

陈晓利, 李传友, 王明明等. 断裂带两侧地震诱发滑坡空间分布差异性的主要影响因素研究——以北川地区的地震滑坡分布为例. 地球物理学报, 2011, 54(3): 737~746, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.013

Chen X L, Li C Y, Wang M M, et al. The main factors causing the seismic landslide distribution difference on two sides of the faults—A case study of landslide distribution in Beichuan area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(3): 737~746, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.013

断裂带两侧地震诱发滑坡空间分布差异性的 主要影响因素研究 ——以北川地区的地震滑坡分布为例

陈晓利, 李传友, 王明明, 李正芳

中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘 要 目前在地震滑坡影响因素的研究中, 一般认为岩性、地形地貌、坡度、地震烈度、震中距等因素对滑坡的空间分布有重要的影响作用, 忽视了发震断裂的运动方式对滑坡分布所起作用. 5.12 汶川地震诱发的大量滑坡崩塌灾害主要沿龙门山断裂带发育, 但在断裂带两侧呈不对称分布, 80% 以上的滑坡、特大型滑坡主要分布于断裂带的上盘. 这一现象在汶川地震重灾区之一的北川地区表现尤为明显. 本文以 GIS 为平台, 通过对北川地区地震滑坡空间分布特点及断裂带两侧的地貌高程、坡度、岩性、余震分布、地表变形、地震动加速度等因素的分析, 探讨了导致该区断裂带两侧滑坡分布差异特点的影响因素. 研究表明, 北川地区地震滑坡崩塌主要分布在距断裂带 5 km 的范围内, 上下两盘的滑坡崩塌分布在数量和面积上存在明显的差异, 上盘的滑坡分布面积为下盘的 8 倍多; 在滑坡易于发生的高程 (<1500 m)、坡度 (25°~40°) 范围, 上下两盘所占比例相当, 但是出现在下盘的滑坡数量远远低于上盘, 相同坡度范围内上盘的滑坡发育比例达到下盘的 3 倍以上; 位于上盘并紧邻断裂带的寒武纪、震旦纪地层中的滑坡崩塌最为发育; 由于汶川地震发震断层的逆冲性质, 余震及大的地表变形都发生在断裂带上盘, 地震动加速度在上盘衰减速度低于下盘, 表现出一定的上盘效应. 从这些分析结果可以推断, 引起研究区断裂带两侧滑坡分布差异的主要因素不是地形坡度和岩性条件, 发震断裂的运动方式起到了主要的作用.

关键词 地震滑坡, 空间分布, 影响因素, 断裂运动方式

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.013

中图分类号 P315

收稿日期 2010-10-12, 2011-01-05 收修定稿

The main factors causing the seismic landslide distribution difference on two sides of the faults —A case study of landslide distribution in Beichuan area

CHEN Xiao-Li, LI Chuan-You, WANG Ming-Ming, LI Zheng-Fang

Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract It is generally believed that rock properties, topography, slope degree, seismic intensity, epicentral distance etc. have a main influence on the spatial distribution of seismic landslides ignoring the influence of the seismic fault mechanics. Landslides triggered by 5.12 Wenchuan Great Earthquake mainly occurred along the Longmenshan Fault Zone, but they were

基金项目 中国地震局地质研究所基本科研业务 (IGCEA1006)、工信部国家科技重大专项课题 (2010ZX03006-007)、国家地质灾害防治专项科研项目 (SXKY3-5) 资助.

作者简介 陈晓利, 女, 1969 年生, 副研究员, 主要从事工程地震及地质灾害研究. E-mail: 04chxl@sina.com

distributed asymmetrically on the uplift side and foot side. More than 80% of the total landslides and almost all the huge landslides are located at the uplifted side of the faults. This phenomenon is more evident in Beichuan area where it is one of the most damaged areas during Wenchuan Great Earthquake. Based on GIS technology, this paper analyzed landslides distribution characteristics of the study area, and as well landform elevation, slope degree, rock property, aftershock distribution, surface deformation, seismic peak ground acceleration of both the uplift and foot sides. Moreover, it discusses the key influencing factors that caused the landslide distribution difference between the uplift and foot sides of the faults. The results show that in the study area landslides concentrated within 5km from the fault rupture zone, and there are significant differences in number and distribution area of the landslides between the uplift side and foot side. The distribution area of the landslides at the uplift side is more than 8 times that at foot side. Landslides are prone to occur in areas with elevation lower than 1500m and slope degree 25~40. Both uplift and foot sides have equivalent proportion of such area, but the number of landslides at the uplift side is far more than that at foot side. In the area with same slope degree, landslides at uplift side are more than 3 times that at foot side. Most landslides developed in the Cambrian and Sinian strata close to the rupture zone at the uplift side. Because Wenchuan Great Earthquake was caused by thrust faults, aftershocks and large deformation occurred at the uplift side. Also, the seismic peak ground acceleration attenuates more slowly at uplift side than foot side. It is concluded that the main influencing factors caused the obvious difference of the landslides distribution should be contributed to the mechanics of the seismic fault, not the landform elevation, slope degree and rock type.

Keywords Earthquake-triggered landslide, Landslide distribution, Influencing factors, Fault mechanics

1 引言

在滑坡的触发因素中,降雨与地震是两个最主要的因素,其中,地震滑坡是指地震作用下触发的滑坡,是山体在强震作用下失稳,以重力为主的斜坡滑移引起的地质灾害^[1,2].从滑坡规模大小这一角度看,这两种类型之间的差别不大;但从岩性和地质构造角度来看,由降雨触发的滑坡通常以土质物质为主,主要发生于具有滑动面的土层—岩层接触面和性质对比显著的成层岩质与基岩的接触面,而地震滑坡主要发生于构造、地层等的结合部位^[3].

一个地区的地质灾害,尤其是地震滑坡,它们的起因与演化通常由活动构造、尤其是强烈的新构造运动控制^[4,5].边坡所处的大地构造单元不仅决定了边坡地质发育史的不同,控制了边坡岩体的地层结构以及强度,而且决定了边坡地质演化过程中新构造运动的活跃程度,边坡可能遭遇地震的频度与强度^[6].我国学者孙崇绍等根据历史地震资料编制了中国历史地震滑坡崩塌分布图^[7],认为南北地震

带是地震滑坡崩塌发生较多的地区,秦岭以北的滑坡分布与黄土分布密切相关.

更加细致、具体的研究表明,断层和节理裂隙对边坡变形破坏的影响更为明显,某些断层或节理本身就是构成滑面或滑坡的界面^[7].对于单个地震产生的滑坡,其平面分布也与构造有关.邹谨敬等^[8]对1927年古浪地震的研究表明,地震引起的多数滑坡和崩塌受断裂构造的控制,大多数崩滑发生在断裂带上或断裂的附近.一般来说,滑坡分布沿地震断层破裂方向要多于垂直破裂方向,地震滑坡受断裂控制的现象在1973年炉霍地震滑坡中表现的也很明显^[9].图1是1973年炉霍地震的滑坡分布示意图,图中滑坡非常紧凑地沿断层破裂带方向展布.

目前对地震滑坡的研究认为地形坡度、岩性控制滑坡发育的位置,震中距、震级等因素对滑坡分布范围有影响^[2~6].对于一些诱发滑坡地震震例的研究主要集中于滑坡的空间分布与坡度、岩性、高程、震级、震中距等因素相互关系的分析上^[10~12].Wang等^[10]对1999年台湾集集 $M_s7.7$ 级地震诱发约10000处滑坡的分析表明,随着震中距的加大,滑坡的数量

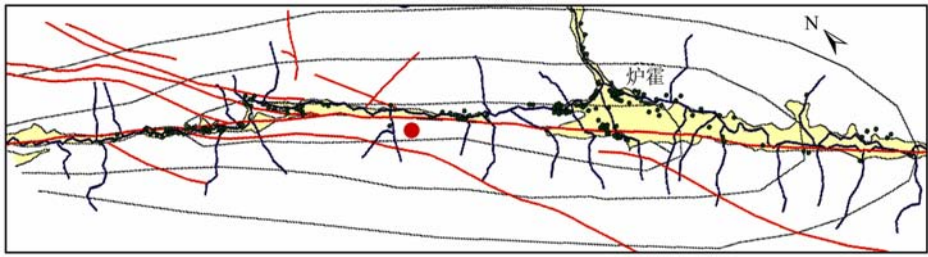


图 1 1973 年炉霍地震滑坡分布图^[9](图中绿色圆点表示滑坡崩塌)

Fig. 1 Earthquake triggered landslides distribution of 1973 Luhuo earthquake^[9] (green dots represent landslides)

在减少,约有 90%的滑坡分布在地震动峰值加速度(PGA)大于 300 gal 的地区,岩性对滑坡有明显的影响.2004 年日本新泻 M_w 6.6 级地震在震中区附近引发了大量的滑坡,Wang 和 Sassa 等^[11]的研究认为此次地震诱发的滑坡主要分布的坡度范围为 $20^\circ\sim 35^\circ$,随着震中距的增大,单位面积内的滑坡数量和面积都在减小.2008 年汶川地震中产生了大量的滑坡、崩塌等地质灾害,很多学者对此次地震滑坡崩塌分布特征进行了研究,初步揭示了该次地震引发地震滑坡的滑坡角度、岩性、震中距、地貌因素等的特征^[13~18].调查显示,此次地震诱发的滑坡崩塌主要沿龙门山断裂带分布,但是滑坡数量、规模等在断裂带两侧表现出很大的不对称性:80%的滑坡崩塌分布在断裂带的上盘,而一些类似安县大光包那样规模巨大的滑坡也大部分位于断裂带上盘.虽然地震滑坡这种独特分布现象已经引起一些学者的关注^[15],但是还没有对导致这种现象的原因进行更进一步的研究.对滑坡分布特征与影响因素相互关系的深入认识有助于提高地震滑坡危险区预测的可靠度.在地震滑坡分布与影响因素关系的研究中,一些学者根据统计数据获得不同震级下滑坡分布与断层距(或震中距)的关系,并用于对地震滑坡的影响范围进行预测^[10,11,19].但是对于汶川地震中出现的这种特殊现象,这些研究成果仍有待深入.

本文以 GIS 为平台,通过对北川县境内汶川地震地表破裂带两侧地形坡度、海拔高程、岩性分布、岩性与坡度的组合、地表变形、地震动等因素的对比分析,探讨导致该区此次地震中破裂带两侧滑坡崩塌分布严重不对称性的主要原因,补充对地震滑坡空间分布影响因素的认识.

2 汶川地震中滑坡崩塌的空间分布特征

5.12 汶川大地震发生在青藏高原东部边界的龙门山逆冲断裂带.龙门山逆冲断裂带宽 30~

50 km,主要由 3 条主干断裂所组成:西边一条是汶川—茂县断裂(后山断裂),大体上沿汶川到茂县的高深峡谷延伸,这次地震时没有发生破裂,但滑坡等地质灾害十分严重;中间的一条是映秀—北川断裂(中央断裂),沿映秀—北川—平通—石坎展布,连续性较好,是 2008 年 8.0 级地震的主要发震断裂;东边的一条叫灌县—江油断裂(前山断裂),沿龙门山与成都平原交界附近分布^[20].

震后的航空遥感等资料及野外实地勘察结果表明,汶川大地震诱发了约 15000 处滑坡崩塌等地质灾害^[21].进一步的分析表明这些地质灾害的空间分布整体上受到了龙门山断裂带发震断层的控制,沿断裂带展布.其中,灾害密度最大的地区主要分布在汶川、什邡、绵竹、安县、北川、青川等地,即大致位于破裂的起始位置、中部及破裂的终止处.对地震滑坡崩塌等灾害的空间分布特征研究结果表明,滑坡崩塌的数量随着与发震断层距离的增大呈显著减小的趋势,约有 80%的滑坡崩塌出现在距离断裂 30 km 的区域中.而在这些区域内,分布于断裂带上盘的滑

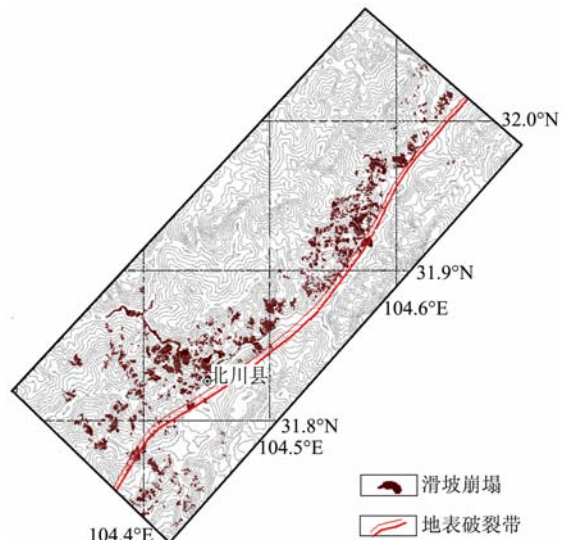


图 2 研究区地震滑坡崩塌分布

Fig. 2 Distribution of earthquake triggered landslides in the study area

坡数量明显多于下盘^[22]. 整个汶川地震灾区中约有 87% 的滑坡崩塌出现在断裂带的上盘, 并且, 几乎所有的特大型滑坡都出现在断裂的上盘, 如本次地震触发的最大滑坡——安县大光包滑坡、第二大滑坡——绵竹文家沟滑坡及唐家山堰塞湖滑坡等. 滑坡崩塌大都集中于断裂带上盘的分布特点在北川县境内表现得更为明显(图 2).

研究区的选取如图 2 所示, 沿映秀—北川断裂走向, 在北川县境内的地区为主; 垂直断裂走向范围的截取, 以受到滑坡崩塌影响的范围为主. 该研究区长约 40 km, 宽约 16 km, 沿破裂带分布了规模不等的滑坡崩塌等灾害 500 余处, 灾害面积达 38 km². 造成伤亡较多的北川县城西滑坡、北川新中滑坡、樱桃沟滑坡等均位于该区域.

以汶川地震地表破裂带为界, 把研究区分为上下两盘. 上盘面积约 436.5 km², 下盘面积约 181.9 km². 采用 LAR(landslide-area ratio, 简称 LAR, 指分析区域面积受到滑坡影响的面积的百分比, $LAR = \text{滑坡总面积} / \text{分析区域面积}$), 分别计算上下盘的滑坡面积比率, 结果列于表 1, 上盘的滑坡密度明显高于下盘.

基于 GIS 的统计分析表明, 研究区高程主要分布在 2000 m 以下地段, 坡度主要分布在 20°~40°. 对滑坡分布的高程、坡度进行统计, 获得滑坡发生坡度主要分布范围为 25°~40°, 约有 58.4% 的滑坡坡度分布在这一范围; 同时, 约有 90.6% 的滑坡分布在高程低于 1500 m 的地段(表 2, 3).

表 1 研究区上下盘滑坡密度

Table 1 Landslide density of uplift and foot sides in the study area

位置	区域面积(km ²)	滑坡面积(km ²)	LAR(%)
上盘	436.5	34.5	7.9
下盘	181.9	3.9	2.1

表 2 研究区滑坡发育的高程分布

Table 2 Elevation of landslides in the study area

高程(m)	区域面积 A _T (km ²)	滑坡面积 A _L (km ²)	滑坡发育率 A _L /A _{LT}
<1000	157.858	17.584	0.458
1000~1500	307.242	17.175	0.448
1500~2000	138.434	3.309	0.086
>2000	14.866	0.285	0.007

注: A_{LT}: 研究区滑坡总面积.

表 3 研究区滑坡发育的坡度分布

Table 3 Slope degree of landslides in the study area

坡度分级(°)	面积(km ²)	滑坡面积 A _L (km ²)	不同坡度滑坡所占比例 (A _L /A _{LT})(%)
<10	78.136	4.617	12.0
10~15	46.373	1.943	5.1
15~20	83.557	2.550	6.6
20~25	118.490	4.390	11.4
25~30	118.162	6.794	17.7
30~35	97.517	9.212	24.0
35~40	55.308	6.407	16.7
40~45	17.357	2.184	5.7
45~50	3.236	0.241	0.6
>50	0.263	0.015	0.0
总计	618.4	38.4	1

3 影响滑坡发育的主要因素分析

3.1 断裂带上下盘的地形地貌特征

3.1.1 高程

研究区整体地势西高东低, 海拔高度在 600~2333 m 变化. 对上下两盘不同海拔高度区域统计结果表明, 断裂带上盘有 30.6% 的面积位于海拔高度大于 1500 m 的地区, 断裂下盘有 8.9% 的面积高程大于 1500 m(图 3). 上下盘高程在 1000~1500 m 区域面积所占比例大致相等, 占到各自面积的 49%, 具体的不同海拔高度段落面积分布见表 4.

3.1.2 坡度

对滑坡坡度的分析表明, 滑坡分布的优势坡度范围为 25°~40°. 上盘区域范围内, 处于 25°~40° 区

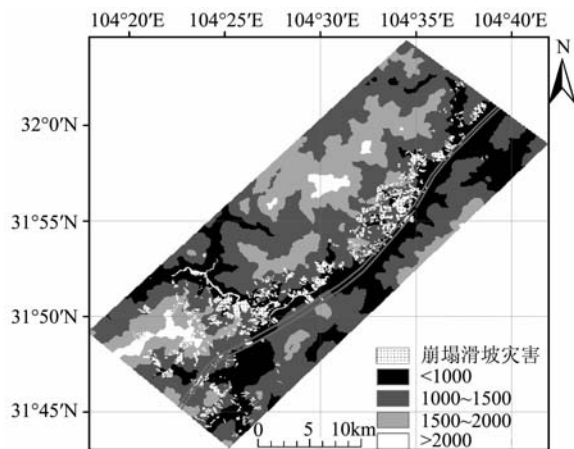


图 3 研究区地势图

Fig. 3 Topograph map of the study area

表 4 不同高程面积分布
Table 4 Distribution of the elevation

高程 (m)	上盘面积 $A_U(\text{km}^2)$	所占比例 $(A_U/A_{UT})\%$	下盘面积 $A_D(\text{km}^2)$	所占比例 $(A_D/A_{DT})\%$
<1000	87.224	19.99	75.638	41.54
1000~1500	215.474	49.38	90.212	49.54
1500~2000	119.214	27.32	16.108	8.85
>2000	14.406	3.30	0.124	0.07

域的面积约占 45.4%，下盘为 40%，二者之间没有明显的差别。从坡度与滑坡分布图(图 4)中可以直观地看出在断裂下盘一些坡度较大的区域没有滑坡发生。下盘的滑坡主要集中于研究区南端的陡坡处。滑坡发育的统计结果表明，上盘中坡度 25°~40°范围内的滑坡分布率为 11%，而下盘只有 3.6%。对断裂上下盘不同坡度段的滑坡分布的分析结果也表明，相同坡度段上盘滑坡所占比例一般为下盘滑坡的 3 倍以上，如 30°~35°坡度段，上盘滑坡比例为 11.6%，下盘为 3.4%(表 5)。

3.2 岩性条件

研究区地层从震旦纪到三叠纪均有出露：在断裂带上盘主要分布震旦系、寒武系、志留系茂县群第一亚组、第二亚组，下盘出露地层以泥盆系、二迭系、三叠系以及志留系罗惹坪组为主(图 5)。滑坡主要发育于上盘的寒武系和震旦系中，面积达 23.8 km²，占到研究区总滑坡面积的 62%，其余滑坡则零散地分布在其他地层中(各个地层的具体岩性描述见表 6)。

3.2.1 面积发育率

为更好地分析不同地层中滑坡崩塌出现的频

率，在此引入面积发育率的概念^[18]。

面积发育率定义为：

$$R_{ji} = \frac{DA_{ji}/DA}{A_{ji}/A}$$

其中 A 为研究区面积， A_{ji} 为某一因素 i (在此为地层)的不同类别或数据段 j 在研究区出露的面积， DA 为研究区总的滑坡灾害面积， DA_{ji} 为 i 因素出露于研究区某一分类或数据段 j 的滑坡灾害面积。

如果 R_{ji} 为 1，表明 i 因素中数据段 j 对本区受灾面积的贡献与其在本区的出露面积是相称的；如果大于 1，则表明 i 地层因素中 j 段数据对本区受灾面积的贡献高于它在本区的出露面积；反之，则认为 i 地层因素中 j 段数据对本区受灾面积的贡献较小。对不同地层面积及其滑坡面积、滑坡面积发育率的分析结果见表 6。

从表中可以看出，震旦系邱家河组的滑坡面积发育率最大，为 8.3；其次为三叠系飞仙关组、石炭系总长沟群、二迭系上统、寒武系清平组等。这些地层的滑坡面积发育率值都大于 1，表明分布于其中的滑坡比例要大于该地层在研究区所占比例，应该属于较易发生滑坡的地层。这些地层的岩性以页岩、灰岩、砂岩等为主，主要分布在距离断裂带上盘 5 km 的范围内。

3.2.2 地层内滑坡发育坡度分布

坡角是直接影响滑坡发生与否的关键因素，斜坡的坡度从几何特征上决定了地震滑坡、崩塌体的空间分布，因此，一定的坡度是滑坡发育的必要地形条件。在分析地层滑坡面积发育率的基础上，对不同

表 5 断裂上下盘不同坡度段的滑坡分布

Table 5 Landslide distribution on both sides of the fault in different slope degree

坡度分级 (°)	上盘面积 $A_U(\text{km}^2)$	所占比例 %	上盘滑坡面积 $A_{LU}(\text{km}^2)$	上盘滑坡 所占比例 (A_{LU}/A_U)	下盘面积 $A_D(\text{km}^2)$	所占比例 %	下盘滑坡面积 $A_{LD}(\text{km}^2)$	下盘滑坡 所占比例 (A_{LD}/A_D)
<10	47.228	0.108	4.237	0.090	30.908	0.170	0.380	0.012
10~15	30.265	0.069	1.768	0.058	16.108	0.088	0.175	0.011
15~20	58.851	0.135	2.389	0.041	24.706	0.136	0.161	0.007
20~25	88.050	0.202	4.025	0.046	30.441	0.167	0.365	0.012
25~30	88.415	0.203	6.093	0.069	29.747	0.163	0.701	0.024
30~35	72.146	0.165	8.357	0.116	25.371	0.139	0.855	0.034
35~40	37.666	0.086	5.494	0.146	17.642	0.097	0.913	0.052
40~45	11.484	0.026	1.856	0.162	5.873	0.032	0.329	0.056
45~50	2.060	0.005	0.219	0.106	1.176	0.006	0.022	0.019
>50	0.153	0.000	0.015	0.095	0.110	0.000	0	0

表 6 不同地层中的滑坡分布

Table 6 Landslides distribution in different stratum

地层	岩性特征	地层面积 $A_R(\text{km}^2)$	滑坡面积 $A_L(\text{km}^2)$	地层面积占有率 $A_R/A_T(\%)$	地层滑坡发生率 $A_L/A_R(\%)$	滑坡面积发育率
寒武系清平组	粉砂岩、硅质页岩夹硅质岩、砂岩	81.577	18.731	13.2	23.0	1.741
震旦系邱家河组	页岩, 硅质岩, 白云岩, 灰岩	19.351	5.026	3.1	26.0	8.300
志留系茂县群第一亚组	千枚岩夹灰岩	125.825	3.908	20.3	3.1	0.153
志留系茂县群第二亚组	灰岩夹千枚岩, 砂岩	105.648	3.024	17.1	2.9	0.168
泥盆系观雾山组	石灰岩, 砂岩, 泥质灰岩	31.895	2.433	5.2	7.6	1.479
二迭系下统	石灰岩, 泥质灰岩, 页岩	18.394	0.409	3.0	2.2	0.748
志留系罗惹坪组	页岩, 砂岩, 石灰岩	42.918	2.652	6.9	6.2	0.890
二迭系上统	燧石灰岩, 页岩	8.584	0.468	1.4	5.4	3.924
三叠系飞仙关组	页岩, 泥岩, 粉砂岩	6.129	0.387	1.0	6.3	6.374
石炭系总长沟群	石灰岩, 页岩, 砂岩	7.831	0.409	1.2	5.2	4.125

表 7 不同地层在不同坡度段滑坡面积分布(km^2)Table 7 Landslides distribution at different slope degree in the stratum(km^2)

坡度($^\circ$)	<10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	>50	
寒武纪	1.972	1.110	1.359	2.469	3.097	4.149	3.287	1.088	0.183	0.014	18.731
震旦	0.351	0.197	0.373	0.570	1.037	1.556	0.804	0.139	0	0	5.026
志留系第一亚组	0.767	0.190	0.241	0.329	0.563	1.096	0.577	0.146	0	0	3.908
志留系第二亚组	0.256	0.088	0.219	0.256	0.599	0.847	0.438	0.285	0.037	0	3.024
泥盆系观雾山组	0.212	0.161	0.095	0.212	0.416	0.497	0.555	0.270	0.015	0	2.433
二迭系下统	0	0.007	0.007	0.015	0.073	0.102	0.153	0.044	0.007	0	0.409
志留系罗惹坪组	0.950	0.117	0.197	0.358	0.563	0.336	0.095	0.037	0	0	2.652
二迭系上统	0.007	0.015	0.022	0.037	0.124	0.205	0.058	0	0	0	0.468
三叠系飞仙关组	0.022	0.029	0.015	0.080	0.139	0.044	0.044	0.015	0	0	0.387
石炭系总长沟群	0	0	0	0.007	0.058	0.131	0.131	0.080	0	0	0.409

地层中滑坡出现的坡度分布进行分析, 获得如表 7 所示结果。

尽管不同地层中滑坡发育面积各不相同, 但是滑坡发育的优势坡度一般都集中在 $25^\circ \sim 40^\circ$ 之间, 并没有因为地层岩性的差异影响到滑坡发育的优势坡度。因此, 对于本研究区域在 $M_s 8.0$ 强震作用下, 地形坡度条件在近断层区域对地震滑坡发育的影响较岩性条件大些, 在进行地震滑坡危险性评价时, 应该赋予地形坡度较大的权重影响。

3.3 地震动

地震是地震滑坡的触发因素, 地面运动加速度大小和震动持续时间决定了地震的破坏力大小。相

关的研究表明高震级及长地震持时是导致汶川地震地质灾害严重的重要原因。

汶川地震获得了大量强震动加速度记录, 尤其是获得了一些近断层区域的强震动加速度记录。本文的研究段落内, 距离断裂带 20 km 范围内共有三个台站记录到地震动加速度: 江油地震台、江油含增地震台及江油武都地震台(表 8), 这三个台站都位于下盘^[21]。

Li (2008)、周荣军(2010)等对汶川 $M_s 8.0$ 级地震强震动加速度记录的初步分析表明, 相同断层距的上盘峰值加速度值明显高于下盘值, 且衰减缓慢, 上盘效应较明显^[23,24]。据此可推断出以北川—映秀

表 8 研究区三个地震台记录的地震动峰值加速度
Table 8 Peak ground acceleration at 3 seismic stations

地震台站	经度(°E)	纬度(°N)	距破裂带距离(km)	E-W(gal)	N-S(gal)	U-D(gal)
江油	104.41	31.77	1.6	493.4	548.6	214.4
江油含增	104.62	31.78	13.0	347.0	512.5	448.1
江油武都	104.78	31.91	17.0	470.2	519.6	210.8

注:地震动峰值加速度数据由中国地震局地球物理所李小军研究员提供.

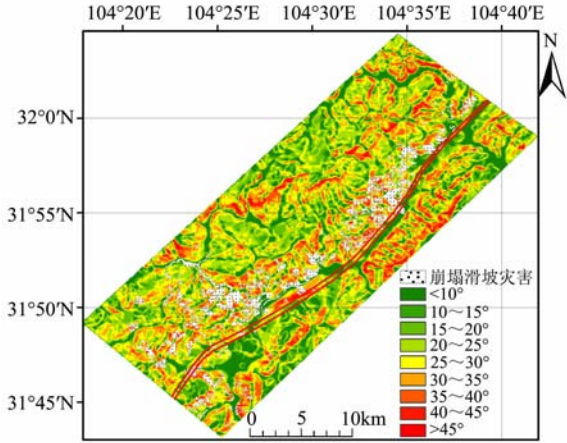


图 4 研究区坡度分布(图中红色线条代表地表破裂带)
Fig. 4 Slope degree map of the study area
(Red lines represent ground surface rupture)

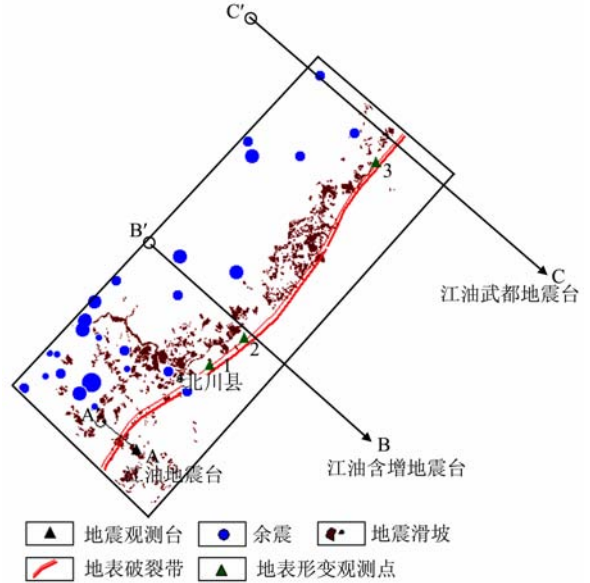


图 6 研究区地震观测台站及余震分布
Fig. 6 Seismic stations and aftershocks distribution in the study area

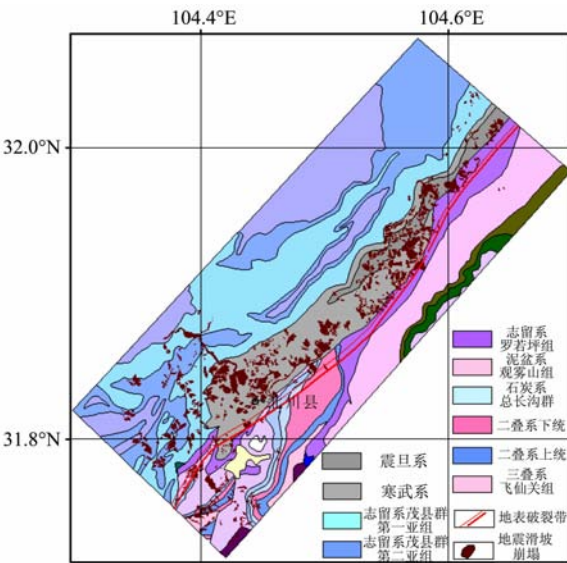


图 5 研究区地质图
Fig. 5 Geological map of the study area

剧增加^[25]. 基于此,可推断出在上盘接近断裂处的地面峰值加速度要远大于位于下盘三个观测台站的观测值,即远远大于 500 gal. 对破裂带上盘滑坡崩塌的空间分析表明,接近 90%的滑坡崩塌位于距断裂 5 km 的范围内.

3.4 上下盘的地表变形

震后野外调查发现该次地震沿北川—映秀断裂、灌县—江油断裂分别产生了 240 km、90 km 的地表破裂带,最大的垂直位移和水平位移分别为 6.5 m 和 4.9 m,沿地表破裂带产生了多种样式的地表变形^[26,27].

李传友等在北川以北段开展地表破裂追踪调查,发现沿着地表破裂同震变形主要发生在断裂的上盘,特别是断裂陡坎附近,而断裂下盘的变形则很小^[28]. 例如,图 6 中在北川县城北的点 1,地震中产生了一个具有 4~5 m 左右垂直位移陡坎,变形主要集中在这一陡坎附近的上盘,远离断层面往 NW 方向的断裂上盘,地表已基本没有变形. 而断裂下盘除靠近陡坎附近地面有少许鼓包外,无明显变形. 于

断裂为对称轴,江油、含增及江油武都在上盘映射点处的地震动峰值加速度要大于相对应地震台的实测值,即图 6 中 A'、B'、C' 处的地震动峰值加速度值要大于相对应的 A、B、C 处. 邵广彪等在近断层地震动加速度峰值衰减规律的研究中指出: $M_w \geq 7.0$ 地震,当断层距在 0~10 km 内时,向着断层方向,PGA 急

贵华等^[29]在对汶川地震地表局部化样式与建筑物破坏特征关系的研究中也发现断层上盘变形带宽度要大于下盘,致使断层上盘构建筑物破坏的宽度大于下盘.这表明断裂的逆冲运动方式使上盘作为主动盘,其受到的断裂活动影响要远远大于下盘.

因此,在断裂带上盘发育的滑坡崩塌无论是数量还是规模,都要超过断裂带下盘.

3.5 余震

地震对滑坡崩塌的作用一方面是直接导致坡体变形、失稳,发生滑坡;另一方面则是震松坡体,或造成裂缝,形成潜在的滑坡崩塌隐患.汶川地震中紧随主震之后的余震进一步加剧了滑坡崩塌灾害.据统计,5.12汶川地震8.0级主震后发生了高达3万次的余震,其中最大余震震级为6.4级.陈九辉等^[30]的研究表明汶川地震绝大部分余震沿龙门山中央断裂延伸,在龙门山逆冲断裂带的上盘一侧分布,具有明显的分段性特征.本文研究区内的余震相对稀疏,据统计,在5月12日主震后至5月20日内,研究区内共发生30次左右地震,其中4.0级以上地震有8次,并且绝大部分位于断裂带上盘^[31](图6).朱艾斓等^[32]利用双差地震定位法对2008年5月12日汶川M8.0级地震至6月26日四川地震台网整理形成观测报告的2741个余震进行了重新定位,认为余震主要分布在中央断裂带的西侧,即断裂带的上盘.

在对触发滑坡的最小震级研究中,一般认为4.0级以上的地震即可引发滑坡灾害.因此,发生在研究区上盘的余震可能进一步加剧了上盘的滑坡灾害.

4 讨论

强烈地震诱发滑坡是自然界常见的现象,在我国西南地区就发生过多次引发大量滑坡崩塌的强烈地震,如1933年叠溪7.5级地震,1973年炉霍7.6级地震,1976年龙陵7.3级地震等.但是这次汶川地震引发的滑坡崩塌成为全世界近百年来最为严重的一次,而地震中滑坡崩塌在断裂带两侧不对称分布的特点更是引起了人们广泛的关注.

与1973年2月6日青藏高原东部四川省境内炉霍发生的7.6级地震对比^[9],尽管二者的地震震级都较高,震中位置有相似的陡坡切割的地形特征,但炉霍地震诱发的滑坡、崩塌在数量、规模和影响范围上,都远远小于汶川地震.图1为炉霍地震的滑坡分布^[9].该次地震中共记录了137个滑坡,受滑坡影

响区域范围只有几百平方公里,滑坡主要沿鲜水河河谷分布.滑坡灾害区长轴方向的最大距离小于70 km,短轴方向的距离小于2 km.

分析造成这种差异的原因,可能有以下几方面的影响.一是二者的构造发育背景有所不同.汶川地震震区位于青藏高原块体的边界,比起靠近板块内部的炉霍地区,经历了更多的、更激烈的碰撞与挤压.这种地质发育历史上的差异,导致了汶川震区岩性更为破碎和脆弱的特点.当强烈地震发生时,这些位于陡坡山区的破碎岩石更易发生滑坡和崩塌.其次,汶川地震与炉霍地震的地震断层运动方式的不同也可能是造成这种差异的一个重要原因.汶川地震是由逆冲断裂引起的,而炉霍地震的发震断层是走滑型断层.已有的地震滑坡实例表明,逆冲断裂能够比走滑断裂释放更多的能量,因而可能造成更多的地表破坏.诸如1999年台湾集集地震,2004年日本新泻地震等由逆冲断层引起的地震都造成了众多滑坡崩塌灾害^[10~12].因此,地质构造背景和断层错动方式对地震滑坡的影响作用值得进一步探讨.

5 结论

有关地形地貌、岩性条件、断层距、地震动等因素对地震滑坡空间分布规律的影响是地震滑坡的主要研究内容之一,汶川地震中诱发的数量巨大的崩塌滑坡及其特殊的分布规律提供了深入认识地震滑坡的基础.本文的研究进一步补充和完善了对地震滑坡影响因素的认识.

(1)研究区中汶川地震地表破裂带两侧的地震滑坡崩塌主要分布在距断裂带5 km的范围内,上下两盘的滑坡崩塌分布在数量和面积上存在明显的差异,上盘的滑坡分布面积为下盘的8倍多,滑坡面积率(LAR)为下盘的4倍;

(2)对上下盘区域海拔高程和坡度分布的对比分析表明,在滑坡易于发生的高程(<1500 m)和坡度(25°~40°)范围,二者所占比例相当,但是出现在下盘的滑坡数量远远低于上盘.相同坡度范围内上盘的滑坡发生比例为下盘的3倍以上.这样的分析结果表明地形坡度不是引起研究区滑坡分布不对称的主要因素;

(3)位于上盘的寒武纪、震旦纪地层滑坡发育率最高;岩性与滑坡崩塌分布关系的分析结果表明,岩性因素对滑坡的差异性分布起到一定的作用,主要发育滑坡的地层中均含有页岩、泥质岩类等软弱岩

层;在 $M_s 8.0$ 地震作用下,近断层区域坡度对滑坡的影响大于岩性;

(4)研究区汶川地震余震几乎全部分布在断裂带上盘,上盘地表变形大于下盘,地震动加速度在上盘衰减速度较慢,这些显示出上盘效应的现象与发震断裂的逆冲性质相关.结合对地形地貌、岩性条件等的分析,初步认为发震断裂的错动方式是影响研究区断裂两侧滑坡分布差异的主要原因.

致 谢 非常感谢中国科学院地质与地球物理研究所祁生文博士提供的滑坡数据,感谢匿名审稿人的建议使本文得以完善和严谨.

参考文献(References)

- [1] 蒋 溥,戴丽思. 工程地震学概论. 北京:地震出版社, 1993. 226~230
Jiang P, Dai L S. Introduction to Engineering Seismology(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 226~230
- [2] David K Keefer. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, **95**: 406~421
- [3] Wen B P, Wang S J, Wang E Z, et al. Characteristics of rapid giant landslides in China. *Landslides*, 2004, **1**: 247~261
- [4] Strecker M R, Marrett R. Kinematic evolution of fault ramps and its role in development of landslides and lakes in the northwestern Argentine Andes. *Geology*, 1999, **27**(4): 307~310
- [5] Keefer D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. *Geomorphology*, 1994, **10**: 265~284
- [6] 祁生文,伍法权,刘春玲等.地震边坡稳定性的工程地质分析. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(16): 2792~2797
Qi S W, Wu F Q, Liu C L, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2004, **23**(16): 2792~2797
- [7] 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. 自然灾害学报, 1997, **6**(1): 25~30
Sun C S, Cai H W. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historic earthquake in China. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 1997, **6**(2): 25~30
- [8] 邹谨敏,邵顺妹. 古浪地震滑坡及其与断裂带的关系. 西北地震学报, 1994, **16**(3): 60~65
Zou J C, Shao S M. The relation between the Gulang seismic landslides and fault belts. *Northwest Seismological Journal* (in Chinese), 1994, **16**(3): 60~65
- [9] Zhou B G, Zhang Y M. Some characteristics of earthquake-induced landslide in southwestern China. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1994, **16**(1): 95~103
- [10] Wang W N, Wu H L, Nakamura H. Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-chi earthquake in central Taiwan. *The Island Arc*, 2003, **12**: 325~334
- [11] 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. *Nat Hazards*, 2007, **41**: 43~60
- [12] Chen X L, Tsunaki Mukai Kato. Prediction of slope failures due to earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(16): 2888~2894
- [13] 黄润秋,李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育规律研究. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2585~2592
Huang R Q, Li W L. A study on the development and distribution rules of geohazards triggered by “5.12” Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2007, **27**(12): 2585~2592
- [14] 黄润秋,李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析. 工程地质学报, 2009, **17**(1): 19~28
Huang R Q, Li W L. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan Earthquake. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2009, **17**(1): 19~28
- [15] 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. 工程地质学报, 2008, **6**(6): 721~729
Xu Q, Huang R Q. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan Earthquake. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2008, **6**(6): 721~729
- [16] 王运生,罗永红,吉 峰等. 汶川大地震山地质灾害发育的控制因素分析. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 759~763
Wang Y S, Luo Y H, Ji F, et al. Analysis of the controlling factors on geo-hazards in mountainous epicenter zones of the Wenchuan Earthquake. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2008, **16**(6): 759~763
- [17] 谢和平,邓建辉,台佳佳等. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1781~1791
Xie H P, Deng J H, Tai J J, et al. Wenchuan large earthquake and post-earthquake reconstruction-related geotechnical problems. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2008, **27**(9): 1787~1791
- [18] 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. 工程地质学报, 2009, **17**(1): 39~49
Qi S W, Xu Q, Liu C L, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5.12 Wenchuan Earthquake. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2009, **17**(1): 39~49
- [19] Kawabe H. Earthquake and earthquake motion. In: Nakamura H, Tsuchiya S, Inoue K & Ishikawa Y eds. *Earthquake-Sabo*. (in Japanese). Kokon Shoin, Tokyo, 2000. 1~13
- [20] 张培震,闻学洋,徐锡伟等. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报, 2009, **54**(7): 944~953
Zhang P Z, Wen X Z, Xu X W et al. Tectonic model of the

- great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 2009, **54**(7): 944~953
- [21] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究. *工程地质学报*, 2008, **16**(4): 433~444
Yin Y P. Research on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2008, **16**(4): 433~444
- [22] Chen X, Zhou B, Ran H, et al. Geohazards induced by the Wenchuan Earthquake. In: Willams et al, eds. *Geologically Active*. Taylor & Francis Group, London, 2010
- [23] Li X J, Zhou Z H, Huang M, et al. Preliminary analysis of strong-motion recordings from the magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008. *Seismological Research Letters*, 2008, **79**(6): 844~854
- [24] 周荣军, 赖敏, 余桦等. 汶川 $M_s8.0$ 地震四川及邻区数字强震台网记录. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(9): 1850~1858
Zhou R J, Lai M, Yu H, et al. Strong motion records of Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake from digital strong earthquake networks in Sichuan and its neighbor regions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(9): 1850~1858
- [25] 邵广彪, 冯启民. 近断层地震动加速度峰值衰减规律的研究. *地震工程与工程振动*, 2004, **24**(3): 30~37
Shao G B, Feng Q M. Research on attenuation of near-fault peak strong ground motion acceleration. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* (in Chinese), 2004, **24**(3): 30~37
- [26] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, **37**(6): 515~518
- [27] 冉勇康, 史翔, 王虎等. 汶川 $M_s8.0$ 地震最大同震垂直位移量及其地表变形样式. *科学通报*, 2010, **55**(2): 154~162
Ran Y K, Shi X, Wang H, et al. The maximum coseismic vertical surface displacement and surface deformation pattern accompanying the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 2010, **55**(2): 154~162
- [28] 李传友, 魏占玉. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震北川以北段地表破裂变形的主要样式. *第四纪研究*, 2009, **29**(3): 416~425
Li C Y, Wei Z Y. Representative patterns of coseismic deformation along surface rupture north to Beichuan city of 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2009, **29**(3): 416~425
- [29] 于贵华, 徐锡伟, 陈桂华等. 汶川 8.0 级地震地表变形局部化样式与建筑物破坏特征关系初步研究. *地球物理学报*, 2009, **52**(12): 3027~3041
Yu G H, Xu X W, Chen G H, et al. Relationship between the localization of earthquake surface ruptures and building damages associated with the Wenchuan 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(12): 3027~3041
- [30] 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 汶川 $M_s8.0$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. *地球物理学报*, 2009, **52**(2): 390~397
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 390~397
- [31] [http://www.cea.gov.cn/manage/html/\[2010-10-12\]](http://www.cea.gov.cn/manage/html/[2010-10-12])
- [32] 朱艾斓, 徐锡伟, 刁桂苓等. 汶川 $M_s8.0$ 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析. *地震地质*, 2008, **30**(3): 759~767
Zhu A L, Xu X W, Diao G L, et al. Relocation of the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake sequence in part: preliminary seismotectonic analysis. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 759~767

(本文编辑 胡素芳)