

文章编号: 1006-6616 (2008) 02-0109-08

[编者按] 本文在实地调查的基础上,对四川汶川强震次生地质灾害进行了较全面地研究,较深入地探讨了次生地质灾害的类型和次生地质灾害的主要特征,主要涉及分布特征、地震强度与滑坡等的关系,以及地震滑坡快速启动机理等,还着重阐明了它与降雨型地质灾害的区别,提出了次生地质灾害某些发育规律的认识。这不仅具有理论意义,而且对次生地质灾害的治理和防灾减灾,有着重要现实意义。在四川汶川特大地震后,我所在部、局、院的直接领导下,立即行动起来,随队奔赴重灾区开展了多方面的工作。今后,我们将继续以《地质力学学报》为平台,陆续报道有关调研成果,欢迎投稿!

四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析

张永双^{1,2}, 雷伟志^{1,2}, 石菊松^{1,2}, 吴树仁^{1,2}, 王献礼^{1,2}

(1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川汶川发生里氏 8.0 级地震给灾区人民带来了巨大的灾难和损失,特别是山区地震次生地质灾害所带来的严重后果是人们始料未及的。本文主要报道了四川境内震中附近几个重灾山区的地震次生地质灾害的初步调查成果,简要论述了地震诱发的滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝和沙土液化等次生地质灾害发育特征及其危害,提出了地震次生地质灾害某些发育规律方面一些认识和今后需要进一步研究的问题,对于灾后重建和高烈度区城镇规划具有一定的指导意义。

关键词: 汶川地震; 次生地质灾害; 滑坡; 堰塞湖

中图分类号: P694, P315

文献标识码: A

0 引言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川汶川发生里氏 8.0 级地震,IX 度以上烈度区和余震

收稿日期: 2008-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号 40672207)和地质力学所基本科研业务费项目(DZLXJK200708)资助。

作者简介: 张永双(1968-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail:

zhys100@sohu.com.

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.>

分布区沿北东向龙门山活动断裂带分布，长度近 300km（图 1）。由于地震震中位于人口密集的四川省成都盆地西缘的龙门山区，导致人员、财产损失惨重，特别是山区地震次生地质灾害所带来的严重后果是人们始料未及的。5.12 特大地震发生后，为响应国土资源部和中国地质调查局抗震救灾应急行动，地科院组成以董树文副院长为组长的汶川地震活动断裂和次生地质灾害调查组，参加部地质灾害应急救援行动。笔者作为调查组成员，于 5 月 16 日至 24 日对四川境内震中附近几个重灾山区的典型地震次生地质灾害开展了野外调查工作，在地震次生地质灾害类型、发育特征及其分布规律等方面获得了一些认识，尤其是深感地震次生地质灾害与降雨型地质灾害之间存在着明显的差异，值得提出来供广大同行和有关部门在灾后重建和高烈度山区城镇规划过程中参考。

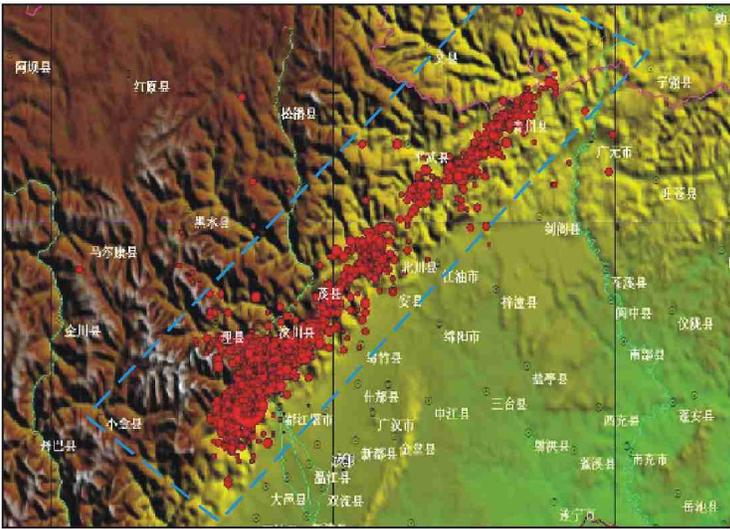


图 1 5.12 特大地震重灾区位置示意图

Fig 1 Location of the 5.12 strong earthquake-damaged area

1 次生地质灾害的类型和主要特征

1.1 地震次生地质灾害的类型及危害

根据野外调查，5.12 四川汶川地震诱发的次生地质灾害类型主要有：滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝和地震沙土液化等（图版一）。

在上述次生地质灾害中，滑坡和崩塌的危害最大，不仅造成斜坡（边坡）、公路路堤发生破坏、堵塞公路和河道（图版一 A, B, C），给震区救灾抢灾物资的运输带来很大的困难，而且城镇建筑后缘的斜坡发生崩塌或滑坡直接掩埋房屋和过路人员，成为本次地震的重要致灾因素。

地震直接诱发的泥石流多为坡面碎屑流，其危害性比大型滑坡和崩塌相对较小，而具有显著危害性的沟谷型泥石流多在震后的降雨作用下发生，具有一定的滞后性（不排除局部地区在地震的同时存在降雨过程）。无疑，地震作用为沟谷型泥石流提供了大量的松散物质来源（图版一 D）。

地裂缝包括地震作用直接产生的地裂缝（地震地裂缝）和地震滑坡后缘的地裂缝，尽管

它们成因不同,但都可以造成地面破裂、下沉,危害公路、桥梁等设施的安全(图版一E, F, G)。

地震砂土液化是典型的地震次生地质灾害,在地震过程中出现地裂和喷砂冒水现象,主要位于宽阔河谷中的高河漫滩或低阶地,部分位于盆地的低洼处。5.12地震在汶川县漩口—映秀镇间的岷江河谷内的高河漫滩发育了较大范围的地震砂土液化现象(图版一H)。

1.2 地震次生地质灾害的主要特征

多年来,国内外学者对地震次生地质灾害的研究一直没有间断,主要涉及地震地质灾害的分布特征^[1~3]、地震滑坡的快速启动机理^[4~5]、地震强度与滑坡的关系等^[6~8],取得了不少有价值的成果。由于四川5.12地震的发震断层属于我国罕见的逆冲型、震级大、烈度高,因此地震次生地质灾害发育程度极高,影响范围广,特别是在表现特征方面与降雨型地质灾害有很大的差异(图版一,图版二)。

(1) 地震滑坡、崩塌的密度比降雨型滑坡、崩塌高得多,在震中区常密集成群,单个出现的滑坡比较少(图版一C)。随着与震中区距离的加大,密度逐渐降低,单体滑坡也比较多见。

(2) 地震滑坡、崩塌的后缘高度远远大于降雨型滑坡、崩塌,通常降雨型滑坡发育在斜坡中下部,而地震滑坡一般发育在斜坡的中上部,可以形象地形容其为“劈掉半边山”(图版一A,图版二A)。

(3) 地震滑坡、崩塌的规模和分布范围通常很大,常以灾害群或灾害链的形式出现,远远大于降雨型滑坡、崩塌的规模,因而其危害性更大。根据野外调查,强震区地震诱发的大型滑坡(体积 $\geq 100 \times 10^4 \text{ m}^3$)和大型崩塌(体积 $\geq 10 \times 10^4 \text{ m}^3$)很常见,是中断交通、堰塞河道的主要原因(图版二A, B, C, D)。

(4) 地震次生灾害中岩体滑坡和岩土混合型滑坡占有相当大的比例,大型次生岩体滑坡的形成通常是因地震作用使岩体中的节理面、层面瞬间贯通,需要较高的动力促发条件,这也是降雨作用所不能及的。

(5) 地震作用既可以导致老滑坡复活,形成复活型滑坡(图版二E),又可以产生地震新生滑坡(照片)。野外调查和初步分析发现,在震中区以新生滑坡为主,复活型滑坡数量相对较少,以往经过治理的滑坡体的整体稳定性普遍较好。这也从另一个角度说明地震滑坡与降雨型滑坡的启动机理是不同的。

(6) 快速滑动是地震次生滑坡的重要特征。大规模的高空快速滑动是产生滑坡堰塞湖的主要原因之一,在高空快速滑动过程中存在明显的气垫效应,并可以产生巨大的气浪,因而冲击力强、破坏性大,堰塞坝有时可以保留原有斜坡岩体的结构痕迹(图版二A, B, C, D)。

(7) 地震次生崩塌具有明显的抛掷效应,崩滑体脱离斜坡后从高空坠下,这是野外调查时在强震区沿途看到很多车辆被砸毁的主要原因之一,因而其危害性很大。

(8) 地震次生灾害在降雨作用下可以迅速发生灾种的演变,从而再次产生进一步的危害。例如,堆积于沟谷中的崩滑滑坡体在降雨作用下可以转变为泥石流,堆积于边坡中下部的崩塌体可以进一步转变为滑坡,地震产生的山体松动、危岩体在后续降雨作用下可能进一步变形破坏,应高度重视(图版一D,图版二H)。

2 对地震次生地质灾害分布规律的初步认识

通过野外调查资料的初步统计分析, 5.12 地震次生地质灾害的空间分布主要具有如下规律:

(1) 次生地质灾害类型多种多样, 但是在山区以滑坡、崩塌和泥石流为主, 地裂缝主要位于发震断裂或次生活断断裂附近, 其总体走向与地震带走向一致。由于 5.12 特大地震属于逆冲型机制, 地表破裂的发育程度远比走滑型和拉张型地震低。地裂缝主要与地震带走向一致, 表现为硬壳层或基岩的挤压断裂或分支羽裂, 构造成因的拉张和剪切裂缝比较少见。在发震构造的识别过程中, 要特别注意区构造地裂缝和滑坡、崩塌引起的地裂缝, 这是不能忽视和混淆的。

(2) 地震诱发崩滑体的规模大小和密度与地震震级大小和震中距离存在着较好的对应关系。据初步调查资料分析, 5.12 特大地震次生地质灾害的分布密集带位于强震区, 与等震线基本一致。绝大部分地震滑坡、崩塌处于 $M_s 5.0$ 级以上的震区, $M_s 6.0$ 级以上震区内的崩塌、滑坡数量显著增大; 根据烈度统计, 崩塌滑坡大多发生在 VI 度及 VI 度以上的地区, VII 度以上发生的可能性急剧增大, 显然二者是吻合的。随着与强震区距离的增大, 次生灾害的规模和密度急剧降低, 这与鲍叶静等 (2005) 的统计结果是一致的^[5] (图 2)。

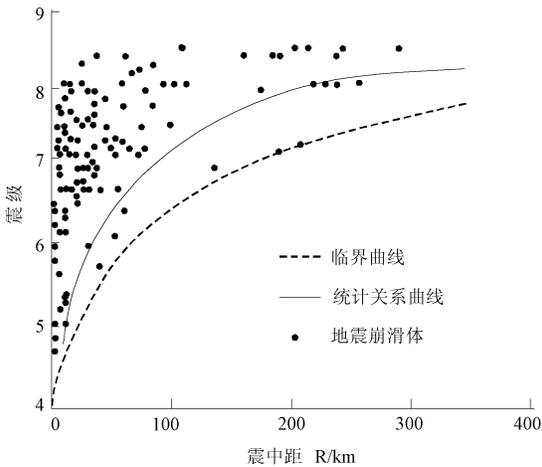


图 2 地震崩滑体与地震强度的关系 (据鲍叶静等, 2005)^[5]

Fig 2 Relation between seismic magnitude and induced landslides (after Bao Yejing et al., 2005)^[5]

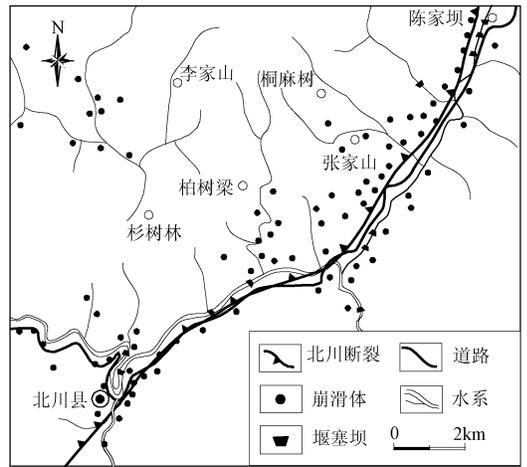


图 3 北川县城附近崩滑体分布与断裂带关系示意图

Fig 3 Relation between the Beichuan fault and earthquake-induced landslides near the county seat of Beichuan

(3) 地震滑坡、崩塌的分布不仅受岩性 (如志留系泥板岩、三叠系飞仙关组泥岩等) 的控制, 而且与断裂构造有密切的关系 (图 3)。根据野外调查表明, 5.12 特大地震诱发的大型滑坡、崩塌绝大多数与断裂带有关, 具有明显的岩体结构和岩性双重控制性。滑坡堰塞湖的发育部位除了受软弱岩体的控制外, 绝大多数与断裂带有关。例如, 安县睢水河堰塞湖, 青川县红石河堰塞湖等。

(4) 地震次生灾害可以多种形式并存, 而且可能混杂在一起, 如滑坡的旁侧可能与崩塌相连, 河谷的两岸滑坡与崩塌并存, 睢水沟口邓家坪堰塞坝就是分别由滑坡和崩塌共同构成

的。地震次生灾害的形成过程呈现出联动效应（灾害链），在山区的表现是以滑坡崩塌群的形式出现，两座山拼合在一起（两岸斜坡相向滑动）的现象也比较常见。

(5) 地震砂土液化作为典型的次生地质灾害类型在山区规划重建过程中是不容忽视的，其主要位于宽阔河谷中的高河漫滩或低阶地，以及山间盆地富含粉土和粉细砂的低洼地带，在灾后重建选址或灾民临时安置过程中必须注意这类问题。

(6) 降雨型滑坡与地震次生滑坡的主导诱发因素不同，它们在空间上的发育规律往往是不一致的。传统的降雨型地质灾害易发性分区结果由于考虑的因素与地震次生灾害不尽相同，因而分区结果是不一致的，灾后重建和规划过程中使用的地质灾害易发性分区图应分别编制，不能混为一团。

(7) 对于滑坡堰塞坝稳定性的分析，要考虑多方面的因素，如坝体的物质组成和结构、堰塞湖形成的水压力及其变化等。一般而言，土体夹杂块石形成的坝体相对比较稳定，而缺少粗大块石的细粒土体构成的坝体稳定性较差，往往可能在水位尚未漫过坝体时就发生溃决。以安县睢水镇邓家坪堰塞坝为例，在现场调查后过程中，我们发现堰塞坝主要由右岸（西岸）风化卸荷带形成的滑坡体构成，岩性为下三叠统飞仙关组的紫红色泥岩和白云质灰岩块石，冲至左岸公路；左岸（东岸）边坡由中侏罗统厚层白云质灰岩构成，顺坡向构造节理发育，在卸荷作用和地震动力诱发下形成大型崩塌体，崩塌块石最大直径可达 10m，堆积于公路，并与上述滑坡体对接成坝（图版二 A, B）。堰塞坝宽近百米，高出河底近 30m，坝后壅水高 20 余 m，水位上升后便从右岸公路块石堆积处泄洪。根据堰塞坝体的结构和库水两方面因素的初步分析，认为该堰塞坝总体稳定性较好，一般不会发生瞬时溃坝，事实证明上述认识是正确的，这为当地抗震救灾工作赢得了时间，有效地发挥了地震次生灾害研究在地震抢险救灾中的作用。

4 结语

在山岳地区，地震诱发的滑坡崩塌灾害有时比地震直接造成的危害还要大，5.12 特大地震就是典型的例证。人们已经认识到在研究龙门山地区活动断裂和地壳稳定性的同时，必须重视地震次生灾害的研究，这也是灾区恢复重建迫切需要解决的问题。我们痛定思痛后认为，5.12 特大地震既给我们带来了灾难，也为科学研究带来了机遇，应在服务灾后重建的同时，对某些基础理论和应用方面开展深入研究。针对 5.12 特大地震诱发的地质灾害，有必要在以下方面开展进一步的研究工作：

- (1) 地震次生灾害的发育规律和预测理论研究；
- (2) 地震高速滑坡的机理及堰塞坝的稳定性评价研究；
- (3) 西南山区内外动力灾害作用的耦合分析和研究；
- (4) 重灾县城恢复重建或选址的工程地质力学问题研究；
- (5) 地震次生灾害的灾情评估方法和途径；
- (6) 高烈度地区建设用地地质灾害危险性评估技术规范；
- (7) 5.12 特大地震的遗址保护和地震博物馆建设方案研究。

致谢：本次调查工作是随地科院“汶川地震活动断裂和次生地质灾害调查组”一起完成的，参加野外调查工作的人员还有：董树文研究员、吴珍汉研究员、张岳桥研究员、杨农研究

员、陈正乐研究员、施炜副研究员，在此一并表示感谢！

参 考 文 献

- [1] 孙崇绍, 蔡红卫. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6 (1): 25 ~ 30.
- [2] 周本刚, 王裕明. 中国西南地区地震滑坡的基本特征 [J]. 西北地震学报, 1994, 16 (1): 95 ~ 103.
- [3] 邹谨敏, 邵顺妹, 蒋荣发. 古浪地震滑坡的分布规律和构造意义 [J]. 中国地震, 1994, 10 (2): 168 ~ 174.
- [4] 胡广韬. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [5] 毛彦龙, 胡广韬, 赵法锁, 等. 地震动触发滑坡体滑动的机理 [J]. 西安工程学院学报, 1998, 20 (4): 45 ~ 52.
- [6] 鲍叶静, 高孟潭, 姜慧. 地震诱发滑坡的概率分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (1): 66 ~ 70.
- [7] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述 [J]. 灾害学, 2003, 18 (4): 64 ~ 70.
- [8] 张春山, 张业成, 吴满路. 南北地震带南段水文地球化学特征及其与地震的关系 [J]. 地质力学学报, 2003, 9 (1): 21 ~ 30.

GENERAL CHARACTERISTICS OF 5. 12 EARTHQUAKE-INDUCED GEOHAZARDS IN SICHUAN

ZHANG Yong-shuang^{1,2}, LEI Wei-zhi^{1,2}, SHI Ju-song^{1,2}, WU Shu-ren^{1,2}, WANG Xian-li^{1,2}

(1. Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: An earthquake of $M_s 8.0$ hit Wenchuan, Sichuan, on May 12, 2008 at 2: 28 p. m. Beijing time, which brought serious disasters and great loss of property to the people of the earthquake-hit areas. Especially the serious consequence that the earthquake-induced geohazards in mountainous areas caused was unexpected. This paper mainly reports the primary investigation results of the earthquake-induced geohazards in some worst-hit mountainous areas near the epicenter in Sichuan, briefly describes the characteristics of development and harm of earthquake-induced geohazards such as landslide, rockfalls, debris flow, ground fissures and sand-soil liquation and presents some ideas about the development mechanisms of earthquake-induced geohazards and problems that need to be further studied. All these have certain significance for guiding the reconstruction of earthquake-hit areas and planning cities and towns in high-intensity areas.

Key words: Wenchuan earthquake; earthquake-induced geohazard; landslide; dammed lake

图版 一



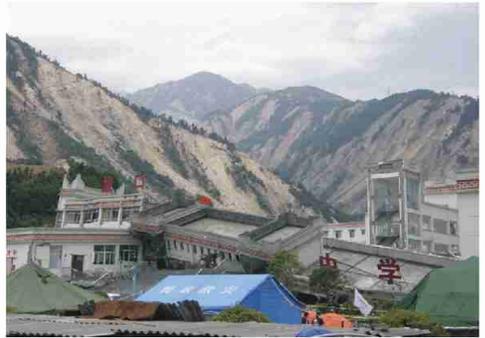
A. 北川县湔江大桥北滑坡阻断河道(镜向NW)



B. 安县雎水河巨大的崩塌块石堆积体阻断公路(镜向NE)



C. 汶川县映秀镇满山遍野的坡面碎屑流和滑坡群(NE)



D. 映秀镇北滑坡为泥石流准备了丰富的物质来源(NW)



E. 地震导致混凝土路面开裂(镜向W)



F. 北川县城近南北向街道产生鼓胀开裂(镜向S)



G. 北川县城南北向街道受挤压作用波状起伏(镜向N)



H. 岷江河漫滩的地震沙土液化现象(镜向E)

5.12 四川汶川地震诱发的主要次生地质灾害类型

Main types of geohazards induced by the 5.12 Wenchuan earthquake

图版二



A. 安县雒水镇邓家坪堰塞坝-右岸滑坡(镜向N)



B. 安县雒水镇邓家坪堰塞坝-左岸崩塌(镜向N)



C. 青川县红光乡东河口滑坡堰塞坝下游(镜向W)



D. 青川县东河口滑坡气浪抛出的碎屑物(镜向N)



E. 北川县老城区西侧复活型老滑坡掩埋房屋(镜向NW)



F. 北川县大型崩塌体掩埋了北川中学(镜向E)



G. 大型崩塌体受构造节理面控制(镜向N)



H. 地震造成青川县狮子梁岩体松动, 形成危岩体(W)

5.12汶川地震次生地质灾害的主要特征

General characteristic of earthquake-induced geohazards during 5.12 Wenchuan earthquake