

王秀英, 聂高众, 马牧军. 2012. 地震滑坡灾害评估中地震影响因素的联合应用. 地震学报, 34(1): 76-84.
Wang Xiuying, Nie Gaozhong, Ma Mujun. 2012. Application of multiple ground motion factors in earthquake-induced landslide hazard evaluation. *Acta Seismologica Sinica*, 34(1): 76-84.

地震滑坡灾害评估中地震影响因素的联合应用^{*}

王秀英^{1),*} 聂高众²⁾ 马牧军³⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

3) 中国北京 100049 中国地震搜救中心

摘要 地震滑坡灾害是一种致灾性极高的地震次生灾害, 其中的地震触发因素是导致滑坡发生的重要影响因素. 可以表征地震影响因素的参数有多种, 但它们代表地震动水平的能力有差异, 对灾害评估预测结果有很大影响. 因此, 本文提出利用层次分析法将多种地震动参数联合应用以弥补不同参数间存在的不足和差异. 计算实例表明, 参数联合应用所得评估结果与实际破坏情况最为接近, 优于参数单独使用所得评估结果, 说明该方法是可行的. 文中给出的参数联合应用的方法对于其它地震灾害的评估也有很重要的借鉴意义.

关键词 地震滑坡 评估 地震影响因素 联合应用 汶川地震

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.01.007

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Application of multiple ground motion factors in earthquake-induced landslide hazard evaluation

Wang Xiuying^{1),*} Nie Gaozhong²⁾ Ma Mujun³⁾

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

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

3) National Earthquake Response Support Service, Beijing 10049, China

Abstract: Earthquake-induced landslide is a catastrophic earthquake secondary disaster. The triggering factor of earthquake plays very important role in this kind of disaster. Many parameters can represent the influence factor of the earthquake. However, there are differences among their representative capabilities, which will exert great influence on the evaluation/forecasting result if these parameters are used. A method of combining the parameters into one is given based on Analytic Hierarchy Process (AHP). The discrepancy and difference between parameters can be compensated in this way. The calculated example

^{*} 基金项目 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(ZDJ2010-28)和国家自然科学基金项目(40872209)资助.

收稿日期 2011-01-28 收到初稿, 2011-03-30 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: xiuyw@sohu.com

shows that the result based on the combination of these parameters is far better than those obtained from single ones. This proves the feasibility of applying this method to evaluation of other kind of earthquake hazards.

Key words: earthquake-induced landslide; disaster evaluation; earthquake influence factor; combined application; Wenchuan earthquake

引言

地震滑坡是由地震诱发的一种非常严重的地震次生地质灾害。根据对以往地震的统计研究表明,诱发滑坡地震占中强以上地震的大多数,特别是西部山区,几乎所有中强以上地震都可以诱发规模和影响范围不同的滑坡(王秀英,聂高众,2009)。地震诱发滑坡等地质灾害造成的损失非常大,有时甚至超过地震本身造成的损失(李忠生,2003)。2008年5月12日发生的汶川 $M_s 8.0$ 地震触发了非常严重的滑坡等地震地质灾害,地质灾害损失占到总损失的 $1/3$,并造成众多的人员伤亡(殷跃平,2008;黄润秋,李为乐,2008;刘传正,2008;吴树仁等,2008)。

地震滑坡灾害在我国分布很广,而且具有极高的致灾性,但目前国内对地震滑坡的研究还非常有限。以往研究多以统计为主,而在灾害评估预测方面则多以地震烈度作为影响因素(丁彦慧等,2000;王兰民,2003;孙崇绍,蔡红卫,1997),通过一定的分类标准,人为地进行划分和计算,计算参数和计算结果等各个环节人为影响因素太多。国外地震滑坡研究中已开始引入地震动参数(Wilson, Keefer, 1985; Jibson, 2007; Romeo, 2000),使地震影响因素本身客观化、评估模型量化。

描述地震动的参数有多种,灾害评估中经常使用的有:地震动峰值加速度、峰值速度、Arias 强度等等。地震动参数从仪器记录数据中计算、提取而得,可以作为反映地震动在记录地点震动强度的一个客观指标。由于各参数提取方法的不同,它们反映客观真实地震动强度的水平亦有所差异,所以在灾害评估中选取不同地震动参数作为地震影响因素使用时,所得评估结果的精度也不同。因此,若要提高评估/预测结果的精度,必须要提高计算参数的精度。

鉴于此,本文利用几种常用地震动参数,通过数学方法构建新的参数,使其能更好地代表地震动的真实情况,从而得到更为准确的评估结果。

1 参数和方法介绍

1.1 地震动参数简介

描述地震动的参数有很多种,它们分别从振幅、频率、持时等不同侧面来反映地震动特性(胡聿贤,2006)。本文选取了在灾害评估中使用较多的3个参数峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)和 Arias 强度(I_a),以这3个参数为例来说明多种地震动参数联合使用的方法。

峰值加速度(PGA)是地震动加速度记录中得到的最大瞬时值。由于它获取简单,应用最多,有许多研究结果可以借鉴。但由于是瞬时最大值,峰值加速度受各种随机因素、场地条件、近断层饱和等多种因素的影响,波动很大(胡聿贤,2006)。虽然就整体变化趋势而言峰值加速度随震动强度增加而增加,但对具体场地来说,由峰值加速度代表的震动强

度与实际情况往往有较大差异(王秀英, 2009; 王秀英等, 2010a).

峰值速度与峰值加速度类似, 是取速度记录(或加速度记录的计算结果)中得到的最大振幅值. 速度与质点振动能量成正比, 所以速度也可以反映震动的强弱程度(胡聿贤, 2006). 虽然峰值速度波动幅度较峰值加速度有所减小, 但随机因素的影响依然存在(王秀英, 2009). 与峰值加速度相比, 峰值速度使用较少, 可以借鉴的研究成果以及可以使用的数据都较少.

Arias 强度是对整个记录持时所有振幅取平方和, 与震动能量成正比. 由于其综合了所有振幅信息, 其中也包含了持时、频率等信息, 所以可以比较全面地反映真实地震动水平(王秀英等, 2010a). 虽然 Arias 强度参数包含了更多地震动信息, 能更全面地表征地震动的总体特性, 但这个参数在国内很少使用, 缺少相关参考资料.

1.2 层次分析法简介

层次分析法是将决策有关的因素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策方法. 它把复杂问题分解成组成因素, 并按支配关系形成层次结构, 然后用两两比较的方法确定决策方案的相对重要性. 层次分析法在多个领域都有应用, 在各种地学问题的建模中也被广泛采用.

运用层次分析法解决问题时, 可以分为以下几个步骤:

1) 建立问题的递阶层次结构. 首先, 将复杂问题分解为各组成元素. 同一层次元素作为准则, 对下一层次的某些元素起支配作用, 同时又受上一层次元素的支配, 形成一个递阶层次.

2) 构造两两比较判断矩阵. 建立层次结构后, 层次间元素的隶属关系也就确定了. 假定上一层次元素 C_k 作为准则, 对下一层次元素 A_1, A_2, \dots, A_n 有支配关系, 也即在准则 C_k 之下, 逐一两两比较 A_i 和 A_j 并赋予相应权重, 形成权重矩阵.

3) 计算单一准则下元素的相对权重. 对于 n 个元素 A_1, A_2, \dots, A_n 通过两两比较得到判断矩阵 A , 解特征根并归一化作为元素 A_1, A_2, \dots, A_n 在准则 C_k 下的排序权重.

4) 对矩阵进行一致性检验. 在构造两两判断矩阵时, 要求判断大体一致, 因此必须对判断矩阵的一致性进行检验. 检验步骤: ① 计算一致性指标 CI , $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$; ② 查找平均随机一致性指标 RI ; ③ 计算一致性比例 CR , $CR = CI / RI$.

当 $CR < 0.10$ 时, 一般认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当的修正.

5) 计算各层次元素的组合权重. 为得到递阶层次结构中每一层次中所有元素相对于总目标的相对权重, 需要把单一准则下元素的相对权重计算结果适当组合并检验其一致性, 最终得到整个递阶层次的判断结果. 详细结算过程这里不再给出.

有关层次分析法的详细计算过程, 可以参考有关书籍, 这里不再赘述.

2 地震动参数联合应用

2.1 参数联合应用模型

通过前面对几个参数的简单分析, 作者认为在实际应用中每一个单独的参数都不能完全满足实际需求. 如果能够在模型中将几个表征地震动强度的参数同时引入、联合使用, 则可以达到如下效果:

- 1) 当可用地震参数较少时，可以只用其一，保证有参数参与计算。
- 2) 当缺少某个参数时，地震动影响因素仍然可以通过其它参数来实现。
- 3) 几个参数同时存在时，通过分配适当的权重，使最终得到的影响因素尽量准确地反映实际震动水平，以弥补单个参数存在误差较大时，评估结果误差也较大的问题。

除地震影响因素外，地震滑坡其它影响因素还有很多，如地形地貌因素、地质因素、构造因素、水文因素等等，这些影响因素在相关研究中已有很深入的分析，本文不再赘述。为简化操作，作为示例这里仅考虑地震影响因素，由此建立地震滑坡危险性判定层次分析模型，如图 1 所示。

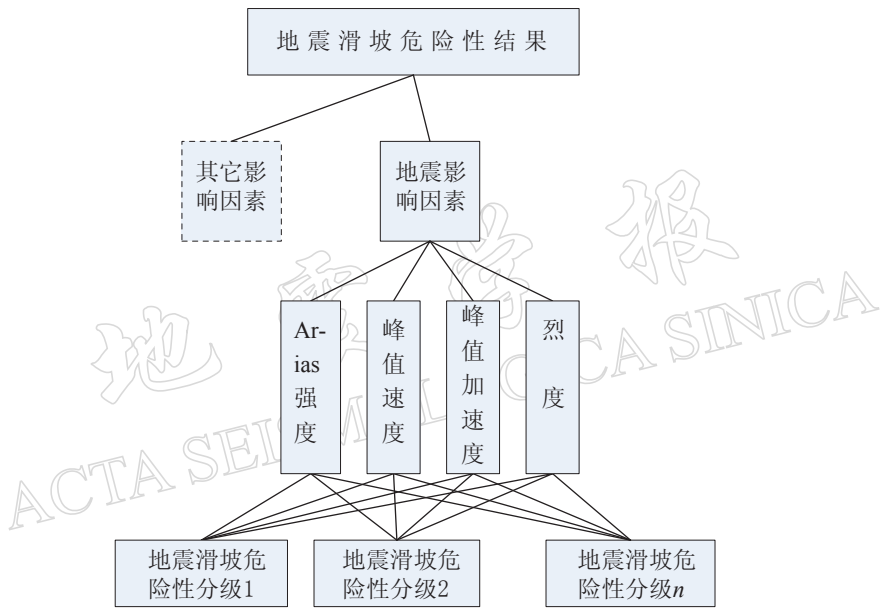


图 1 地震滑坡危险性判定层次分析法图示

Fig. 1 Demonstration of AHP used in judging earthquake-induced landslides risks

图 1 中 Arias 强度、峰值速度、峰值加速度、烈度的排序代表了与地震滑坡关系的密切程度由高到低依次降低，也代表了这几个参数在最终合成参数时的权重分配次序。有关这几个参数与地震滑坡关系的确定可以参考相关文献(王秀英，2009；Wang *et al*，2010)。另外，考虑到目前地震动参数的使用范围极为有限，同时为便于后面的对比分析，图 1 模型的地震影响因素中同时将地震烈度引入。

2.2 地震影响因素定量对比方法

图 1 所给的层次分析模型中，当两两比较某一个确定的地震动参数对地震滑坡可能性的影响结果时，通过定性的方式不易确定。作者在之前的系列研究中已对各参数与地震滑坡的关系做过深入研究(王秀英，2009；王秀英等，2009，2010a，b；Wang *et al*，2010)。利用这些研究结果可以建立各地震动参数判定地震滑坡危险性的模糊隶属函数，然后通过隶属函数计算某个确定参数相对于不同滑坡危险性情况的隶属度，通过隶属度的比较，籍以实现参数的两两比较。

建立隶属函数时为保证表达结果的数据严谨性，对其进行了适当约束，即：对于一个

给定的参数值,同时隶属于不同模糊集(危险性分级)的个数不超过 2 个,而且隶属于不同模糊集的隶属度之和为 1. 为保证约束条件得以实现且简化隶属关系式,这里以线性关系来建立隶属函数. 限于篇幅,这里仅给出峰值加速度相对于 3 级地震滑坡危险性分级得到的隶属函数,如下:

1) 地震滑坡危险性很小

$$\mu_L = \begin{cases} 1 - 20x & 0 \leq x < 0.05 \\ 0 & x \geq 0.05 \end{cases} \quad (1)$$

2) 地震滑坡危险性中等

$$\mu_M = \begin{cases} 20x & 0 \leq x < 0.05 \\ \frac{4}{3} - \frac{20}{3}x & 0.05 \leq x < 0.2 \\ 0 & x \geq 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

3) 地震滑坡危险性极高

$$\mu_H = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.05 \\ \frac{20}{3}x - \frac{1}{3} & 0.05 \leq x < 0.2 \\ 1 & x \geq 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)–(3)中, x 表示评估场点峰值加速度,单位为 g (g 为重力加速度,值为 9.8 m/s^2); μ_L , μ_M 和 μ_H 分别表示给定峰值加速度后,地震滑坡危险性分级对应的隶属度,无量纲.

峰值速度、Arias 强度以及烈度的隶属函数关系可以参考王秀英(2009)文章.

2.3 模型实例分析

为说明方法的可行性,这里以汶川地震得到的数据为例,对模型进行计算,并对结果进行分析.

汶川地震获得大量强震记录,同时也触发大量滑坡等地质灾害. 在之前的研究中,我们利用龙门山地区得到的地震和滑坡资料,对地震滑坡与地震动数据的关系进行了深入研究(王秀英, 2009; 王秀英等, 2009, 2010a, b; Wang *et al.*, 2010). 在此,我们仍以这些数据为基础进行计算分析. 选用其中的两个台站数据参与计算,台站与地震烈度分布关系如图 2 所示,其中绿色大圆标注的 LXS B 和 SPA H 为所选参与计算台站,绿色小圆为其它得到主震强震记录的台站. 选择 LXS B 和 SPA H 这两个台站作为示例,是因为这两个台站同在烈度 VII 度区, SPA H 更靠近 VI 度区,而 LXS B 更接近 VIII 度区,这样更便于比较在同样平均震害程度区域内具体场地震害的差异.

地震滑坡危险性分级取 3 级,对应 2.2 节中给出的分级隶属函数. 利用层次分析模型计算各参数单独应用和综合应用得到的评估结果如表 1 所示.

实际计算时,利用不同滑坡危险性相对于该参数的隶属度来比较并确定权重. 以 2.2 节给出的峰值加速度隶属度为例,当峰值加速度为 $0.25g$ 时,隶属度分别为 $(0, 0, 1)$. 参考权重比较原则,可以将其分别对应最低权重 1 和最高权重 9,建立权重比较矩阵. 几个地

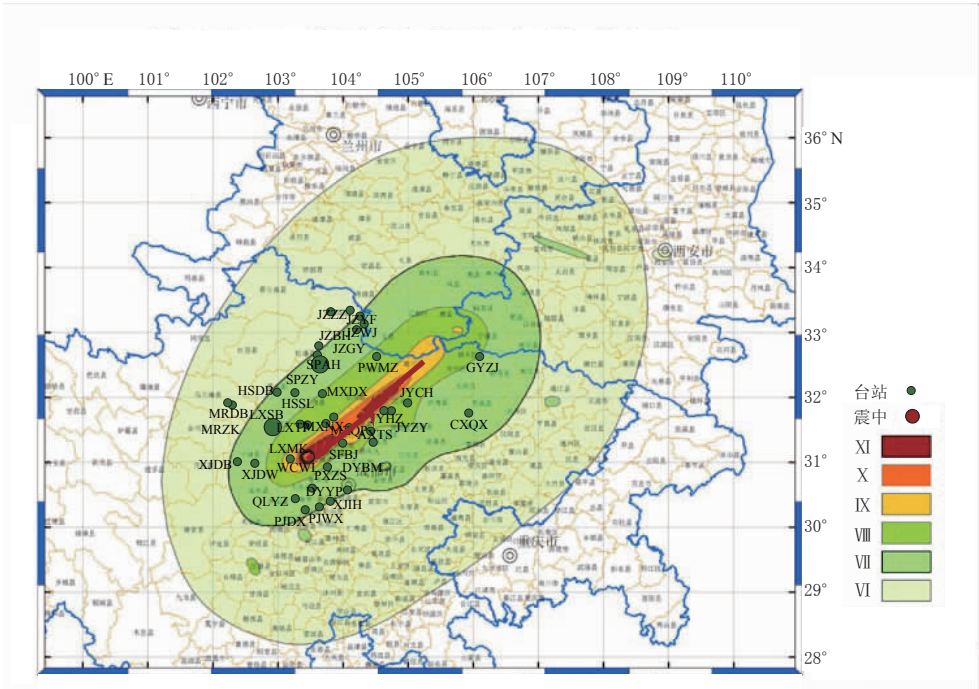


图 2 汶川地震强震台站与地震烈度分布关系

Fig. 2 Strong motion stations and intensity isoseisms of the Wenchuan earthquake

表 1 各参数单独使用与综合使用判定地震滑坡结果对比

地震影响参数	台站代码	
	LXSB	SPAH
烈度	Ⅶ	Ⅶ
(滑坡可能性)	(0.0879, 0.2426, 0.6694)	(0.0879, 0.2426, 0.6694)
峰值加速度/ g	0.25	0.17
(滑坡可能性)	(0.0909, 0.0909, 0.8182)	(0.0909, 0.1818, 0.7273)
峰值速度/ $m \cdot s^{-1}$	1.55	1.24
(滑坡可能性)	(0.0909, 0.0909, 0.8182)	(0.0879, 0.2426, 0.6694)
Arias 强度/ $m \cdot s^{-1}$	2.92	1.76
(滑坡可能性)	(0.0879, 0.2426, 0.6694)	(0.0879, 0.6694, 0.2426)
综合应用结果	(0.0890, 0.1850, 0.7259)	(0.0884, 0.4682, 0.4433)

震动参数之间两两比较确定权重，主要根据其 与地震地表破坏的关联程度确定，详细信息可以参考文献(王秀英，2009；Wang *et al*，2010)。

对所得结果进行分析，可得到如下认识：

- 1) 单独使用烈度作为评估参数时，两个台站的滑坡可能性相同，均为滑坡可能性较高，但无法区分它们之间的差异。
- 2) 单独使用峰值加速度作评估参数时，虽然两个台站所处区域滑坡可能性都较高，但 LXSB 台所在区域触发滑坡的可能性要高于 SPAH 台所在区域。
- 3) 单独使用峰值速度得到的结果与单独使用峰值加速度的结果类似，但 LXSB 台处

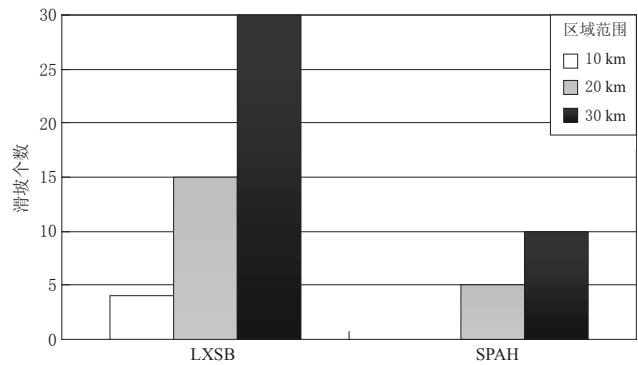


图 4 两个台站附近局部滑坡分布密度比较

Fig. 4 Comparison of landslide site density in local region around the two stations

3 讨论与结论

地震触发滑坡与降雨或重力触发滑坡相比，无论在触发范围、触发规模，还是在导致的灾害程度方面都远比后者严重，所以地震触发因素本身是导致滑坡发生的非常重要的影响因素。因此，在对地震滑坡进行预测/评估时，地震触发因素的选择对评估结果非常关键，地震触发因素的精度直接决定了评估结果的准确程度。而在以往以烈度作为地震影响因素的评估研究中，存在如下问题：

1) 地震烈度是对宏观评估结果的平均受灾程度描述，受人为因素影响，不同评估者得到的评估结果往往具有较大差异(胡聿贤，2006)；以烈度作为判定依据使用，判据本身即存在较大误差，导致判定结果的精度必然不会很高。

2) 地震滑坡本身也是评定烈度等级的一种地表破坏判据(胡聿贤，2006；谢毓寿，1957；中国国家标准化管理委员会，2009)，以烈度对地震滑坡进行评估存在互相引用的问题。

3) 烈度虽以定量形式表达，但实际上它是定性判别的结果，不具连续性，无法区分同一烈度区不同的破坏情况，如文中计算实例的情况。

4) 烈度标准的不统一、不一致也使其应用受到限制。不同国家往往使用不同的烈度标准，使得烈度不具有横向对比性，不同研究者的研究结果难以横向比较；而且烈度标准的不断变化修订，使得同一国家或地区不同时段烈度的纵向对比也会存在问题(胡聿贤，2006；谢毓寿，1957；中国国家标准化管理委员会，2009)，从而影响其使用的延续性、连贯性。

5) 烈度还存在滞后性，由于烈度是根据震后现场调查资料得到的评估结果，震后短时间内往往无法获得。

由于这些问题的存在，仅仅以地震烈度作为地震动影响因素并不适合。将地震动数据引入地震滑坡灾害评估后，可以消除烈度人为影响，使地震影响因素客观化、量化，提高判定结果的准确性。但由于各种地震动参数定义和获取方式的不同，它们在综合表征地震动水平方面存在较大差异。这样不同参数作为评估因素时，所得结果的准确性也会受到影响，而且由于各参数获取的难易程度不同，导致各参数可用数据量不同。

鉴于此,文中提出将多种参数联合使用.这样由多个参数综合得到的结果可以更好地表征真实的地震动水平,而且多个参数联合使用会减小单个参数误差较大带来的问题.借助于层次分析法对模型参数调整的可伸缩性,计算时根据实际得到的参数数量,可以实现多种参数的任意多种组合,得到计算精度和服务目的不同的各种评估结果.

利用文中的研究思路,选取汶川地震数据实例,将计算结果与实际滑坡灾害对比表明:几个参数单独使用时所得结果有所差异,而将几个参数联合使用后,所得结果与实际情况更为接近.这说明本文中的方法是可行的.

地震滑坡灾害在我国极为普遍,对它的评估/预测研究开展的不多,而且一直缺少完善有效的方法模型.本研究尝试将地震动参数引入地震滑坡评估工作中,并对这些参数提出了一种联合使用的方法,对于地震滑坡的评估/预测研究具有积极的推动作用,而且对其它类型地震灾害的评估具有很好的借鉴意义.

参 考 文 献

- 丁彦慧,王余庆,孙进忠,唐蕴. 2000. 地震崩塌预测方法及其工程应用研究[J]. 工程地质学报, **8**(4): 475-480.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学(第2版)[M]. 北京:地震出版社: 104-109.
- 黄润秋,李为乐. 2008. “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, **27**(12): 2585-2592.
- 李忠生. 2003. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. 灾害学, **18**(4): 64-70.
- 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.
- 孙崇绍,蔡红卫. 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征[J]. 自然灾害学报, **6**(1): 25-30.
- 王兰民. 2003. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社: 169-171.
- 王秀英,聂高众. 2009. 地震应急中诱发滑坡灾害致灾距离快速评估方法研究[J]. 中国地震, **25**(3): 333-342.
- 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: 46-85.
- 王秀英,聂高众,王登伟. 2009. 利用强震记录研究汶川地震诱发滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(11): 2369-2376.
- 王秀英,聂高众,张玲. 2010a. 汶川地震诱发崩滑与 Arias 强度关系[J]. 应用基础与工程科学学报, **18**(4): 645-656.
- 王秀英,聂高众,王登伟. 2010b. 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.
- 吴树仁,石菊松,姚鑫,王涛,汪华斌. 2008. 四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价[J]. 地质通报, **27**(11): 1900-1906.
- 谢毓寿. 1957. 新的中国地震烈度表[J]. 地球物理学报, **6**(1): 35-47.
- 殷跃平. 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, **16**(4): 433-444.
- 中国国家标准化管理委员会. 2009. GB/T 17742-2008 中国地震烈度表[S]. 北京:中国标准出版社: 6.
- Jibson R W. 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement [J]. *Engineering Geology*, **91**(2-4): 209-218.
- Wilson R C, Keefer D K. 1985. Predicting Areal Limits of Earthquake-induced Landsliding[C]// Ziony J I ed. *Evaluating Earthquakes in the Los Angeles Region*. US Geological Survey Professional Paper 1360: 317-345.
- Romeo R. 2000. Seismically induced landslide displacements: a predictive model[J]. *Engineering Geology*, **58**(3-4): 337-351.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. 2010. Relationships between the ground motion parameters and the landslides induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Science*, **23**(3): 233-242.