

四川汶川地震诱发滑坡与峰值速度的关系

王秀英¹, 王登伟²

WANG Xiu-ying¹, WANG Deng-wei²

1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;

2. 四川省地震局西昌地震中心台, 四川 西昌 615022

1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Xichang Seismic Station, Earthquake Administration of Sichuan Province, Xichang 615022, Sichuan, China

摘要:利用汶川地震诱发的滑坡资料和得到的地震动数据,对地震诱发滑坡与峰值速度的关系进行了分析,得到一些基本认识:①地震诱发滑坡与地震动峰值速度(PGV)存在明显的正相关性,可以利用 PGV 作为判别地震滑坡的判据;②汶川地震龙门山震区可以触发地震滑坡的 PGV 下限约为 0.5m/s;③龙门山震区可以触发地震滑坡的 PGV 上限约为 1.5m/s;④建立了汶川地震龙门山震区 PGV 衰减关系,可用以估计地震滑坡致灾的范围。利用地震动参数研究地震诱发滑坡具有很好的一致性,可以克服应用烈度时存在的不足。上述研究结果可以应用于震后灾害快速评估工作中,为应急救援方案的制定提供参考信息。

关键词:汶川地震;地震滑坡;峰值速度;地震动参数;灾害评估

中图分类号:P694

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)01-0159-07

Wang X Y, Wang D W. Relationships between the Wenchuan earthquake-induced landslide and peak ground velocity, Sichuan, China. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(1):159-165

Abstract: Based on the data of landslides induced by the Wenchuan earthquake and of strong ground motion, the relationship between earthquake-induced landslides and PGV is analyzed and some conclusions are obtained as following: (1) There exists an obvious positive relation between earthquake-induced landslides and PGV, therefore, PGV can be used to judge the failure result of slopes after an earthquake. (2) The PGV threshold, which can trigger landslides in the Longmenshan earthquake-hit areas, is about 0.5m/s. (3) The upper limit of PGV is about 1.5m/s in the Longmenshan areas. (4) An attenuation law of PGV is built for the Longmenshan areas, which can be used to estimate the area affected by earthquake-induced landslides. Consistency is found if ground motion parameters are used to measure earthquake-induced landslides, which can compensate the deficiencies of earthquake intensity. Research result obtained from this paper can be applied to the rapid hazard evaluation work after an earthquake and provides reference information for emergency rescue decision making.

Key words: Wenchuan earthquake; earthquake-induced landslide; peak ground velocity; ground motion parameters; hazard evaluation

地震诱发滑坡灾害在中国分布非常广,而且往往造成巨大的经济损失和众多的人员伤亡。2008 年 5 月 12 日汶川 Ms 8.0 级地震诱发了数以万计的滑坡、崩塌等地质灾害^[1-3],影响面积超过 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,严重影响区域超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。据公布的数据,地

震地质灾害损失达到总损失的 1/3,直接地质灾害人员死亡超过 2 万人^[2],是新中国成立以来造成灾害性最为严重的一次地震^[3]。

中国地震滑坡研究始于 20 世纪 70 年代^[5],但多年来对地震滑坡的研究中,地震影响因素一直沿用

收稿日期:2010-07-14;修订日期:2010-08-25

资助项目:中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(编号:ZDJ2010-28),国家自然科学基金资助项目(编号:40872209)

作者简介:王秀英(1972-),女,博士,副研究员,从事地震灾害学方面的研究。E-mail:xiuyw@sohu.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

烈度作为判定标准^[6-8]。由于烈度存在人为影响因素,而且时间上有滞后性,不同区域、不同时段烈度标准不一致,将其应用于震后灾害快速评估有诸多的不便。随着强震观测台网产出数据的积累和增多,利用地震动参数研究地震滑坡逐渐成为可能。汶川地震获得大量主震强震记录,为利用地震动参数研究地震滑坡提供了基本数据。利用地震动参数研究地震滑坡,一方面,可以对地震滑坡进行定量计算和分析,避免人为影响因素;另一方面,地震动参数可以具体反映不同场地的实际震动情况,较宏观平均评估的烈度值更能代表不同地点的实际震害程度。国外在 20 世纪 80~90 年代即开始利用地震动参数研究地震滑坡^[9-11],而且取得了很好的效果,表明利用地震动参数研究地震滑坡对不同区域、不同地震具有比较好的一致性,可以克服烈度做横向(不同地区)或纵向(不同时段)对比时存在的问题。

地震动参数有多种表示形式^[12],在对地震滑坡研究中多采用峰值加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)和 Arias 强度(Arias Intensity)^[10-11],利用峰值速度(Peak Ground Velocity,PGV)的研究相对较少。本文利用汶川地震得到的强震记录数据和滑坡数据,对地震诱发滑坡与地震动峰值速度的关系进行了分析,希望能找到它们之间的对应规律,以期将峰值速度引入地震滑坡的判别评估工作中。

1 滑坡和峰值速度(PGV)数据分布

为了对本次地震诱发滑坡进行详细的研究和分析,本文收集整理了震区近 3000 个崩滑点比较详细的资料。这些滑坡点分布于龙门山断裂带上下两盘,如图 1 所示,图中发震断层数据取自徐锡伟等^[13]的现场考察数据,属于本次地震地质灾害最为严重的区域,对于研究地震诱发滑坡及其灾害评估非常有价值。选取这些数据的另一目的是,在这些崩滑点附

近都有强震记录数据,可以应用地震动参数对这些崩滑资料进行分析,建立地震诱发滑坡与地震动参数之间的对应关系和判别标准。

汶川地震发生时,在龙门山断裂带及其附近地区部署了几十套强震观测仪,获得了本次汶川地震大量强震观测记录资料^[14-16]。本文选取了沿发震断层分布的近 40 组强震观测数据,这些强震台站沿发震断层分布在上下两盘,分布位置如图 1 所示。在这些台站附近都有规模和数量不等的崩滑灾害点分布。

表 1 为部分台站的峰值加速度和峰值速度数据。在这些台站中,获得的最大峰值速度近 5m/s (SFBJ),距离发震断层约 10km。获得本次地震主震最大峰值加速度的汶川卧龙台(WCWL),东西向峰值速度超过 3m/s,排在第三位。由此可见,峰值速度与峰值加速度并不完全对应,峰值加速度大,峰值速度未必一定大。由于峰值加速度具有随机的特点,离散性很大,随场地条件不同会有很大变化,而且会发生临近震中或断层的饱和现象^[12],所以虽然峰值加速度在整体上可以反映不同区域的震害程度,但对于具体的场点并不能完全反映真实的振动情况。而地震动速度则可以反映地震动释放的能量,因为 $1/2mV$ 为质点运动的动能,所以地震动速度与质点运动的能量是成比例的,因而 PGV(峰值速度)可以在一定程度上反映震时地表震动释放能量的强度,进而反映地表破坏的程度。所以 PGV 与地震地表破坏(如滑坡)应该具有比较密切的关系。

2 地震滑坡与峰值速度的对应关系

2.1 区域范围峰值速度与地震滑坡灾害的对应关系
汶川地震后,国土资源部地质环境监测院根据对震区地震地质灾害(主要为崩塌、滑坡灾害)调查的结果,按灾害点分布密度不同将地震灾区

表 1 部分台站峰值加速度(PGA)和峰值速度(PGV)数据

Table 1 Some PGA and PGV data from stations studied in this paper

台站代码	PGV_EW /m·s ⁻¹	PGV_SN /m·s ⁻¹	PGV_Vertical /m·s ⁻¹	PGA_EW /m·s ⁻²	PGA_SN /m·s ⁻²	PGA_Vertical /m·s ⁻²
SFBJ	4.9616	4.6516	2.6175	5.694	5.925	6.459
JYZY	3.8656	3.1224	1.3707	5.223	4.682	2.022
WCWL	3.2758	3.5460	2.5937	9.763	6.648	9.664
JYHZ	3.1959	2.2903	2.1015	5.299	3.342	4.534
LXMK	3.1814	2.7868	2.1264	3.274	2.896	3.651

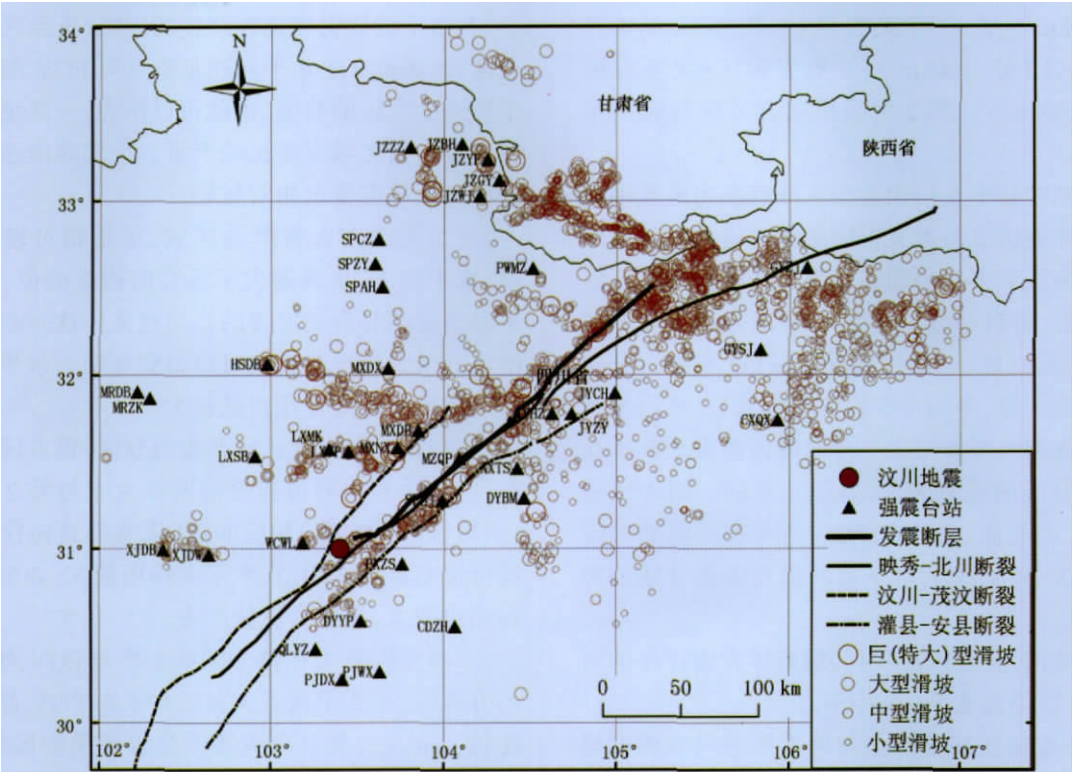


图 1 滑坡点与强震台站分布

Fig. 1 Distribution map of landslides and Strong Motion Stations

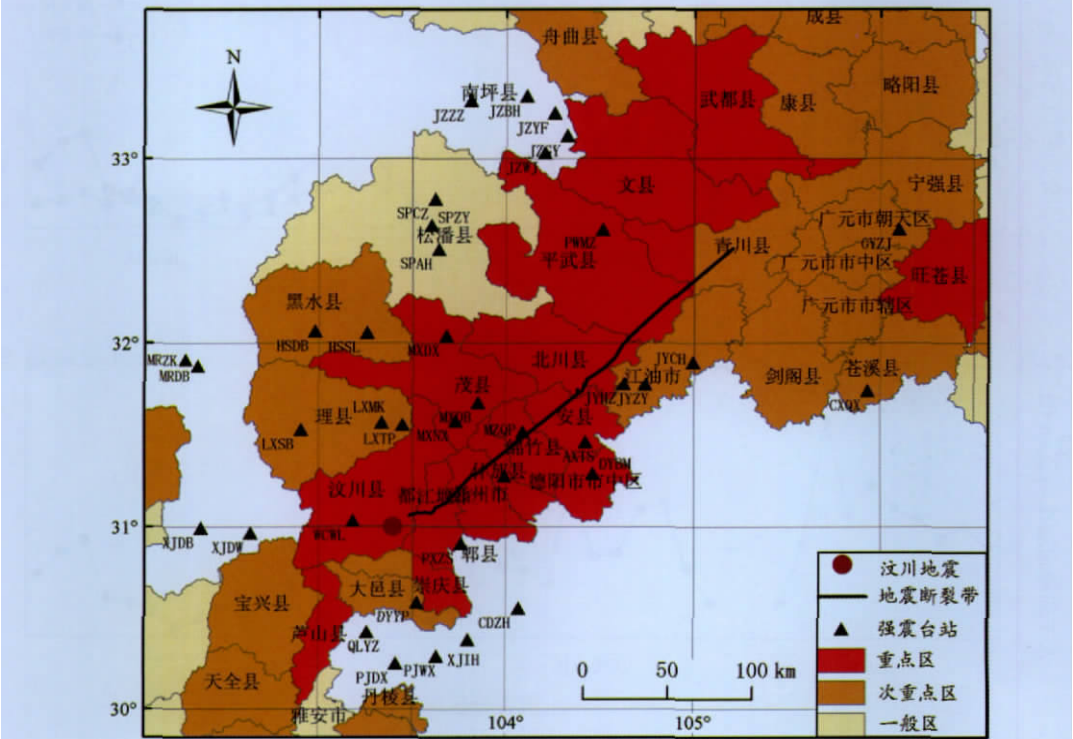


图 2 强震台站与地质灾害分区的关系

Fig. 2 Strong Motion Stations and their relations with geologic disaster zonation

分为 3 类区域^①,分别为:重点灾害区(灾害点密度≥12 处/100km²)、次重点灾害区(3 处/100km²≤灾害点密度<12 处/100km²)、一般灾害区(灾害点密度<3 处/100km²)。图 2 为地质灾害分区与强震台站分布图。

为得到在整个龙门山地区区域范围内地震动峰值速度与地震诱发滑坡灾害的总体对应关系,利用汶川地震地质灾害区划图和选用的强震台站在区划图中的位置,将台站分为 4 类,分别对应区划图中的重点区、次重点区、一般区和其它区(没有进入分布密度统计的区域,平均灾害程度非常低)。然后分别绘制每个观测点强震记录 3 分向峰值速度与其所在不同灾害分区的对应关系,如图 3 所示。图 3-a 表示东西向、南北向、垂直向 PGV 与灾害分区的对应关系,图 3-b 为 PGV 水平向均值与灾害分区的对应关系。

分析峰值速度(PGV)与区域整体灾害程度的对应关系,可以得到如下一些认识。

(1)峰值速度在整体上与地震滑坡灾害程度呈正相关,在滑坡灾害比较严重的区域,峰值速度也都

较大;随灾害程度的降低,峰值速度整体上也减小。在 2 个地质灾害比较严重的区域(重点区和次重点区),无论 2 个水平向还是垂直向 PGV 都明显大于另外 2 个区域的值。由此可以认为,一次地震后峰值速度大的区域灾害比较严重,反之峰值速度普遍较小的区域灾害也相对较轻。

(2)无论在灾害严重区域,还是相对较轻的区域,水平向 PGV 普遍大于垂直向相应的值,因此水平向地震动对滑坡灾害的作用更大。这一点从坡体滑块的受力情况分析也可以得到证明,水平向作用力对滑块向外的作用贡献较大。

(3)在 2 个灾害比较严重的分区(重点区和次重点区),垂直向峰值速度值明显大于另外 2 个区域(一般区和其它区)相应的值,说明垂直向作用对地震滑坡有促进作用。在水平向作用较大,如果垂直向作用也较大,灾害会比较严重。

(4)分析图 3,在整个区域水平向 PGV 有 1.5m/s 的分界线,在 2 个重点灾害区水平向 PGV 普遍大于此值,而在另外 2 个灾害不是很严重的区域,PGV 大都小于此值。但同时也应注意到,在第 4 类区域,

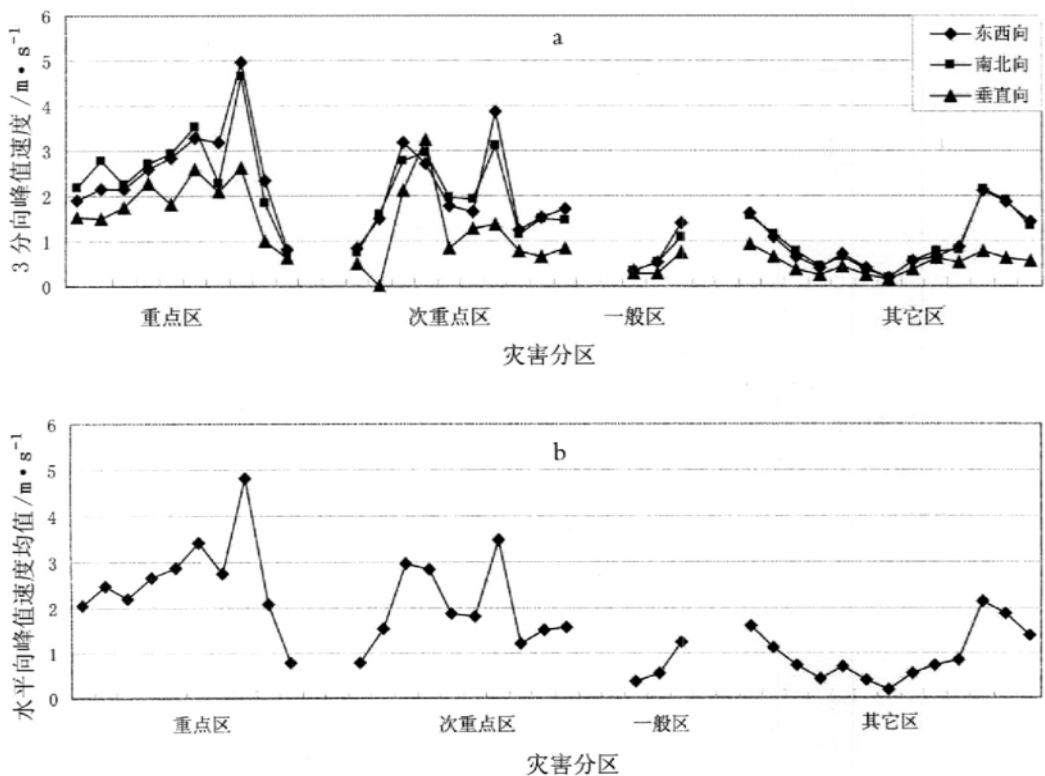
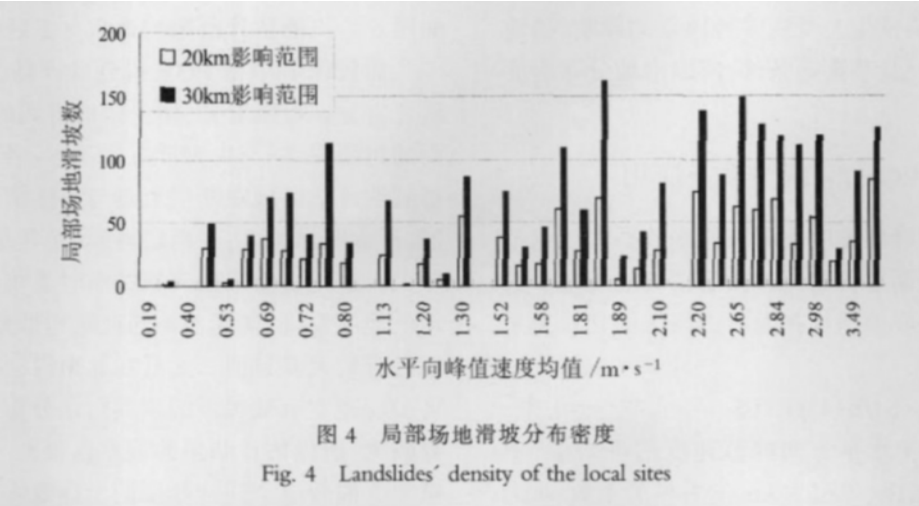


图 3 3 分向 PGV(峰值速度)与灾害分区的对应关系

Fig. 3 Three components of PGVs vs. the corresponding geologic disaster zonations



有些观测点的值明显大于这个分界线, 通过与滑坡分布图(图 1)对比会发现, 有几个点处于平原区域, 另外 2 个点虽然在 4 类分区, 在以行政区为单位的平均灾害区划图上没有表现出来, 但局部场地附近滑坡比较密集。这似乎说明峰值速度在进行区域级的整体应用时, 更能突出一些局部破坏的严重程度。

(5)与峰值加速度对比, 峰值速度可以适当消除峰值加速度随机性很大的缺点, 在同一类型灾害区, 峰值速度幅值更集中一些; 在峰值加速度较低的某些点, 对应的峰值速度并不是很低, 与局部场地的滑坡分布密度对应得很好。

2.2 局部场地峰值速度与滑坡灾害的对应关系

地质灾害区划反映了根据行政区域确定的灾害严重程度, 是某个行政区域受灾程度的平均反映, 与地震动参数的关系可以反映整体受灾程度的对应变化情况, 但地震诱发崩滑等地质灾害受局部地形地貌、地层岩性、地质构造等的影响非常明显, 局部区域崩滑灾害的严重程度与其记录的峰值速度的对应关系应该更加密切。因此, 需要对有强震记录的局部区域的崩滑等地质灾害密度与峰值加速度的对应关系进行进一步的研究分析。

统计每个台站局部场地滑坡密度和相应水平向峰值速度的对应关系。为消除局部场地调查数据分布不均的情况, 同时统计了 20km 和 30km 两个范

围的滑坡密度, 图 4 为局部场地滑坡分布密度与峰值速度的对应关系。

在图 4 中, 通过局部场地滑坡分布密度与峰值速度水平向平均值的对比, 发现峰值速度小于 0.5m/s 时, 诱发滑坡的数量非常小; 而当峰值速度达到 0.5m/s 后, 局部场地滑坡数开始明显增多。在峰值速度达到 2.0m/s 后, 局部场地滑坡分布密度基本保持在一个较高的水平, 上下有小的浮动。说明在地震动峰值速度达到 2.0m/s 后, 基本达到研究区域所有斜坡能够承受的峰值速度的上限, 这时滑坡的发生仅与局部场地的地形有关(如平原或山区的差异)。

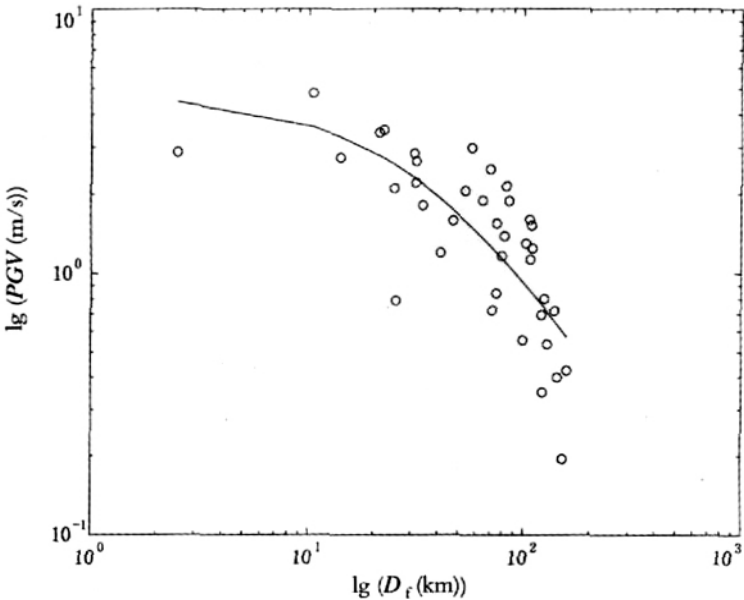


图 5 PGV attenuation law in the Longmenshan earthquake-hit areas

在 0.5m/s 和 2.0m/s 之间, 滑坡分布密度相对变化较大, 地震滑坡的发生会受到多种因素的影响, 如地形地貌、岩性、断层、节理等条件, 所以滑坡分布密度上下浮动很大。

3 峰值速度(PGV)衰减关系及应用

利用选用的峰值速度数据和这些数据观测点距离汶川地震震断层的距离, 按通用的地震动参数衰减公式, 建立峰值速度在龙门山震区的衰减关系如下:

$lg(PGV)=-1.42\times lg(D_f+45)+3.03$ $r=-0.77, \sigma=0.20$
式中: PGV 为 2 个水平方向峰值速度的平均值, 单位 m/s ; D_f 为断层距, 单位为 km ; r 为相关系数; σ 为标准差开方, 单位为 m/s 。图 5 为实际样本点与拟合曲线的关系。

按本文得到的峰值速度上限值(区域范围的分界线)1.5m/s 和下限值 0.5m/s, 利用峰值速度衰减

关系可以得到滑坡的影响距离分别 57km、177km, 如图 6 给出的估计范围与地质灾害区划的关系。

比较图 6 中由 PGV 得到的评估关系与实际地质灾害分区可以看到, 由上限值得到的评估区域(里面的封闭曲线)与灾害严重区基本一致; 而由下限值得到的评估区域在断层上盘与实际情况符合得比较好, 下盘明显偏大; 在断层两端, 尤其是北东端, 偏差较大。这是由于采用衰减关系时是将整个震区作为均质地层看待, 实际上不同区域地形地貌、地质岩性还是有较大差异的, 尤其在北东段, 处于黄土覆盖区, 与建立衰减关系的强震台站分布区地质条件差异较大, 所以估计结果的偏差也较大。另外, 断层的破裂方向效应、逆冲断层的上盘效应等也使得灾害的空间分布存在差异。

总体上来说, 在震后各种数据尚未获得时, 如果依据一定的衰减关系得到与实际震害比较一致的评估, 将会为地震应急救援工作提供重要的参考信息,

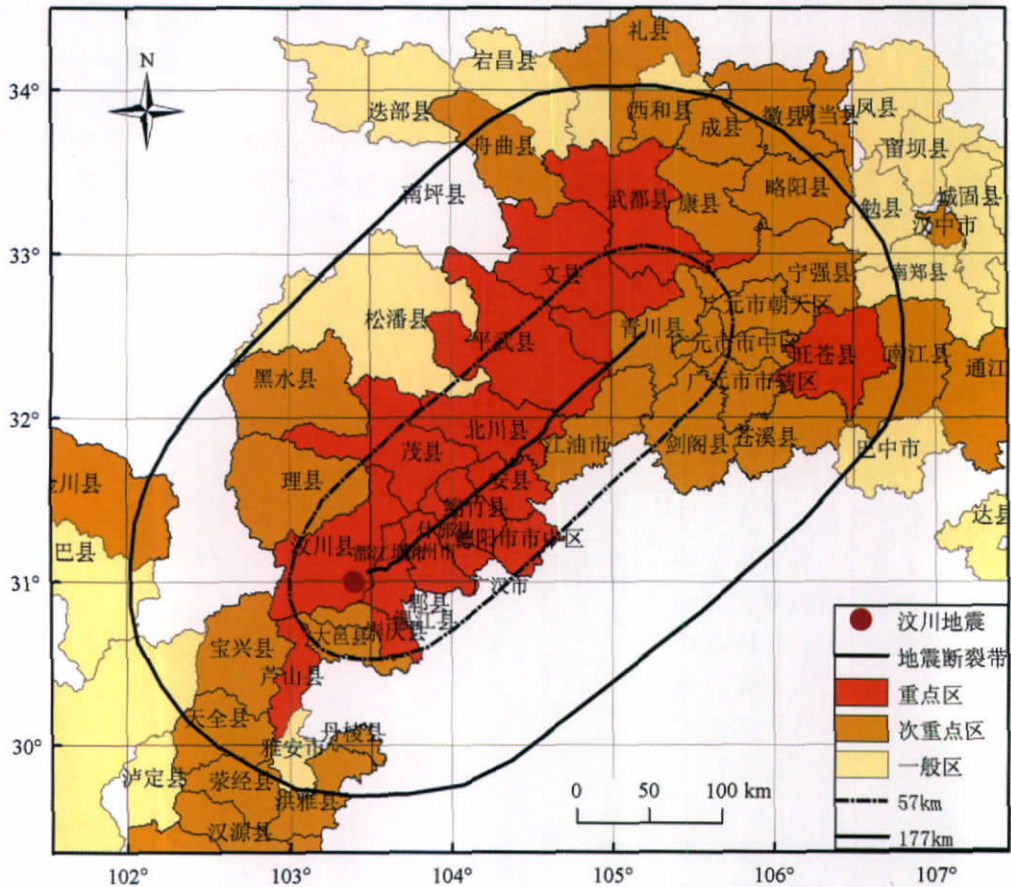


图 6 峰值速度(PGV)衰减关系评估结果与实际灾害分区结果对比

Fig. 6 Comparison of the result calculated from PGV attenuation law and the geologic disaster zonation

对应急方案制定、救援路线的选择至关重要。如以烈度作为评估依据,采用VI度作为可以诱发滑坡的起始烈度,则评估区域要远远大于本文给出的结果。评估区域越大,对救援工作提供的帮助信息越小,无法确定重点救助地区。所以本文给出的方法具有现实的使用价值。

4 结 语

汶川地震得到的大量诱发滑坡资料和地震动数据为应用地震动参数进行地震滑坡定量研究提供了机会。通过本文的研究及其它一系列研究,得到地震诱发滑坡与一些常用的地震动参数具有非常好的相关性,而且不同区域、不同地震得到的研究结果具有很好的一致性,所以利用地震动参数研究地震滑坡可以克服使用地震烈度时存在的问题。通过本文的分析,得到地震动峰值速度与地震诱发滑坡对应关系的一些认识。

(1)地震动峰值速度与地震诱发滑坡具有非常明显的正相关性,峰值速度大,则滑坡灾害比较严重,可以利用这种关系,应用峰值速度研究地震滑坡。

(2)汶川地震龙门山震区可以触发滑坡的峰值速度下限约为 0.5m/s ,小于此值时,触发滑坡的可能性很小。

(3)区域范围的分析表明,龙门山震区存在一个比较明显的峰值速度分界线 1.5m/s ,大于此值后诱发滑坡灾害比较严重;局部场地的分析表明,峰值速度大于 2.0m/s 后,滑坡灾害特别严重。综合分析认为, 1.5m/s 适合区域范围的分析,可以作为该区诱发滑坡的上限值。

(4)建立了汶川地震龙门山震区峰值速度衰减关系,利用此关系和峰值速度可以触发滑坡的上下限值,可以估计地震滑坡的影响范围。

目前国内地震滑坡的研究还限于以地震烈度作为影响因素,本文的研究将地震动参数引入地震滑坡的分析判别工作中,对于促进国内地震滑坡的定量研究具有积极意义。

致谢:感谢国土资源部地质环境监测院刘传正

教授对本文工作的支持。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]崔鹏,韦方强,陈晓清,等.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].科技减灾,2008,23(4):433-444.
- [4]刘传正.四川汶川地震灾害与地质环境安全[J].地质通报,2008,27(11):1907-1912.
- [5]李天池.地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨[C]//滑坡文集(第2集).北京:人民铁道出版社,1979:127-132.
- [6]Zhou Bengang,Zhang Yuming. Some characteristics of earthquake-induced landslide in southwestern China[J]. Northwestern Seismological Journal, 1994,16(1):95-103.
- [7]辛鸿博,王余庆.岩土边坡地震崩滑及其初判准[J].岩土工程学报,1999,21(5):591-594.
- [8]王兰民,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
- [9]Wilson R C, Keefer D K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(3): 863-877.
- [10]Wilson R C, Keefer D K. Predicting Areal Limits of Earthquake-induced Landsliding[C]//Ziony J I. Evaluating Earthquakes Hazards in the Los Angeles Region—an Earth-Science Perspective, US Geological Survey Professional Paper 1360. Washington, United States: U.S.G. P.O, 1985: 317-345.
- [11]Harp E L, Wilson R C. Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: Evidence from 1987 Whittier narrows and superstition Hills Earthquake strong-motion records [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, 85(6):1739-1757.
- [12]胡聿贤,等.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版社,2006.
- [13]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.
- [14]LI Xiaojun, ZHOU Zhenghua, YU Haiying, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7 (3): 235-246.
- [15]于海英,王栋,杨永强,等.汶川 8.0 级地震强震动特征初步分析[J].震灾防御技术,2008,3(4):321-336.
- [16]周朝晖.2008年四川汶川 8.0 级地震强震动台网观测记录[J].四川地震,2008,(4):25-29.
- ① 国土资源部地质环境监测院.“5·12”汶川地震区地质灾害防治区划图.2008.