

# 江苏及邻区地震动衰减关系研究<sup>\*</sup>

詹小艳, 朱升初, 王恒知

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 基于2006—2015年江苏省强震动台网记录到的大量强震动数据, 根据近场距离饱和的加速度经验衰减模型, 利用多随机变量回归分析方法、最小二乘法拟合确定出经验衰减关系模型中的各个系数, 获取了江苏及邻区中小地震的地震动参数衰减关系。以2012年7月20日江苏高邮M<sub>4.9</sub>地震为例, 结合新求取的地震动衰减关系计算其震源区的地震动加速度场, 结果显示: 相比于直接采用内插值方法的分布结果, 采用衰减关系校正后的结果所显示的地震动加速度场的连续性分布特征更为明显, 加速度场长轴走向更接近于实际调查得到的地震烈度分布。

**关键词:** 峰值加速度; 地震动衰减关系; 烈度分布; 江苏及邻区

**中图分类号:** P315.91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)01-0138-06

## 0 引言

地震动衰减关系对于地震区划、地震安全性评价及烈度速报系统均是不可或缺的重要基础资料。受震源特性、传播路径及场地条件等因素影响, 各区域的地震动衰减关系往往呈现出较强的差异性, 因此开展区域性地震动衰减关系研究一直是工程地震学领域内十分重要的课题。目前, 关于地震动衰减关系的研究可大致归纳为以下几类: (1) 在地震动记录丰富地区, 根据强震动记录资料, 采用经验地震动衰减公式, 利用回归统计方法, 直接建立地震动参数和地震震级、距离及场地条件之间的关系; (2) 在缺乏地震动记录地区, 通过对地震烈度衰减规律进行研究, 利用地震动记录丰富的其它地区的烈度与地震动参数的对应关系, 换算得到所研究地区的地震动衰减关系; (3) 根据地震学研究成果, 利用震源力学和波动理论, 研究地震动衰减规律。其中, 前两种方法在目前被广泛使用(霍俊荣, 胡聿贤, 1992; Toro *et al.*, 1997; 汪素云等, 2000; 石树中, 沈建文, 2003; 崔建文等, 2008; 金星等, 2009)。过去, 我国大部分地区, 尤其是中东部地区缺乏足够多的强震动记录, 无法利用地震动资料直接得到本地区的衰减关系, 于是采用转换方法来确定本地区的地震动参数衰减关系是较常见

的做法, 如吕坚等(2009)利用转换方法得到了江西及邻区的地震动衰减关系。

江苏及邻区是我国中东部地震活动较强的地区之一, 在大地构造位置上跨越华北平原和鲁东—黄海2个Ⅱ级地块(张国民等, 2005), 历史上曾发生多次破坏性地震, 如1974年、1979年溧阳5.5、6.0级地震, 1982年南黄海6.2级地震, 1990年常熟5.1级地震等。但2006年以前, 由于强震动台站数量极少, 缺乏足够的地震动记录资料, 难以直接建立江苏及邻区的地震动衰减关系。在实际工作中, 仍采用以美国西部地区的地震烈度和加速度反应谱的衰减关系为参考, 根据我国历史地震资料和部分现代地震等震线资料统计得到了中国东部地区地震烈度衰减关系(陈国兴等, 2002)。

随着强震动台站密度的大幅提高及科学研究水平的进步, 中小震近场地震动衰减关系的研究正逐步引起关注, 如李小军等(2005)对中小震近场的地震动衰减关系的适用性给出了详细分析; 崔平安(2013)利用中小震记录研究了川滇地区的地震动衰减关系。江苏省强震动台网同时也是国家强震动东南区域强震动台网中心, 自2006年投入运行以来, 累积了大量中小地震的地震动数据, 这使得直接探索建立江苏及邻区的地震动衰减关系成为可能。本文将尝试应用2006—2015年江苏省强震动台网记录的实际观测数据, 研究江苏及邻区中小地震的地震动参数衰减关系。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-04-27.

**基金项目:** 中国地震局“三结合”课题(2016年度)和江苏省地震局青年科学基金(2015年度)共同资助。

## 1 计算方法

### 1.1 衰减模型

大量观测数据表明（胡聿贤，1999），在近震中区加速度衰减存在2种饱和现象：一是随着震中距的减小，加速度峰值可能并不随之增大，称为距离饱和；二是随着震级增大，如当震级接近7级或7.5级后，震中附近的加速度峰值并不随震级的增大而增大，称为震级饱和。江苏及邻区历史上虽发生过多次破坏性地震，但震级均在6.5级以内，因此，笔者在研究地震动衰减关系时，选用只考虑近场距离饱和的加速度衰减模型（霍俊荣，胡聿贤，1992）：

$$\lg[Y(M, R)] = c_1 + c_2 M + c_4 \lg[R + c_5 \exp(c_6 M)]. \quad (1)$$

式中， $Y$ 为地震动参数，如峰值加速度（PGA）、速度（PGV）、位移（PGD）等， $M$ 为面波震级， $R$ 为震中距（单位为km）， $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_4$ 、 $c_5$ 、 $c_6$ 为回归系数。

### 1.2 回归分析

式（1）中地震动参数 $Y$ 与 $M$ 、 $R$ 均为具有不确定性的随机变量，在研究地震动衰减关系时，为了使回归方法所得结果能真实体现 $Y$ 、 $M$ 、 $R$ 之间的相关关系，胡聿贤和霍俊荣（1988）提出了多随机变量回归分析的一致加权最小二乘法，对于由 $m$ 个随机变量 $y_i$ （ $i = 1, 2, \dots, m$ ）和 $l$ 个确定性变量 $x_i$ （ $i = 1, 2, \dots, l$ ）所构成的关系式

$$A + \sum_{i=1}^m B_i y_i - \sum_{i=1}^l C_i x_i = 0. \quad (2)$$

回归原则要求所有随机变量 $y_i$ 的归一化回归残差平方和综合最小，即

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m W_i (\Delta Y_{ik})^2 = \min. \quad (3)$$

其中， $\Delta Y_{ik}$ 为随机变量 $y_i$ 在第 $k$ 个样本点处的归一化回归残差，归一化的目的在于使参与最小二乘的变量同量纲化或无量纲化，并确保归一化后变量数值的量级相近，以免小数量级变量的作用在式（3）中求和时被大数量级变量淹没。 $W_i$ 为体现 $y_i$ 随机性大小的加权因子，当 $y_i$ 为确定性变量时， $W_i$ 自动变为零，从而不参与最小二乘法计算。此外，式（3）确定的结果不受回归关系式中函数变量选择的影响，无论选取哪个变量作为函数，用

函数形式本身或是其反函数形式进行回归分析，结果总是唯一的。

由式（3）确定的回归系数的正则方程为多元高次方程组，对于超过3个随机变量的情况，求解正则方程组十分繁琐。针对这一问题，霍俊荣（1989）提出多随机变量回归方程采用直接迭代法进行求解，本文在计算过程中采用该方法。

## 2 数据资料选取及预处理

江苏省强震动台网由50个固定台站组成，平均台间距约为35 km，其中10个台站架设在基岩上，其余40个台站均架设在土层上，台站分布如图1所示。记录仪器为美国kinemetrics公司生产的19Bits Etna高精度数字强震仪和Episensor力平衡加速度计。数字强震仪的动态范围约110 dB，每一通道均有独立的DSP和ADC；加速度计的动态范围约155 dB，频带宽度DC-200 Hz，满量程 $\pm 1 g$ （ $1 g = 9.8 m/s^2$ ）。2006—2015年江苏省强震动台网共记录到江苏及邻区的地震事件1 426次（其中， $M > 5$ 、震中距大于1 000 km的地震事件约占70%），笔者从中共筛选出震中距 $< 300$  km、P波段信噪比 $> 10$ 、 $M > 2.5$ 的高信噪比地震事件172次，有效的峰值加速度共计3 345条，覆盖路径如图1所示。对每一条记录都进行基线校正，并进行35 Hz以下低通滤波等预处理后，再测量其有效峰值加速度。

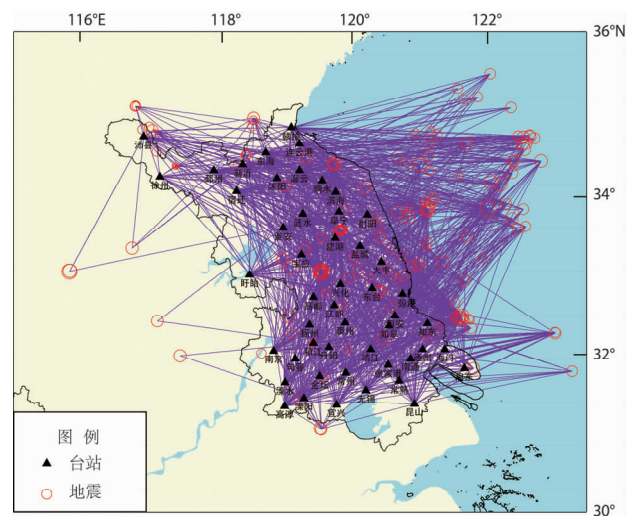


图1 本文所使用的地震及射线分布图

Fig. 1 Distribution of earthquakes and recording rays in this paper

3 计算分析

3.1 确定回归系数

采用式 (1) 的经验衰减模型, 将  $\lg Sa(T)$  作为随机变量, 运用回归分析和最小二乘法拟合来确定衰减模型中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_4$ 、 $c_5$ 、 $c_6$  各个系数。确定回归系数总体分为 2 步: 首先要确定近场饱和因子  $R_0$ , 即  $c_5 \exp(c_6 M)$  中的系数  $c_5$ 、 $c_6$ ; 然后将  $R_0$  代入式 (1) 后, 再回归得到系数  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_4$ 。在计算过程中为了更充分地体现地震动的随机变化特性, 将每个台站记录的 2 个水平分向视为 2 条独立的记录参与回归分析。

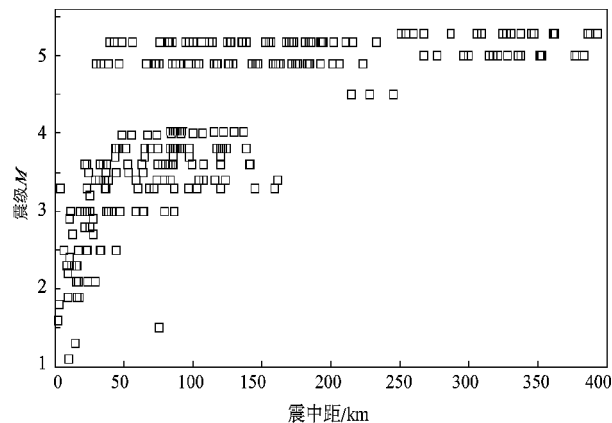


图 2 地震震级-震中距关系图

Fig. 2 Diagram of relationship of magnitude and epicenter distance

从图 2 可以看出, 所获取的强震记录中大部分都集中于 3.5 级左右, 震中距范围为 30 ~ 150 km。从统计学角度看, 样本分布不均匀会造成统计结果的不稳定, 样本集合边缘预测值的置信度降低, 难以向数据稀少的大震级、近距离外推。因此, 笔者参照霍俊荣和胡聿贤 (1992) 的研究方法, 对资料进行加权处理。加权处理的原则是确保权重系数之和在  $M-R$  平面内均匀分布, 这样数据的权重系数就取决于每个  $M$ 、 $R$  分档内数据量的多少, 震级分档为:  $M < 3$ 、 $3 \leq M < 4.5$ 、 $4.5 \leq M < 5.5$ , 震中距分档为:  $R < 50$  km、 $50 \text{ km} \leq R < 100$  km、 $100 \text{ km} \leq R < 200$  km、 $200 \text{ km} \leq R < 400$  km。对含有数据的各分档区间  $[\Delta M_i, \Delta R_j]$  赋予等权重, 而每个区间内各数据具有等权  $1/n_{ij}$ ,  $n_{ij}$  为  $[\Delta M_i, \Delta R_j]$  内数据的总和。最后再进行标准化处理, 使

权重系数总和等于样本总数, 确保统计自由度不变。

根据上述方法, 为了解耦震级与距离项, 首先选用距离分布范围较广而震级大小不等的数据资料, 对 0 ~ 50 km 范围内各个震级档的峰值加速度值进行回归分析, 得到震级相关的近场饱和因子  $R_0$ :

$$R_0(M) = \begin{cases} 0.425 \exp(0.414M), & R_0 \text{ 单独为随机量;} \\ 0.812 \exp(0.198M), & R_0 \text{ 与 } M \text{ 为随机量.} \end{cases} \quad (4)$$

将其代入式 (1) 后, 再根据 3 个震级分档的资料回归确定  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_4$  系数值, 结果见表 1, 其中  $4.5 \leq M < 5.5$  三分向的峰值加速度衰减拟合情况如图 3 所示。回归分析时将地震动参数  $Y$  和  $M$ 、 $R$  的随机不确定性程度视为相近, 将式 (3) 中加权因子  $W_i$  取为相同值。最后, 分别联合 3 个震级分档的垂直向、水平向拟合结果 (表 1), 通过最小二乘法拟合获得了江苏及邻区中小地震垂直向和水平向的回归结果, 见表 2, 计算中 3 个震级分档的权重取值相等。本文还通过计算阻尼比 5% 反应谱结果, 来获得不同周期 (0.10 ~ 6 s) 江苏及邻区水平向的峰值加速度, 并拟合得到相应的衰减关系 (表 3)。

表 1 各个震级范围内的拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficients in each magnitude range

震级范围	记录分向	$c_1$	$c_2$	$c_4$	样本数	随机误差
$M < 3$	EW	0.58	0.65	-1.62	223	0.375
	NS	0.58	0.65	-1.92	229	0.389
	UD	0.68	0.83	-1.92	219	0.444
$3 \leq M < 4.5$	EW	2.58	0.95	-1.92	623	0.309
	NS	2.47	0.26	-1.39	619	0.332
	UD	2.57	0.26	-2.52	625	0.415
$4.5 \leq M < 5.5$	EW	4.38	1.05	-2.99	264	0.269
	NS	4.38	1.35	-3.98	278	0.278
	UD	4.38	1.24	-2.78	265	0.345

表 2 江苏及邻区垂直向和水平向衰减关系

Tab. 2 Relationship between vertical and horizontal strong motion attenuation in Jiangsu and its adjacent areas

	$c_1$	$c_2$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	随机误差
垂直向	3.002	0.652	-1.623	1.812	0.189	0.411
水平向	2.892	0.345	-1.596	1.812	0.189	0.388

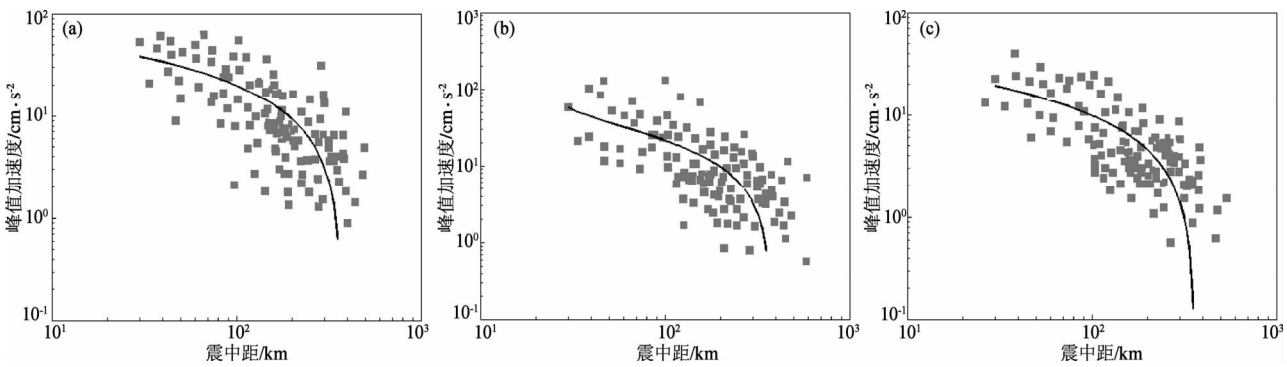


图 3 4.5≤*M*<5.5 地震东西 (a)、南北 (b) 和垂直 (c) 分量的拟合结果  
Fig. 3 The fitting results of EW (a), NS (b) and vertical (c) of 4.5≤*M*<5.5 earthquakes

表 3 水平向峰值加速度不同周期的回归系数  
Tab. 3 Regression coefficients of different periods of horizontal peak acceleration

周期/s	<i>c</i> <sub>1</sub>	<i>c</i> <sub>2</sub>	<i>c</i> <sub>4</sub>	<i>c</i> <sub>5</sub>	<i>c</i> <sub>6</sub>	随机误差
0.10	4.441	0.367	-1.945	2.113	0.475	0.502
0.20	3.127	0.448	-1.852	2.113	0.475	0.427
0.30	2.995	0.393	-1.808	2.113	0.475	0.415
0.40	2.750	0.722	-1.779	2.113	0.475	0.463
0.50	2.587	0.451	-1.752	2.113	0.475	0.393
0.60	2.095	0.467	-1.671	2.113	0.475	0.430
0.70	1.804	0.539	-1.632	2.113	0.475	0.420
0.80	1.758	0.508	-1.716	2.113	0.475	0.414
1.00	1.515	0.440	-1.733	2.113	0.475	0.462
2.00	0.536	0.602	-1.502	2.113	0.475	0.470
3.00	0.035	0.608	-1.695	2.113	0.475	0.362
4.00	-0.244	0.652	-1.719	2.113	0.475	0.416
5.00	-0.454	0.637	-1.735	2.113	0.475	0.473
6.00	-0.689	0.569	-1.512	2.113	0.475	0.392

3.2 计算实例

2012 年 7 月 20 日 20 时 11 分在江苏高邮、宝应交界发生的 4.9 级地震，这是近 30 年来江苏省发生的最大内陆地震。江苏省经济发达、人口稠密，此次地震震中位于江苏中部，全省大部分地区震感明显，地震造成 1 人死亡、2 人受伤，造成了巨大的社会影响。江苏省强震动台网中的 43 个强震动台站共记录到该次地震的 129 条清晰完整的地震动，其中，震中距最小约为 32.2 km，最大约为 226.6 km (詹小艳等，2014)。震后，江苏省地震局 (2012) 通过实地调查得到了实际的烈度分

布，这为检验新求得的衰减关系是否可用提供了难得的时机。结合实际观测值，分别采用直接线性内插值和衰减关系计算了加速度场结果，并与实际烈度分布进行差异对比分析。

加速度场的计算方法参考 ShakeMap 的做法 (Wald *et al*, 1999a, b)，具体步骤如下：(1) 将研究区按 0.1°×0.1°的间隔进行网格化，如图 4 所示；(2) 各台站实际记录的峰值加速度代表所在网格区的峰值加速度值；(3) 剩余网格节点的地震动值，由式 (2) 估计得到，其中 *c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>4</sub>、*c*<sub>5</sub>、*c*<sub>6</sub> 的取值见表 2 (水平向)；(4) 根据经验估计值和实测值，内插绘制小网格节点 (0.05°×0.05°) 的地面运动值，平滑各网格节点的峰值加速度值，即得到相应的峰值加速度分布场。

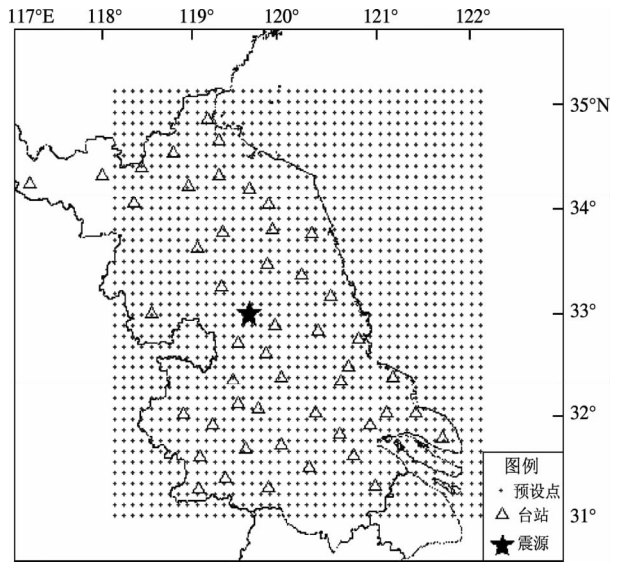


图 4 预设的网格节点和台站分布  
Fig. 4 The default grid nodes and the stations distribution

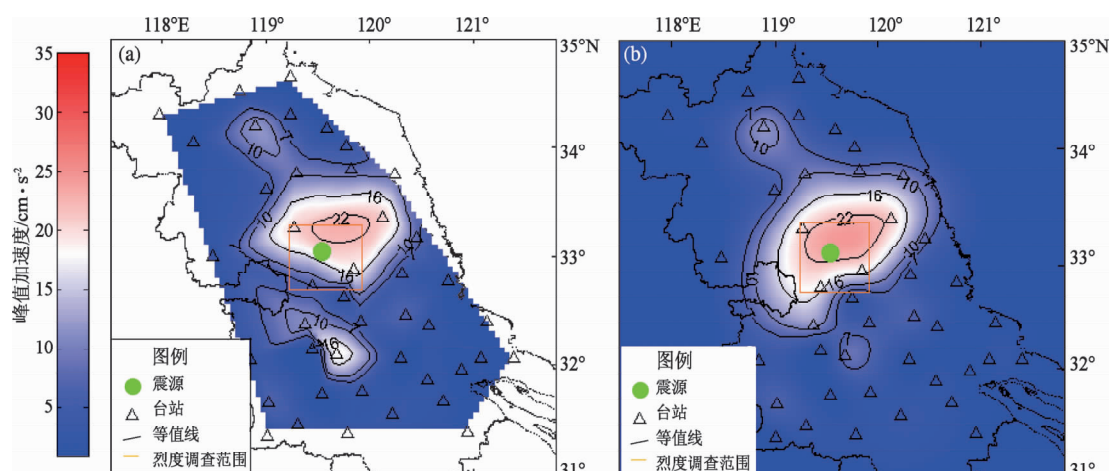


图5 采用直接内插值方法 (a) 和衰减关系 (b) 得到的水平向加速度场的分布结果  
Fig. 5 The ground motion acceleration results of horizontal component by using the direct interpolation method (a) and the attenuation relation (b)

从图5可以看出,2种计算结果之间存在明显差异,采用直接内插值方法的结果中(图5a),地震动强度较高的区域主要位于震中东北方向,地震动强度场的长轴走向为近东西向;在采用衰减关系的计算结果中(图5b),震中东北方向区域地震动强度高值的分布面积虽仍大于其他方向区域,但整体上围绕震源呈四象限分布,地震动强度场的长轴走向为近北东向。据江苏省地震局(2012)的震后实际调查评估结果,震中区烈度Ⅵ度,等震线为椭圆形,长轴呈北东向分布,约19.1 km,短轴约10.6 km,总面积约160 km<sup>2</sup>(图6对应于图5中橙色方框所示区域)。对比图5与图6可以清晰地看到,相较于采用直接线性内插值得到的结果,采用衰减关系计算获得的地震动强度场结果的展布特征更接近于实际调查得到的烈度分布。

#### 4 结论

开展区域性地震动衰减关系研究一直是地震烈度速报乃至整个工程地震学领域内的一项十分重要的课题。随着我国强震动台站密度的日益增加,根据实际记录数据来研究区域性地震动衰减关系的可靠性逐渐增强。本文基于江苏省强震动台网大量强震动数据,采用多随机变量回归分析方法、最小二乘法拟合获得了江苏及邻区中小震近场的地震动参数衰减关系。结合新获取的衰减关系,对2012年7月20日江苏高邮4.9级地震的

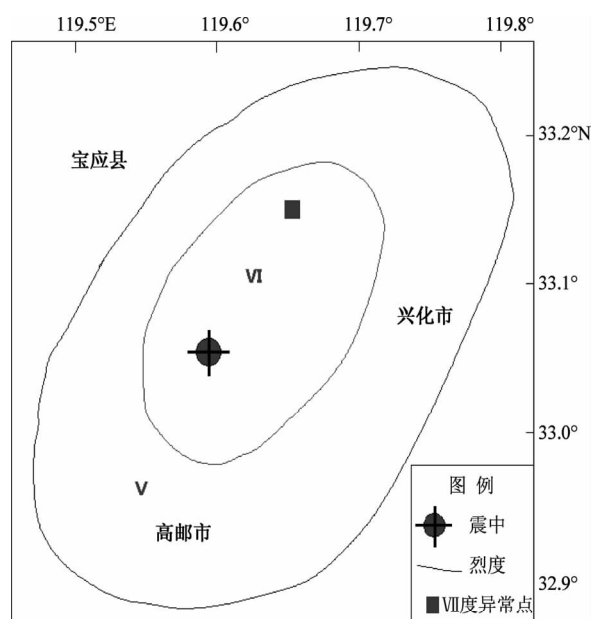


图6 江苏高邮4.9级地震烈度分布  
Fig. 6 Distribution of seismic intensity of Gaoyou M4.9 earthquake in Jiangsu

强震动场分布进行了计算,发现采用直接内插值方法获得的结果,容易受某个离散值影响,而采用衰减关系校正计算获得的结果,其地震动场分布的连续性更为明显,整体分布特征更为接近于实际调查得到的地震烈度分布。理论计算结果与实际结果之间的一致性,在一定程度上验证了本文所运用的方法是可行的,所获取的地震动衰减关系也适用于江苏地区;但需要说明的是,由于本文使用的强震动数据还极为有限,地震的最大

震级仅为 5.1 级, 因此衰减关系的适用范围必然存在一定的局限性, 在今后的研究中需积累到更多的强震动记录数据, 以获得更为科学、可靠的结果。

### 参考文献:

- 陈国兴, 杨伟林, 严新育. 2002. 南京河西地区软土地地震动参数研究[J]. 南京工业大学学报, 24(1): 35-40.
- 崔建文, 卢大伟, 高东, 等. 2008. 基于合成地震动的震区烈度划分[J]. 地震研究, 31(4): 388-393.
- 崔平安. 2013. 用地震观测台网的小震记录建立川滇强地震衰减关系[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 胡聿贤, 霍俊荣. 1988. 具有随机误差变量之间的回归关系[J]. 地震工程与工程振动, 8(4): 1-12.
- 胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社.
- 霍俊荣, 胡聿贤. 1992. 地震动峰值参数衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 12(2): 1-11.
- 霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所.
- 江苏省地震局. 2012. 高邮、宝应 M4.9 级地震灾害评估报告[R].
- 金星, 康兰池, 欧益萍. 2009. 福建地区中小地震加速度反应谱衰减规律[J]. 地震工程与工程振动, 29(5): 52-58.
- 李小军, 阎秀杰, 潘华. 2005. 中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析[J]. 地震工程与工程振动, 25(1): 1-7.
- 吕坚, 俞言祥, 汤兰荣, 等. 2009. 江西及邻区地震动参数衰减关系[J]. 地震地质, 31(1): 122-132.
- 石树中, 沈建文. 2003. 美国西部地震烈度衰减规律[J]. 世界地震工程, 19(3): 50-55.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 16(2): 99-106.
- 詹小艳, 朱升初, 王恒知. 2014. 2012 年 7 月 20 日江苏宝应 M4.9 地震加速度场的计算[J]. 地震地磁观测与研究, 35(4): 47-50.
- 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 48(3): 602-610.
- TOROG, ABRAHAMSON N, SCHNEIDER J. 1997. Model of strong ground motions from earthquakes in the central and eastern North America; best estimates and uncertainties[J]. Seismological Research Letters, 68(1): 41-57.
- WALD D J, EERI M, VINCENT Q, et al. 1999a. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California[J]. Earthquake Spectra, 15(3): 557-564.
- WALD D J, QUITORIANO V, DENGLE L, et al. 1999b. Utilization of the Internet for Rapid Community Intensity Maps[J]. Seism Res Letters, 70(6): 680-697.

## Study on the Attenuation Relationship of Strong Ground Motion in Jiangsu and its Adjacent Area

ZHAN Xiaoyan, ZHU Shengchu, WANG Hengzhi

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

### Abstract

Based on a large number of strong motion data recorded by Jiangsu Province strong motion network since 2006 and the near field distance saturated empirical acceleration attenuation model, we use multiple random variables regression analysis method and least squares fitting to determine the empirical attenuation relation model of each coefficient, and thus the attenuation relationship of ground motion parameters of small and medium earthquakes in Jiangsu and its adjacent areas is obtained. Take the July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou M4.9 earthquake as an example, we calculated its ground acceleration field in the focal region combined with the new the attenuation relation. The results show that compared to use the results of direct interpolation method, the attenuation relationship between the corrected results the vibration acceleration field of continuous distribution features are more obvious, and more close to the actual investigation to the seismic intensity distribution.

**Keywords:** peak acceleration; ground motion attenuation relation; distribution of seismic intensity; Jiangsu and its adjacent area