁而强烈,使山体进一步遭到反复破坏。强烈的主震和余震在龙门山断裂带范围内造成了大量的滚石、崩塌、滑坡、泥石流、碎屑流、堰塞湖等次生山地灾害。据航空和卫星影像和应急调查,国土资源部门已排查

出崩塌、滑坡、泥石流、堰塞湖等灾害隐患点 2 万余处,威胁人口 120 万人,主要分布在四川、甘肃和陕西接壤的 90 个县内,其中四川占 70%,甘肃占 25%,陕西占 5%。

这些次生灾害不仅直接造成严重损失,还堵断了进入重灾区的道路,严重阻碍了救援队伍和救援物资的进入,极大地增大了救援难度,进一步加重了灾害。地震诱发的大型滑坡阻塞河道,形成了大量的堰塞湖。堰塞湖蓄水后不仅造成上游的淹没损失,同时给下游城镇、村庄、道路和农田等造成了严重的溃决洪水威胁,成为震后可能造成重大损失的高风险次生灾害。

2.2 类型

(1)崩塌(滚石)、滑坡。崩塌(滚石)、滑坡灾害是汶川大地震诱发的主要次生灾害,分布范围之广、数量之多、规模之大、危害之严重均为国内外所罕见。根据四川省国土资源部门初步统计,在四川省灾区初步计划防治的 8 000 余处灾害隐患点中,崩塌 2 264 处,滑坡 3 412 处,占 69.5%。这些崩塌、滑坡阻断交通、砸毁车辆、掩埋城镇和村庄、阻断河流,危害灾区人民的生命和财产安全,

对山区城镇、村庄、道路和水利水电工程以及通讯设施等造成严重破坏(图 2),进一步加重了地震灾害,更为严重的是毁坏道路阻碍了救援队伍和工程机械进入灾区,加大了救援难度,严重延缓了救援进度,因崩塌、滑坡使得道路不通而延误的时间,大部分超过了生命搜救的最佳时间 72 小时。

(2)堰塞湖。大规模滑坡堵塞河道形成堰塞湖,淹没了上游的道路、村庄、城镇和农田等,堰塞湖溃决又将引发洪水,淹没和冲毁下游的城镇、村庄和道路、通讯等基础设施^[3-5](图 3)。汶川地震形成了大量的堰塞湖,根据遥感影像解译和现场考察,查明极震区有明显危害和威胁的堰塞湖 33 个,其中北川 8 个、青川 3 个、安县 3 个、平武 1 个、绵竹 4 个、什邡 7 个、彭州 2 个、崇州 4 个、汶川 1 个。堰塞湖回水已开始淹没上游村镇和公路等,5 月 17 日规模较小的堰塞湖已开始溢流或溃决。

通过对安县茶坪河、北川通口河(湔江)和青川清江流域堰塞湖的实地考察发现,本次地震形成的堰塞湖规模巨大,堰塞湖坝体松散,强度低,溢流后易造成溃坝,并且多数



图 2 北川县王家岩滑坡破坏和掩埋了大量建筑,造成严重损失



中国科学院



图3 北川县上游通口河干流的唐家山堰塞湖

成串珠状分布,如北川通口河湔江上连续分布7个堰塞湖,其中唐家山堰塞湖危险最大,堰塞湖溃决后会引发下游一系列堰塞坝逐级溃决,具有级联效应,使溃决洪水逐级加大,将严重危害下游沿岸城镇、村庄、其它基础设施和100余万人生命财产安全。

更多小规模堰塞湖分布于支沟内,由于云雾影响,在当时的遥感影像上尚无法判断,这些小规模的堰塞湖虽不会象主河道上的堰塞湖那样造成大范围灾害,但仍会引发大规模泥石流,危害危险区内的道路、村庄和城镇。

(3)泥石流。地震主灾区本身就是泥石流多发区,已有灾害记录的主要泥石流沟多达501条,其中都江堰10条、彭州30条、什邡9条、绵竹7条、茂县61条、汶川县66条、理县134条、黑水县49条、北川县24条、安县33条、平武县68条、青川10条。目前,由于还未进入雨季,没有出现暴雨,泥石流活动相对较少。由于地震作用,将激活大量潜在泥石流沟,使泥石流沟数量进一步增

加,据国土资源部门调查,仅四川灾区已查出具有潜在危险的泥石流沟805处。

2.3 成因

青藏高原的隆升和断裂活动控制了河流的发育,导致强烈的河流侵蚀,形成众多的河曲和断层崖。在河流凹岸坡脚由河流垂向和侧向侵蚀冲刷坡脚,岩体应力释放,在地震荷载作用下,有利于产生大规模滑坡和崩塌。滑坡体和崩塌体堆积在狭窄的河谷中形成堰塞坝,拦截上游汇水形成堰塞湖。大量崩塌和滑坡松散体堆积在坡面和沟谷中,在上游汇水、天然降水、地下水等水动力激发下,形成泥石流。大规模的泥石流从支沟进入主河,也会形成泥石流堰塞坝和堰塞湖。

地震直接诱发的山地灾害主要是崩塌和滑坡,结合具体的地貌条件、水文条件和松散体规模,衍生出泥石流和堰塞湖灾害,从而形成地震山地灾害链,即:崩塌、滑坡→(泥石流→)堰塞湖→溃决洪水或泥石流。

2.4 分布

通过对汶川地震次生灾害的遥感解译和野外调查,初步发现滑坡和崩塌2万余处。对这些数据进行初步分析发现,滑坡数量与距主破裂带的距离呈较好的相关关系,即随距破裂带的距离增大,滑坡数量急剧减少,主要分布在距破裂带10公里的范围内,以距破裂带的距离增大而成带状递减。堰塞湖主要分布于破裂带附近,沿破裂带呈带状分布,沿河流呈串珠状分布。在这次地震中,堰塞湖一般由大型的滑坡和崩塌形成,而堰塞湖沿断裂带分布的特点进一步证明了大型的滑坡、崩塌沿断裂带呈带状分布的规律。地震次生山地灾害空间分布的另一特点是沿交通线分布,从漩口镇到映秀镇的滑坡和崩塌密集地沿国道312线分布,在48公里的线路内,有159处滑坡和崩塌,其线密

度达 3.3 处 / 公里。

3 震后主要次生灾害的发展趋势分析

汶川地震的重灾区位于龙门山区,属于青藏高原东部的前缘过渡地带,是中国地貌的第二阶梯与第一阶梯的过渡带东部边缘,新构造运动活跃。大部分区域为典型的高山峡谷地貌,海拔高度一般为 2 500—3 500 米,最高为茂县境内九顶山 4 984 米;东部边缘为海拔高程 500 米左右的平原;灌县(都江堰)—安县断裂基本沿山地与平原交接带展布,构成了地貌反差强烈的成都平原与高山区的分界线。该区域气候主要受季风控制,东部迎风坡雨泽充沛,是四川著名的鹿头山暴雨区所在地;西部背风坡岷江河谷雨水稀少,气候干燥,但降雨集中,多局地性暴雨。上述条件使得该区域成为中国西部泥石流、滑坡的活跃区,区内在汶川地震前有滑坡 3 300 处、崩塌 492 处、泥石流 501 处。

在地震荷载作用下,斜坡的整体性遭到破坏,降低了斜坡岩土体的抗剪强度,使得大量斜坡处于欠稳定状态。在降雨条件下,雨水沿坡面裂隙入渗,进一步降低边坡的稳定性。因而,在近 5 年内,地震区还会发生大量的滑坡和崩塌;随着时间的推移,不稳定斜坡数量逐渐减少,滑坡和崩塌活动将呈现逐渐减弱的趋势,估计约持续 10 年。

地震诱发崩塌、滑坡产生了大量的松散固体物质,使得该地区的泥石流活动主要受降雨条件的控制。地震后该区域的泥石流活动的数量将增加,泥石流爆发需要的激发雨量条件将降低,泥石流爆发的频度会增加。随着雨季来临,在暴雨的激发下,泥石流将开始强烈活动。参照 1973 年四川炉霍地震(7.9 级)产生泥石流呈带、呈群分布现象^[6],以及 1976 年松潘—平武地震(7.2 级)后,九寨沟进入 10 余年的泥石流活动活跃期^[7],可以预测:泥石流活动将在未来 5 年内进入极

度活跃期,随后逐渐衰减,持续时间约 20 年。

处于高危状态的部分堰塞湖,随着汛期的来临,其风险将会增加。堰塞湖成为震后最为危急的次生灾害,受到中国政府的高度重视,已经开展危险性评估和风险分析,制定临灾预案,采取工程措施与非工程措施相结合的排险方案来减小风险,保证人民生命财产安全。在未来泥石流、滑坡的强烈活跃期内,大规模的滑坡、泥石流仍有堵江形成堰塞湖的可能,应在今后 5—10 年内,注意对堰塞湖危害的防范。随着滑坡、泥石流活动强度的减弱,堰塞湖的形成概率将逐渐降低。

本次地震引发的次生山地灾害,表现出典型的灾害链形式。在未来 5—10 年内,因滑坡、泥石流强烈活动,灾害链表现比较突出;随着泥石流、滑坡的活动强度降低,灾害链表现相对弱,出现概率减小。

4 次生山地灾害防治对策

地震次生山地灾害的防治在不同的阶段有不同的对策,主要分应急抢险和灾后重建两个阶段。

4.1 应急抢险阶段的防治对策

(1)全面调查堰塞湖分布,进行溃决危险性分析。采用高分辨率遥感影像分析解译震区滑坡和泥石流堵塞河道形成的堰塞湖,掌握堰塞湖的数量、分布和性质,开展现场考察和勘察,进行堰塞湖溃决危险性分析和风险排序,作为抢险救灾决策的依据。

(2)开展重点堰塞湖的监测预警,制定减灾方案,预防次生灾害。对高风险堰塞湖布设监测预警系统,实时监测水情和坝体稳定状态,分析堰塞湖的溃决条件,预测溃决时间及泛滥范围,制定工程排险措施和下游危险区的临灾预案,一旦发现险情,及时预警并组织撤离泛滥范围内的人员和财产。



中国科学院

(3)注重灾民临时安置点的泥石流、滑坡灾害风险评估。对灾民安置场所和抢险救援人员居住场所进行山地灾害评估,避免这些场所设置在泥石流和滑坡的高危险区。对确实无法避开危险区的临时场所,必须严密监测滑坡和泥石流活动,制定相应的临灾预案,以防地震救援中的次生灾害。

4.2 灾后重建阶段的防治对策

(1)加强震后滑坡和泥石流灾害监测预警。震后滑坡和泥石流灾害多数由强降水诱发,应加强降水(特别是局地强降水)的监测和预报,及时做出滑坡和泥石流灾害预测预报。同时,对具有重要危害对象的滑坡和泥石流点进行监测和预警,减轻滑坡和泥石流灾害。

(2)进行灾后重建场址的地质灾害风险评估,选择安全的场所。在对灾区进行系统的调查和勘察后,排查重大灾害隐患点,进行灾害风险分析,选择相对安全的区域作为灾后重建的场址,避免重大人员伤亡。

(3)治理重点灾害,确保重建安全。对无法避开灾害的灾后重建点,进行详细的勘察,查明泥石流、滑坡、堰塞湖的性质、规模、潜在危害,采取工程措施、生态措施和预警措施相结合的方法,进行综合治理和灾害监测,保证重建工程的安全。

(4)保护生态环境,预防工程诱发灾害。山区土地资源奇缺,在风险评估的基础上,评估山区人口容量,将多余人口尽量移出山区,减小生态和环境的压力。在城镇和村庄重建过程中,尽量避免开挖边坡,保持坡面自然状态,避免诱发新的滑坡。在山区道路恢复重建中,进行道路地质灾害评估,对大型滑坡和泥石流灾害点和隐患点重新选线,尽量采取绕避方案,从源头上减少灾害。

(5)堰塞湖后续处理与资源利用。开展系统的堰塞湖危险性评估,根据危险程度,

分别采取应对措施。对于危险堰塞湖进行排险处置,降低风险。对稳定的堰塞湖,可以进行资源开发,改造为水利水电设施,或者开发为旅游景点。

5 结论

发生于青藏高原东缘的龙门山断裂带的中国汶川 8.0 级地震由龙门山断裂带的中央断裂映秀—北川断裂单向破裂引发,震后高强度余震在龙门山断裂带的 3 大断裂上频繁发生,震中位置总体由南西向北东方向推移。

地震引发主要次生山地灾害是崩塌、滑坡、堰塞湖和泥石流。崩塌、滑坡成为阻断交通的主要次生灾害,崩塌、滑坡使得道路不通而延误的时间,绝大部分超过了生命搜救的最佳时间 72 小时。极震区有明显危害和威胁的堰塞湖 33 个,在同一流域上呈串珠状分布,具有级联效应,堰塞湖溃决成为震后最大的次生灾害威胁,受溃决洪水威胁的人口多达上百万。地震直接诱发的山地灾害形成灾害链,即:崩塌、滑坡→(泥石流→)堰塞湖→溃决洪水或泥石流。次生灾害主要沿破裂带密集分布,并随距破裂带的距离增大而急剧减少。

震后次生灾害将进入活跃期,崩塌、滑坡的活跃期可能持续 5—10 年,泥石流的活跃期将可能持续 20 年。在未来 5—10 年内,因滑坡、泥石流强烈活动,灾害链表现比较突出;随着泥石流、滑坡的活动强度降低,灾害链表现相对弱,出现概率减小。

根据次生山地灾害的特征和发展趋势,不仅要在震后采取应急减灾措施防止次生山地灾害造成更大的危害,特别是堰塞湖的排险应放到首位,还要在震后的恢复重建中采取减灾措施,防止次生山地灾害对恢复重建的基础设施和重建场址造成危害。

主要参考文献

- 1 Deng Q, Chen S, Zhao X. Tectonics, seismic activity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology*, 1994, 29(3): 389-403(in Chinese).
- 2 Tang R, Han W. Active faults and earthquakes in Sichuan Province. Beijing: Seismology Press, 1993, 123-132 (in Chinese).
- 3 Costa J E, Schuster R I. The formation and failure of natural dams. *Gel. Sco. America bulletin*, 1988, 100: 1 054-1 068.
- 4 Costa J E. Flood from dam failures. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 1985, 85-560: 54.
- 5 Dai F C, Lee C F, Deng J H *et al.* The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China. *Geomorphology*, 2006, 73: 277-278.
- 6 田连权. 四川炉霍地震泥石流. 泥石流(三). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986, 58-66.
- 7 Cui P, Liu S Q, Tang B X *et al.* Debris flow prevention pattern in national parks. *Science in China Ser.* 2003, 46: 1-11.

Geo-hazards in Wenchuan Earthquake Area and Countermeasures for Disaster Reduction

Cui Peng Wei Fangqiang Chen Xiaoping He Siming

(Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS 610041 Chengdu)



中国科学院

The devastating Wenchuan Earthquake occurred in Wengchuan, Sichuan Province, China, with a magnitude of 8.0 on May 12. The main earthquake zone was extended along the Longmenshan fault with 300 kilometers in length on the East edge of Tibet Plateau. Numerous geo-hazards broke out simultaneously and rock avalanches, rock flows, landslides, and debris flows responded the earthquake violently. Many roads were destroyed by rock avalanches, rock flows, landslides, which makes succor more difficulty. Debris was dashed into river channels at different sections, forming a couple of dozens of barrier lakes. These earthquake-lakes not only have flooded human habitations, roads and farmlands in the upstream but also would pose a great threat to the downstream cities once it were to break up. The geo-hazards in quake hitting area concentratively appear in the area very near faults. The post-earthquake geo-hazards will continue for years. At last, the countermeasures for disaster mitigation are suggested.

Keywords Wenchuan, earthquake, landslide, debris flow, dammed lake, disaster chain, disaster nitigation

崔 鹏 中国科学院成都山地灾害与环境研究所研究员, 博士生导师, 中国科学院山地灾害与地表过程重点试验室主任, 中国科学院东川泥石流观测研究站站长, *Journal of Mountain Science* 主编。主要研究领域为山地灾害与水土保持, 在泥石流起动机理与基于形成理论的减灾新技术、山区道路山地灾害防治理论与技术、风景区泥石流防治等方面做了较多的工作。曾经获得国家杰出青年科学基金和中国科学院“百人计划”项目资助。E-mail: pengcui@imde.ac.cn