

# 汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比

许冲

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029

**摘要** 汶川地震滑坡编录结果表明,2008年5月12日汶川地震触发了197481处滑坡,面积约为1160km<sup>2</sup>,大致分布在一个面积约1.1×10<sup>5</sup>km<sup>2</sup>的区域内,是当前汶川地震滑坡最全面详细的编录成果,也是有记录以来单次地震事件触发滑坡数量最多的记录。其中196007处滑坡(占滑坡总数量的99.25%),面积为1150.622km<sup>2</sup>(占总滑坡面积的99.19%),分布在一个面积为44031km<sup>2</sup>、以映秀—北川地表破裂为近似中心的近椭圆形区域内。分析这196007处滑坡面积与滑坡数量的幂律关系,结果表明,面积在1×10<sup>4</sup>—1×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>之间的滑坡,滑坡面积与滑坡数量累加之间的幂律关系式可表示为 $\lg N(A)=-2.0745A+13$ ,判定系数 $R^2=0.9931$ ,表明该滑坡面积区内滑坡面积与滑坡数量之间具有良好的幂律关系。对比结果表明,汶川地震滑坡影响区面积略高于全球其他地震事件滑坡影响区面积的上包络线。汶川地震滑坡编录成果为后续汶川地震滑坡相关科学研究提供了重要的基础数据。

**关键词** 汶川地震滑坡;编录;滑坡强频关系;滑坡影响区面积

**中图分类号** P642

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.25.001

## Detailed Inventory of Landslides Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake and Its Comparison with Other Earthquake Events in the World

XU Chong

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract** It is indicated that on May 12, 2008, 197481 landslides triggered by Wenchuan earthquake ( $M_w$  7.9) in China, total affected area is about 1160km<sup>2</sup>, distributing in an area of approximate 110000km<sup>2</sup> by the latest studies. The inventory is the most detailed and comprehensive landslide inventory in the recent publications of landslide inventory related to the 2008 Wenchuan earthquake, it is also the largest landslide inventory for a single earthquake event at the beginning of records. Among of these landslides, 196007 landslides (account for 99.25%), with a total area of 1150.622km<sup>2</sup> (account for 99.19%), concentrate in an approximate ellipse area with a total area of 44031km<sup>2</sup>. The Yinxiu-Beichuan co-seismic surface rupture is the long axis of the approximate ellipse area. The power rules between cumulative landslide number and landslide area having size between 10000m<sup>2</sup> and 1000000m<sup>2</sup> related to the 2008 Wenchuan earthquake could be represented as a power law relationship, which is  $\lg N(A)=-2.0745A+13$  with  $R^2=0.9931$ . This result indicates a good power law relationship between landslide area and landslide number. The area affected by the 2008 Wenchuan earthquake slightly exceeds the upper bounds determined by single earthquake events all over the world. The inventory of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake provides an important basic data for the future research.

**Keywords** landslides triggered by Wenchuan earthquake; inventory; landslide area-frequency relationship; area affected by landslides

收稿日期:2012-07-13;修回日期:2012-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41202235,41004037);科学技术部国际科技合作项目(2009DF A21280)

作者简介:许冲,副研究员,研究方向为地震滑坡,电子邮箱:xuchong@ies.ac.cn,xc1111111@126.com

## 0 引言

地震滑坡编录工作是区域地震滑坡研究的基础,地震滑坡编录的完整性决定着后续地震滑坡区域研究的科学性<sup>[1]</sup>。发生于2008年5月12日14:28(北京时间)的 $M_w7.9(M_s8.0)$ 级汶川大地震,震中位于四川省汶川县,震源深度14km,造成了巨大的人员伤亡与经济损失。汶川地震发生于龙门山地区,是印度板块向北俯冲推挤欧亚板块,造成青藏高原隆升,以致在青藏高原东缘,沿着龙门山断裂发生错断的结果<sup>[2]</sup>。该地震产生了两条主地表破裂带,其中一条为240km长的映秀—北川地表破裂带,表现为右旋走滑性质;另一条为长72km的灌县—江油地表破裂带,以逆冲为主<sup>[3-5]</sup>。另外,地震还触发了一条长6km的北西走向的逆冲左旋走滑性质破裂带,名为小鱼洞地表破裂带。

地震区多为山盆交界地带的高山峡谷区,因此也触发了大量的山体滑坡。汶川地震滑坡详细编录是后续地震滑坡空间分布分析、危险性评价、泥石流研究、震区河流与地貌演化、活断层与滑坡的关系等研究的基础。本文基于高分辨率多源遥感影像人工目视解译与部分滑坡野外验证的方法,开展汶川地震滑坡详细编录工作。基于详细汶川地震滑坡编录图,开展滑坡强震关系研究;总结了其他单次地震事件触发滑坡情况,将汶川地震滑坡影响区面积与全球其他地震滑坡事件进行对比,分析了逆冲走滑性质断裂型地震与其他地震事件触发滑坡影响区面积的关系。

## 1 地震滑坡编录研究现状

### 1.1 地震滑坡编录方法

地震滑坡编录方法有野外实地调查和基于遥感影像调查两种主要方式。地震滑坡编录方法经历了如下发展阶段。

(1) 基于野外调查的滑坡编录。在遥感技术出现与发展之前,地震滑坡编录往往采用野外实地调查方法,该方法通常基于地形图、地质图等,将滑坡编绘到这些图件之上,实现滑坡编录图的制作。这种方法有很大的局限性,由于实地调查工作量大,所以一般只开展大规模或中等规模滑坡的调查,很难获得全面详细的地震滑坡编录图;因为缺少数据管理与分析方面的便利性,所以在后续统计滑坡数量、滑坡面积以及进行滑坡空间分布分析方面比较困难。

(2) 基于航片解译的纸质图编绘。随着遥感技术的出现与发展,基于遥感影像的滑坡人工目视解译逐渐成为地震滑坡编录的主要方法,早期的遥感影像主要是航片,该方法将滑坡位置或边界直接编绘到航片等遥感影像上,或者通过航片解译将滑坡编绘到其他图件上。这种方法得到的编录图虽然包括了一些小规模滑坡,得到了较全面的滑坡编录数据,但得到的编录图的介质依然是纸质的;因为可能的滑坡数量较多,获取准确的滑坡数量与滑坡面积较困难,所以在后续的滑坡统计分析方面依然存在困难。

(3) 纸质图编绘的数字化阶段。这一阶段是以航片解译

的纸质图编绘为基础的。计算机技术、遥感与地理信息系统(GIS)的出现与发展,实现了纸质滑坡编录图的数字化编绘工作,并可基于强大的GIS空间分析功能开展准确的地震滑坡空间分析工作。这种数字化的地震滑坡编录图可利用程度高,对地震滑坡科学研究起到重要的推动作用。

(4) 地震滑坡计算机屏幕人工目视解译与编录图制作一体化阶段。随着计算机技术、地理信息系统(GIS),尤其是遥感技术的发展成熟,大量的商业卫星投入使用,生成了大批高分辨率卫星影像。地震滑坡人工目视解译方法得到了进一步的发展,逐渐由在纸质的遥感影像上操作转移到面向计算机屏幕、GIS软件、数字化遥感影像的人工目视解译与编录图制作一体化的阶段。该方法需要首先将遥感影像进行精确的地理配准,然后面对计算机屏幕直接开展遥感影像的目视解译,还可以根据地形数据制作地震滑坡区的三维遥感影像,真实再现地震滑坡区域三维场景。这种方法也叫人机交互解译方法,该方法已经成为目前最常用的区域地震滑坡编录方法。经过地理配准的数字化格式的滑坡编录可以方便地开展地震滑坡空间统计分析与危险性评价等科学研究。

(5) 地震滑坡遥感影像自动提取方法。随着遥感图像处理技术的发展,滑坡自动提取技术也取得了一定的进展,其优点是效率高、阈值可调节性强,但是精度低,适合于震后滑坡应急调查与大滑坡调查。因为常将一些震前的滑坡或者裸露的山体、公路、居民区等识别成滑坡,因此基于滑坡自动提取方法的最终编录结果并不适合应用于后期的地震滑坡区域科学研究。

虽然基于遥感影像解译的滑坡编录方法在地震滑坡编录中逐渐占据了主导地位,但是现场调查工作不可忽视。现场调查是人工目视解译的一个很好的补充与辅助,通过现场调查可以制定区域内地震滑坡人工目视解译规则与标准,大体思路是基于现场调查与遥感影像,总结该地震事件地震滑坡的特征,制定解译标准,从而开始后续全面的滑坡人工目视解译。另外,难以仅根据遥感影像标定的滑坡,需要现场调查验证,以确认是否为地震滑坡。因此,地震滑坡编录应根据实际条件开展相应的地震滑坡野外考察工作。

### 1.2 其他地震滑坡事件编录

地震滑坡编录是后续地震滑坡科学研究的基础,如2010年4月14日的玉树 $M_w6.9$ 级地震,触发了2036处滑坡<sup>[6-7]</sup>,这些数据后续被用于滑坡空间分布规律分析<sup>[8-10]</sup>与基于不同方法的地震滑坡危险性评价<sup>[11-14]</sup>。2010年1月12日海地地震触发了30828处滑坡<sup>[15]</sup>,这一滑坡编录成果被用于基于二元统计方法的地震滑坡危险性评价<sup>[16]</sup>。由于编录人员对滑坡的认知程度与对地震滑坡的解译详细程度存在差异,且研究目的与使用的基础数据源不同,同一地震事件触发滑坡的不同编录成果可能差距较大。如2010年4月14日玉树地震、2010年1月12日海地地震、2005年10月8日克什米尔地震、2004年11月23日日本新潟县地震、1999年9月21日台湾

集集地震等的地震滑坡编录均存在多个版本。

一般前期基于地震应急,或者调查区域不全面的滑坡编录,往往缺失一些滑坡,得到的滑坡编录成果不完全。后期基于充足的时间与覆盖全部地震区的高分辨率遥感数据,才能获得详细全面的滑坡编录面数据。如2010年玉树地震与2010年海地地震,前期基于地震滑坡应急考查对滑坡位置进

行标定,得到滑坡点数据分别为282处<sup>[7]</sup>与7000处<sup>[8]</sup>,后续基于详细的高分辨率人工目视滑坡解译,得到两次地震事件触发滑坡的面数据分别为2036处<sup>[6-7]</sup>与30828处<sup>[15]</sup>。关于汶川地震滑坡编录成果,应急调查结果与不同的滑坡人工目视解译编录结果有多个版本,结果也存在较大差异。表1列举了一些汶川地震之外的单次地震事件触发滑坡编录成果。

表1 地震滑坡编录汇总

Table 1 Summary of earthquake-triggered landslide inventories

国家	地区	日期	$M_w$	$M_s$	类型	数量	面积/km <sup>2</sup>	参考文献
中国	玉树	2010-04-14	6.9	7.1	面	2036	1.194	[6],[7]
					点	282		[17]
海地	太子港	2010-01-12	7.0		面	30828	15.736	[15]
					点	>7000		[18]
日本	岩手-宫城	2008-06-14	6.9	7.2	点	4161		[19]
智利	艾森峡湾	2007-01-22	6.2	6.3	面	538	1.7	[20]
印巴	克什米尔	2005-10-08	7.6	7.7	面	1293		[21]
					点	2424		[22]
					面	2252	61	[23]
					面	1212	7.99	[24]
日本	新潟县	2004-10-23	6.6	6.8	面	>1000		[25]
						362		[26]
						1353		[27]
						4438		[28]
中国	台湾南投县集集镇	1999-09-21	7.6	7.3	面	10000		[29]-[33]
					面	20000		[34]
意大利	翁布里亚-马尔凯	1997-09-26	6	5.9	面	200		[35]
日本	兵库县	1995-01-17	6.9	6.8	点	674		[36]
美国	加州北岭	1994-01-17	6.7	6.8	面	>11000	23.8	[37]-[39]
美国	加州洛马普列塔	1989-10-17	6.9	7.1	点	>1046		[40]
厄瓜多尔		1987-03-05	7	6.9	点			[41],[42]
美国	科林加	1983-05-02	6.2	6.7	面			[1]
意大利	伊尔皮尼亚	1980-11-23	6.9	6.9	面			[43],[44]
美国	加州猛犸湖	1980-05-25-27	6.1		面	5200	6	[1],[45]
意大利	弗留利	1976-05-06	6.4		点			[1],[46]
危地马拉		1976-02-04	7.5		面	50000		[1],[47],[48]
美国	加州圣费尔南多	1971-02-09	6.5		面	>1000		[1],[49]
秘鲁		1970-05-31	7.8	7.9	点	>1000		[1],[50]
日本	今市市	1949-12-26	6.4		点			[1],[51]
新西兰	默奇森	1929-06-17	7.7	7.8	点			[52],[53]
美国	密苏里州新马德里	1811-12-16	8.3	8.8	点	>220		[54]

### 1.3 汶川地震滑坡编录现状及不足

汶川地震滑坡编录也存在多个版本,表2综合了文献[55]与一些新出版成果的最新统计。虽然有一些基于这些滑坡编录的地震滑坡危险性评价等科研成果<sup>[65-67]</sup>,但是这些滑坡编录数据存在的问题不容忽视,主要包括:(1)滑坡调查不

完整,研究区域未能覆盖全部震区;(2)中、小规模滑坡编录数据不完全,与实际情况相差较大;(3)一些研究成果<sup>[60]</sup>采用滑坡自动提取,精确度低,存在较多的将数个单体滑坡圈成一个滑坡的情况;(4)一些研究成果采用的是点要素标识滑坡,不适合用于地震滑坡体积求取等更深入的科学研究。

表 2 汶川地震滑坡编录成果对比

Table 2 Comparison between the inventories of landslides triggered by the Wenchuan earthquake

方法	编录类型	数量	面积	是否覆盖整个震区	文献来源
目视解译	点	<10000	无	基本覆盖	[56]
目视解译	点为主,大滑坡用面	16704	无	基本覆盖	[57]
目视解译	源区点	<10000	无	否	[58]
目视解译	源区点	约 60000	无	基本覆盖	[59]
自动提取	区	73367	未提供	否	[60]
目视解译	中心点、区	48007	>711.8km <sup>2</sup>	否	[61],[62]
目视解译	中心点、区	56000	811km <sup>2</sup>	否	[63]
目视解译	中心点、源区点、区	197481	1160km <sup>2</sup>	是	[64]

## 2 汶川地震滑坡详细编录及其空间分布特点

### 2.1 震区覆盖遥感数据

汶川地震滑坡覆盖面积广、数量多,要针对每个滑坡开展野外调查是不可能的。因此,本文采用人工目视解译方法,辅以野外调查验证,开展汶川地震滑坡编录工作。人工目视解译使用的遥感影像包括震前和震后数据,震前数据包括1999—2003年的ETM+,震前SPOT 5真彩色融合数据;震后数据包括航片、QuickBird、IKONOS、SPOT 5、ALOS、ASTER、IRS-P5、CBERS-02B等。因为震区覆盖震后遥感影像数据源较多,一些地区覆盖了多种数据源,在震后数据源的选择上,优先选择高分辨率与距离地震发生时间较近的数据,在这些影像上有云覆盖的地区,选择其他的数据源。

### 2.2 汶川地震滑坡编录

详细准确的区域地震滑坡编录是后续区域地震滑坡研究的基础,理想的地震滑坡编录图应覆盖整个地震区,包括所有能解译调查的足够小的滑坡且以区要素标识滑坡。

采用面向计算机屏幕的人工目视解译与编录图制作一体化的方法作为地震滑坡编录方法,需要遵循如下原则:

- (1) 遥感影像要经过精确的地理配准与几何校正。
- (2) 震后的影像要尽量选择距离地震发生时间近的与高分辨率的。
- (3) 有震前的影像要尽量搜集,用来排除地震前的滑坡。
- (4) 影像要尽量覆盖整个震区。
- (5) 要用区要素去标识滑坡,因为点仅仅包含了滑坡的位置信息,而区要素不但包含了滑坡的位置信息,而且还包含了滑坡的边界信息、面积信息,进而可以基于滑坡“面积-体积”幂律公式得到滑坡的体积,是后续震区河流与地貌演化、泥石流研究等的重要基础数据。
- (6) 对于连片的滑坡要区分出每一个单体滑坡。区分单体滑坡的方法包括:基于地形与河流信息判别每个单体滑坡,单体地震滑坡发生在一个斜坡上;根据源区的连接形态判断是否单体滑坡,若源区在同一个坡面上连在一起,因为斜坡地形因素,使得运动区与堆积区有所分开,那么作为一个滑坡处理,如果多个没有连接的源区发生的滑坡堆积物质堆积到一起,那么这些滑坡就按照多个滑坡去处理,依据经

验与滑坡源区的特点将堆积区大概分开,框定出多个滑坡;尽量按照标准滑坡的形状去解译滑坡,对于形状不标准的滑坡,根据实际情况可以按照多个滑坡的方式处理。

优先选择数据质量好、云覆盖少、高分辨率与距离地震发生时间最近的数据,进行精确的地理配准与校正工作之后,面向计算机屏幕,采用人工目视解译方法,基于震后的遥感数据圈定出所有的滑坡,这样最终得到约25万处单体滑坡数据。再基于震前的影像对这些滑坡进行逐一检查,将震前存在的滑坡和一些解译错误的目标删除,最终得到了汶川地震滑坡编录成果。本编录成果包括3类滑坡数据,第1类是滑坡分布面数据,每一条滑坡记录用一个面去标识;第2类是滑坡中心点数据;第3类是滑坡后壁位置点数据。其中第2类数据是基于第1类滑坡分布面数据提取得到的,第1类与第3类数据是基于人工目视解译方法得到的。在滑坡解译之前与解译工作进行之中开展了汶川地震滑坡的野外调查验证工作,调查对象为一些大型滑坡与堰塞湖,对绵竹市绵远河流域的滑坡开展了较详细的野外调查验证工作。限于遥感影像辨识能力且大多数滑坡的源区、运动区、堆积区互相重合,因此对滑坡面数据并未区分出滑坡的滑源区、运动区与堆积区。最终的地震滑坡面数据编录图如图1所示,图中的白色斑块为基于人工目视解译得到的滑坡。结果表明,汶川地震触发的197481处滑坡分布在一个面积大约为 $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的区域内,这些滑坡的总面积约为 $1160 \text{ km}^2$ 。该编录成果是当前汶川地震滑坡最全面详细的编录成果,也是有记录以来单次地震事件触发滑坡数量最多的记录。

在这个滑坡限制区内,远离北川—映秀断裂的区域,与近地表破裂区域相比,这些区域地震滑坡极少,而且缺乏高分辨率的震后遥感数据,数据多为分辨率较低的CBERS-02B(19.5m)与ASTER(15m),且缺乏震前的遥感数据,这些区域距离地表破裂较远,不会发生太大的滑坡,获得的滑坡编录结果可能会有较大的误差;另一个方面,这些区域内发生的滑坡数量少、规模小。因此,本文选择了一个小于滑坡限制区的区域作为研究区,以将这些远地表破裂区域排除在研究区域之外(图2)。研究区为一个以映秀—北川地表破裂为近似中心的近椭圆形区域,整个研究区面积约为 $44031 \text{ km}^2$ ,研究

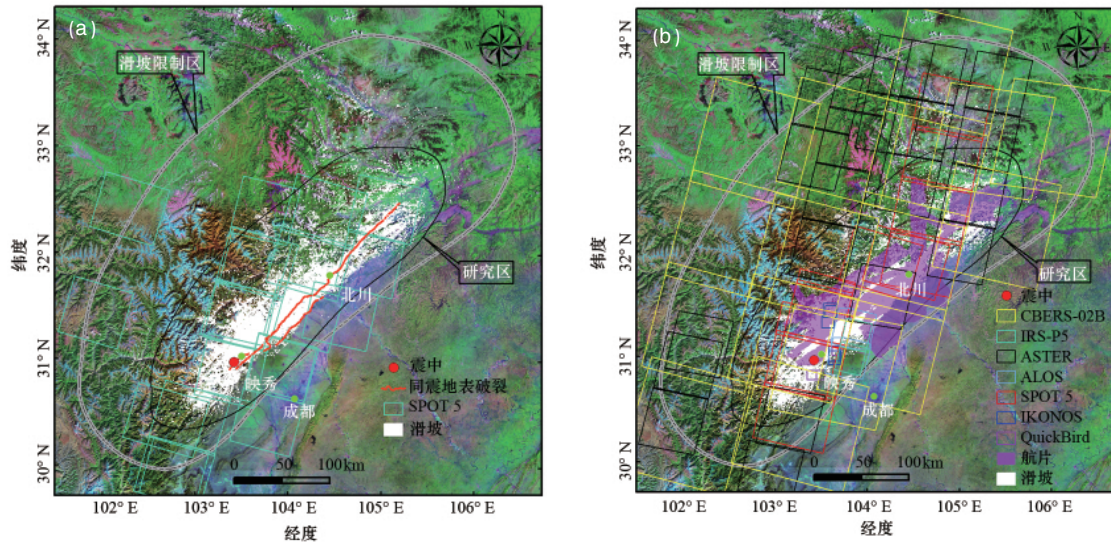
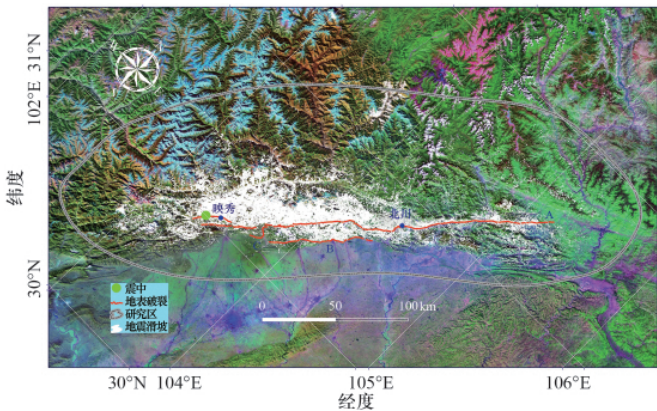


图 1 汶川地震滑坡震前(a)和震后(b)解译影像覆盖范围

Fig. 1 Pre- (a) and post-earthquake (b) remote sensing images coverage

区内滑坡数为 196007 处(占总滑坡数量的 99.25%),总面积为 1150.622km<sup>2</sup>(占总滑坡面积的 99.19%)。可见,绝大多数滑坡位于此研究区之内。



A—映秀—北川地表破裂;B—灌县—江油地表破裂;  
C—小鱼洞地表破裂

图 2 汶川地震滑坡编录图

Fig. 2 Inventory of earthquake-triggered landslides (white polygons)

### 2.3 汶川地震滑坡分布特征

研究区位于地形陡变的龙门山地区,高程为 452.9—6245.4m,区内斜坡的自然坡度较陡,平均坡度为 29.2°。研究区是一个近椭圆形与长条形的区域,近似以映秀—北川地表破裂为中心,滑坡多沿其密集分布。在地表破裂的东南方向,研究区边界终止到龙门山与成都平原交界附近,因为成都平原内不发生滑坡;在北西方向,研究区最大扩展至距离地表破裂近 100km 的区域;在同震破裂的东北与西南方向两端,分别延伸了大约 80km(图 2)。

研究区内,除了一些以往文献总结的特点<sup>[55]</sup>外,汶川地震滑坡还表现出如下特点:

(1) 地震滑坡大多集中在地表破裂周围,受地表破裂控制作用较强,地表破裂控制着滑坡空间分布的大致走向。

(2) 滑坡多发生在震中的北东侧,向北东侧扩展较远,这与映秀—北川断裂的单向破裂机制相一致。

(3) 滑坡多分布在映秀—北川断裂的上盘,尤其是映秀镇到北川县之间的映秀—北川地表破裂的上盘区域。

(4) 滑坡虽然大体沿着映秀—北川地表破裂分布,但是沿着映秀—北川地表破裂发育差异较大,以逆冲性质为主的映秀镇到北川县之间的区域发育的滑坡远比北川以北以走滑性质为主的断裂附近发育的滑坡多。

(5) 滑坡主要集中在映秀镇—北川县之间的映秀—北川断裂上盘区域、映秀—北川地表破裂与灌县—江油地表破裂夹持的条状区域、北川北东方向的地表破裂穿越区及近地表破裂的长条状区域,在映秀—北川断裂的映秀镇—北川县之间段落的上盘区域的远断层区域也发育较多的滑坡,多沿河流密集分布。

(6) 映秀—北川地表破裂与灌县—江油地表破裂所夹持的长条状区域也是汶川地震滑坡的易发与高发区域,但是这一区域内的滑坡发育程度要低于映秀—北川断裂的上盘。

(7) 北川县北东方向区域的滑坡具有沿着地表破裂的长条串珠状空间分布特征。

### 3 地震滑坡强频关系统计

地震触发区域滑坡往往表现出一定的“面积-频率”幂律关系式,滑坡的面积与滑坡累积数量可以用下式表示:

$$\lg N(A) = bA + a \quad (1)$$

其中,  $A$  为该滑坡的面积,  $N(A)$  为面积大于该滑坡面积的滑坡

数量,  $a$  与  $b$  为常数。将汶川地震滑坡投射到滑坡面积与滑坡数量累加的对数坐标系(图 3), 这些点符合如下特点: (1) 在滑坡面积  $1 \times 10^4 - 1 \times 10^6 \text{m}^2$  的段落表现出良好的幂律关系式; (2) 出现了两个面积大于  $1 \times 10^6 \text{m}^2$  的超大规模滑坡——大光包滑坡(面积为  $6.97 \text{km}^2$ )和文家沟滑坡(面积为  $2.98 \text{km}^2$ ), 两者在滑坡面积-数量累加曲线上表现出异常趋势; (3) 面积小于  $1 \times 10^5 \text{m}^2$  的滑坡在曲线上呈现出下降趋势, 与其他地震事件触发区域滑坡表现出类似趋势。

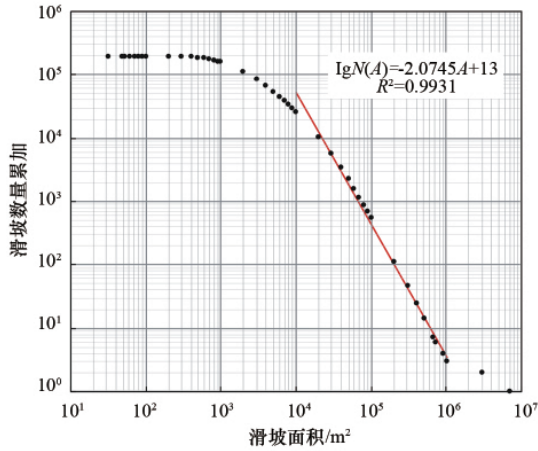


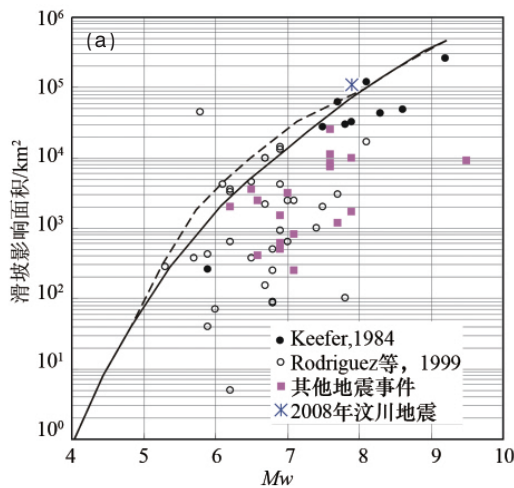
图 3 汶川地震滑坡面积-累加数量幂律关系

Fig. 3 Curve depicting correlation between cumulative landslide number and the landslide area

本文选择滑坡面积  $1 \times 10^4 - 1 \times 10^6 \text{m}^2$  之间的滑坡, 按照最小二乘法得到一个关系式为  $\lg N(A) = -2.0745A + 13$ , 判定系数  $R^2 = 0.9931$ , 表明这一面积区间内滑坡面积与滑坡数量累积之间具有良好的幂律关系。

#### 4 地震滑坡与地震参数的统计

分析地震滑坡影响区面积对地震后滑坡分布范围与面



积的快速确定具有一定的参考与指导意义, 本节结合全球其他滑坡事件, 分析汶川地震滑坡影响区的面积在全球其他地震事件中的地位。地震事件相关区域滑坡研究是近年来地震滑坡方向的研究热点。图 4 为近年来在全球范围内开展的地震区域滑坡研究对应的地震事件分布。除了 Keefe<sup>[68]</sup>总结的 1811—1980 年 40 次地震事件与 Rodriguez 等<sup>[69]</sup>总结的 1980—1997 年 36 次地震事件外, 本文总结了其他 34 次地震事件, 加上 2008 年汶川地震事件共 111 次地震滑坡对应地震事件, 其中 50 次发生在西半球, 61 次发生在东半球。

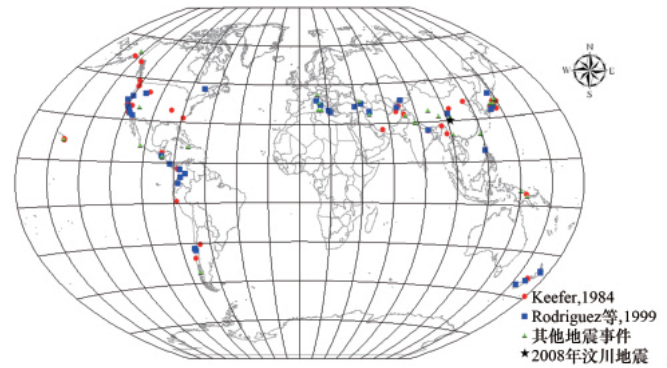


图 4 全球地震滑坡相关地震事件分布

Fig. 4 Distribution map of earthquake events related to earthquake-triggered landslides all over the world

Keefe<sup>[68]</sup>统计的 1811—1980 年的 40 次滑坡事件, 其中 8 次缺少滑坡影响区面积; Rodriguez 等<sup>[69]</sup>补充的 36 个震例给出了 35 次地震事件的滑坡影响区面积, 其中缺少 1 次的影响区面积; 本文总结的包括汶川地震事件在内的地震事件 35 次, 其中有滑坡影响区面积的 20 次。图 5 为综合了 Keefe<sup>[68]</sup>(32 个)、Rodriguez 等<sup>[69]</sup>(35 个)与本文最新统计的 20 次地震, 共 87 次地震事件对应的滑坡影响区面积的统计结果。因为一些地震事件缺少  $M_s$  或者  $M_w$  震级, 因此图 5 中的样本数量有所

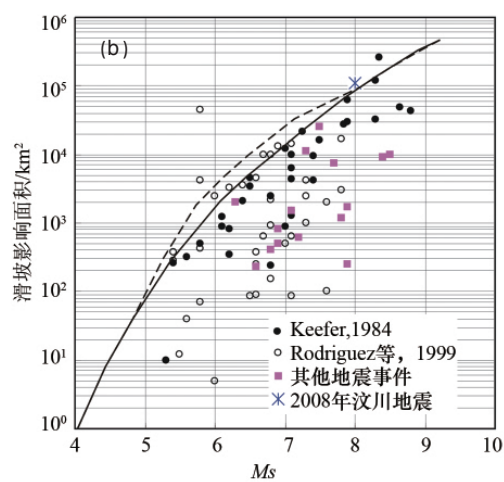


图 5 滑坡影响区面积与震级的关系

Fig. 5 Relationship between areas affected by landslides and earthquake magnitude

差异,样本点均未达到 87 个。

从图 5 可以看出,汶川地震滑坡影响区面积略高于其他文献<sup>[68-69]</sup>给出的上包络线,表明在全球背景下,汶川地震滑坡事件高于同等震级触发滑坡影响面积,原因可能包括以下方面:(1)汶川地震为逆冲性质为主的地震,破坏强度大,在上盘距离断裂很远的地方也会发生滑坡,表明逆冲型地震比其他断裂机制型地震更容易触发滑坡;(2)汶川地震发生在山盆交界的高山峡谷区,山高坡陡,在地震条件下易发生滑坡;(3)研究区一直以来构造活动极其强烈,岩体破碎,斜坡堆积风化层结构松散,在震动条件下容易发生滑动。

## 5 结论

(1) 2008 年 5 月 12 日汶川地震触发了 197481 处滑坡,滑坡面积约为 1160km<sup>2</sup>,大致分布在一个面积约 1.1×10<sup>5</sup>km<sup>2</sup> 的区域内,这是当前汶川地震滑坡最全面详细的编录成果,也是有记录以来单次地震事件触发滑坡数量最多的记录。

(2) 汶川地震中 196007 处滑坡(占滑坡总数量的 99.25%),面积为 1150.622km<sup>2</sup>(占总滑坡面积的 99.19%),分布在一个面积为 44031km<sup>2</sup>、以映秀—北川地表破裂为近似中心的近椭圆形区域内。分析了这 196007 处滑坡面积与滑坡数量的幂律关系,得出面积在 1×10<sup>4</sup>—1×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup> 之间的滑坡,滑坡面积与滑坡数量累加之间的幂律关系式可表示为  $\lg N(A) = -2.0745A + 13$ ,判定系数  $R^2 = 0.9931$ ,表明该滑坡面积区间内滑坡面积与滑坡数量之间具有良好的幂律关系。

(3) 将汶川地震滑坡影响区面积与全球其他地震事件相比发现,汶川地震滑坡影响区面积略高于其他地震事件滑坡影响区面积的上包络线,表明山盆交界部位逆冲断裂型地震具有强烈的触发滑坡的能力。

## 参考文献 (References)

- [1] Harp E L, Keefer D K, Sato H P, et al. Landslide inventories: The essential part of seismic landslide hazard analysis [J]. *Engineering Geology*, 2011, 122(1-2): 9-21.
- [2] Xu Z Q, Ji S C, Li H B, et al. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake[J]. *Episodes*, 2008, 31(3): 291-301.
- [3] 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*, 2008, 30(3): 597-629.  
Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 597-629.
- [4] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, 2009, 37(6): 515-518.
- [5] Xu X W, Yu G H, Chen G H, et al. Parameters of coseismic reverse- and oblique-slip surface ruptures of the 2008 Wenchuan earthquake, eastern Tibetan plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (4): 673-684.
- [6] 许冲, 徐锡伟, 于贵华. 玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制 [J]. *地震地质*, 2012, 34(1): 47-62.  
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. *Seismology and Geology*, 2012, 34(1): 47-62.
- [7] Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides triggered by slipping-fault-generated earthquake on a plateau: An example of the 14 April 2010, Ms 7.1, Yushu, China earthquake[J]. *Landslides*, 2012, doi:10.1007/s10346-012-0340-x.
- [8] 许冲, 徐锡伟, 戴福初, 等. 2010 年 4 月 14 日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 505-510.  
Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 505-510.
- [9] 许冲, 徐锡伟, 于贵华, 等. 玉树地震滑坡影响因子敏感性分析 [J]. *科技导报*, 2012, 30(1): 18-24.  
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua, et al. *Science & Technology Review*, 2012, 30(1): 18-24.
- [10] 许冲, 徐锡伟. 走滑断裂型地震诱发的滑坡在断裂两盘的空间分布差异[J]. *地质通报*, 2012, 31(4): 532-540.  
Xu Chong, Xu Xiwei. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31 (4): 532-540.
- [11] 许冲, 徐锡伟. 逻辑回归模型在玉树地震滑坡危险性评价中的应用与检验[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(3): 326-333.  
Xu Chong, Xu Xiwei. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(3): 326-333.
- [12] 许冲, 徐锡伟. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划 [J]. *地质科技情报*, 2012, 31(3): 116-121.  
Xu Chong, Xu Xiwei. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(3): 116-121.
- [13] 许冲. 青海玉树“2010-4-14”地震发震构造与地震滑坡危险性初步评价[J]. *工程地质计算机应用*, 2012(1): 1-14.  
Xu Chong. *Engineering Geological Computer Applications*, 2012 (1): 1-14.
- [14] Xu C, Xu X W, Lee Y H, et al. The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modeling[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1603-1616.
- [15] 许冲, 徐锡伟. 俯冲带地区压扭断裂型地震触发滑坡及其剥蚀厚度空间分布规律分析[J]. *工程地质学报*, 2012, 已录用.  
Xu Chong, Xu Xiwei. *Journal of Engineering Geology*, 2012, in press.
- [16] Xu C, Xu X W, Yu G H. Earthquake triggered landslide hazard mapping and validation related with the 2010 Port-au-Prince, Haiti earthquake[J]. *Disaster Advances*, 2012, in press.
- [17] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 Ms 7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(3): 289-296.  
Yin Yueping, Zhang Yongshuang, Ma Yinsheng, et al. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3): 289-296.
- [18] Harp E L, Jibson R W, Dart R L. The effect of complex fault rupture on the distribution of landslides triggered by the 12 January 2010, Haiti earthquake [C]. *The Second World Landslide Forum*, Rome, Italy, October 3-7, 2011.
- [19] Yagi H, Higaki D, Yamamoto M, et al. Distribution and characteristics of landslides induced by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 in Tohoku District, Northeast Japan[J]. *Landslides*, 2009, 6(4): 335-344.
- [20] Sepúlveda S A, Serey A, Lara M, et al. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia[J]. *Landslides*, 2010, 7 (4): 483-492.
- [21] Owen L A, Kamp U, Khattak G A, et al. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake [J]. *Geomorphology*, 2008, 94 (1-2): 1-9.
- [22] 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(2): 113–122.
- [23] 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(4): 631–642.
- [24] 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]. *Natural Hazards*, 2007, 41(1): 43–60.
- [25] Chigira M, Yagi H. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture Earthquake in Japan[J]. *Engineering Geology*, 2006, 82(4): 202–221.
- [26] Sassa K. Landslide disasters triggered by the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake in Japan[J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 135–142.
- [27] Sato H P, Sekiguchi T, Kojiro R, *et al.* Overlaying landslides distribution on the earthquake source, geological and topographical data: The Mid Niigata prefecture earthquake in 2004, Japan [J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 143–152.
- [28] Sekiguchi T, Sato H P. Feature and distribution of landslides induced by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, Japan [J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2006, 43(3): 142–154.
- [29] Liao H W, Lee C T. Landslides triggered by the Chi-Chi Earthquake [EB/OL]. ACRS, 2000. [2009-12-06]. [http://www.geospatialworld.net/index.php?option=com\\_content&view=article&id=16097:landslides-triggered-by-the-chi-chi-earthquake&catid=150:natural-hazard-management-landslide-soil-erosion](http://www.geospatialworld.net/index.php?option=com_content&view=article&id=16097:landslides-triggered-by-the-chi-chi-earthquake&catid=150:natural-hazard-management-landslide-soil-erosion).
- [30] Liao C, Liao H, Lee C. Statistical analysis of factors affecting landslides triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2002.
- [31] Weissel J K, Stark C P. Landslides triggered by the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi Earthquake in Taiwan and their relationship to topography[C]. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, Sydney, NSW, Australia, July 9–13, 2001, 2: 759–761.
- [32] Khazai B, Sitar N. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi Earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1–2): 79–95.
- [33] 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[J]. *The Island Arc*, 2003, 12(4): 325–334.
- [34] 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]. *Landslides*, 2002, 38(4): 18–26.
- [35] Marzorati S, Luzi L, Amicis M D. Rock falls induced by earthquakes: A statistical approach [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(7): 565–577.
- [36] Fukuoka H, Sassa K, Scarascia-Mugnozza G. Distribution of landslides triggered by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and long runout mechanism of the Takarazuka Golf Course landslide [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1997, 45(2): 83–90.
- [37] Harp E L, Jibson R W. Inventory of landslides triggered by the 1994 Northridge, California Earthquake[EB/OL]. USGS, 1995. [2000-08-29]. <http://geo-nsdi.er.usgs.gov/metadata/open-file/95-213/>.
- [38] Harp E L, Jibson R W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1B): S319–S332.
- [39] Jibson R W, Harp E L. Landslides triggered by the Northridge Earthquake[J]. *Earthquake & Volcanoes*, 1994, 25(1): 31–41.
- [40] Keefer D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution: The 1989 Loma Prieta, California event [J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3–4): 231–249.
- [41] Tibaldi A, Ferrari L, Pasquare G. Landslides triggered by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry: An example from Ecuador[J]. *Geomorphology*, 1995, 11(3): 215–226.
- [42] Schuster R L, Nieto A S, O'Rourke T D, *et al.* Mass wasting triggered by the 5 March 1987 Ecuador earthquakes [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(1): 1–23.
- [43] Wasowski J, Gaudio V D, Pierri P, *et al.* Factors controlling seismic susceptibility of the Sele Valley slopes: The case of the 1980 Irpinia earthquake re-examined [J]. *Surveys in Geophysics*, 2002, 23(6): 563–593.
- [44] Harp E L, Keefer D K. Earthquake-induced landslides, Mammoth Lakes area, California [M]// Brown III W M. Landslides in Central California: San Francisco and Central California: Field trip guidebook, Washington DC: AGU, 1989, T381: 48–53.
- [45] Harp E L, Tanaka K, Sarmiento J, *et al.* Landslides from the May 25–27, 1980, Mammoth Lakes, California, earthquake sequence [R]. Miscellaneous Investigations Series Map I-1612, Reston, VA: US Geological Survey, 1984.
- [46] Govi M. Photo-interpretation and mapping of the landslides triggered by the Friuli earthquake (1976)[J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1977, 15(1): 67–72.
- [47] Harp E L, Wilson R C, Wieczorek G F. Landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake [R]. Washington DC: US Government Printing Office, 1981.
- [48] Harp E L, Wieczorek G F, Wilson R C. Earthquake-induced landslides from the February 4, 1976 Guatemala earthquake and their implications for landslide hazard reduction[R]. Document number: 5175, Washington DC: US Geological Survey, 1978.
- [49] Morton D M. Seismically triggered landslides above San Fernando Valley[J]. *California Geology*, 1971, 24(4–5): 83–84.
- [50] Plafker G, Eriksen G E, Concha J F. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, 61(3): 543–578.
- [51] Morimoto R. Geology of Imaichi district with special reference to the earthquake of Dec. 26, 1949 (II)[J]. *Departmental Bulletin Paper*, 1951, 29(2): 349–358.
- [52] Pearce A J, O'Loughlin C L. Landsliding during a M 7.7 Earthquake: Influence of geology and topography [J]. *Geology*, 1985, 13(12): 855–858.
- [53] Pearce A J, Watson A J. Effects of earthquake-induced landslides on sediment budget and transport over a 50-yr period[J]. *Geology*, 1986, 14(1): 52–55.
- [54] Jibson R W, Keefer D K. Statistical analysis of factors affecting landslide distribution in the new Madrid seismic zone, Tennessee and Kentucky[J]. *Engineering Geology*, 1989, 27(1–4): 509–542.
- [55] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. *地质论评*, 2010, 56(6): 860–874.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. *Geological Review*, 2010, 56(6): 860–874.
- [56] Huang R Q, Li W L. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(3): 363–371.
- [57] 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.
- Huang Runqiu, Li Weile. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2009, 20(3): 1-7.
- [58] Qi S W, Xu Q, Lan H X, *et al.* Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(1-2): 95-108.
- [59] Gorum T, Fan X M, Van Westen C J, *et al.* Distribution pattern of earthquake -induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Geomorphology*, 2011, 133(3-4): 152-167.
- [60] Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, *et al.* Mass wasting triggered by 2008 Wenchuan Earthquake is greater than orogenic growth [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 449-452.
- [61] 许冲, 戴福初, 姚鑫. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积 [J]. 科技导报, 2009, 27(11): 79-81.
- Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 79-81.
- [62] 许冲, 戴福初, 陈剑, 等. 汶川 Ms 8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 754-762.
- Xu Chong, Dai Fuchu, Chen Jian, *et al.* *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 754-762.
- [63] 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*, 2011, 40(4): 883-895.
- [64] Xu C, Xu X W. Comment on "Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China" by Shengwen Qi, Qiang Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu[Engineering Geology 116(2010) 95-108][J]. *Engineering Geology*, 2012, 133-134: 40-42.
- [65] Xu C, Dai F C, Xu X W, *et al.* GIS-based support vector machine modeling of earthquake -triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. *Geomorphology*, 2012, 145-146: 70-80.
- [66] Xu C, Xu X W, Dai F C, *et al.* Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 46: 317-329.
- [67] Xu C, Xu X W, Dai F C, *et al.* Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region [J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(1): 97-120.
- [68] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(4): 406-421.
- [69] Rodriguez C E, Bommer J J, Chandler R J. Earthquake-induced landslides: 1980-1997[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, 18(5): 325-346.

(责任编辑 马宇红,朱宇)

·学术动态·

## “第八届环境与发展论坛”征文

由中华环保联合会、联合国环境规划署联合主办,中华环保联合会承办的“第八届环境与发展论坛”将于2012年11月8—10日在浙江省义乌市举行。同期还将举办“第五届中国(国际)建设环境友好型社会成果展览会”。本届论坛以“以环境保护优化经济发展促进经济结构调整和环境质量改善”为主题。

征稿范围:专题论坛一:源头把关,强化环境规划;专题论坛二:严格环评制度和“三同时”制度,实行污染物排放总量、环境容量和质量的统一监管;专题论坛三:立足于治,着眼于防,坚持环境倒逼机制;专题论坛四:严格法治环保,严惩违法排污;专题论坛五:严格环境目标责任,强化环境保护意识。

全文截稿日期:2012年10月5日。

联系电话:(010)51230009/51230018。

电子信箱:lunwen2012@acef.com.cn。

会议网站:<http://www.acef.com.cn/tzl/hbz/43176.shtml>。