

江西及邻区地震烈度衰减关系研究^{*}

吕 坚¹, 俞言祥², 高建华¹, 高登平³, 汤兰荣¹

(1. 江西省地震局, 南昌 330039 2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100084
3. 河北省地震局红山基准台, 河北 隆尧 055350)

摘要: 收集江西及邻区的地震烈度等震线资料, 采用椭圆长、短轴联合衰减模型和近、远场补点与长轴可转向方法, 建立了该地区的地震烈度衰减关系并进行了验证, 结果表明, 该衰减关系符合该地区历史和近代地震震害分布的地域性特点, 可进一步应用于地震安全性评价、震害预测、损失快速评估等研究。

关键词: 地震烈度; 衰减关系; 江西及邻区

中图分类号: P315.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2009)03-0269-06

0 引言

地震烈度衰减关系是地震安全性评价、震害预测和历史地震研究中不可或缺的内容。在缺乏强震记录的地区, 地震工作者根据地震烈度衰减关系, 采用转换方法获得地震动参数衰减关系(胡聿贤, 张敏政, 1984 俞言祥, 2002 俞言祥, 汪素云, 2006)。在江西省的地震安全性评价工作中, 人们一直采用汪素云等(2000)的中国东部地区地震烈度衰减关系(以下简称中国东部衰减关系)。该衰减关系是利用中国东部地区 68 次 5 级以上中强地震的烈度等震线资料统计得到的。数据源中有 75% 以上的地震发生在华北地区, 回归计算时也没有使用 5 级以下地震的资料, 对于 5 级以下地震的烈度只能靠外推方法估计。众所周知, 地震烈度和地震动参数衰减具有较强的地域性特征(胡聿贤, 1999)。例如, 江西及邻区(指江西省及省界外推 150 km 范围, 包括广东、福建、浙江、安徽、湖北、湖南的部分地区), 地震时地表效应比较强烈, 3~4 级地震的震中烈度通常可达到 V 度, 4 级地震的震中烈度通常可达到 VI 度, 5 级地震的震中烈度通常可达到 VII 度, 具有典型的低震级高烈度的震害特点。此外, 根据《工程场地地震安全性评价》(GB17741-2005), 在做工

程场址地震危险性概率分析时, 也需要考虑发生在潜在震源区之外的本底地震和不确定性校正的影响, 地震震级下限的确定应以其影响烈度不低于 V 度为宜。因此, 在对江西的工程场址进行地震危险性概率分析时, 本底地震的震级水平通常取为 4~5 级, 有时也取为 3~5 级。然而, 对于江西及邻区的本底地震, 利用中国东部衰减关系外推所得的理论烈度值要显著低于实际烈度值, 这往往会导致地震危险性概率分析结果中中地震可能造成的影响和破坏受到低估, 从而给工程场址的安全性带来隐患。针对这个问题, 笔者系统地收集了江西及邻区震中烈度在 V 度以上的地震等震线资料, 运用这些资料, 建立适合该地区的地震烈度衰减关系。

1 研究资料与方法

1.1 资料选取

利用地震烈度等震线资料拟合烈度衰减关系时, 要求震级 M 和烈度 I 都是独立测定的, 因此只能选用既有仪器测定震级, 又有宏观烈度调查资料的地震(中国地震局震害防御司, 1999)。依此原则, 笔者选取了江西及邻区 26 次地震的烈度等震线资料(表 1)进行统计回归分析, 其中部分地震采用公式 $M_s = 1.13M - 1.08$ (时振梁, 1990) 进行震级转换。

* 收稿日期: 2008-05-12.

基金项目: 江西省社会发展科技攻关项目“江西及邻区地震动参数衰减关系研究与应用”、国家科技支撑计划“强震危险区划关键技术研究”(2006BAC13B01)、地震行业科研专项“核电厂地震安全问题研究”(200708003)共同资助。

表 1 用于统计的地震烈度资料

Tab 1 Selected intensity data in Jiangxi Province and its neighboring region applied to the calculation

序号	发震日期	参考地点	震级 M_S	烈度 I	长半轴 / km	短半轴 / km	资料来源
1	1978-06-27	江西兴国-宁都	3.9	VI	8	5	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				V	16	8.6	
				IV	76	43	
2	1982-02-25	江西龙南	5.0	VII			《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				VI	13.5	6.5	
				V	67.5	35	
3	1985-07-04	江西龙南	3.4	V	13.2	10.8	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				IV	22.8	17.5	
4	1987-08-02	江西寻乌	5.5	VII	8.5	2.3	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				VI	29	14	
				V	70	47.5	
5	1995-01-24	江西寻乌	4.0	VI	10	7.5	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
6	1995-04-15	江西瑞昌	4.5	VI V	17 60	9 50	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
7	1999-04-15	江西永丰	3.4	V	20	13	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				IV	32	24	
8	2003-12-04	江西会昌	3.7	V	12	6.5	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
9	2004-01-26	江西德安	3.6	V	9.5	6.8	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
10	2005-11-26	江西九江-瑞昌	5.7	VII	15.5	10.5	吕坚等(2007)
				VI	34	21	
11	1983-05-12	福建武平	3.7	V	14	5.5	福建省地震局(2000)
				IV	29	13.5	
12	1992-11-26	福建龙岩	4.7	VI	12.5	5	福建省地震局(2000)
				V	30	25	
				IV	67.5	55	
13	1994-05-24	福建永安	4.3	V	17	12	福建省地震局(2000)
				IV	34	26	
14	1997-05-21	福建永安	5.2	VI	19	12	福建省地震局(2000)
				V	45	33	
15	2007-03-13	福建顺昌	4.7	VI	7.8	4.3	蔡辉腾等(2007-2008)
				V	17	11.3	
16	1962-03-19	广东河源	6.1	VIII	3.5	2	全国地震烈度区划编图组(1979)
				VII	24	13	
				VI	82	47	
				V	257	184	
17	1964-09-23	广东河源	5.3	VI	9.5	5.5	全国地震烈度区划编图组(1979)
				V	37	26	
18	1987-09-15	广东河源	4.5	VI	9.8	8.3	黄河生等(1989)
				V	21.5	17.5	
				IV	32.5	27.5	
19	1989-11-26	广东河源	4.5	VI	15.7	7.5	黄河生等(1991)
				V	45.0	33.0	
20	1995-11-12	广东丰顺	4.2	VI	13	12	魏柏林(2001)
				V	25.5	19.5	
21	1999-03-25	广东河源	4.2	VI	2	1	徐起浩等(1999)
				V	10	3.5	
22	1999-08-20	广东河源	4.7	VI	12	9	徐起浩等(2000)
				V	27	16.5	
23	1992-12-22	湖南汝城	3.7	V	13.7	3.5	湖南省地震办公室(1993)
				IV	20	8.2	
24	1962-07-12	安徽庐江	4.0	V	11	7	安徽省地震局(1990)
				IV	28	20	
25	1963-03-13	安徽怀宁	4.5	V	26	13	安徽省地震局(1990)
26	1973-03-11	安徽霍山	4.5	VI	7.3	6	安徽省地震局(1990)
				V	19.5	14	

1.2 烈度衰减模型与方法

在统计分析地震烈度衰减关系时，通常假设地震震源为点源模型，地震烈度衰减则取椭圆模型。该模型的衰减曲线起始点应是重合的，在中等距离上长、短轴之间有差别，曲线呈椭圆形，到了远场，由于发震构造的影响已经消失，烈度等震线趋于圆形，长、短轴衰减曲线也趋于重合。因此，我们在回归计算时采用椭圆长、短轴联合衰减模型（陈达生，刘汉兴，1989），以保证长、短轴在 $R=0$ 时烈度相等，而在中等距离上仍保持长、短轴烈度的差别，在远场使等震线成圆形。联合衰减模型的衰减方程为

$$I = a + bM + \zeta_1 R(R + R_a) + \zeta_2 R(R + R_b) + \epsilon \quad (1)$$

其中， I 为地震烈度， M 为震级； R_a 和 R_b 分别为长、短轴两方向烈度衰减的近场饱和因子； R_1 和 R_2 分别为烈度为 I 的椭圆等震线的长半轴和短半轴长度； a 、 b 、 ζ_1 、 ζ_2 均为回归系数； ϵ 为回归分析中表示不确定性的随机变量，通常假定为正态分布，其均值为零，标准差为 σ 。

在通常情况下，烈度等震线图勾画的是各个烈度等级的外包线。因此，如果最内圈等震线烈度值与震中烈度一样的话，说明最内圈等震线所包围的地区为极震区。而烈度在极震区内是达到饱和的，即该范围内任一点都具有同一震中烈度值。为了使衰减曲线达到这样的要求，参照汪素

云等（2000）的做法，我们在极震区内不同距离上适当增补一些数据点，这种近场补点工作只在震中烈度为 VII 度以上和最内圈等震线半径大于 5 km 时进行。另外，为了体现远场区发震构造影响消失，等震线形状趋于圆形的特点，取有感范围（III~IV 度）的半径作为远场控制点（汪素云，时振梁，1993）。在量取各地震的烈度等震线长、短轴数据时，我们采用长轴可转向的方法，也就是说，以每条等震线最长方向的半径为长轴半径，与之相垂直的方向为短轴半径。这样，当地震的各圈等震线长轴方向不一致时，就会出现长、短轴转向的情况（国家地震局，1996）。

2 统计结果与验证

按上述资料与方法，笔者进行统计回归，得到江西及邻区的地震烈度衰减关系的表达式：

长轴： $I = 6.0903 + 1.0536M - 3.6965 \lg(R_a + 14)$ ， $\sigma = 0.4352$

短轴： $I = 4.3839 + 1.0536M - 2.9940 \lg(R_b + 7)$ ， $\sigma = 0.4352$ (2)

式中， I 为地震烈度， M 为震级， R_a 和 R_b 分别为烈度等震线的长半轴和短半轴长度， σ 为标准差。图 1 给出了该衰减关系曲线和用于统计的烈度数据点的分布情况。考虑到用于统计的 26 次地震中，

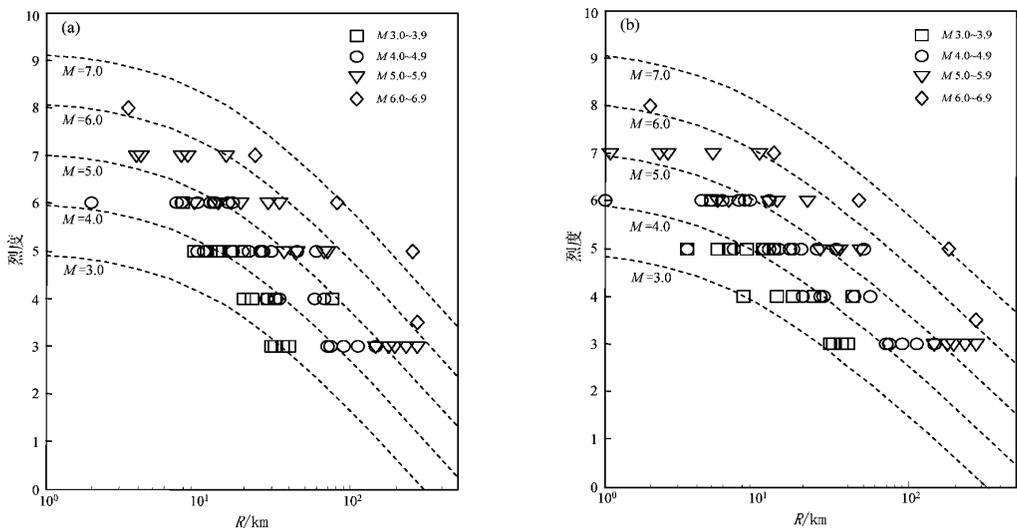


图 1 江西及邻区地震烈度衰减关系与用于统计的烈度数据点
(a) 长轴；(b) 短轴

Fig 1 Intensity attenuation relation in Jiangxi Province and its neighboring region and the selected intensity data applied to the calculation

(a) long axis; (b) short axis

中强地震所占的比例相对较小——5~5.9级地震为5次,6~6.9级地震有1次,4~4.9级地震所占的比例相对较大(表1),我们又收集了江西及邻区历史记载较为详细的7次中强地震(5~5.9级地震4次,6~6.9级地震3次)和近代有仪器

记录的3次3~3.9级地震的烈度等震线资料用于验证检验(表2)。从图2可以看出,用于检验的这10次地震的烈度分布与江西及邻区地震烈度衰减关系吻合较好,表明本研究得到的结果是较为可靠的。

表2 用于验证的地震烈度资料

Tab 2 Selected intensity data in Jiangxi Province and its neighboring region applied to the test

序号	发震日期 年-月-日	参考地点	震级 M_s	烈度 I	长半轴 / km	短半轴 / km	资料来源
1	1634-03	湖北黄冈-罗田	$5\frac{1}{2}$	VII VI	37	16	顾功叙(1983)
2	1651-02-16	福建宁化	$5\frac{1}{2}$	VI+ VI	30	22	顾功叙(1983)
3	1806-01-11	江西会昌	6	VIII	11	7	魏柏林(2001)
				VII	22	15	
				VI	52	35	
				V	106	73	
4	1917-01-24	安徽霍山	$6\frac{1}{2}$	IV	201	168	顾功叙(1983)
				VIII	10	6	
				VII	31	19	
5	1932-04-06	湖北麻城	6	VI	125	63	《湖北地震志》编纂委员会(1990)
				VII	10	4	
6	1941-09-21	江西寻乌	$5\frac{3}{4}$	VII	14	11	《江西省地震志》 编纂委员会(2003)
				VI	25	16	
				V	77	69	
7	1968-04-01	福建华安	5.2	VI+	10	6.5	中国地震局震害防御司(1999)
				VI	8.6	2.7	
				V	16	9	
8	1982-11-06	湖南宜章-临武	3.4	V	26	17	陈立军(1984)
				IV	6.5	4	
9	1988-09-18	福建长汀	3.3	IV	15.5	11	福建省地震局(2000)
10	1993-07-30	湖北咸宁	3.6	V	4.5	3	杨淑贤等(2006)
				VI	1.1	0.6	
				IV	5	3	
				IV	12.5	8.5	

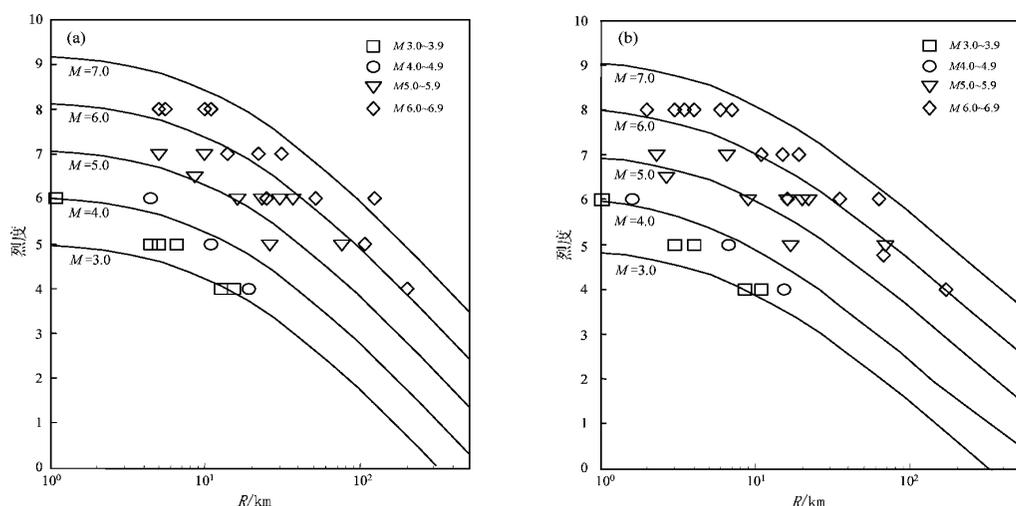


图2 江西及邻区地震烈度衰减关系与用于验证的烈度数据点

(a) 长轴; (b) 短轴

Fig 2 Intensity attenuation relation in Jiangxi Province and its neighboring region and the selected intensity data applied to the test

(a) long axis (b) short axis

3 讨论与结论

(1) 根据公式 2 给出的江西及邻区地震烈度衰减关系，当震级取 3 级时，震中烈度理论值接近 V 度；当震级取 4 级时，震中烈度理论值接近 VI 度；当震级取 5 级时，震中烈度理论值接近 VII 度；当震级取 6 级时，震中烈度理论值接近 VIII 度。上述统计结果符合该地区现代和历史地震震害分布的地域性特点。

(2) 从图 3 可以看出，对于小于 5 级的中等地震，江西及邻区的长轴和短轴地震烈度衰减关系曲线在近场和远场都要显著高于中国东部的衰

减曲线；对于中强地震，长轴和短轴方向的衰减关系曲线具有一定的复杂性：当震级取 5 级时，江西及邻区长轴曲线在距离小于 20 km 时要明显高于中国东部地区的烈度衰减曲线，距离大于 20 km 后略高于中国东部曲线，而短轴方向的衰减曲线在近场和远场都要明显高于中国东部曲线；当地震震级取 6 级时，江西及邻区长轴方向的衰减曲线在距离小于 10 km 时略高于中国东部地区的烈度衰减曲线，大于 10 km 后逐渐低于中国东部地区的烈度衰减曲线，短轴方向的衰减曲线在距离小于 10 km 时略高于中国东部曲线，大于 10 km 后与中国东部地区的烈度衰减曲线基本重合。

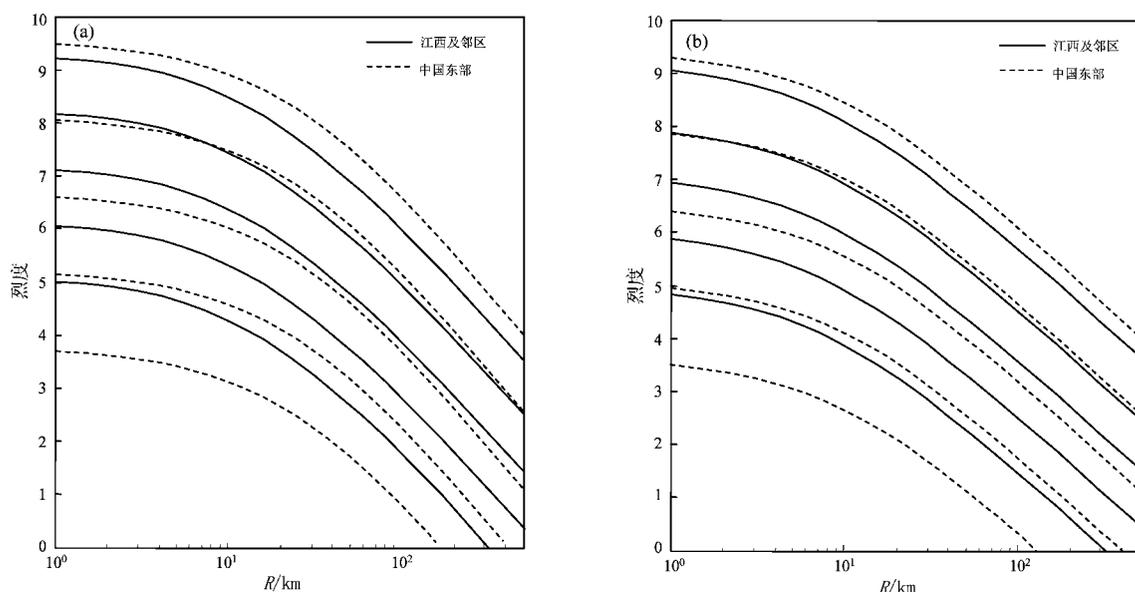


图 3 江西及邻区与中国东部地震烈度衰减关系的比较

(a) 长轴; (b) 短轴

Fig 3 Comparison of the intensity attenuation relation in Jiangxi Province and the one in East China

(a) long axis (b) short axis

(3) 近年来的强震记录表明，4~5 级地震产生的加速度很可能达到或超过《中国地震动参数区划图》所规定的 0.05 g 的最低设防标准（胡聿贤等，2001；李颖等，2007）。例如在 2008 年 3 月 6 日福建古田 4.2 级地震中记录到的基岩水平向峰值加速度达到 62.8 Gal，震中烈度为 V 度。对于江西及邻区隶属的华南内陆地区而言，此类 4~5 级中等地震活动是比较频繁的，部分地震造成了较严重的建筑物破坏和较大的经济损失，对于地震危险性分析结果可能会有较大影响，这在今后的研究工作中需要充分考虑。

料记载以来没有发生过 7 级以上地震，工程场址的近场区也不存在大震的潜在震源区，因此我们在研究其地震烈度衰减关系时没有考虑 7 级以上强震的问题，本区 7 级以上地震的烈度衰减特征只是外推的结果。因此，本研究结果只适用于 6 级工作除外的地震安全性评价、地震动参数小区划、震害预测等防震减灾领域。

湖南省地震局肖和平高级工程师和湖北省地震局陈俊华高级工程师为本研究提供了部分地震资料，在此表示衷心感谢！

(4) 江西及邻区是一个中强地震活动区，有史

参考文献:

- 安徽省地震局. 1990. 安徽地震目录 [M]. 北京: 中国展望出版社.
- 蔡辉腾, 韦永祥, 郑师春, 等. 2008. 福建及邻近地区地震烈度衰减关系研究 [J]. 地震研究, 31 (1): 20-26.
- 蔡辉腾, 赵志伟, 黄莉菁, 等. 2007. 福建顺昌 4.7 级地震建筑物震害分析 [J]. 华南地震, 27 (4): 54-60.
- 陈达生, 刘汉兴. 1989. 地震烈度椭圆衰减关系 [J]. 华北地震科学, 7 (3): 31-42.
- 陈立军. 1984. 1982年 11月 16日宜章一连县 3.5 级地震 [J]. 华南地震, 4 (3): 43-48.
- 福建省地震局. 2000. 福建省地震现场调查报告汇编 [J]. 福建地震, 16 (1): 1-85.
- 顾功叙. 1983. 中国地震目录 (公元前 183-公元 1969年) [M]. 北京: 科学出版社.
- 国家地震局. 1996. 中国地震烈度区划图 (1990) 概论 [M]. 北京: 地震出版社.
- 胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程 [M]. 北京: 地震出版社.
- 胡聿贤. 2001. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材 [M]. 北京: 中国标准出版社.
- 胡聿贤, 张敏政. 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法 [J]. 地震工程与工程振动, 4 (1): 1-11.
- 湖北地震志编纂委员会. 1990. 湖北地震志 [M]. 北京: 地震出版社.
- 湖南省地震办公室. 1993. 汝城大坪乡 $M_{L4.3}$ 级地震调查报告 [R].
- 黄河生, 陈益民, 魏柏林, 等. 1989. 新丰江水库区 1987年 9月 15日 4.5 级地震研究 [J]. 华南地震, 9 (3): 72-78.
- 黄河生, 魏柏林, 曾宪泽, 等. 1991. 新丰江水库区 1989年 11月 26日 4.5 级地震的主要特征 [J]. 华南地震, 11 (2): 68-73.
- 江西省地震志编纂委员会. 2003. 江西省志·江西省地震志 [M]. 北京: 方志出版社.
- 李颖, 胥广银, 陈鲲, 等. 2007. 湖南省中南部地区地震区划研究 [J]. 中国地震, 23 (1): 17-24.
- 吕坚, 倪四道, 沈小七, 等. 2007. 九江-瑞昌地震的精确定位及其发震构造初探 [J]. 中国地震, 23 (2): 166-174.
- 全国地震烈度区划编图组. 1979. 中国地震等烈度线图集 [M]. 北京: 地震出版社.
- 国家地震局震害防御司. 1990. 地震工作手册 [M]. 北京: 地震出版社.
- 汪素云, 时振梁. 1993. 有感半径与震级的关系及其应用 [C] // 国家地震局震害防御司. 中国地震区划文集. 北京: 地震出版社.
- 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.
- 魏柏林. 2001. 东南沿海地震活动特征 [M]. 北京: 地震出版社.
- 徐起浩, 缪维成, 张国荣, 等. 2000. 1999年 8月河源新丰江 $M_{L4.9}$ 级地震 [J]. 华南地震, 20 (2): 57-61.
- 徐起浩, 左开挺, 钟貽军, 等. 1999. 1999年 3月 25日广东河源 $M_{L4.7}$ 级地震宏观影响场 [J]. 华南地震, 19 (4): 66-71.
- 杨淑贤, 于品清, 郑水明, 等. 2006. 1993年咸宁地震群震害损失及发震成因探讨 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (1): 84-87.
- 俞言祥. 2002. 长周期地震动衰减关系研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 俞言祥, 汪素云. 2006. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系 [J]. 震灾防御技术, 1 (3): 206-216.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录 (公元 1912年-1990年 $M_{\geq 4.7}$) [M]. 北京: 中国科学技术出版社.
- GB17741-2005. 工程场地地震安全性评价 [S].

Attenuation Relation of Seismic Intensity in Jiangxi Province and Its Adjacent Area

LÜ Jian¹, YU Yan-xiang², GAO Jian-hua³, GAO Deng-ping², TANG Lan-rong²

(1. Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang 330039, Jiangxi, China)

(2. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

(3. Hongshan Seismic Station, Earthquake Administration of Hebei Province, Longyao 055350, Hebei, China)

Abstract

Based on the seismic intensity data of Jiangxi Province and its adjacent area according to the ellipse model of united map in nor axis and the method of adding control points of the near far field, we establish an intensity attenuation relation and tested its reasonability. The result shows that this relation well represents the features of historical and modern earthquake damage distribution in the areas, and can be applied to seismic safety evaluation, earthquake damage prediction and fast loss assessment.

Key words: seismic intensity; attenuation relation; Jiangxi Province and its adjacent area



邓柏昌 华南理工大学物理系副教授。1982年7月毕业于合肥工业大学地质系应用地球物理专业,获学士学位。1992年毕业于北京师范大学物理系物理教学专业,获硕士学位。主要从事电离层物理、地震电磁预报、电磁场理论及工科大学物理教学法等方面的研究工作。



武安绪 北京市地震局副局长。1989年毕业于云南大学地球物理系。目前主要从事地震活动、地壳形变、数字波形、综合预报、爆炸识别、信号处理、软件开发等研究工作。



蒋锋云 中国地震局第二监测中心工程师。2002年毕业于东华理工大学测绘系测绘工程专业,获理学学士学位。2006年毕业于中国地震局地震研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震预报与GPS数据处理及分析等方面的工作。



段虎荣 陕西铁路工程职业技术学院讲师。2002年7月毕业于长安大学测量工程专业,获学士学位;2006年7月毕业于长安大学大地测量与工程测量学专业,获硕士学位;2008年4月开始攻读长安大学大地测量与工程测量学博士学位。主要从事卫星大地测量研究工作。



武艳强 中国地震局地震预测研究所助理研究员。2003年天津大学计算机信息管理专业毕业,获学士学位;2008年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业,获理学硕士学位。主要从事大地测量数据处理与分析、孕震形变场识别等方面的研究工作。



张建国 河北省地震局邯郸地震中心台工程师。2006年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业,获理学学士学位。2008年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震监测工作。



李俊 四川大学电子信息学院在读硕士研究生。2006年毕业于四川大学电气信息学院,获工学学士学位。主要从事网络多播技术的研究工作。



庞卫东 2006年毕业于昆明理工大学地球科学系资源勘查工程专业,获学士学位,现为云南大学地球物理系在读硕士研究生。主要从事地球物理数据处理、地震地质及地震活动性分析方面的研究工作。



吕坚 江西省地震局预报中心工程师。2007年毕业于中国科学技术大学地球物理专业,获学士学位。主要从事地震活动性、地震危险性和数字地震学研究工作。



赵刚 中国地震局地壳应力研究所副研究员。2002年毕业于中国地震局地壳应力研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事前兆观测技术研究工作。

注:秦嘉政、付虹、张立、潘纪顺、王赟赟、杨国华、胡亚轩、周光全的简介已分别刊登在本刊 Vol28 No4, Vol30 No1, Vol29 No4, Vol31 No3, Vol32 No2, Vol31 No1, Vol30 No2, Vol29 No2