

文章编号:1000-582X(2011)10-086-11

“5.12 汶川地震”映秀极震区地震滑坡编目分析

刘新荣¹, 胡元鑫¹, 葛 华², 戚大贺¹

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘 要:2008 年汶川 5.12 地震触发了大量滑坡, 这些滑坡所造成的损失甚至超过地震本身。系统的滑坡编目是进行滑坡研究的基础技术手段, 能为滑坡量化研究提供有效数据。映秀极震区是地震滑坡分布较为集中的区域。基于高精度卫星和航拍影像遥感和现场调查, 获得映秀极震区约 109.3 km² 范围内共 1948 处地震滑坡的位置、类型及其基本几何特征, 并利用 GIS 软件建立了地震滑坡编目数据库。在此基础上, 将地震滑坡编目数据同坡向、坡角、距山脊距离、地质单元与岩性、震中距、距发震断裂距离等环境因子进行叠置分析。分析结果表明: 编目区内地震滑坡多分布在坡角为 30°~50° 的区域, 其密度与坡度有较强的正相关性; 山脊附近区域的地震滑坡密度较大, 说明这些区域对地震波的放大效应是造成坡体破坏的重要原因; 彭灌杂岩体区的地震滑坡发育程度比沉积岩区高; 震中距、距发震断裂距离与地震滑坡密度呈单指数负相关关系, 与已有研究成果具有较好吻合度, 且发震断裂上盘地震滑坡发育程度高于下盘。

关键词:5.12 汶川地震; 地震滑坡编目; 映秀极震区; 统计分析

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

Analyses of earthquake-induced landslide inventory in Yingxiu meizoseismal area of 5.12 Wenchuan earthquake

LIU Xin-rong¹, HU Yuan-xin¹, GE Hua², Qi Da-he¹

(1. a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, P. R. China)

Abstract: A number of landslides were triggered by the Wenchuan earthquake on May 12 2008. The damage caused by these landslides was even more than that by earthquake. Systematic landslides inventory, as a basic technique for landslide study, can provide applicable data to quantify the study of landslides. A lot of earthquake-induced landslides were concentrated in Yingxiu meizoseismal area of 5.12 Wenchuan Earthquake. By means of post-earthquake aerial photo and satellite imagery interpretation and field investigation, this paper gets the information including locations, types and morphometry about 1948 earthquake-induced landslides within the Yingxiu Meizoseismal area (about 109.3 km²) and inventoried them with GIS software. Then, overlay analyses are used between these landslides inventory data and environmental factors such as slope aspect, slope angle, distance from ridge, geologic units and lithology,

收稿日期:2011-06-07

基金项目:中国地质调查局资助项目(1212010914011)

作者简介:刘新荣(1969-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩土与地下工程地质方向的研究,
(E-mail)Liurong@126.com。

distance from epicentre and seismogenic fault. The results show that: Landslides are triggered by earthquake scatter predominantly in the range of $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, and the landslide density is positively correlated with slope angle. Areas nearby ridge are of high landslide density indicating that amplification effect of ridge on seismic wave is an important reason of slope failure. Earthquake-induced landslide development level in Pengguan complex is higher than that in sedimentary petrologic province. Landslide density is the single exponential negative correlation with distance from epicentre and seismogenic fault indicating that earthquake-induced landslide development level in hanging wall of seismogenic fault is higher than that in footwall, and the results predicted by regression correlation agree with the existing research findings.

Key words: 5.12 wenchuan earthquake; earthquake-induced landslide inventory; Yingxiu merzoseismal area; statistical analysis

滑坡作为一种复杂自然地质体,是造成人类伤亡和财产损失的重要灾害源之一。系统的滑坡编目作为基础技术手段,能为滑坡量化研究提供有效数据^[1]。一般而言,滑坡编目可分为某区域内单一触发因素触发滑坡的编目(如地震、强降雨等)及不同时段由不同因素触发的历史滑坡编目。

国外学者 Keefer 根据 40 次历史地震的滑坡信息提出了地震滑坡分类方法,并对地震滑坡与地震参数之间的关系作了统计分析^[2]。在 Keefer 的研究基础之上,一些学者对上世纪 90 年代至 2004 年典型地震所触发的地震滑坡进行编目^[3-9],其成果进一步丰富和拓展了地震滑坡研究思路和方法,为地震滑坡易发性及其风险分析奠定了研究格局,其中针对地震滑坡分布规律的统计分析成为主要研究方法并获得广泛应用^[10-13]。

2008 年的汶川地震触发了大量滑坡,其灾害效应甚至超过地震本身。已有的汶川地震滑坡研究成果主要体现在遥感在滑坡信息提取和灾情评估^[14-17]、地震滑坡特征及链式灾害效应^[18-21]、地震滑坡分布特征和规律^[22-28]、地震滑坡失稳机理、动力特征^[18,29-37]及地震滑坡与地震动参数之间的关系^[38-39]等方面。这些成果对于汶川地震滑坡后期机理分析、防治和规避措施研究具有重大意义。但上述研究多集中于大面积的滑坡统计或重点滑坡分析,前者因范围大而较少考虑小规模滑坡对统计模型的影响,后者虽具有典型的力学机理,但在反映地震滑坡的整体分布特征方面略显不足。

笔者应用 GRASS GIS 软件以 5.12 地震映秀极震区为例,对区内地震滑坡进行编目,再将编目数据与坡向、坡角、距山脊距离、地质单元、震中距及距发震断裂距离等环境因子进行叠置分析。

1 编目区概述

编目区坐标范围为 $31^{\circ}1'33''N\sim 31^{\circ}6'58''N, 103^{\circ}23'12''E\sim 103^{\circ}29'58''E$,位于汶川县东南部,距汶川县城、都江堰市区分别约 50 km 和 16 km,其面积约为 109.3 km²,属极震区,具有龙门山地区典型的地质单元。5.12 地震与该区触发了大量滑坡,其空间分布较为集中。

岷江呈近南北向流经编目区,渔子溪呈近东西向展布并于映秀镇处汇入岷江。区内高程为 818~3 706 m,沿北西—南东呈降低趋势。龙门山于区内呈北东—南西向展布,其地质构造复杂。映秀—北川断裂(中央断裂)为区内的区域性大断层,呈南西—北东向经牛眠沟、映秀镇等地穿越编目区,是 5.12 地震的发震断裂。以中央断裂为界,编目区可分为 2 个工程岩组区:其一为中央断裂北西侧以坚硬块状岩浆岩和侵入岩岩组为主的彭灌杂岩体;其二为中央断裂南东侧以沉积岩为主的碎屑岩类。二者为断裂接触。彭灌杂岩体长轴呈北东—南西向延伸,岩石混染、混合岩化、自变质及动力变质强烈,为喷出一—侵入,由超基性—酸性岩组成的多期复式杂岩体,其岩性极为复杂,于区内出露面积约为 91.85 km²,占研究区总面积 84.0%。沉积岩类于研究区内出露面积约为 16.5 km²,占研究区总面积 16.0%,以中生界侏罗系上统须家河组一段(T_3x^1)—须家河组两段(T_3x^2)为主,为海相、海陆交互相和河湖沼泽相含煤建造。沿岷江分布有少量第四系广汉组(Q_g)、资阳组(Q_z)及现代河流沉积(Q^{al}),其岩性主要为砂、砾石(见图 1 所示)。

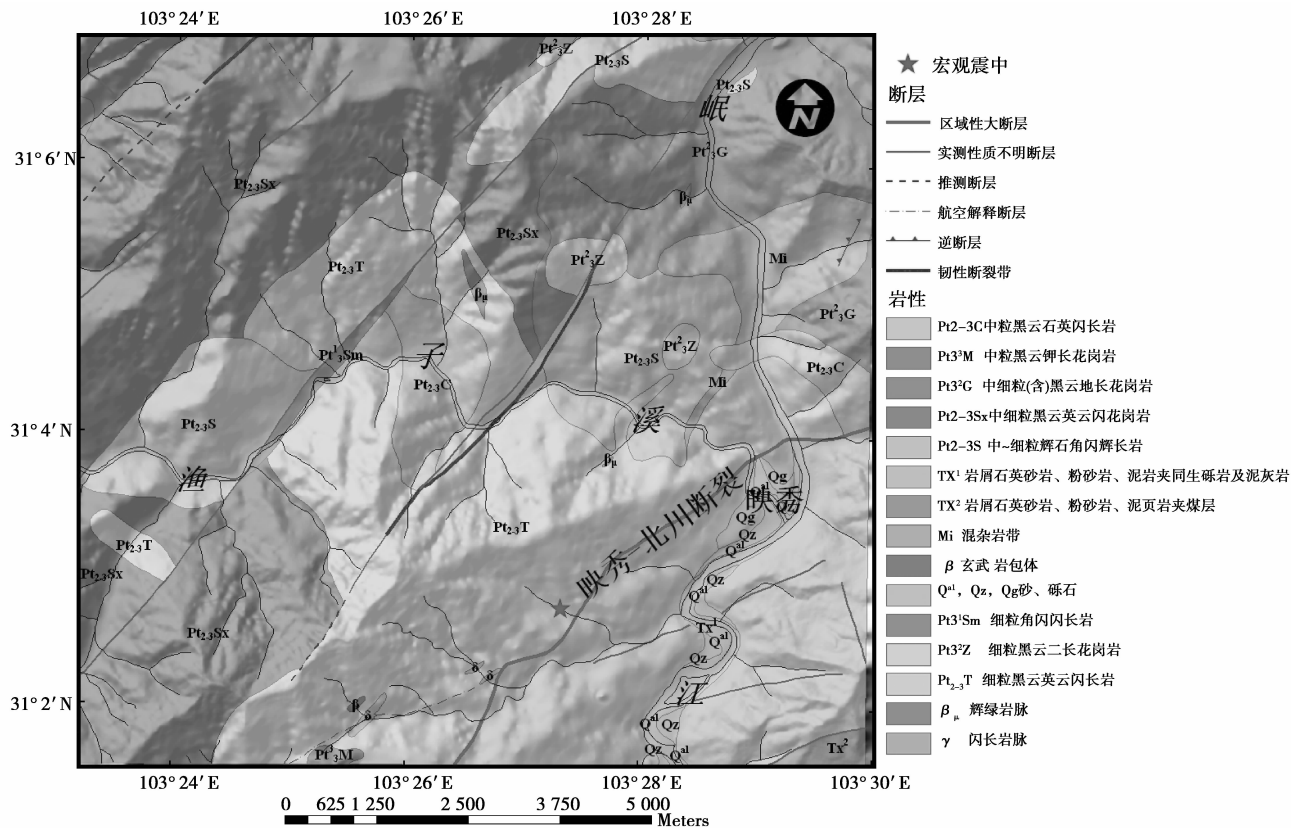


图 1 编目区地质构造和地质单元

2 地震滑坡编目数据集和方法

滑坡编目采用的基础数据包括以下 3 类:基础地质资料、地形图及遥感影像(卫星影像、航拍影像及 DEM 模型),见表 1。

利用 GRASS GIS 软件将表 1 中各数据集统一为高斯-克吕格 6°分带投影坐标系和我国西安 80 地理坐标系。

区内地震滑坡编目主要基于高分辨率卫片及航片解译进行,并对岷江、渔子溪河谷区及牛眠沟、莲花新沟地震滑坡进行现场校核。遥感解译判读准则如下:由于刚产生滑坡或崩塌,植被尚未恢复,故该处影像色调较亮;河谷两侧坡体滑塌物质堆积于河道内,造成河道突然变窄或弯曲;大量松散土体或块碎石堆积于陡坡坡脚处;公路突然中断或改变;坡脚处具有圆丘状、舌状滑动体或缓起伏地形;堰塞湖或堰塞湖溃坝后痕迹。

由于传感器、航空摄影仪或扫描仪的拍摄角度和分辨率限制,以及地表植被覆盖等因素,可能会遗漏少量几何尺寸小于 5~10 m 的滑坡。因此,除分布于编目区边缘并跨越边界的滑坡(该类滑坡约占研究区滑坡总数的 2.8%,分析时仅统计其处于编

目区内的面积),估计编目滑坡数不低于区内因 5.12 地震触发滑坡总数的 95%。

表 1 滑坡编目实例采用的基础数据集

基础数据集	比例尺或像素分辨率	提取信息或用途
茂汶幅、灌县幅 区域地质调查报告	1 : 200 000	区域地质背景
映秀幅地质图	1 : 50 000	龙门山构造带及 地层分布
龙门山构造带地震区 区域地质图	1 : 500 000	龙门山构造带
龙门山及邻区 地震分布图	1 : 500 000	震源与龙门山 构造带的关系
四川省汶川县 区域工程地质图	1 : 100 000	研究区 工程地质信息
映秀镇幅数字线划图	1 : 50 000	水文信息及校核 DEM 模型
震前 ASTER 卫星影像	15 m	与震后影像对比 提取滑坡信息
震后 ASTER 卫星影像	15 m	与震前影像对比 提取滑坡信息

续表

基础数据集	比例尺或像素分辨率	提取信息或用途
震后 QuickBird 卫星影像	约 2.5 m	滑坡编目及建立三维地形图
都汶路映秀-皂角湾航空遥感影像图	1 : 3 000	滑坡编目
ASTER GDEM	30 m	地形因子
SRTM DEM	90 m	地形因子

3 地震滑坡编目结果

利用 GRASS GIS 软件分别建立表征滑坡点位置与滑坡周界的 LA 点要素集、LB 多边形要素集,其中滑坡点位置通过滑坡物源区确定,而滑坡类型按照文献[2]确定(见图 2)。

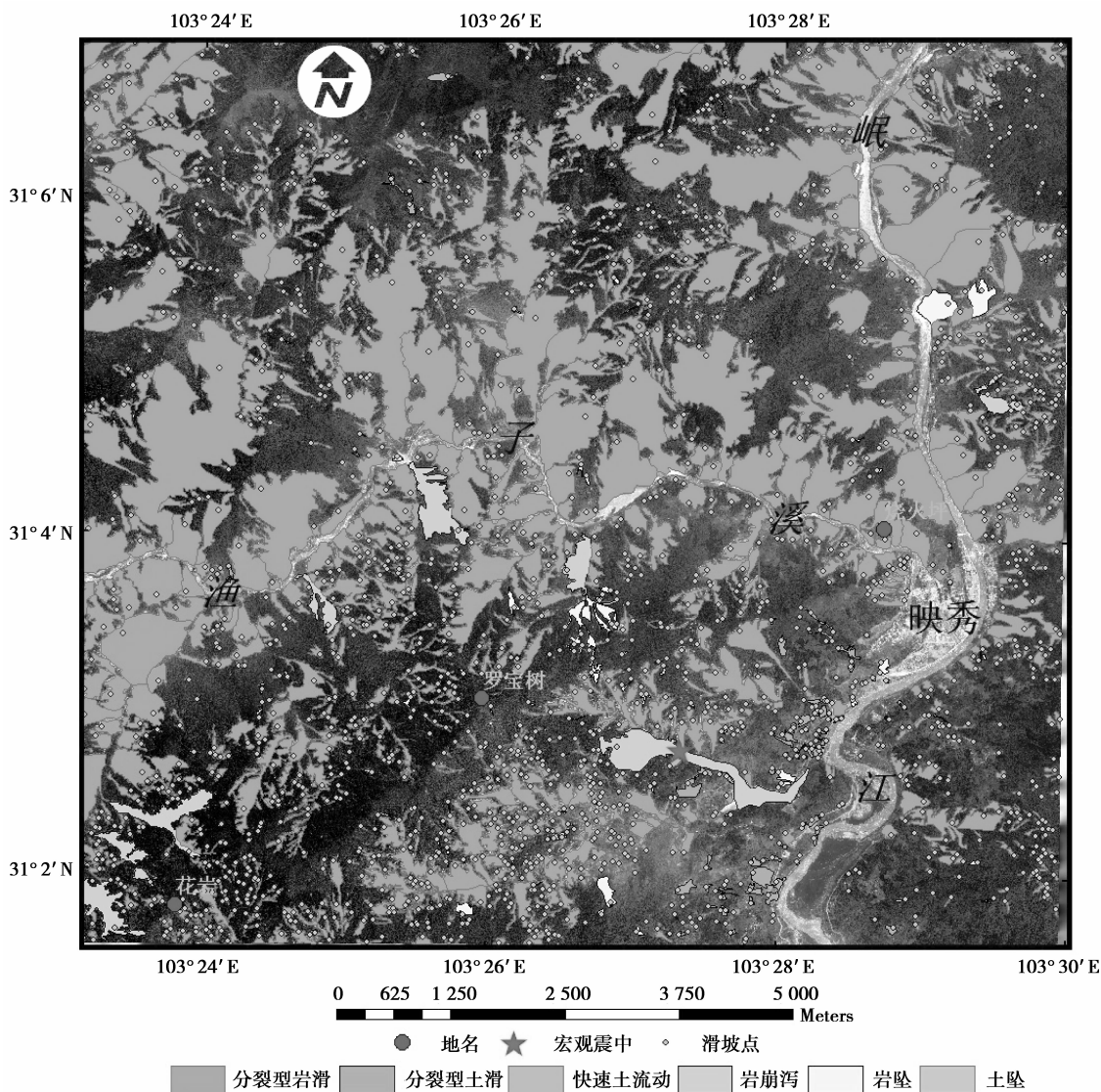


图 2 编目区的地震滑坡

图 2 表明,区内共发育滑坡 1 948 处,滑坡覆盖面积共约为 40.74 km²,占编目区总面积的 37.2%,其中绝大部分为浅层滑坡(滑体平均厚度<5 m),滑体体积相差极大,最小的岩坠约数立方米,最大的岩石崩塌(莲花新沟和牛眠沟滑坡)超过千万立方米。

表 2 数据反映了编目区内不同地震滑坡类型的编目细节。

若以烧火坪、罗宝树及花岗岩一线山脊为界,其北西侧区域、岷江及渔子溪河谷两侧为滑坡的第一高发区域,也是大型滑坡或具较大面积滑坡的分布区

域。该区域的滑坡明显呈北东-南西向分布,与研究区内的构造走势较为接近,而受河谷地形控制,岷江河谷和渔子溪河谷两侧的滑坡分别呈南北向和东西向分布。烧火坪、罗宝树及花岗岩一线山脊南东侧至

岷江一带为滑坡的第二高发区域,也是小规模滑坡的集中发育带。研究区东南部岷江东岸与中央断裂所夹地带,滑坡发育程度较低,无论滑坡规模或发育密度均较研究区内其它区域为轻。

表2 编目区地震滑坡编目细节

属性	分裂型岩滑	岩坠	分裂型土滑	土坠	岩崩泻	快速土流动
滑坡数量	1 551	276	109	2	9	1
占滑坡总数百分比/%	79.62	14.17	5.6	0.1	0.46	0.05
最小滑坡长度/m	7	4	7.9	25	346	144.3
最大滑坡长度/m	2 647	648	388.7	35	2 593.3	—
滑坡长度均值/m	207.71	52.22	81.93	30	990.7	—
最小滑坡宽度/m	3	4	6	16	40	55.3
最大滑坡宽度/m	1189	289	184	44.8	250	—
滑坡宽度均值/m	71.97	30.89	42.04	30.4	162.22	—
最小滑坡面积/m ²	138.81	79.99	169.09	1 086.12	15 665.4	8 181.16
最大滑坡面积/m ²	1.70×10 ⁶	103 309.5	41 426.26	1 263.52	460 229.4	—
滑坡面积均值/m ²	24 577.67	2 546.7	4 149.86	1 174.82	160 727.8	—
该类型滑坡总面积/m ²	3.81×10 ⁷	702 902.9	452 334.2	2 349.64	1 446 549.9	8 181.16
占滑坡总面积百分比/%	93.59	1.73	1.11	0.01	3.55	0.02
滑坡长宽比统计组距	0.17	0.35	0.44	—	2.28	—
滑坡长宽比最小值	0.096	0.067	0.321	0.558	2.576	2.609
滑坡长宽比最大值	34.188	35.4	44.4	2,187.5	23.154	—
滑坡长宽比均值	4.968 2	2.623 2	3.277 8	1,372.8	7.377 3	—

4 地震滑坡分布规律分析

编目区内地震滑坡分布规律分析基于地震滑坡编目 LA 和 LB 要素集进行,并通过下式计算滑坡密度

$$L_D = \frac{N_L}{A}, \quad (1)$$

式中: L_D 为滑坡密度,个/ km^2 ; A 为统计面积, km^2 ; N_L 为该面积内分布的滑坡数量。

4.1 坡向

沿顺时针方向以方位角 $337.5^\circ \sim 22.5^\circ$ 代表正北向,并依次递推,即以 45° 为组距统计滑坡数量与密度,其结果见图 3。

图 3 表明编目区内 SE、E、NW、N 及 S 向坡体发育的滑坡较多,W、NE 及 SW 向坡体滑坡数量较少;但由于每一坡向组距面积不一致,滑坡密度与滑坡数量之间可能存在一定差别,除 SW 向坡体外,其余坡体的滑坡密度较为接近,其中 E 向坡体的滑坡密度最大,为 20.5 个/ km^2 ,这主要受岷江和渔子溪于区

内的大致展布方向影响。

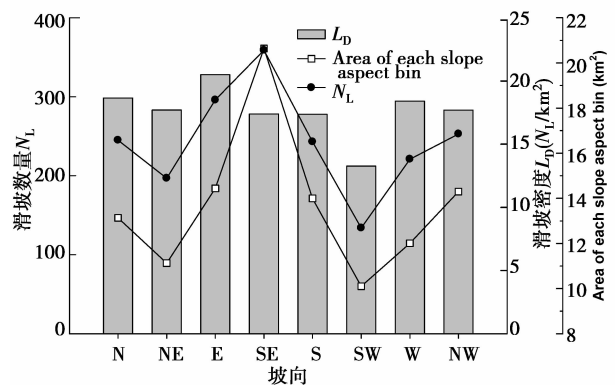


图3 滑坡密度及滑坡数量与坡向之间的关系

4.2 坡角

编目区内平均坡角范围为 $0^\circ \sim 74^\circ$,以 $\delta\theta = 1^\circ$ 的均匀重分类后得到 74 个 $\delta\theta$ 间隔。对于每一个 $\delta\theta$ 间隔,其栅格单元面积与编目区总面积百分比及该 $\delta\theta$ 间隔滑坡与滑坡总数的百分比变化见图 4。

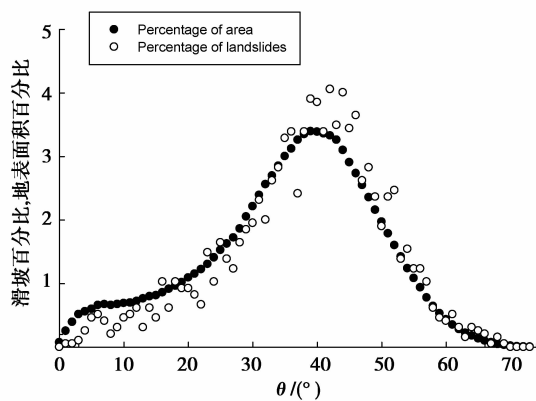


图 4 1°坡角间隔内地表面积百分比及滑坡百分比

图 4 表明地震滑坡集中于 30°~50°坡角范围,并在坡角为 42°处其数量百分比达到最大值,这与文献[25]是比较吻合的。剔除掉图 4 中无地震滑坡分布的栅格单元,则地震滑坡分布与坡度之间的关系见图 5。

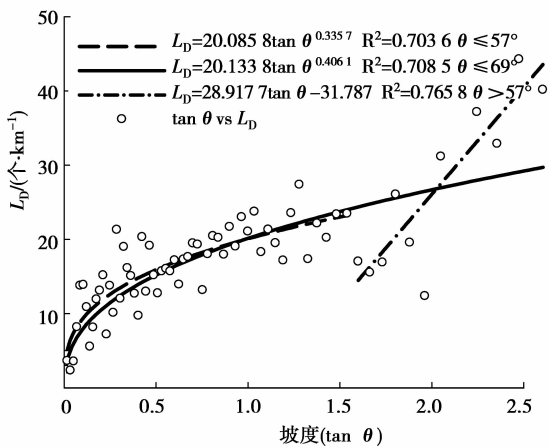


图 5 滑坡密度与坡度的拟合曲线

图 5 表明在坡角 $\theta > 57^\circ$ 的区域 ($\tan\theta > 1.540$),地震滑坡密度随坡度变化趋势较 $\theta < 57^\circ$ 的区域快,因此对 $\theta = 57^\circ$ 两侧分别进行拟合,其左侧为幂函数形式,右侧为线性函数形式,具体拟合方程为

$$L_D = 20.0858(\tan\theta)^{0.3357}, \theta \leq 57^\circ, \quad (2)$$

$$L_D = 28.9177\tan\theta - 31.787, \theta > 57^\circ, \quad (3)$$

式(2)与式(3)的 R^2 值分别为 0.7036、0.7658,显示出较好的拟合关系,分别以虚线和点划线表示,均说明滑坡密度随坡度增大而增大。图 5 中实线表示平均坡度小于 69° 栅格单元的地震滑坡密度与坡度的拟合,其拟合方程为

$$L_D = 20.1338(\tan\theta)^{0.4061}, \theta \leq 69^\circ, \quad (4)$$

式(4)仍为幂函数关系,其 R^2 值为 0.7085,具有较好的拟合关系。

式(2)、式(3)及式(4)的对比分析结果表明:当 $\theta \leq 57^\circ$ 时,式(2)与式(4)的拟合结果非常接近;但当 $\theta > 57^\circ$ 时,式(3)与式(4)的拟合结果差别比较大,在相同的坡度变化范围内,前者的增大幅度比后者大,这说明陡坡角区域的滑坡密度增长趋势比缓坡角区域要快。考虑到陡坡角区域多位于于坡体中上部,因此应结合滑坡位置与山脊距离进行分析。

4.3 距山脊距离

山脊线与滑坡之间的空间分布关系可利用山脊邻域内的滑坡密度定量表征,即建立如下式所示的山脊缓冲区

$$P = \{x \mid d(x, R_M) \leq r\}, \quad (5)$$

式中: R_M 表示研究区内的山脊; P 为山脊的缓冲区, d 为欧氏距离; r 为缓冲区距离或缓冲区建立条件。

区内山脊 5 m、10 m、20 m、30 m 及 40 m 各级缓冲区内发育的滑坡数分别为 230、126、239、228、224 处,其总数为 1 047,占整个编目区滑坡总数的 53.8% (见表 3)。各级缓冲区面积总和为 47.5 km^2 ,占区内总面积的 43.5%。各级缓冲区内地震滑坡密度分别为 23.7、24.7、21.7、20.7、20.9 个/ km^2 ,所有缓冲区内滑坡密度为 22.0 个/ km^2 ,均大于整个编目区内滑坡密度 (17.8 个/ km^2) 及非缓冲区的滑坡密度 (14 个/ km^2)。而距山脊最近的 5 m (含山脊区)、10 m 缓冲区的地震滑坡密度均高于其余各级缓冲区及编目区的平均值,表明山脊附近为地震滑坡的密集发育带。有力地证明了具较大相对高差的陡峻地形对地震波具有放大效应,而这种顶端放大效应正是造成地震滑坡沿山脊密集分布的重要原因。

表 3 山脊缓冲区滑坡统计信息

缓冲区	面积 / km^2	滑坡数 (N_L)	滑坡百分比 /%	滑坡密度 / (个· km^{-2})
5 m 及山脊区	9.7	230	11.8	23.7
10 m	5.1	126	6.5	24.7
20 m	11.0	239	12.3	21.7
30 m	11.0	228	11.7	20.7
40 m	10.7	224	11.5	20.9
总计	47.5	1 047	53.80	—

图 6 表明了各级缓冲区内地震滑坡密度和累积地震滑坡数与缓冲区半径之间的关系,二者均为线性关系,其拟合方程为

$$L_D = 24.6244 - 0.1088r, R^2 = 0.7706, \quad (6)$$

$$N_L = 23.3037r + 120.8232, R^2 = 0.9996. \quad (7)$$

上述 2 式中 r 为山脊缓冲区距离。

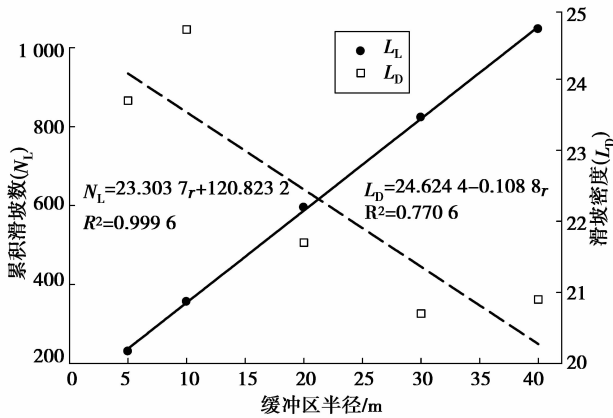


图 6 滑坡密度和累积滑坡数与缓冲区半径的关系

4.4 地质单元与岩性

各地质单元内的滑坡数量及滑坡密度见表 4。滑坡面积超过 10 km^2 的地质单元为 $Pt_{2-3}Sx$ 和 $Pt_{2-3}T$ ，相对次之的地质单元分别为 $Pt_{2-3}S$ 、 Pt_3^2G 、 T_3x^1 、 $Pt_{2-3}C$ 及 Mi (滑坡面积超过 1 km^2)，而余下的地质单元内地震滑坡面积均未超过 1 km^2 。

彭灌杂岩体出露面积为编目面积的 84%，发育于该杂岩体内的滑坡总量为 1 600 处，占编目滑坡总数的 82.1%，其面积和与杂岩体出露面积之比为 0.42。沉积岩类区占编目面积的 16%，其滑坡数为 348 处，占编目滑坡总数的 17.9%，滑坡面积和与沉积岩类出露面积之比为 0.13。这说明沉积岩类地区受地震滑坡影响程度较彭灌杂岩体要低，其中 T_3x^1 区域由于离震源较近而发生了 342 处滑坡，而 T_3x^2 由于位于编目区内面积较少，于统计面积内仅有一处滑坡，但不能证明 T_3x^2 与地震滑坡发育规模之间无明确关系。

从地震滑坡密度来看，沉积岩类的滑坡密度值为 $7.366 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$ ，标准误差为 4.120，其中 T_3x^1 具有最大的滑坡密度值 ($23.55 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$)， Qg 单元的滑坡密度值处于中等程度，为 $6.25 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$ ，余下的 T_3x^2 、 Q^d 及 Qz 单元的滑坡密度值则处于较低程度。而彭灌杂岩体地震滑坡密度均值为 $15.483 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$ ，标准误差为 3.619，其中最大值为 $45.45 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$ ，属闪长岩脉 δ 单元；地震滑坡密度值处于中等程度的地质单元为 Pt_3^3M 、 $Pt_{2-3}T$ 、 Pt_3^2G 、 Pt_3^2Z 、 $Pt_{2-3}Sx$ 、 $Pt_{2-3}C$ 及 Mi ，其值均大于 $10 \text{ 个} \cdot \text{km}^2$ ；滑坡密度值小于 $10 \text{ 个}/\text{km}^2$ 的地质单元为 Pt_3^1Sm 与 $Pt_{2-3}S$ 。这同样说明彭灌杂岩体内地震滑坡的发育程度较沉积岩类高。

表 4 各地质单元内的滑坡面积及滑坡密度

地质单元	出露面积 / km^2	滑坡数 (N_L)	滑坡面积 /(km^2)	滑坡密度 ($\text{个} \cdot \text{km}^{-2}$)
Pt_3^3M	0.15	4	0.013 1	26.67
Pt_3^2G	11.44	205	4.815 9	17.92
Pt_3^2Z	1.10	12	0.476 2	10.91
Pt_3^1Sm	0.50	3	0.276 7	6.00
彭灌杂岩体 $Pt_{2-3}Sx$	32.91	527	11.996 9	16.01
$Pt_{2-3}T$	27.39	640	11.868 8	23.37
$Pt_{2-3}C$	3.58	59	2.014 2	16.48
$Pt_{2-3}S$	11.33	100	5.745 7	8.83
Mi	3.18	45	1.309 2	14.15
$\beta\mu$	0.15	0	0	0.00
δ	0.11	5	0.060 7	45.45
β	0.02	0	0	0.00
沉积岩类 Q^d	0.56	1	0.009 1	1.79
Qz	0.70	2	0.010 8	2.86
Qg	0.32	2	0.023 8	6.25
T_3x2	0.42	1	0.001 9	2.38
T_3x1	14.52	342	2.118 2	23.55

4.5 震中距

编目区内地震滑坡点与宏观震中距离 r_c 最小值为 202.7 m ，最大值为 10199.1 m 。文中将滑坡于编目区内分布的大致密集程度与 r_c 值结合，对缓冲区建立半径进行重分类，降低数据误差与离散性以得到有意义的结果，其重分类缓冲区界限分别为 $1.8, 3.0, 5.4, 7.2, 9.3, 9.9, 10.2 \text{ km}$ ，相应的缓冲区面积、滑坡数及滑坡密度值见表 5。

表 5 滑坡与震中距(r_c)的关系

缓冲区 / km	面积 / km^2	滑坡数 (N_L)	滑坡密度 /($\text{个} \cdot \text{km}^{-2}$)
1.8	10.18	301	29.57
3.0	15.55	358	23.02
5.4	37.26	669	17.95
7.2	27.97	398	14.23
9.3	16.34	208	12.73
9.9	0.91	12	13.22
10.2	0.16	2	12.40

图 7(a)表明了地震滑坡密度与震中距(r_e)的拟合关系为指数函数形式,其拟合方程为

$$L_D = 33.6073e^{-0.1056r_e}, R^2 = 0.9547. \quad (8)$$

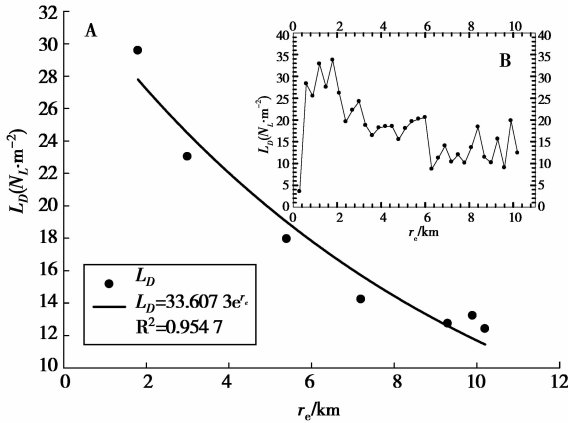


图 7 滑坡密度与震中距(r_e)的拟合曲线

图 7(b)则为以 300 m 为组距均匀建立缓冲区的滑坡密度曲线,该曲线所表达的意义不如图 6 曲线明确。式(8)表明编目区内滑坡密度随震中距增大而降低,但区内的地震滑坡编目属不完全编目,加之区内烈度达Ⅺ度,地震滑坡发育程度高,式(8)并未经震中距较大区域或烈度较低区域验证。如若将该式外推至 35 km,则滑坡密度分别 0.83 个/ km^2 ,与文献[13]基于 1989 年 Loma Prieta 地震所触发滑坡的研究数据比较接近(约为 0.5 个/ km^2);若外推方向垂直断层带,则 35 km 处已进入Ⅷ度区,此时式(8)计算值与文献[22]关于Ⅷ度区地震滑坡密度值(0.15 个/ km^2)相比稍偏大,但考虑到汶川地震所触发的次生地质灾害点主要沿断裂带呈带状分布[24],而式(8)所描述的分佈为呈放射状,因而这种差异在正常的范围之内。

4.6 距发震断裂距离

文献[24-28]认为 5.12 地震次生地质灾害与发震断裂具有紧密联系,且上下盘效应非常明显。因此文中分别针对中央断裂上下盘以 1 km 为组距建立缓冲区,每级缓冲区面积及涵盖的地震滑坡数列于表 6,其中第一列字符 L 表示断层左侧,即上盘,同理 R 表示下盘,数字代表缓冲区界限。

尽管下盘仅有 4 组统计数据,地震滑坡密度与距发震断裂距离 r_b 之间仍具有较好的指数函数拟合关系(图 8 中粗虚线),其拟合方程如下

$$L_D = 37.0551e^{-0.3171r_b}, R^2 = 0.8755. \quad (9)$$

图 8 粗实线为上盘地震滑坡密度与距发震断裂距离 r_b 的拟合曲线,其拟合方程为

$$L_D = 32.8969e^{-0.1386r_b}, R^2 = 0.8927. \quad (10)$$

表 6 滑坡与距发震断裂距离(r_b)的关系

缓冲区	面积	滑坡数	滑坡密度
/km	/km ²	(N_L)	/(个·km ⁻²)
L1	8.49	262	30.86
L2	10.00	259	25.90
L3	11.52	202	17.53
L4	12.92	256	19.81
L5	14.61	229	15.67
L6	13.38	179	13.37
L7	8.80	82	9.32
L8	6.27	66	10.53
L9	3.91	43	11.00
L10	1.71	21	12.31
L11	0.12	1	8.08
R1	6.85	173	25.27
R2	5.08	115	22.65
R3	3.17	50	15.77
R4	1.39	10	7.21

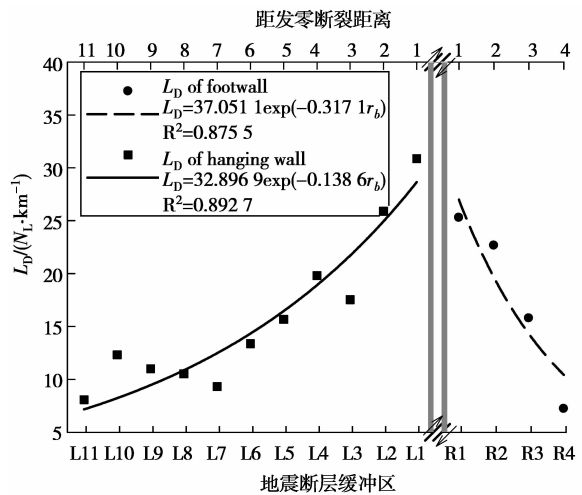


图 8 滑坡密度与距发震断裂距离(r_b)的拟合曲线

式(9)与式(10)皆具有良好的拟合性,表明滑坡密度随离发震断裂距离的增大而减小。当 $r_b < 660$ m 时,发震断裂上下盘具有相近的滑坡密度(图 7 灰色条带区域);随着 r_b 的增大,式(9)的衰减速率比式(10)快,即在发震断裂两侧相同距离处,上盘的滑坡密度值比下盘大,这表明下盘的滑坡发育程度较上盘低。由于编目区内下盘区域均为沉积岩类,上盘均为彭灌杂岩体,这恰好印证了文中所得之“彭灌杂

岩体内地震滑坡发育程度较沉积岩类高”的结论,也与文献[24,28]关于“5.12地震所触发的次生地质灾害与发震断裂具有上下盘效应”相吻合。

但研究区内的滑坡编目仅限于极震区,属非完全编目。在编目面积内,无论发震断裂上盘还是下盘,其地震滑坡密度值最小值均大于7个/ km^2 。详细分析式(9)的拟合曲线后发现,下盘的地震滑坡主要分布于距发震断裂约6.3 km范围内,此范围内滑坡密度大于5个/ km^2 ,当 $r_b > 11.3$ km后其滑坡密度值小于1个/ km^2 ,至18 km时,滑坡密度值为0.12个/ km^2 ,表明此时地震滑坡数已极少。同理,对式(10)的分析结果表明,发震断裂上盘的地震滑坡主要分布在15 km范围内,其滑坡密度大于4个/ km^2 ,至 $r_b > 40$ km时,滑坡密度值已较小,仅为0.13个/ km^2 。图9表明(据黄润秋和李为乐,2008^[24]),下盘滑坡主要分布于距发震断裂约17 km之内,而上盘滑坡主要分布于距发震断裂约46 km内区域(未考虑距发震断裂较远主要沿河谷发育的滑坡),因此通过映秀极震区建立之滑坡密度与距发震断裂距离的变化规律和已有研究具有较好的吻合度。

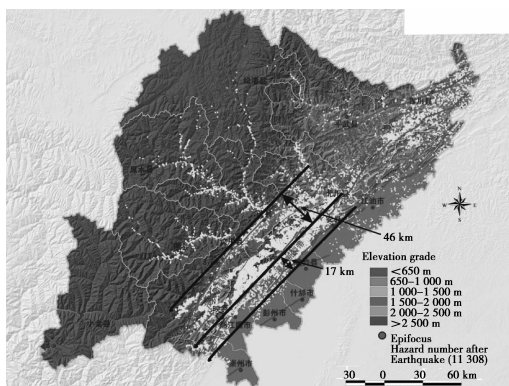


图9 滑坡分布的上下盘效应

5 结论

1)以遥感和现场调查相结合的技术手段,对编目区内因“5.12地震”触发的滑坡进行编目,共获取了1948处地震滑坡的位置、类型及其基本几何特征;区内绝大多数地震滑坡为浅层分裂型滑坡。

2)总体而言,编目区内各坡向坡体的滑坡密度值差别不大;滑坡多分布于坡角为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的区域,其数量百分比变化与不同坡角区域面积百分比基本一致,并在坡角为 42° 处达到最大值。

3)山脊附件的地震滑坡密度较大,并随着山脊距离的增大而减小,说明有较大相对高差的陡峻地

形对地震波具有放大效应。

4)滑坡与工程岩组出露面积比与滑坡密度值均说明彭灌杂岩体区的地震滑坡发育程度比沉积岩区大。

5)编目区内地震滑坡密度随震中距的增大按指数函数关系而减小,其变化规律与已有研究成果之间的较小差异属正常范围。

6)编目区内滑坡密度随着距发震断裂距离的增大按指数函数关系而减小,且下盘的滑坡发育程度较上盘低;当不考虑距发震断裂较远主要沿河谷发育的滑坡时,文中所得结果与已有研究具有较好吻合度。

参考文献:

- [1] MALAMUD B D, TURCOTTED L, GUZZETTI F, et al. Landslide inventories and their statistical properties [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(6): 687-711.
- [2] KEEFER D K. Landslides caused by earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406-421.
- [3] JIBSON R W, HARP E L, SCHULZ W, et al. Large rock avalanches triggered by the M7.9 denali fault, Alaska, earthquake of 3 November 2002 [J]. Engineering Geology, 2006, 83(1-3): 144-160.
- [4] JIBSON R W, HARP E L, S CHULZ W, et al. Landslides triggered by the 2002 Denali Fault, Alaska, earthquake and the inferred nature of the strong shaking [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(3): 669-691.
- [5] HARP E L, JIBSON R W. Inventory of landslides triggered by the 1994 Northridge, California earthquake [R]. Open-File Report 95-213, USGS, 1995.
- [6] 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): 319-332.
- [7] OCHIAI H, KITAHARA H, SAMMORI T, et al. Landslides triggered by the 1995 hyogenken Nanbu Earthquake in the Rokko mountains [C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides. Balkema, Rotterdam: Taylor & Francis, 1996, 3: 1007-1012.
- [8] KIEFFER D S, JIBSON R, RATHJE E M, et al. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(S1): S47-S73.
- [9] JIBSON R W, PRENTICE C S, BORISSOFF 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.
- [10] 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(3-4): 251-270.
- [11] 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.
- [12] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3-4): 271-289.
- [13] 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.
- [14] 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 FU-CHU, YAO XIN. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 79-81.
- [15] 王治华,徐起德,徐斌,等. 5.12 汶川地震航空遥感应急调查[J]. *中国科学(E辑:技术科学)*, 2009, 39(07): 1304-1311.
WANG ZHI-HUA, XU QI-DE, XU BIN, et al. Emergency aero-photo survey after the 5.12 Wenchuan earthquake china [J]. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 2009, 52(4): 835-843.
- [16] SATO H, HARP E. Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7.9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China using satellite imagery and Google Earth[J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 153-159.
- [17] 许冲,戴福初,陈剑,等. 汶川 Ms8.0 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 FU-CHU, CHENG JIAN, et al. Identification and analysis of secondary geological hazards triggered by a magnitude 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 754-762.
- [18] 韩金良,吴树仁,何淑军,等. 5.12 汶川 8 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 306-326.
HAN JIN-LIANG, WU SHU-REN, HE SHU-JUN, et al. Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0 [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 306-326.
- [19] 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.
YIN YUE-PING. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433-444.
- [20] YIN J, CHEN J, XU X, et al. The characteristics of the landslides triggered by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake from Anxian to Beichuan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(5-6): 452-459.
- [21] 李勇,黄润秋, DENSMORE Alexander L, 等. 汶川 8.0 级地震的基本特征及其研究进展[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2009, 41(3): 7-25.
LI YONG, HUANG RUN-QIU, DENSMORE A L, et al. Basic features and research progresses of Wenchuan Ms8.0 Earthquake [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2009, 41(3): 7-25.
- [22] 姚鑫,许冲,戴福初,等. 四川汶川 Ms8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性[J]. *地质通报*, 2009, 28(8): 1156-1162.
YAO XIN, XU CHONG, DAI FU-CHU, et al. Contribution of strata lithology and slope gradient to landslides triggered by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 1156-1162.
- [23] 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 RUN-QIU, LI WEI-LE. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2009, 20(3): 1-7.
- [24] 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.
HUANG RUN-QIU, LI WEI-LE. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [25] 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(02): 25-29.
QIAO JIAN-PING, PU XIAO-HONG, WANG

- MENG, et al. A study on characteristics of distribution of earthquake-induced landslides and hazard zoning[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(02): 25-29.
- [26] 殷跃平,潘桂堂,刘宇平,等.汶川地震地质与滑坡灾害概论[M].北京:地质出版社,2009.
- [27] 王秋良,薛宏交,杨强,等.北川地区地震灾害的地形因子分析[J].大地测量与地球动力学,2008,28(6): 68-72.
- WANG QIU-LIANG, XUE HONG-JIAO, YANG QIANG, et al. Analysis on terrain factors of earthquake disaster in beichuan area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(6): 68-72.
- [28] 黄润秋,李为乐.汶川大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.
- HUANG RUN-QIU, LI WEI-LE. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(01): 19-28.
- [29] 冯文凯,许强,黄润秋.斜坡震裂变形力学机制初探[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1): 3124-3130.
- FENG WEN-KAI, XU QIANG, HUANG RUN-QIU. Preliminary study on mechanical mechanism of slope earthquake-induced deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1): 3124-3130.
- [30] 乔彦肖,马中社,吕凤军.汶川地震地质灾害发育特点及动因机制分析[J].中国地质,2009,36(3): 736-741.
- QIAO YAN-XIAO, MA ZHONG-SHE, LV FENG-JUN. Characteristics and dynamic cause mechanism of the Wenchuan Earthquake geological hazards [J]. Geology in China, 2009, 36(3): 736-741.
- [31] 陈晓兰,卢国胜.地震诱发滑坡的机理研究[J].安徽农业科学,2009,37(18): 8612-8613.
- CHEN XIAO-LAN, LU GUO-SHENG. Review on the formation mechanism of landslide induced by earthquake [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2009, 37 (18): 8612-8613.
- [32] 郑颖人,叶海林,黄润秋.地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8): 1714-1723.
- ZHENG YING-REN, YE HAI-LIN, HUANG RUN-QIU. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (8): 1714-1723.
- [33] 李秀珍,孔纪名,邓红艳,等.“5·12”汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(3): 72-77.
- LI XIU-ZHEN, KONG JI-MING, DENG HONG-YAN, et al. Analysis on characteristics and deformation failure mode of large-scale landslides induced by “5.12” Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University : Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 72-77.
- [34] 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.
- XU QIANG, HUANG RUN-QIU. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12TH Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721-729.
- [35] 王运生,徐鸿彪,罗永红,等.地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11): 2360-2368.
- WANG YUN-SHENG, XU HONG-BIAO, LUO YONG-HONG, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2360-2368.
- [36] 黄润秋.汶川8.0级地震触发崩滑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.
- HUANG RUN-QIU. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [37] 张永双,石菊松,孙萍,等.汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J].地质力学学报,2009,15(2): 131-141.
- ZHANG YONG-SHUANG, SHI JU-SONG, SUN PING, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 131-141.
- [38] 王秀英,聂高众,王登伟.利用强震记录分析汶川地震诱发滑坡[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11): 2369-2376.
- WANG XIU-YING, NIE GAO-ZHONG, WANG DENG-WEI. Analysis of landslide induced by Wenchuan earthquake by strong motion records [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2369-2376.
- [39] 王秀英,聂高众.汶川 M_s 8.0级地震诱发崩滑特点及其与地震动参数对应关系初析[J].岩土工程学报,2009,31(9): 1378-1383.
- WANG XIU-YING, NIE GAO-ZHONG. Characteristics of landslides induced by Wenchuan M_s 8.0 earthquake and preliminary analysis of their relations with ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (9): 1378-1383.