

王秀英, 王成亮, 张聪聪. 2015. 地震动参数与地震灾害相关性分析——以汶川震区地震滑坡灾害为例. 地震学报, 37(2): 230-238. doi:10.11939/jass.2015.02.003.

Wang X Y, Wang C L, Zhang C C. 2015. Analysis of correlation between ground motion parameters and earthquake disasters: A case study on earthquake-induced landslide hazard in Wenchuan earthquake area. *Acta Seismologica Sinica*, 37(2): 230-238. doi:10.11939/jass.2015.02.003.

地震动参数与地震灾害相关性分析 ——以汶川震区地震滑坡灾害为例^{*}

王秀英¹⁾,^{*} 王成亮²⁾ 张聪聪¹⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室

2) 中国河北邯郸 056008 邯郸市地震局

摘要 本文以汶川地震滑坡灾害为例, 设计一种方法, 对几个反映不同地震动特性的地震动参数与地震滑坡灾害的相关性进行了分析比较. 结果表明: Arias 强度参数与地表破坏的相关性最好, 该参数比较适合小区域范围的震害预测评估; 峰值加速度与地表破坏的相关性较好, 但更适合作为较大区域的震害评估参数; 与持时和频率有关的参数对于具体场地的震害机理分析具有辅助作用; 垂向地震动对滑坡震害的作用不容忽视. 本文结论对于其它震害相关研究中评估因子的选取具有参考意义.

关键词 地震动参数 地震灾害 地震滑坡 相关性 评估因子

doi:10.11939/jass.2015.02.003 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Analysis of correlation between ground motion parameters and earthquake disasters: A case study on earthquake-induced landslide hazard in Wenchuan earthquake area

Wang Xiuying^{1),*} Wang Chengliang²⁾ Zhang Congcong¹⁾

1) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Earthquake Administration of Handan, Hebei Handan 056008, China

Abstract: A method was designed by taking the case of landslide hazards induced by the Wenchuan earthquake to study the correlation between parameters reflecting different ground motion characteristics and earthquake-induced landslide hazards. The results indicate that Arias intensity is the best parameter for disaster evaluation, which is more suitable for small region estimation. And the peak ground acceleration also behaves well in correlation analysis, but it is more suitable for evaluation of large area. The parameters, related with duration and frequency, can provide accessory information in analysis on mechanism

* 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2013-08)资助.

收稿日期 2014-05-21 收到初稿, 2015-01-03 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: xiuyw@sohu.com

of earthquake damage in concrete site. The vertical component plays an important role in evaluating earthquake-induced landslide hazards. The results have certain reference significance for selecting evaluation factors in studies related with earthquake-induced secondary hazards.

Key words: ground motion parameter; earthquake disaster; earthquake-induced landslide; correlation; evaluation factor

引言

地震是一种突发性强、破坏性大、次生灾害严重的自然灾害。由地震直接导致的房屋、建筑物倒塌，往往造成大量人员伤亡和财产损失；地震还会引发各种次生灾害，如火灾、有毒有害气体泄漏扩散、地震滑坡等（赵振东等，2010），这些次生灾害的严重程度有时甚至大大超过地震直接灾害造成的损害。最为典型的是2008年5月12日汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震，触发了数以万计的滑坡，由滑坡造成的灾害损失超过总损失的 $1/3$ ，仅地震滑坡造成人员死亡就超过2万人（王秀英，2009）。

我国属于多地震国家，尤其是西南部各省地处山区，地形地貌变化剧烈，出露地层多为易风化的灰岩、板岩等，坡体组成物质松散，震后极易引发崩塌、滑坡等次生地质灾害，震害极为严重。汶川地震及之前多次地震的惨痛教训提醒我们，在当前地震预报尚未过关的情况下，震后对灾区及时展开救援工作十分重要。地震发生后，做好灾情的预测和评估工作，在尽量短的时间内以最快的速度响应，给出比较准确的灾情预测，为应急救援工作提供准确的决策信息，则可以大大提高灾害救助的针对性和时效性，减少人员伤亡（聂高众等，2011）。但以前的灾情评估研究工作主要侧重于建筑物倒塌、人员伤亡，次生灾害方面主要是火灾蔓延和有毒有害气体扩散，有关山地灾害的评估研究并不多。汶川地震后，人们认识到对发生在山区的地震，除常规评估手段外，地质灾害的评估、地质灾害对人员伤亡、交通、通讯和生命线工程等的影响不容忽视。

关于地震地质灾害的预测和评估工作，传统研究一直利用地震烈度作为预测评估的评估因子（丁彦慧等，2000；程强，2011；刘毅等，2011），但由于该参数作为评估因子存在人为影响、循环引用、时间滞后等一系列问题（王秀英等，2011），并不适合在实际中使用。近些年国外已展开利用地震动参数进行地震滑坡等地质灾害的相关研究（Jibson *et al*，2000；Khazai, Sitar, 2004；Rathje, Saygili, 2008），发现它们之间具有很好的相关性，为利用地震动参数评估地震滑坡等地质灾害提供了很好的研究方向。国内随着强震观测的普及（Li *et al*，2008）以及各地烈度速报预警等工作的展开，获取的地震动数据越来越多，且在获取数据的时效性方面也大大提高，为灾害评估提供了便利的条件。地震动参数成为灾害评估的首选参数。

由于地震动参数种类较多，各参数与地表震害的相关性差异较大，因而选取与震害相关性最好的参数可以提高评估结果的准确性。由于地震震害类型较多，全面资料分析不易实现，且有些震害类型的严重程度不适于定量化分析，因此，本文以汶川地震触发滑坡震害为例，利用本次地震中获取的强震数据，分析各种地震动参数与地震滑坡灾害的相关性，以期得到不同地震动参数与震害相关性的优劣排序。本文结果对于灾害研究中评估因子的选取有一定的参考意义。

1 地震动参数简介

地震动参数是表征地震引起的地面运动的物理量, 地震工程学中通常以幅值、频率和持时 3 个特性来表达地震动特征, 不同地震动参数即是地震动在不同特性方面的反映。经常见到和使用的峰值加速度、峰值速度、峰值位移等是反映振幅特性的地震动参数, 反应谱、傅里叶频谱等是反映地震动频率特性的参数, 括号持时、能量持时是反映地震动持续时间特性的参数。有关这些参数的详细定义可以参考胡聿贤(2006)文章, 这里不再赘述。

地震工程学研究认为, 地表结构的破坏与地震动的幅度、频率和持时都有关系, 地震动幅值越大、持续时间越长、优势频率越接近结构的自振周期, 则产生的破坏越严重。由于常规的地震动参数仅反映地震动某一方面特性, 因而其代表整体地震动强度的能力就有差异。在选择这些参数作为灾害评估因子时, 应尽量选择与地表破坏相关性最好的参数。

发生地震滑坡的坡体与地表建筑物类似, 汶川地震的现场灾害调查表明, 建筑物破坏严重的区域, 地震滑坡也比较严重。因此, 可以利用地震滑坡的灾害程度研究并评价不同地震动参数与地表破坏的相关性, 评价每个地震动参数表征地震动强度的能力, 为其它类似的应用提供参数选择。

本文选取的地震动参数包括: 峰值加速度、峰值速度、峰值位移 3 个幅值特性参数; 括号持时、5%—95% 能量持时两个持时特性参数; 另外还选择了一个包含振幅和持时特性的 Arias 强度参数, 该参数定义为整个震动持续期间振幅平方的累积之和(胡聿贤, 2006); 频率参数本文采用单位时间内过零点振动频次, 该参数提取方法为震动持时内对幅值发生符号改变的振动次数累积, 计算单位时间内平均频次。这样共选择 7 个地震动参数进行本文的分析。这里需要特别指出, 本文没有使用常规的频率特性参数主要基于如下考虑: 对一条强震记录作频谱分析会得到一系列频率值, 这样, 一个点会对应多个数值, 故无法进行计算; 如果选择其中某个频率作为优势频率, 只有对于具体结构的研究才有意义, 对于不特定对象的通用研究则无法确定究竟选择哪个频率作为参数, 所以本文没有考虑常用频率特性参数, 而是采用一个可以直接由记录数据提取、具有唯一性且具有频率特性的参数, 即单位时间内过零点震动频次。

2 相关性分析

所谓地震滑坡与地震动参数的相关性分析, 即分析哪种地震动参数与地震滑坡的关系更为密切, 可以更好地表征地震滑坡的灾害程度。一般而言, 地表震动越强烈, 地表建筑物或构筑物破坏越严重, 所以表征地震动强度的参数与地表破坏之间存在关联, 通过分析其间的关联程度, 可以确定哪种地震动参数用来表征地表破坏, 或者说作为地表破坏的评估因子更为适合。

这里需要特别指出, 除地震动因素外, 地震滑坡与地形地貌、地表岩性等因素密切相关, 但当以较大区域范围作为研究对象时, 只能忽略细节, 而以区域平均条件作为参考。本文所用滑坡及强震数据来自龙门山地区, 属于滑坡多发区, 具备滑坡发生的地形、岩性等条件, 所以这里不再专门论述这些因素。因此, 本文所得结论也仅适用于与龙门山地区具有类似地质条件的区域。

2.1 研究方法

进行地震滑坡与地震动参数的相关性分析, 最好是基于量化的数据进行, 这样便于利用数学方法进行比较客观的分析评判。基于强震记录时程得到的各种地震动参数都是量化的数据, 那么如何定量表征地震滑坡灾害的严重程度呢? 一般而言, 从滑坡的数量、规模以及所导致的灾害损失等方面可以反映地震滑坡的灾害程度。地震滑坡数量越多、滑坡的规模越大、导致的灾害损失越严重都说明滑坡灾害越严重。但由于地震滑坡导致的灾害损失属于灾害的社会属性范畴, 容易受人的主观判断影响。例如, 造成灾害损失越大的滑坡往往认为就是灾害越严重的滑坡, 而远离人群集中区的滑坡往往不会造成大的灾害损失, 人们往往感觉滑坡灾害不严重。鉴于此, 本文主要利用滑坡的数量和规模来确定地震滑坡灾害的严重程度, 并以此来分析其与地震动参数的相关性。

强震数据是由部署于某一特定场地条件的仪器记录而得, 因此所得数据只能反映观测点及其附近地区的地震动强度情况, 并不能反映更大区域范围的地震动强度情况。因此, 在获取地震滑坡数据时, 也要利用地震动数据附近的滑坡数据, 才能比较准确地反映它们之间的对应关系。为此, 本文选择观测点附近一定范围的地震滑坡数量, 辅之以同样范围内大型滑坡数量, 作为表征地震滑坡灾害程度的定量数据。具体操作方法为: 将台站附近的滑坡数量和大型滑坡数量分别取权重, 两类数据按权重计算相加后的数据作为台站附近的滑坡灾害程度的定量表达。为了使计算比较客观, 台站附近距离可根据实际需要分别选取不同距离, 以消除某些因素的影响。例如, 局部地形地貌因素可能不具备滑坡发生的基本地质条件, 局部范围内滑坡数量虽众多但滑坡规模很小等。

2.2 资料选取

汶川地震触发了数以万计的地震滑坡, 覆盖面积超过 20 万 km^2 (刘传正, 2008), 其中以龙门山地区最为集中, 灾害最为严重。同时, 这一地区震前部署了大量强震仪, 获得了汶川主震大量强震记录资料 (Li *et al*, 2008), 为相关研究提供了数据基础。选取这一区域 38 个强震观测点及近 3000 个滑坡点资料^①进行本次研究。这些强震台站和滑坡点的分布以及与汶川地震和发震断裂的关系如图 1 所示。

从 38 个台站的三分向记录提取了 38 组上述 7 个地震动参数, 即峰值加速度、峰值速度、峰值位移、Arias 强度、5%—95% 能量持时、 $0.1g$ ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$) 括号持时和 $0.1g$ 括号持时内过零点震动频次。这里选择 $0.1g$ 作为阈值, 主要考虑该值为龙门山地区触发滑坡的平均峰值加速度下限 (王秀英等, 2010)。

利用近 3000 处滑坡资料, 其中包含 100 多处大型滑坡资料, 分别统计每个强震台站附近一定范围内的滑坡数量和大型滑坡数量。观测台站附近距离分别取值为 10, 20, 30, 40 和 50 km。这样选取距离参数主要基于如下考虑:

- 1) 本文研究目的为对灾害评估选取合适的参数, 研究对象更倾向于较大的区域, 而非具体场地, 范围过小时所得结果对区域灾害评估无意义;
- 2) 两两数值间距离差虽然仅为 10 km, 但面积上具备区域的特性, 且不同距离所对应的面积具有较明显差异;
- 3) 由于台站选址等原因, 台站附近往往不具备滑坡发生的地形地貌条件, 若距离范围

^① 滑坡数据取自国土资源部汶川地震现场灾害调查数据, 由国土资源部地质环境监测院刘传正研究员提供。

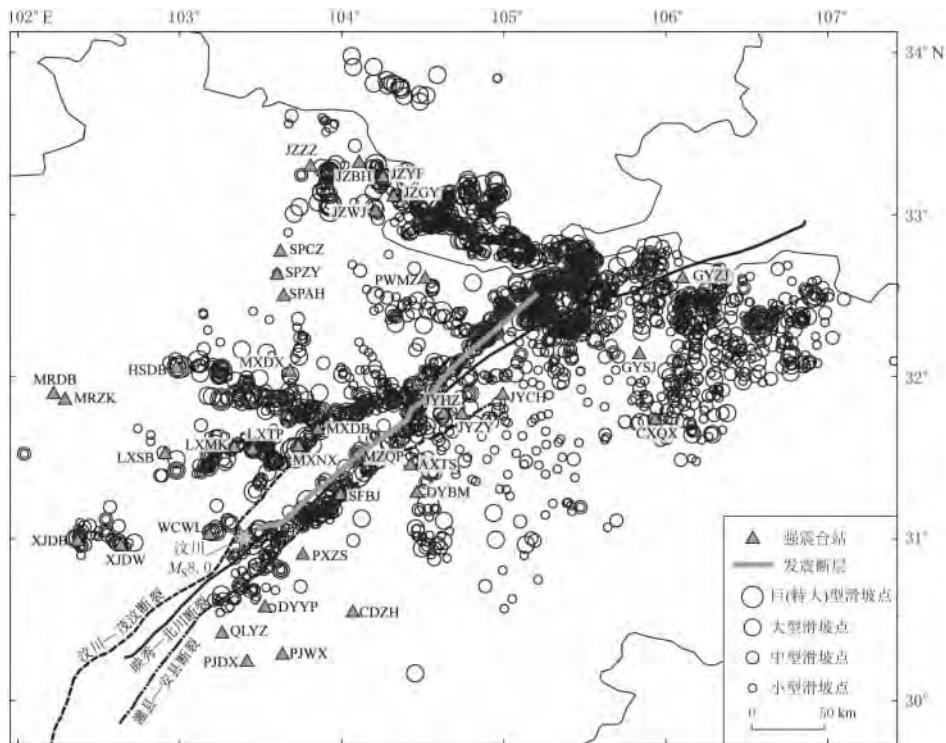


图1 滑坡点与强震台站分布图

Fig. 1 Distribution of landslides induced by Wenchuan earthquake and strong motion stations

很小会碰到很多无滑坡数据的情况，距离范围稍大则可以消除该因素造成的滑坡数据为零的情况；

4) 距离范围太大则失去滑坡统计数据的意义，对灾害评估失去指导意义。

通过对数据的选取比较，我们认为 20—40 km 是比较合适距离范围取值，而 10 km 和 50 km 更多可作为参考数据。滑坡灾害程度以台站附近滑坡数量及大型滑坡数量取 (0.6, 0.4) 权重进行计算，得到最终用于表达相关性分析的滑坡灾害程度的定量数据。由于数据量较大，这里不再给出。

2.3 实例及分析

利用 2.2 节中获得的数据，对每个地震动参数分别计算其与不同距离地震滑坡灾害的相关系数以反映它们之间的相关性，得到了 38 组数据相关性的计算结果，如表 1 所示。对表 1 中的相关性计算结果进行分析研究，得到具体结果如下：

1) 幅值特性参数。纵向比较峰值加速度、峰值速度和峰值位移 3 个幅值参数，与同样距离范围内的滑坡灾害作计算时得到不同的相关性系数，其中峰值加速度的相关性最高，其次是峰值速度，最后是峰值位移。由于峰值速度和峰值位移需要经过计算转换，尤其是像汶川地震这样的大震，造成地表破裂位移，由加速度记录计算提取速度和位移数据要经过比较复杂的校正转换，最终的产出结果有许多的人为影响因素。因此，从简单实用性方面考虑，峰值加速度更适合作为灾害分析时的评估参数。单独考虑峰值加速度对不同距离范围内的滑坡灾害的相关性分析结果表明，随着距离范围的增大，相关系数明显增加，由

表 1 不同地震动参数与地震滑坡灾害相关性结果

Table 1 Correlation coefficients between different ground motion parameters and earthquake-induced landslide hazards

地震动参数	三分向	r_{10}	r_{20}	r_{30}	r_{40}	r_{50}
峰值加速度	EW	0.4125	0.4959	0.5309	0.5774	0.5998
	NS	0.5056	0.5979	0.6135	0.6555	0.6644
	UD	0.5241	0.5138	0.4825	0.5109	0.5373
峰值速度	EW	0.3966	0.3927	0.4572	0.5148	0.5198
	NS	0.3909	0.5251	0.5731	0.5876	0.6156
	UD	0.3272	0.4705	0.5371	0.5557	0.5736
峰值位移	EW	0.1708	0.2480	0.3723	0.4520	0.4592
	NS	0.3602	0.4959	0.5692	0.5765	0.5131
	UD	0.2126	0.3493	0.3649	0.3515	0.3811
Arias 强度	EW	0.5090	0.5315	0.5348	0.5551	0.5613
	NS	0.5805	0.5812	0.5631	0.5856	0.6041
	UD	0.5671	0.4932	0.4268	0.4616	0.4924
5%—95%	EW	-0.1924	-0.3420	-0.3273	-0.3298	-0.3226
能量持时	NS	-0.1902	-0.3519	-0.3362	-0.3205	-0.3088
	UD	-0.3798	-0.5019	-0.4659	-0.4536	-0.4524
	EW	-0.0015	-0.0414	0.0094	0.1095	0.1462
0.1g 括号持时	NS	-0.0053	-0.0417	0.0072	0.1074	0.1479
	UD	-0.0165	-0.0540	-0.0014	0.1012	0.1379
	EW	0.3963	0.2415	0.2009	0.2889	0.2559
内过零点频次	NS	0.4136	0.2908	0.2445	0.3135	0.2686
	UD	0.4071	0.3768	0.3283	0.4167	0.4394

注: 相关性计算采用 Matlab 软件. r_{10} , r_{20} , r_{30} , r_{40} , r_{50} 分别表示 10, 20, 30, 40, 50 km 范围内地震动参数与地震滑坡灾害的相关系数.

10 km 范围内的 0.4125 提高到 50 km 范围内的 0.5998. 这说明峰值加速度在表征大范围的震动特征时要优于局部场地. 地震工程学研究表明: 峰值加速度易受随机因素影响, 而且有近断层饱和的问题(胡聿贤, 2006), 作为局部场地的灾害评估因子必然会受到这些问题的制约; 而峰值加速度作为较大范围的灾害指标时, 由于没有特定的比较目标, 则可以忽略这些制约问题. 因此, 在作灾害评估时, 如果是针对大区域的平均灾害评估则选择峰值加速度参数比较适合.

2) 综合幅值和持时特性参数. Arias 强度参数由其定义来看是一个综合了所有震动幅值平方的参数, 既包含了幅值信息, 又包含了持时信息, 可以表征震动释放的总能量. 该参数与上面具体结果 1) 中相关性较好的峰值加速度参数相比而言, 在距离范围较小时, 其相关性优于峰值加速度, 而在距离范围较大时, 则略逊于峰值加速度. 就不同距离范围所得结果综合而言, 该参数与地震滑坡灾害的相关性最高. 另外, 该参数随着滑坡覆盖范围的增加, 其相关性虽有所提高, 但提高的并不多, 尤其在范围较大时, 其与滑坡灾害的相关程度反而不如峰值加速度. 这说明该参数与较小范围的灾害关联更为密切, 更适合作为较小区域范围内的灾害评估参数.

3) 持时特性参数. 持时是地震工程学研究中特别提出的一个影响地表破坏的震动特性, 但由表 1 的能量持时和括号持时来看, 括号持时几乎与地震滑坡灾害不存在相关性, 而能量持时则表现出一定的相关性, 即在很小距离范围时, 其相关系数很小, 距离稍大后

相关性有所提高,但维持在一定水平,并没有显示随距离范围增加而相关性提高的规律。另外,能量持时虽然与滑坡灾害相关,但表现的是负相关性,与常规理解的“震动持续时间越长,破坏越严重”的观念是完全相反的。其原因是由于该参数的定义所决定的。根据该参数的定义,在震动持续时间内,达到总释放能量一定比例的期间作为震动持时。当震动总体水平较强时,可以很快达到该比例,持续时间较短;如果震动水平较弱,则需持续相当长的时间。因此,由目前的持时参数来看,还不太符合常规的应用习惯,需要更多的方法来拓展该参数的定义,为实际工作需要提供更多更好的持时选择。另外,能量持时在相对较小距离范围内与地震滑坡灾害程度的相关性也表明,该参数适合较小范围的灾害分析。因此在进行具体场地的震害分析时可以辅助参考之,以得到更深入的认识。

4) 频率特性参数。震动持时内单位时间内过零点频次,表征震动通过零线往复的频次。震动过零点的往复运动可能比单侧运动对地表的建筑物或构筑物造成的破坏更严重,这一点从该参数与地震滑坡灾害的相关性数据可以得到反映。从表1中数据可以看到,该参数在小范围内与地震滑坡灾害的相关性比能量持时的相关性更好,也优于该参数在距离范围更大时得到的相关性。该参数并不像其它参数那样“随数据范围的增加,相关性提高”,而是大致保持相似的相关性。本文之所以提取该参数,意在指出该参数的重要性,提醒研究者要特别注意:实验中的震动波形与实际的地震动波形有较大差异,这些微观的震动特征或许是导致宏观破坏结果的直接反映,因此在进行实验结果的分析时必须要特别注意加以区分并解释其机理。该参数在具体场地范围所反映出的与地震滑坡灾害较好的相关性表明,其在作局部滑坡震害分析时可以提供很好的辅助参考信息。

5) 垂向作用分析。综观表1中的数据,发现垂向震动的地震动参数与地震滑坡灾害的相关性均比较好。一般的灾害分析中对垂向运动考虑较少,尤其是在地震滑坡的研究中,往往仅考虑水平运动的作用。表1中除括号持时参数外,其余几个参数的垂向参数都反映出与地震滑坡灾害具有较好的相关性,尤其是能量持时和0.1g括号持时内过零点频次两个参数的垂向参数与地震滑坡的相关性几乎都优于其所对应的两个水平参数。这些结果都说明垂向运动在地表破坏中扮演了重要角色。从微观层面分析,垂向运动上下往复运动越剧烈、持续时间越长,则滑坡体的内部结构被破坏得越严重,最终导致滑坡的发生。有关垂向地震动的分析还需作更多的计算分析工作,这里的分析方法仅从一个侧面反映了垂向运动在地震滑坡中的作用不可忽视。

6) 综合分析。利用相关系数的显著性水平方法检验,3个地震动参数(峰值加速度、峰值速度和Arias强度)与地震滑坡灾害的相关性系数可以通过0.05置信度和0.01置信度检验,说明它们之间具有较高的相关性。按其相关性优劣排序依次为Arias强度、峰值加速度和峰值速度。峰值位移参数与地震滑坡灾害的相关性在近场范围不能通过显著性水平检验,范围较大时则可以通过检验。与此相反,单位时间内过零点频次参数只在近场数据可以通过显著性检验,范围更大时则不能通过检验。

另外还有一个比较明显的现象,即几个地震动参数普遍都表现出南北向参数与地震滑坡灾害相关性更高的特点,尤其是几个振幅特性参数,该特点更为明显。这可能与汶川地震地表出露断层的破裂传播方向有关。图1中地表破裂为南西—北东向,而更接近南北向,该方向存在破裂传播效应。相关性结果与地表破裂方向的契合,从一个侧面说明本文计算结果的可信度。

通过上述分析,可以看到不同的地震动参数具有不同的特性,将其用于地震滑坡灾害评估时需要结合具体的评估场地范围、参数可以获取的时效性以及参数提取的复杂程度进行综合考虑。根据本文分析结果,我们认为 Arias 强度参数和峰值加速度参数是比较合适的候选参数,这两个参数都是由加速度记录数据直接得到,无须经过复杂的校正转换等工作,获取比较简单方便,在考虑时效性时这两个参数是优先选取的对象。而在具体应用时,区域的地震滑坡灾害评估可以选择峰值加速度参数,而较小区域的地震滑坡灾害评估则可以选择 Arias 强度参数。

3 讨论与结论

本文通过将地震滑坡灾害定量化的方法,实现了地震动参数与地表滑坡灾害的相关性计算,通过相关性数据分析,得到如下结论:

1) 各参数与地表破坏的相关性有较大差异,说明各种参数代表地震动水平的能力不同。经过比较分析,与地表破坏相关性最好的 3 个参数分别是 Arias 强度、峰值加速度和峰值速度。从参数获取的难易和时效性等因素考虑,Arias 强度和峰值加速度是比较好的选择。Arias 强度适合作为较小范围灾害评估的参数,而峰值加速度则适合作为较大范围或区域范围灾害评估的参数。

2) 常规所认为的地震动持时与地震滑坡的关系有待展开更多研究,以拓展持时的定义方法。过零点频次在局部场地与地震滑坡灾害表现出的相关性,说明地震动的震动方式对地表破坏的影响很大。因此,在利用人工合成地震动或仅以简单规则波形作室内实验时,必须充分考虑规则波形与天然地震波形过零点频次的差异对实验结果可能存在较大影响的问题。

3) 多个参数的垂向参数都表现出与地震滑坡灾害具有较好的相关性,这表明垂向运动对地表破坏也发挥了重要作用,需要进行更深入的机制研究。

需要指出的是,某种特定震害类型的发生必须具备一定的前提条件,如本文中所阐述的地震滑坡,必须在具备可能发生滑坡的地形地貌、地质条件下才会发生。因此,本文的某些结果在应用时需要在具有类似地质条件下才具有参考意义。

地震持时是地震工程研究中一个特别重要的关注点,但现有持时定义都存在局限性,与地表滑坡震害的相关性表现得并不是很好,尤其是能量持时,当地震动水平较小时,反而会出现持时很长的现象。因此,对地震动持时的定义和应用还需要更多关注和研究。

地表震害类型多种多样,很难用定量的方式去衡量。常用的震害分级只是一种序数方式的表示,而非真正定量化的数据。本文对地震滑坡震害通过数量和规模的综合考虑,实现震害结果的定量化表达,为利用地震动数据定量分析地震灾害提供了一种研究思路。

本文结果表明,地震动参数是进行震后各类灾害评估比较合适的评估因子,但由于地震动的特性,不同的地震动参数往往仅能反映地震动的某个特点,在具体应用时各具优缺点。对它们与震害的相关性进行排序,分析各自适用的场合,对于震害评估或评估参数的选取具有指导作用。

计算结果中,垂向地震动与地表滑坡震害的相关性尤其值得关注。我们在之前地震滑坡分布与峰值加速度关系的研究中,就发现了近断层大型滑坡的分布与垂向峰值加速度的衰减具有大体一致的衰减规律(Wang *et al*, 2012),表明垂向运动对地震滑坡的破坏作用

不容忽视。本文的计算结果再次表明垂向运动在地震滑坡，尤其是近断层大型滑坡的破坏过程中的作用不像之前相关研究中所述可以忽略不计，而应进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 程强. 2011. 汶川强震区公路沿线地震崩滑灾害发育规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, **30**(9): 1747–1760.
- Cheng Q. 2011. Research on development rules of seismic landslide and collapse along highways highly seismic region of Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **30**(9): 1747–1760 (in Chinese).
- 丁彦慧, 王余庆, 孙进忠, 唐蕴. 2000. 地震崩滑预测方法及其工程应用研究[J]. 工程地质学报, **8**(4): 475–480.
- Ding Y H, Wang Y Q, Sun J Z, Tang Y. 2000. Research on the method for prediction of earthquake-induced landslides and its application to engineering projects[J]. *Journal of Engineering Geology*, **8**(4): 475–480 (in Chinese).
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 第2版. 北京: 地震出版社: 104–109.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering* [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press: 104–109 (in Chinese).
- 刘传正. 2008. 四川汶川地震灾害与地质环境安全[J]. 地质通报, **27**(11): 1907–1912.
- Liu C Z. 2008. Disasters induced by the Wenchuan earthquakes, Sichuan, China, and geo-environmental safety[J]. *Geological Bulletin of China*, **27**(11): 1907–1912 (in Chinese).
- 刘毅, 吴绍洪, 徐中春, 戴尔阜. 2011. 自然灾害风险评估与分级方法论探研: 以山西省地震灾害风险为例[J]. 地理研究, **30**(2): 195–208.
- Liu Y, Wu S H, Xu Z C, Dai E F. 2011. Methodology for assessment and classification of natural disaster risk: A case study on seismic disaster in Shanxi Province[J]. *Geographical Research*, **30**(2): 195–208 (in Chinese).
- 聂高众, 安基文, 邓砚. 2011. 地震应急评估与决策指标体系的构建[J]. 震灾防御技术, **6**(2): 146–155.
- Nie G Z, An J W, Deng Y. 2011. Construction of the index system for earthquake emergency loss evaluation and decision-making[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **6**(2): 146–155 (in Chinese).
- 王秀英. 2009. 地震滑坡灾害快速评估技术及对应急影响研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 1–3.
- Wang X Y. 2009. *A Study on Fast Evaluation of Earthquake-Induced Landslides and Their Effect on Earthquake Emergency Rescue* [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 1–3 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 王登伟. 2010. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, **29**(1): 82–89.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. 2010. Research on relationship between landslides and peak ground accelerations induced by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **29**(1): 82–89 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 王松. 2011. 汶川地震诱发滑坡的地震动加速度评判标准[J]. 地震学报, **33**(1): 82–90.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang S. 2011. Ground motion acceleration criterion for judging landslide induced by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(1): 82–90 (in Chinese).
- 赵振东, 王桂萱, 赵杰. 2010. 地震次生灾害及其研究现状[J]. 防灾减灾学报, **26**(2): 9–14.
- Zhao Z D, Wang G X, Zhao J. 2010. Secondary disaster of earthquake and the present research situation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, **26**(2): 9–14 (in Chinese).
- Jibson R W, Harp E L, Michael J A. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. *Engineering Geology*, **58**(3/4): 271–289.
- Khazaii B, Sitar N. 2004. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events[J]. *Engineering Geology*, **71**(1/2): 79–95.
- Li X J, Zhou Z H, Yu H Y, Wen R Z, Lu D W, Huang M, Zhou Y N, Cu J W. 2008. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **7**(3): 235–246.
- Rathje E, Saygili G. 2008. Probabilistic seismic hazard analysis for the sliding displacement of slopes: Scalar and vector approaches[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(6): 804–814.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang S. 2012. Analysis of landslide damage caused by the 2008 Wenchuan earthquake using strong motion data: A case study in the Beichuan county town[J]. *Earthquake Science*, **25**(4): 307–313.