

地震滑坡研究回顾与展望^{*}

李为乐¹, 伍 霁², 吕宝雄³

(1. 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;
2. 四川省林业勘察设计院, 四川 成都 610081; 3. 西北勘测设计研究院工程勘察研究分院,
甘肃 兰州 730050)

摘 要: 对国内外地震滑坡特别是汶川 8.0 级地震产生的地震滑坡的历史文献进行了系统回顾, 认为地震滑坡的研究可以概括为发育分布规律统计研究和动力学机理研究。其中对于地震滑坡发育分布规律的研究较深入, 取得了丰富的规律性认识; 而关于动力学机理的研究, 大多是基于表观现象的假设或推断, 缺乏物理或数值模拟实验的验证。建议进一步开展: ①基于地震波传播理论的物理或数值模拟; ②高速远程滑坡形成机制与运动特征研究; ③强震触发滑坡灾害链效应研究。

关键词: 地震; 滑坡; 分布规律; 动力学机理; 汶川地震; 高速远程

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)03-00103-06

本文所指“滑坡”(landslide)指斜坡物质(包括岩石、自然土、人工填土或以上的混合物)向下或向外的运动过程。其运动方式包括崩落(falling)、倾倒(topping)、滑移(sliding)、侧向扩离(sprea-ding)或流动(flowing), 即我们常说的“地质灾害”(geo-hazard), 包括崩塌、滑坡、泥石流等^[1]。

地震是触发滑坡灾害的主要因素之一, 地震震级(M_L)大于 4.0 时便会触发滑坡灾害^[2]。一次大型地震可以诱发数万处滑坡, 分布范围可达 10 万 km^2 , 地震滑坡造成的生命财产损失可以占到整个地震造成损失的 50%, 甚至更多^[2-4]。2008 年汶川 8.0 级地震触发约 5 万处滑坡, 滑坡灾害造成的人员死亡约占地震总死亡人数的 1/3^[5]。地震滑坡灾害因其巨大的致灾力而广泛引起人们的关注。有关地震诱发滑坡灾害的文字记载可以追溯到公元前 372 年的希腊地震, 最早对地震诱发地质灾害进行系统科学的描述是在 1783 年的意大利地震, 而第一次对地震诱发滑坡进行简单调查编目的是在 1957 年的美国加利福尼亚地震^[2,6]。

1980 年代以来, 随着遥感、GIS 技术的发展使大范围高精度的地震滑坡灾害调查编目成为可能,

大量关于地震滑坡的分布规律的研究也涌现出来。Harp 等人首次对 1976 年危地马拉 7.5 级地震诱发的滑坡进行了大范围的调查编目^[7]。近 20 年来, 1989 年美国加州洛马·普雷塔 6.9 级地震, 1999 年中国台湾集集 7.5 级地震, 2004 年日本新潟县中越 6.6 级地震, 2005 年克什米尔 7.6 级地震, 2008 年汶川 8.0 级地震等重大地震诱发的滑坡都被进行了详细的调查编目, 并得到广泛深入的研究^[3,8-15](表 1)。前人关于地震滑坡的研究主要包括两方面, 一方面是利用统计方法对地震滑坡的发育特征和分布规律进行分析研究, 另一方面是对地震诱发滑坡形成机制和内在动力学特征的研究, 下文分述之。

表 1 近 20 年来全球典型地震诱发滑坡事件

地震名称	时间	国家地区	震级	滑坡数/个	范围/ km^2
洛马·普雷塔	1989-10-17	美国	Mw 6.9	1 280	15 000
拉恰	1991-04-29	格鲁吉亚	M7.0	1 000	3 000
集集	1999-09-21	台湾	Mw7.5	10 000	3 750
埃瓦吉	2002-06-22	伊朗	Mw6.5	550	3 600
新潟县中越	2004-10-23	日本	Mw6.6	1 353	276
克什米尔	2005-10-08	克什米尔	Mw7.6	2 252	7 500
汶川	2008-05-12	中国	M8.0	50 000	100 000

^{*} 收稿日期: 2011-01-20

基金项目: 成都理工大学青年科学基金(2010QJ15); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)课题(2008CB425801); 地质灾害防治国家重点实验室自主研究基金

作者简介: 李为乐(1982-), 男, 安徽太湖人, 在读博士, 助理实验师, 主要从事 3S 技术在地质灾害防治中的应用研究工作。

E-mail: whyllw01@163.com

1 发育分布规律研究

地震滑坡的发育特征和分布规律的研究主要从统计学角度分析其发育特征同地震参数(震级、烈度、震源深度、震中距等)及斜坡环境参数(坡度、坡向、岩石类型等)之间的关系。前者主要对历史上多次地震事件进行统计,后者则多是针对单次地震事件进行研究。

1.1 地震滑坡与地震参数的关系研究

Keefe 通过对 1958–1977 年间全球 40 个历史地震事件进行研究,依据地震地质灾害运动的特性、内部破裂、地质环境等,将地震地质灾害分为三大类 14 小类,并对地震地质灾害分布与震级、震中距、地震烈度等地震参数的关系进行了统计,并首次绘制了地震地质灾害最大分布面积与地震震级的关系曲线^[2](图 1)。Rodriguez 在 Keefe 的工作基础上补充统计了 1980–1997 年全世界地震造成的滑坡灾害情况,分析了地震造成滑坡的最大密度、影响滑坡范围、滑坡数量以及滑坡类型^[16]。Papadopoulos 对希腊 47 次地震造成的滑坡进行统计,研究了震级与滑坡距离震中最远距离的关系^[17]。

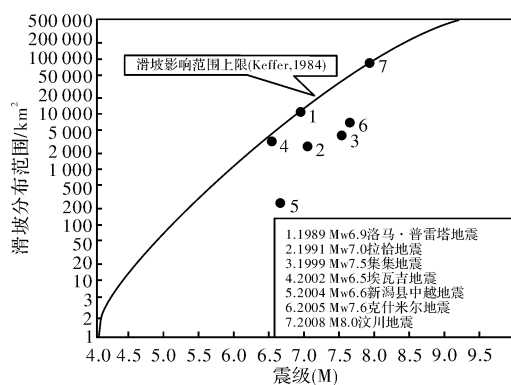


图 1 地震滑坡最大分布范围与震级关系图^[2]

我国学者李天池根据我国区域地质和地貌条件的特性,通过回归计算,得出了单个地震Ⅶ度以上烈度区的滑坡面积和震级的近似关系^[18]。孙崇绍等通过对中国历史地震资料(1500–1949 年)统计分析,得出了地震引起的滑坡与震级、烈度的关系^[19]。丁彦慧以西部地区 71 例地震中引发的 194 例滑坡为基础,进行相关分析,建立地震滑坡与地震参数间的关系,确定触发地震滑坡的最小震级、最小烈度和最大震中距^[20]。李忠生依据《中国地震目录》及其它主要地震目录,对 5 级地震以下的地震滑坡做了统计分析,得出了诱发地震滑坡的最小震级统计结果^[21]。

1.2 地震滑坡与斜坡环境参数的关系研究

Keefe 利用单因素方差回归分析方法分析了 1989 年加州洛马·普雷塔 6.9 级地震滑坡与震中距、坡度、岩性的关系^[3]。Parise 等根据 1994 年美国北岭地震情况的调查,分析了滑坡面积、形式,以及滑坡分布、影响因素(坡度、岩性)等与滑坡的关系^[22]。Liao 统计了集集地震诱发的滑坡与发震断裂距离、地层岩性、与河流的距离、与公路的距离、坡角、坡向的关系,发现在发震断层上盘滑坡主要发生在 S、SE 向斜坡上,在发震断层下盘滑坡主要发生在 S、SE 和 SW 的斜坡上,并认为这与地震过程中发震断层的错动方向有关^[23]。Wang 等对 1999 年台湾集集地震(Mw7.5)滑坡空间分布与岩石类型的关系进行分析,并对深层滑坡的地质特征进行了描述^[24–26]。Chigira 和 Yagi 通过野外调查和遥感解译对 2004 年日本新潟县中越 6.6 级地震触发的大型滑坡进行了分析,指出古滑坡复活和切坡是地震诱发深层滑坡的最主要因素^[27]。Hiroshi 等对 2005 年克什米尔 7.6 级地震地质灾害利用 2.5 m SPOT5 立体相对进行解译,获得了 2 424 处滑坡,通过统计分析指出:大型滑坡主要发生在凸形坡且其滑向主要为 S 和 SW 向^[28]。Sato 对克什米尔地震诱发的大型滑坡的统计分析发现,73% 的大型滑坡发生在坡面朝南和西南方,认为这些滑坡的滑动方向与发震时地壳主运动方向一致^[29]。Owen 等对 2005 年 Kashmir 地震地质灾害的统计分析发现,地质灾害主要集中分布于 6 个不同地质单元内,从而印证了地震地质灾害的分布受到地层岩性、坡体结构、地形地貌和人类活动的控制^[30]。

国内由于遥感、GIS 应用较晚,在汶川 8.0 级地震之前关于单次地震触滑坡分布规律的研究较少。康来迅研究了昌马断裂带地震滑坡,认为昌马断裂带地震滑坡主要发生在地震震中距 30°~50°的部位和山坡地形高差 100~300 m 的部位;地震滑坡规模、数量与断裂活动强度有密切的关系^[31–32]。汶川地震发生后,许多学者对其触发的滑坡的分布规律进行了研究。黄润秋和李为乐结合野外调查和遥感解译获取的 11 000 处地质灾害点对汶川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^[33–36]。祁生文等对汶川 4 000 多处滑坡灾害分布与岩性、高程、坡度的关系进行了统计^[37];苏凤环等以 ETM+ 为主要数据源,提取出汶川地震地质灾害约 5 700 处,并对其分布规律进

行了统计^[38]; 吴树仁等对地震诱发滑坡活动强度进行了分析评价^[39]。

此外, 还有学者在对地震滑坡空间分布规律的认识基础上进行了地震滑坡敏感性与危险性评价的探索性研究。Jibson 和 Harp 提出了 Newmark 法进行地震滑坡危险性评价的新方法^[40], Miles 和 Keefer 利用模糊逻辑系统建立了地震滑坡危险性评价综合区域模型 (CAMEL)^[41], Kamp 等利用多准则评价方法对 2005 年克什米尔 7.6 级地震滑坡进行了敏感性评价^[42]。乔建平等对汶川地震触发滑坡的危险性进行了区划^[43]。

2 动力学机理研究

对于强震触发滑坡, 尽管其空间分布规律的研究已经相当成熟, 全球范围内也已经有许多被详细研究的实例, 如美国麦迪逊峡谷滑坡^[44]、秘鲁 Nevados Huas 滑坡^[45]、台湾九份二山和草岭山滑坡^[46]、新几内亚 Bairaman 滑坡^[47]、日本 Ontake kuzure 滑坡^[48-50]、克什米尔地震 Hattian Bala 岩崩^[51]、1920 年的宁夏海原地震滑坡和 1933 年的四川叠溪地震滑坡^[52]等, 但成因机理与动力过程研究还非常不足。尤其是汶川地震触发的许多巨型、高速、远程滑坡的形成机制已远远超出了我们现有的认知水平, 如安县大光包滑坡^[53]。为了从本质上认识和掌握强震诱发地质灾害的成因机理, 首先必须对强震条件下斜坡的动力响应规律有充分的认识和了解。

Celebi 对实测地震数据的研究发现, 地震引起的破坏对山脊顶及陡崖顶趋于较大, 表明了地震波具有地形放大效应^[54]。Geli 对地形放大效应的研究的综述中指出, 地形放大效应发生在入射波长与地形坡宽近似相等的坡顶, P 波的放大效应比 S 波大, 地形放大效应随入射角度的增大而减小, 但随山脊方位角的放大效应还不很清楚, 地形放大效应随坡度的增大而增大^[55]。周维垣认为地震等动荷载对岩质边坡的稳定影响主要表现在地震波通过岩层面及岩体结构面时发生的反射及折射作用导致的超压增大及地震荷载与其他因素 (水的作用) 对斜坡体的共同破坏两个方面^[56]。张倬元等认为地震对边坡稳定性的影响表现为累积效应和触发效应两个方面^[57]。Hartzell 等对 1989 年洛马·普雷塔地震 Robinwood 山脊的破坏进行了研究, 发现该山脊破坏程度较大的主要因素为: 山脊内体波的多向反射及散射, 瑞利波与 Love 波的复杂作用, 主震源的方向性及波的扩散状态^[58]。

胡广韬等提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应假说^[59]。Ashford 和 Sitar 对 1994 年北岭地震的研究发现, 最严重的破坏发生在接近于最陡的坡处, 且集中在地域的南部, 认为地形放大效应具有方向效应^[60]。毛彦龙等认为地震时的坡体波动振荡在斜坡岩土体变形破坏过程中产生三种效应: 累进破坏效应、启动效应和启程加速效应^[61]。刘洪兵等对国内外地震波地形放大研究进行总结时指出, 地震波具有地形放大效应, 且这种效应受地震波传播方向和波的入射角度的影响^[62]。祁生文等认为地震边坡的失稳是由于地震惯性力的作用以及地震产生的超静孔隙水压力迅速增大和累积作用两个原因造成的^[63]。Aoi 等在 Iwate-Miyagi 地震中发现了世界地震记录史上少见的强地面垂直加速度现象, 提出了垂直强震动现象的“蹦床”模型, 即用运动员蹦床的过程来解释地震诱发的强地面垂直加速度不对称现象^[64]。唐春安等认为, 运用应力波在自由面的入、反射原理和加速度倍增效应, 更能从力学的更高层次上解释强地表加速度现象的机理, 并通过数值模拟再现了冲击载荷作用下的边坡表层散裂和抛射现象^[65]。崔芳鹏等认为地震崩滑灾害的形成是受到地域性和空间非均质性的地震纵横波时差耦合作用的结果^[66]。

对于汶川地震触发的滑坡形成机制, 殷跃平认为汶川地震诱发的大型滑坡具有“地震抛掷”-“撞击崩裂”-“高速滑流”三阶段特征, 在高速滑流中, 发生 3 种效应: 高速气垫效应、碎屑流效应和铲刮效应^[67-68]。黄润秋等通过地震条件下斜坡动力响应的现场监测、大型振动台模拟试验以及大量三维动力数值模拟等综合手段, 系统地研究了地震条件下斜坡动力响应规律, 认为强震条件下大型滑坡失稳破坏最基本和内在的破坏模式可用“拉裂-滑移”来概括, 主要发育拉裂-顺走向滑移型、拉裂-顺(层)倾向滑移型、拉裂-水平滑移型、拉裂-散体滑移型、拉裂-剪断滑移型等几类典型成因模式^[5,69]。方华等对汶川地震触发大型高速远程滑坡力学机理和控制因子进行了分析^[70]。但上述成果只是初步研究成果, 许多观点也还仅仅是推断或“概念模型”, 需要进一步开展更深入的现场调研与物理、数值模拟来验证。

3 研究展望

纵观国内外关于地震滑坡的研究, 得益于高精度遥感技术和 GIS 技术的发展应用, 对于地震滑

坡发育特征和分布规律的研究已较深入,取得了丰富的规律性认识;而关于其动力学机理的研究,大多是基于表观现象的假设或推断,缺乏物理或数值模拟实验的验证,观点分歧较大。

汶川地震地震动力强烈且发生在地质条件极其复杂的高山峡谷区,触发的滑坡分布范围广泛、数量众多,类型复杂,许多强震触发滑坡的客观规律也充分的显现出来,为地质工作者研究强震触发滑坡的动力学机理提供了难得的机会。通过对历史文献的分析,结合作者对汶川地震滑坡调查研究中遇到的现象和问题,本文提出以下几点研究课题,以供探讨:

(1)前期的遥感解译和野外调查中发现汶川地震滑坡具有显著的“上下盘效应”(发震断层上盘滑坡发育密度显著高于下盘)、“锁固段效应”(发震断层的错断转折部位的滑坡密度显著增高)和“方向效应”(背向震源或背向发震断层的滑坡要显著多于面向震源或发震断层)^[71-73]。这些现象必然与地震波的传播有关,需要从地震波传播理论出发,利用物理或数值模拟进行验证和解释。

(2)强震触发高速远程滑坡形成机制与运动特征研究。汶川地震触发了大量的大规模滑坡,其中绝大多数都表现出了高速远程碎屑化流动的特点。虽然对于高速远程滑坡的研究较多,但对其形成机理的认识,大多还停留在概念模型的阶段,缺乏正确、统一认识,需要进一步的深入研究,汶川地震为该项研究提供了大量的实例。

(3)强震触发滑坡灾害链效应研究。强震触发的滑坡不仅会直接对人类生命财产造成惨重损失,而且还会以灾害链的形式产生系列危害。

一方面地震触发的滑坡会堵塞河道形成堰塞湖,对上游形成回水淹没,如果堰塞坝溃坝又会对下游居民造成毁灭性灾难。如 1933 年叠溪地震便有数处大型滑坡堵塞岷江后溃决,致使下游 2 500 余人死亡^[74]。

另一方面,大量的滑坡形成的松散碎屑物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡,最终将以泥石流的形式携带到下游居民区和主河道,冲毁房屋建筑,堵塞主河道,抬升河床,造成严重的生命财产损失。如 2010 年 8 月 12-19 日在汶川地震重灾区绵竹、映秀、龙池等地泥石流群发,造成了惨重的人员伤亡和财产损失。仅绵竹清平乡就群发 11 条泥石流,在清平乡场镇形成了长达 3.5 km,宽 500 m,平均厚约 5 m(最大厚度超过 13 m),总方量约 600 万 m³ 的堆积和淤埋区,堵塞主河绵远河使之改道并抬高河床数米(图 2),造成 7 人遇难,7 人失踪,33 人受伤,直接经济损失达 6 亿元^[75]。

因此对地震滑坡危害性应该从灾害链的角度开展系统研究。

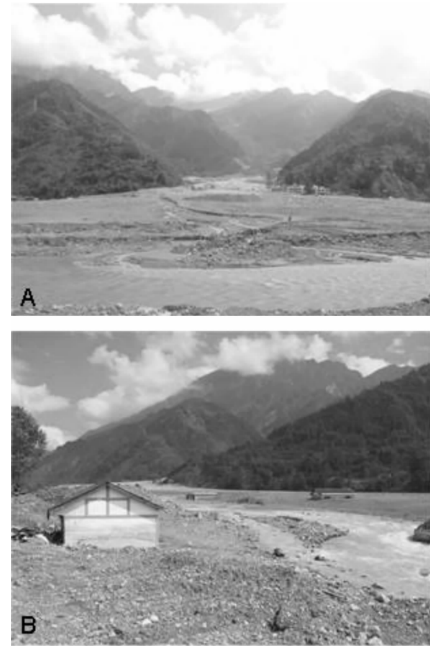


图 2 绵竹市清平乡文家沟泥石流照片(A. 全貌, B. 堆积区前缘,厚度约 3 m)

参考文献:

- [1] Lynn Highland. Landslide types and processes. USGS Fact Sheet 2004-3072[EB/OL]. (2006-01-25) [2010-11-01]. <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>.
- [2] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95: 406-421.
- [3] Keefer D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution: the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 2000, 58: 231-249.
- [4] Keefer D K, Larsen M. Assessing landslide hazards[J]. Science, 2007, 316: 1136-1138.
- [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[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [6] Keefer D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope failure hazards in seismically active regions[J]. Geomorphology, 1994, 11: 265-284.
- [7] Keefer D K. Investigating landslides caused by earthquakes - a historical review[J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23: 473-510.
- [8] Jibson R W, Prentice C S, Borisoff B A, et al. Some observations of landslides triggered by the 29 April 1991 Racha Earthquake, Republic of Georgia[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 963-973.
- [9] Huang Jujiang. Chi-Chi earthquake induced landslides in Taiwan[J]. Earthquake Engineering and Engineering seismology, 2000, 2(2): 25-33.
- [10] Mohammad R M, Shahryar Solaymani, Mohammad K J. Landslides triggered by the Avaj, Iran earthquake of June 22, 2002[J]. Engineering Geology, 2006, 86: 166-182.
- [11] Masahiro Chigira, Hiroshi Yagi. Geological and geomorphologi-

- cal characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan [J]. *Engineering Geology*, 2006, 82: 202–221.
- [12] Wang H B, Sassa K, Xu W Y. Analysis of a spatial distribution of landslides triggered by the 2004 Chuetsu earthquakes of Niigata Prefecture, Japan[J]. *Nat Hazards*, 2007, 41: 43–60.
- [13] Ulrich Kamp, 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] Owen L A, Ulrich Kamp, Khattak G A, et al. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. *Geomorphology*, 2008, 94: 1–9.
- [15] 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.
- [16] Rodriguez C E, Bommer J J, Chandler R J. Earthquake-induced landslides: 1980–1997[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, 18: 325–346.
- [17] Papadopoulos G A, Plessa A. Magnitude-distance relations for earthquake-induced landslides in Greece[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3–4): 377–386.
- [18] 李天池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测探讨[C]//滑坡文集(第二集). 北京: 中国铁道出版社, 1979: 127–132.
- [19] 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.
- [20] 丁彦慧, 王余庆, 孙进忠. 地震崩滑与地震参数的关系及其在边坡灾害预测中的应用[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(S1): 101–107.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Liao H W, Lee C T. Landslides triggered by the Chi-Chi earthquake, Asian association on remote sensing, Asian conference on remote sensing ACRS 2000 [EB/OL]. (2002–01–13) [2010–10–23]. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007.asp>.
- [24] 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.
- [25] Wang W N, Furuya T, Chigira M. Geomorphological precursors of the Chiu-fen-erh-shan landslide triggered by the Chi-chi earthquake in Central Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69: 1–13.
- [26] Wang W N, Wu H L, Nakamura H, et al. Mass movements caused by recent tectonic activity: the 1999 Chi-Chi earthquake in central Taiwan[M]. *The Island Arc*, 2003: 325–334.
- [27] 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.
- [28] Hiroshi P S, Hiroyuki H, Satoshi F, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT5 imagery[J]. *Landslides*, 2007, 4: 113–122.
- [29] Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery[J]. *Landslides*, 2007, 4: 113–122.
- [30] 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.
- [31] 康来迅. 昌马断裂带滑坡之研究[J]. *内陆地震*, 1988, 2(4): 376–381.
- [32] 康来迅, 邹谨敞. 昌马断裂带地震滑坡的基本特征[J]. *华南地震*, 1995, 15(1): 49–54.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Huang Runqiu, Li Weile. Fault effect analysis of geohazards triggered by Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 19–28.
- [37] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 39–49.
- [38] 苏凤环, 刘洪江, 韩用顺. 汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析[J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 956–963.
- [39] 吴树仁, 石菊松, 姚鑫, 等. 四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价[J]. *地质通报*, 2008, 27(11): 1900–1906.
- [40] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58: 271–290.
- [41] Miles S B, Keefer D K. Evaluation of CAMEL – comprehensive areal model of earthquake-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2009, 104: 1–15.
- [42] 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.
- [43] 乔建平, 蒲晓虹, 王萌, 等. 大地震诱发滑坡的分布特点及危险性区划研究[J]. *灾害学*, 2009, 24(2): 25–29.
- [44] Hadley J B. Landslides and related phenomena accompanying the Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959. U. S [J]. *Geological Survey Professional paper*, 1964, 435: 107–138.
- [45] Plafker G, Ericksen G E, Fernandez C J. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, 61: 543–578.
- [46] Chigira M, Wang W N, Furuya T, Kamai T. Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoiling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68: 259–273.
- [47] King J, Loveday I, Schuster R L. The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1989, 105: 257–270.
- [48] Endo K, Sumita M, Machida M, et al. The 1984 collapse and debris avalanche deposits of Ontake Volcano, central Japan [C]// Latter J H. *IAVCEI Proceedings in Volcanology*.

- Springer, 1989: 210–229.
- [49] Kobayashi I, Tateishi M, Yoshioka T, et al. Geology of the Nagaoka District[J]. Geological Survey of Japan, Quadrangle Series (Scale 1: 50, 000) Niigata (7), 1991, 38: 132.
- [50] Voight B, Sousa J. Lessons from Ontake-san: a comparative analysis of debris avalanche dynamics[J]. Engineering Geology, 1994, 38: 261–297.
- [51] S A Dunning, W A Mitchell, N J Rosser, et al. The Hattian Bala rock avalanche and associated landslides triggered by the Kashmir Earthquake of 8 October 2005[J]. Engineering Geology, 2007, 93: 130–144.
- [52] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [53] 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.
- [54] Celebi M. Topographic and geological amplification determined from strong motion and aftershock records of 3 March 1985 Chile earthquake[J]. Bull Ses Soc Am, 1987, 77: 1141–1147.
- [55] Geli L, Bard P Y, Jullien B. The effects of topography on earthquake ground motion: A review and new result[J]. Bull Ses Soc Am, 1988, 78: 42–63.
- [56] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [57] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [58] Hartzell S H, Carver D L, King K W. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood ridge, California[J]. Bull Ses Soc Am, 1994, 84: 1336–1349.
- [59] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [60] Ashford S A, Sitar N. Topographic amplification in the 1994 Northridge earthquake: Analysis and observation[C]//6th U. S. National conference on earthquake engineering, Oakland: Earthquake Engineering Institute, 1997.
- [61] 毛彦龙, 胡广韬, 毛新虎, 等. 地震滑坡启程剧动的机理研究及离散元模拟[J]. 工程地质报, 2001, 9(1): 74–80.
- [62] 刘洪兵, 朱晞. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 1999, 15(3): 20–25.
- [63] 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2792–2796.
- [64] Shin Aoi, Takashi Kunugi, Hiroyuki Fujiwara. Trampoline effect in extreme ground motion[J]. Science, 2008, 322: 727–730.
- [65] 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. 北京: 中国电力出版社, 2009: 258–262.
- [66] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 455–462.
- [67] 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.
- [68] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29–38.
- [69] 许强, 黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721–729.
- [70] 方华, 崔鹏. 汶川地震大型高速远程滑坡力学机理及控制因子分析[J]. 灾害学, 2010, 25(S0): 120–126.
- [71] 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.
- [72] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(S1): 7–14.
- [73] Li Weile, Huang Runqiu, Tang Chuan. Landslides triggered by the Mw 8.0 Wenchuan Earthquake in the Mianyu River Basin, China[C]//Proc of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 2010. London: Taylor & Francis Group, 2010: 373–384.
- [74] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国滑坡堵江事件目录. 地质灾害与环境保护. 1995, 6(4): 1–9.
- [75] 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.

Research on Landslide Triggered by Earthquake: Review and Prospect

Li Weile¹, Wu Ji² and Lü Baoxiong³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Forestry Survey and Design Institute in Sichuan Province, Chengdu 610081, China; 3. Institute of Engineering Prospecting, Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the review of historical documents on earthquake-triggering landslides at home and abroad, the study of earthquake-triggering landslides can be divided into the statistic study of development distribution and dynamical mechanism study, of which the former type of study is quite deep and some rules have been generalized; while the latter type mainly includes hypotheses or assumptions induced from superficial phenomena, lacking physical or numerical simulation experimental tests. Therefore, further studies should be conducted in the following three aspects: (1) the physical or numerical simulation based on the transmission principle of seismic wave; (2) the development mechanism and motional features of high-speed and long-runout landslides; (3) the chain effect of landslides triggered by strong earthquakes.

Key words: earthquake; landslide; distribution law; dynamical mechanism; Wenchuan Earthquake; rapid and long-runout