

冯静, 高孟潭, 陈鲲. 2013. 基于衰减关系的城镇烈度发生概率快速估计. 地震学报, 35(4): 553-560.
Feng Jing, Gao Mengtan, Chen Kun. 2013. Rapid estimation of the probability of seismic intensity for affected counties based on attenuation relationship. *Acta Seismologica Sinica*, 35(4): 553-560.

基于衰减关系的城镇烈度发生 概率快速估计^{*}

冯 静[†] 高孟潭 陈 鲲

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 震后快速产出的震动烈度分布是地震应急救援非常有效的依据, 通常由烈度与地震动参数的经验关系给出. 有台站的场点, 地震动参数可以直接由台站数据给出确定性的结果; 而无台站的场点, 地震动参数只能由衰减关系给出估计值. 目前我国台站覆盖有限, 且难于实时获取, 快速生成的地震动参数主要依赖于地震动衰减关系, 再依据烈度与地震动参数的经验关系, 输出确定性的震动烈度分布. 由于衰减关系本身存在着不确定性, 将其估计值用于生成确定性的震动烈度分布是不准确的. 而且实践证明, 震动烈度与实际调查烈度存在差异. 鉴于此, 从衰减关系模型中的 ϵ 出发, 提出了场点(城镇)遭遇不同烈度的概率计算方法: 利用衰减关系的估计值与衰减关系的标准差, 构造峰值加速度(PGA)变化的对数正态分布, 然后以烈度分档对应的 PGA 范围, 计算震区各城镇遭遇不同烈度的概率及各城镇抗震设防烈度被超越的概率. 具体以 1966 年 3 月 8 日河北邢台 $M_s 6.8$ 地震为例, 说明了此方法的可行性, 认为以概率形式给出城镇可能遭遇的烈度在表述上更为合理, 并建议将场点(城镇)遭遇烈度的概率表达方法用于震害快速评估.

关键词 震动烈度 调查烈度 抗震设防烈度 衰减关系 发生概率 超越概率
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.010 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Rapid estimation of the probability of seismic intensity for affected counties based on attenuation relationship

Feng Jing[†] Gao Mengtan Chen Kun

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Shaking intensity distribution immediately following an earthquake is valuable for emergency response. Such intensity distribution is usually derived from empirical relationship between seismic intensity and ground motion parameters. If there is a seismic station at the site, the ground motion parameter is quantified by the station record; if there is no seismic station, the ground motion parameter is just estimated from attenuation relationship. Due to the sparse

^{*} 基金项目 地震行业专项(201108002, 201108014)和基本科研业务(DQJB11C26)共同资助.
收稿日期 2012-04-19 收到初稿, 2012-08-24 决定采用修改稿.
[†] 通讯作者 e-mail: feng@cea-igp.ac.cn

seismic station coverage and the difficulty in real-time data acquisition in China, the rapid results of ground motion parameter, which will be changed into shaking intensity later according to empirical relationship between seismic intensity and ground motion parameter, are just estimated from attenuation relationship. However, there is uncertainty in attenuation relationship itself, the estimated ground motion parameter is dubious and is not suitable to be used for the output of the deterministic shaking intensity distribution. Therefore, we propose a method to compute the probability of shaking intensity for counties in seismic area by means of the stochastic variable ϵ in attenuation relationship. Specifically, we build the logarithmic normal distribution about peak ground acceleration, using the estimated value and the standard deviation of the attenuation relationship, to calculate the probability of every possible shaking intensity and the probability exceeding seismic fortification intensity for counties in seismic area. Then, the March 8 1966 Xingtai $M_s 6.8$ earthquake is taken for example to show the feasibility of this method. It is thought that the intensity displayed in a probability way is more reasonable than before. So, it is recommended that the intensity characterized by probability should be considered in emergency response and rapid earthquake damage assessment.

Key words: shaking intensity; survey intensity; seismic fortification intensity; attenuation relationship; probability of occurrence; exceedance probability

引言

震动图(ShakeMap)描绘了震后可能的地面运动程度. 它综合利用台站观测值、震中位置、震级大小以及震区地质条件等信息, 估计一定区域范围的地震动大小(Wald *et al*, 1999a, 2006). 其结果能够在地震发生后短时间内以一系列图件的形式发布, 其中尤以直观的震动烈度分布在应急救援和灾害评估中最为常用.

烈度是地震引起的地面震动及其影响的强弱程度. 烈度的大小并不是简单看一个地区房屋的破坏程度, 而是用典型房屋衡量该地区的地面震动情况, 典型房屋在某种程度上相当于地震仪. 烈度分布通常由地震调查组根据调查结果编绘而成, 通常需要几天或几周的时间. 而震动烈度(仪器烈度)一般是根据地震动参数与烈度的经验关系, 在地震发生后快速(几分钟或几小时)计算得到. Wald 等(1999b)回归得到了修正麦加利烈度(Modified Mercalli Intensity)与峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)的计算公式, 现被用于美国地质调查局(USGS)的 ShakeMap 系统. 日本气象厅(JMA)用烈度计的结果进行震后烈度速报. 烈度计是利用加速度记录全振动的等效幅值来计算烈度, 称为“气象厅测定烈度”(Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, 1996). 我国的震动烈度主要依据《中国地震动参数区划图》(国家质量技术监督局, 2001)和《中国地震烈度表》(国家质量监督检验检疫总局, 2009)中烈度与峰值加速度的对应关系给出(陈颀等, 2010, 2011a, b).

可以看出, 快速生成的震动烈度依赖于地震动参数的快速获取. 对于有台站的场点, 地震动参数可以直接由台站观测数据给出确定性的结果; 而对于无台站的场点, 地震动参数只能由地震动衰减关系给出估计值. 目前我国台站覆盖有限, 且难于实时获取, 快速生

成的地震动参数(峰值加速度)主要依赖于经验衰减关系. 再依据烈度与峰值加速度的对应关系, 输出确定性的震动烈度分布.

但是, 衰减关系本身存在着不确定性, 其回归模型中通常都包含一个随机变量 ϵ , 以表征众多未加考虑因素(包括随机因素)所产生的影响(Esteva, 1970; Joyner, Boore, 1981; Brillinger, Preisler, 1985; Abrahamson, Youngs, 1992). 因此, 将其估计值用于生成确定性的震动烈度分布是不准确的. 而且实践亦证明, 震动烈度与实际调查烈度常常存在较大差异. 基于衰减关系给出的震动烈度分布依赖于衰减模型的选取, 常常是比较规则的形状, 比如圆、椭圆等; 而实际调查烈度由于断层破裂和能量传播的高度不确定性, 其分布常常是很不规则的.

因此, 本文从衰减关系回归模型中的 ϵ 出发, 提出了场点(城镇)遭遇不同烈度的概率计算方法. 具体以 1966 年 3 月 8 日河北邢台 $M_s 6.8$ 地震为例, 利用衰减关系的估计值与衰减关系的标准差, 构造峰值加速度变化的对数正态分布, 以烈度分档对应的峰值加速度范围, 计算震区各城镇遭遇不同烈度的概率以及城镇抗震设防烈度被超越的概率. 作者认为, 与确定性的震动烈度分布相比, 以概率表征的城镇遭遇烈度在表述上更为合理, 建议将其用于震害快速评估.

1 研究方法

地震发生后, 首先获取的地震参数为震中位置和震级大小, 选择合适的衰减关系可以计算出基岩上任意场点的地震动参数估计值. 地震动衰减关系的一般形式如下:

$$\lg Y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg(R + c_5 e^{c_6 M}) + \epsilon \tag{1}$$

式中, Y 为基岩地震动参数估计值, 如峰值加速度 PGA、加速度反应谱值 $S_a(T, \xi)$, 单位为 cm/s^2 ; M 为震级, 我国一般采用面波震级; R 为距离, 我国多采用震中距, 单位为 km ; $c_1 - c_6$ 为回归系数; ϵ 为回归分析中表示不确定性的随机变量.

Esteva(1970)指出, 利用最小二乘方法拟合 $\ln Y$ 时(本文取常用对数 $\lg Y$), ϵ 服从均值为 0、标准差为 σ 的正态分布, 这是线性回归的基本假定. 因此可以认为, 基岩上的地震动参数 Z 服从对数正态分布, 即

$$Z \sim LN(\mu, \sigma^2) \tag{2}$$

$$\mu = \lg Y \tag{3}$$

式中, μ 为该场点处衰减关系理论计算值 Y 的常用对数, σ 为衰减关系的标准差. Z 的分布如图 1 所示. 图中, f 为 Z 的概率密度函数; A 和 B 为地震动参数积分下限和上限(表 1).

由概率密度函数的定义可知, Z 落在 A 和 B 之间的概率为阴影部分的面积. 若地表的地震动参数为 Z' , 由基岩地震动参数估计值 Y 经过场地校正得到地表地震动参数估

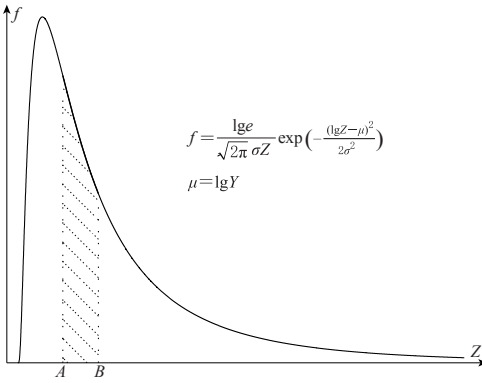


图 1 对数正态分布示意图
Fig. 1 Sketch map of logarithmic normal distribution

计值为 Y' ，假设 Z' 仍服从对数正态分布（也就是说不考虑场地效应的不确定性），则有

$$Z' \sim LN(\mu', \sigma^2) \tag{4}$$

$$\mu' = \lg Y' \tag{5}$$

当 Z' 为峰值加速度时，综合考虑《中国地震动参数区划图》（国家质量技术监督局，2001）和《中国地震烈度表》（国家质量监督检验检疫总局，2009）烈度分档情况，Ⅸ度以下采用《中国地震动参数区划图》中烈度与峰值加速度的对应关系，Ⅸ度及以上采用《中国地震烈度表》的分档原则，对相应峰值加速度区间进行积分，可以得到场点发生对应烈度的概率。烈度与峰值加速度对照关系如表 1 所示。

2 实例计算

1966 年 3 月 8 日 5 时 29 分 14 秒，河北邢台（114.92°E，37.35°N）发生 $M_s6.8$ 地震，震源深度 8 km，震中烈度Ⅸ度强（国家地震局地球物理研究所，河北省地震局，1985）。控制邢台地震活动的地质构造单元是束鹿凹陷，其东西两侧分别是衡新凸起和隆尧凸起，呈北北东向平行展布。衡新凸起和隆尧凸起的相对上升与束鹿凹陷的相对下沉，造成了该地区地壳强烈的差异运动（河北省地震局，1986），引发了这次地震。本文以此地震为例，对研究方法加以说明。

首先，选用第四代地震动参数区划图所采用的中国西部峰值加速度椭圆衰减关系（汪素云等，2000）计算基岩上的峰值加速度估计值 Y 。其中长轴方向采用邢台地区活动断层走向和邢台地震震源机制解（河北省地震局，1986）的结果，取为 $N27^\circ E$ 。然后，利用基于地形坡度的场地放大系数（Wald, Allen, 2007；陈颀等，2010），将基岩峰值加速度估计值 Y 转换到地表，得到各城镇的峰值加速度估计值 Y' 。最后，对每个城镇以峰值加速度估计值 Y' 和衰减关系的标准差 σ （本文取 $\sigma=0.242$ ）构造地表峰值加速度 Z' 的对数正态分布，参照表 1 对相应峰值加速度区间进行积分，可以得到各城镇遭遇不同烈度的概率。计算结果见表 2。

3 分析与讨论

图 2 给出了邢台地震的震动烈度与调查烈度分布图。其中，实线为实际调查烈度，由邢台地震考察队宏观地震调查组根据 1058 个调查点编绘而成；虚线为震动烈度，最外圈为Ⅵ度，最内圈为Ⅸ度，由表 1 最后一列地表 PGA 范围给出。例如将 PGA 约等于 40 cm/s^2 的等值线认定为烈度Ⅵ度等震线，以此类推。可以看出，震动烈度与调查烈度除了Ⅸ度区基本一致外，其它等震线均相差很大，震动烈度的等震线几乎为规则的椭圆，但调查烈度的等震线很不规则。另外震动烈度没有给出昔阳县一带烈度异常的Ⅵ度区。因此，震后仅靠震动烈度分布来估计地震引起的地面震动及其影响将存在较大偏差。

借鉴美国地质调查局(USGS)全球地震响应快速评估系统对死亡人数和灾害损失的概

表 1 烈度与峰值加速度对照表

Table 1 PGA intervals for seismic intensity

烈度	地表 PGA 范围/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$
<Ⅵ	<40
Ⅵ	[40, 90)
Ⅶ	[90, 190)
Ⅷ	[190, 380)
Ⅸ	[380, 707)
X	[707, 1 414)
\geq Ⅺ	$\geq 1\ 414$

表 2 震区城镇可能遭遇的烈度及其概率

Table 2 Possible intensity and corresponding probability for counties in seismic area

城镇	经度/°E	纬度/°N	地表 PGA /cm·s ⁻²	烈度发生概率 P						
				I<Ⅵ	I=Ⅵ	I=Ⅶ	I=Ⅷ	I=Ⅸ	I=X	I≥Ⅺ
平定县	113.622	37.802	28.5	0.7287	0.2518	0.0192	0.0003	0	0	0
昔阳县	113.697	37.608	33.8	0.6192	0.3414	0.0384	0.0010	0	0	0
晋州市	115.035	38.033	88.9	0.0759	0.4336	0.4042	0.0817	0.0045	0.0001	0
深州市	115.549	38.012	67.3	0.1751	0.5243	0.2694	0.0303	0.0009	0	0
辛集市	115.215	37.914	110.6	0.0340	0.3214	0.4790	0.1523	0.0129	0.0004	0
赵县	114.772	37.753	138.7	0.0128	0.2057	0.4955	0.2507	0.0335	0.0017	0
元氏县	114.509	37.750	91.2	0.0696	0.4206	0.4161	0.0885	0.0051	0.0001	0
衡水市	115.706	37.726	68.5	0.1667	0.5210	0.2786	0.0326	0.0010	0	0
赞皇县	114.377	37.663	82.4	0.0974	0.4663	0.3696	0.0637	0.0030	0.0001	0
宁晋县	114.915	37.621	248.0	0.0005	0.0339	0.2815	0.4623	0.1917	0.0292	0.0009
高邑县	114.612	37.605	139.9	0.0123	0.2018	0.4948	0.2547	0.0346	0.0018	0
冀州市	115.564	37.566	92.7	0.0656	0.4126	0.4229	0.0932	0.0055	0.0001	0
新河县	115.247	37.530	197.2	0.0021	0.0774	0.3933	0.4077	0.1085	0.0108	0.0002
柏乡县	114.681	37.495	203.0	0.0018	0.0704	0.3802	0.4175	0.1175	0.0123	0.0002
临城县	114.500	37.440	136.2	0.0139	0.2144	0.4968	0.2421	0.0312	0.0015	0
南宫市	115.380	37.359	134.0	0.0150	0.2221	0.4975	0.2347	0.0293	0.0014	0
隆尧县	114.766	37.352	351.0	0	0.0072	0.1279	0.4218	0.3386	0.0982	0.0062
内丘县	114.512	37.295	157.0	0.0071	0.1517	0.4754	0.3095	0.0529	0.0034	0
巨鹿县	115.023	37.212	310.4	0.0001	0.0130	0.1759	0.4530	0.2882	0.0665	0.0033
任县	114.681	37.126	237.8	0.0007	0.0399	0.3026	0.4569	0.1748	0.0246	0.0007
清河县	115.656	37.070	62.3	0.2132	0.5326	0.2315	0.0221	0.0006	0	0
广宗县	115.146	37.068	195.9	0.0022	0.0791	0.3962	0.4053	0.1065	0.0104	0.0002
平乡县	115.022	37.068	204.0	0.0017	0.0692	0.3778	0.4192	0.1192	0.0126	0.0003
邢台县	114.494	37.066	142.6	0.0113	0.1930	0.4928	0.2637	0.0372	0.0020	0
南和县	114.687	37.000	186.9	0.0028	0.0919	0.4174	0.3865	0.0929	0.0083	0.0001
威县	115.259	36.974	106.5	0.0394	0.3414	0.4699	0.1382	0.0109	0.0003	0
鸡泽县	114.874	36.924	162.2	0.0060	0.1390	0.4670	0.3247	0.0592	0.0041	0.0001
临西县	115.490	36.859	63.5	0.2033	0.5313	0.2408	0.0239	0.0007	0	0
沙河市	114.488	36.858	108.7	0.0364	0.3308	0.4749	0.1456	0.0119	0.0004	0
邱县	115.165	36.819	92.6	0.0659	0.4131	0.4225	0.0929	0.0055	0.0001	0
永年县	114.483	36.790	96.9	0.0561	0.3905	0.4399	0.1064	0.0069	0.0002	0
曲周县	114.950	36.779	106.9	0.0388	0.3396	0.4707	0.1394	0.0111	0.0003	0
武安市	114.192	36.698	51.8	0.3206	0.5185	0.1510	0.0097	0.0002	0	0
邯郸县	114.530	36.588	71.1	0.1506	0.5132	0.2973	0.0376	0.0013	0	0
肥乡县	114.803	36.552	70.3	0.1555	0.5158	0.2915	0.0360	0.0012	0	0
广平县	114.937	36.481	59.0	0.2426	0.5334	0.2061	0.0175	0.0004	0	0
成安县	114.694	36.441	57.5	0.2577	0.5323	0.1942	0.0156	0.0003	0	0
临漳县	114.607	36.341	48.0	0.3710	0.4993	0.1230	0.0067	0.0001	0	0

注：I 表示烈度。

率估计^①，本文建议采用概率方法描述震后城镇可能遭遇的破坏。例如，图 3 给出了 4 个城镇遭遇不同烈度的概率分布，能够很直观地估计城镇在地震后最可能遭受何种程度的破坏。对于隆尧县和巨鹿县而言，遭遇Ⅷ度的可能性最高，分别为 42.18%和 45.30%，但也不

① <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/pager/>

借鉴概率地震危险性分析的思路，本文计算了地震发生后各城镇抗震设防烈度的超越概率。其中抗震设防烈度根据《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国建设部，国家质量监督检验检疫总局，2001)取 50 年超越概率为 10% 的地震烈度值，结果如表 3 和图 4 所示。可以看出，宁晋县、新河县、柏乡县、隆尧县、巨鹿县、任县、广宗县、平乡县、威县等 9 个城镇抗震设防烈度被超越的概率均在 50% 以上，因此，如果类似地震发生，应该对这些城镇加大救灾投入。

表 3 震区各城镇抗震设防烈度的超越概率

Table 3 Probability exceeding seismic fortification intensity for counties in seismic area

城镇	抗震设防 烈度	超越概率	城镇	抗震设防 烈度	超越概率	城镇	抗震设防 烈度	超越概率
平定县	Ⅶ	0.0003	柏乡县	Ⅶ	0.5471	鸡泽县	Ⅶ	0.3884
昔阳县	Ⅶ	0.0010	临城县	Ⅶ	0.2751	临西县	Ⅵ	0.2657
晋州市	Ⅶ	0.0864	南宫市	Ⅶ	0.2656	沙河市	Ⅶ	0.1580
深州市	Ⅶ	0.0312	隆尧县	Ⅶ	0.8647	邱县	Ⅶ	0.0986
辛集市	Ⅶ	0.1658	内丘县	Ⅶ	0.3661	永年县	Ⅶ	0.1136
赵县	Ⅶ	0.2863	巨鹿县	Ⅶ	0.8108	曲周县	Ⅶ	0.1509
元氏县	Ⅶ	0.0938	任县	Ⅶ	0.6565	武安市	Ⅶ	0.0099
衡水市	Ⅶ	0.0337	清河县	Ⅵ	0.2544	邯郸县	Ⅶ	0.0390
赞皇县	Ⅵ	0.4368	广宗县	Ⅶ	0.5220	肥乡县	Ⅶ	0.0372
宁晋县	Ⅶ	0.6838	平乡县	Ⅶ	0.5508	广平县	Ⅶ	0.0179
高邑县	Ⅶ	0.2914	邢台县	Ⅶ	0.3033	成安县	Ⅶ	0.0159
冀州市	Ⅶ	0.0990	南和县	Ⅶ	0.4884	临漳县	Ⅷ	0.0001
新河县	Ⅶ	0.5267	威县	Ⅵ	0.6189			

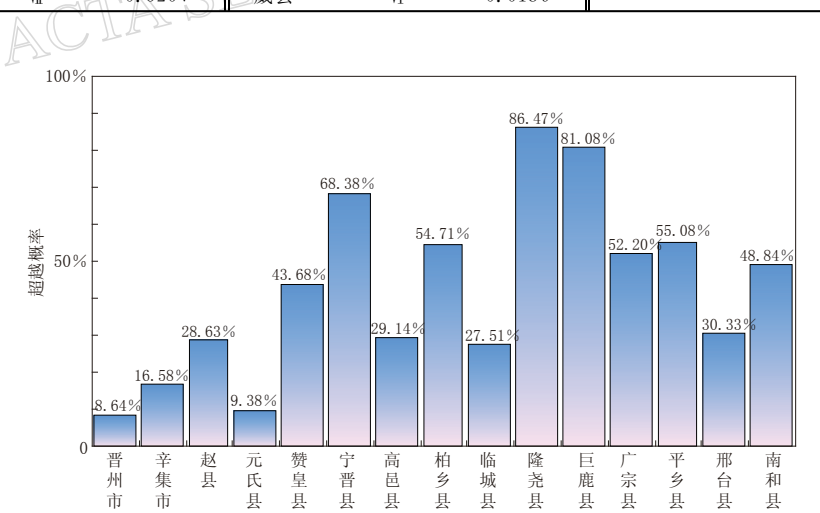


图 4 部分城镇抗震设防烈度超越概率柱状图

Fig. 4 Histogram of probability exceeding seismic fortification intensity for several counties in seismic area

通过以上分析可以看出，仅靠震动烈度分布来估计震区的地震影响程度将存在较大偏差。因此本文建议，在地震发生后能同时给出震区各城镇遭遇不同烈度的概率，以及各城镇抗震设防烈度被超越的概率，从中权衡按照几度烈度进行地震备灾，以实现资源有效配置。

4 讨论与结论

本文从衰减关系模型中的 ϵ 出发, 提出了城镇遭遇不同烈度的概率计算方法. 某地区发生地震后, 利用本文提出的概率计算方法可以快速估计周围城镇可能遭受的烈度, 以及抗震设防烈度被超越的概率, 从而有效指导救灾和资源配置. 另外, 城镇遭遇烈度的不确定性会直接影响随后震害评估的不确定性, 因此建议将本文提出的以概率表征的城镇遭遇烈度用于震害的快速评估, 以此来描述遭遇烈度的不确定性对震害评估结果的影响.

本文仅以峰值加速度计算了城镇遭遇不同烈度的概率, 但是地震发生后, 人们不仅关心人口密集城镇的破坏情况, 还要避免核电厂、大坝、超高层建筑、大型地下管线等重大工程发生次生灾害. 因为这些工程一旦遭到破坏, 可能导致水灾、火灾、爆炸、剧毒或者强腐蚀性物质大量泄露. 例如 2011 年 3 月 11 日日本东北部大地震造成的少量核泄漏至今未绝. 因此, 未来将重点从特定周期加速度反应谱出发, 使用概率方法评估地震对重大工程可能造成的影响.

参 考 文 献

- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究[J]. 中国地震, **26**(1): 92–102.
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 吕红山. 2011a. 考虑震源破裂过程的青海玉树地震震动图研究[J]. 中国地震, **27**(1): 56–64.
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2011b. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震震动图[J]. 中国地震, **27**(1): 99–102.
- 国家地震局地球物理研究所, 河北省地震局. 1985. 一九六六年邢台地震照片集[M]. 北京: 海洋出版社: 12–18.
- 国家质量技术监督局. 2001. 中国地震动参数区划图(GB 18306-2001)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–3.
- 国家质量监督检验检疫总局. 2009. 中国地震烈度表(GB/T 17742-2008)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–4.
- 河北省地震局. 1986. 一九六六年邢台地震[M]. 北京: 地震出版社: 82–96.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, **16**(2): 99–106.
- 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 2001. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)[S]. 北京: 中国标准出版社: 10–11.
- Abrahamson N A, Youngs R R. 1992. A stable algorithm for regression analysis using the random effects model[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**(1): 505–510.
- Brillinger D R, Preisler H K. 1985. Further analysis of the Joyner-Boore attenuation data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**(2): 611–614.
- Esteva L. 1970. Seismic risk and seismic design decisions[M]// Hansen Robert J ed. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press: 142–182.
- Joyner W B, Boore D M. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**(6): 2011–2038.
- Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency. 1996. *Outline of JMA's Seismic Intensity Meter*[R]. JMA No. 4 Notification in Heisei 8.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, Kanamori H, Scrivner C W, Worden B C. 1999a. TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California[J]. *Earthq Spectra*, **15**(3): 537–555.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, Kanamori H. 1999b. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity for earthquakes in California[J]. *Earthq Spectra*, **15**(3): 557–564.
- Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, Pankow K L. 2006. *ShakeMap Manual: Technical Manual, Users Guide, and Software Guide*[R]. USGS Open File Report.
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **97**(5): 1379–1395.