

为新区划图编制所建立的地震动衰减关系¹

俞言祥¹⁾ 李山有²⁾ 肖亮¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

摘要 介绍了建立新一代地震区划图所采用的地震动参数衰减关系的总体思路, 并从资料、衰减关系分区、衰减关系模型、回归方法、转换等方面说明了地震动参数衰减关系的建立过程, 给出了我国分区地震烈度和地震动参数衰减关系结果。新的地震动衰减关系的建立, 具有如下特点: 一是基于更加丰富可靠的强震记录和烈度资料; 二是采用了具有大震近场饱和特征的地震动衰减模型; 三是采用了使结果更加稳定的分步回归方法; 四是在地震动衰减关系分区时考虑了地震活动性特征。与第四代地震区划图衰减关系相比, 由于地震动衰减模型的变化和高震级强震记录的增加, 高震级下的峰值加速度有所降低, 而中强地震区的峰值加速度则在低震级时有所提高。

关键词: 地震区划图 衰减关系 地震烈度 加速度

引言

在地震区划工作中, 建立地震动参数衰减关系是一个重要的技术环节。在我国第四代地震区划图编制完成后的 10 多年间, 国内外在强震记录特别是大震近场记录的获取方面有了明显改观, 在地震动衰减关系分区、强地震动特性等方面的研究也取得了新的认识。为满足我国新一代地震区划图编制工作的要求, 在建立地震动衰减关系时, 需要根据我国的实际情况和工程实践, 及时吸收和反映国内外相关研究成果, 同时保持适当的继承性。本文简要介绍了建立新一代地震区划图所采用的地震动参数衰减关系的总体思路, 并从资料、衰减关系分区、衰减关系模型、回归方法、转换等方面说明了地震动参数衰减关系的建立过程, 给出了我国分区地震烈度和地震动参数衰减关系。

1 总体思路

在建立我国新一代地震区划图编制工作所需的地震动参数衰减关系时, 充分吸收和借鉴了国内外有关最新研究成果、特别是美国 NGA (Next Generation Attenuation) 的成果 (Power 等, 2008), 考虑我国强震数据的实际情况和工程实践, 在与第四代地震区划图的地震动衰减关系保持适当衔接的基础上, 以观测数据为基础, 建立我国分区地震动参数衰减关系。

1 基金项目 国家科技支撑计划课题 (2006BAC13B01) 和新一代地震区划图编制项目资助

[收稿日期] 2013-03-08

[作者简介] 俞言祥, 男, 生于 1964 年。博士, 研究员。主要从事工程地震研究。E-mail: yuyx@cea-igp.ac.cn

虽然近年来我国强震观测数据得到了快速积累，但全国大部分地区仍不足以用强震数据直接回归得到衰减关系。因此，本次工作中仍以转换方法（胡聿贤等，1984）建立我国分区地震动衰减关系，即在确定我国地震动衰减关系分区的基础上，建立各分区地震烈度衰减关系；同时，选择美国西部为参考地区，建立该地区的地震动衰减关系，并选择合适的参考地区地震烈度衰减关系，采用转换方法得到我国各分区地震动参数衰减关系，并在转换过程中利用了我国部分强震数据加以控制。

考虑到我国新一代地震区划图编制原则和方法的要求，在建立地震动衰减关系时，地震动参数仍然为基岩水平向加速度反应谱和速度反应谱平台值除以 2.5（用这 2 个参数即可构建标准反应谱），地震震级 M 采用面波震级，距离参数也仍然采用震中距。

2 衰减关系分区

强地震动的衰减特征存在区域性差异，因此大多数地震动衰减关系均只适合于特定的地区。在我国第三代和第四代地震区划图编制时，大致以东经 105° 为界，将全国分为 2 个地震动衰减关系分区，这主要考虑了我国东、西部地区地震烈度衰减的主要特征，如烈度衰减的快慢、最内圈等震线的长短轴比值等（汪素云等，2000）。对于我国新一代地震区划图编制工作中的地震动衰减关系是否沿用上述分区，作者专门进行了分析与研究。

目前，国际上倾向于依据区域地震构造活动特征的不同来划分地震动衰减关系分区。例如：美国新版地震区划图编制时，除板块俯冲带地区外，将浅源地震影响地区分为以美国西部地区为代表的构造活动地区和以美国中东部地区为代表的构造稳定地区（US Geological Survey, 2008），分别建立各自的地震动衰减关系。近来的一些研究表明，即使在我国东部地区，地震烈度衰减特征也存在着分区性，例如：华南内陆地区，中强地震甚至小震常常造成较重的破坏，其地震烈度衰减特征与华北地区有所不同（王继等，2008）。对于地震活动性相对较弱的欧洲地区，它的中小地震的地震动衰减规律与美国西部地区的中小地震的地震动衰减规律有所不同（靳超宇等，2009）。

地震动随距离的衰减包括了几何衰减和非弹性衰减两部分。对于震源深度相同的地震，地震动的几何衰减对于任何地区都是相同的，而非弹性衰减则随地区变化。对于构造稳定的地区，非弹性衰减小，介质品质因子 Q 值相对较高。根据对全国非弹性衰减横向变化的研究结果（汪素云等，2007；2008），在塔里木盆地、四川盆地、华南地块及鄂尔多斯高原等构造稳定的地台地区，有较高的 Q 值，即非弹性衰减较慢，这些地区的地震活动以中强地震为主，而在华北、天山、祁连山及川滇、渤海湾等构造活动地区，有较低的 Q 值，即非弹性衰减较高，这些地区也是强震多发地区。以上证据表明，以浅源地震为主的我国，在进行地震动衰减关系分区时，也应考虑地震活动水平的区域性。

在本次地震区划图编制工作中，我国地震动衰减关系分区是以地震区带为基本单元，综合考虑地震烈度衰减的分区特征、地震活动水平的区域性特征确定的，具体分区方案如下：

（1）青藏区：青藏地震区。

（2）新疆区：新疆地震区除塔里木 - 阿拉善地震带的其它区域。

（3）东部强震区：华北地震区除鄂尔多斯地震统计区外的其它地震带、华南沿海地震带、台湾地震区。

（4）中强地震区：东部地区的其它区域、塔里木 - 阿拉善地震统计区。

3 地震烈度衰减关系

在本次地震区划图编制工作中,除了衰减关系分区方案不同和地震烈度资料扩充外,地震烈度衰减关系的模型与建立方法均与第四代区划图相同。

共选取了发生在我国境内研究地区的 377 个 4.0 级以上地震的等震线图,其中,1990 年前的地震资料与第四代区划图相同,另外新增 1991—2008 年 140 个地震的烈度资料,其中大部分来自中国地震年鉴,少数来自独立的地震现场烈度勘查报告。最终进行地震烈度衰减关系确定的为来自这 377 个地震、共 973 条等震线记录。地震震级分布的统计见表 1。

表 1 地震震级分布统计表

Table 1 Statistical classification of earthquake magnitude distribution

震级 分区	4.0	4.0—4.4	4.5—4.9	5.0—5.4	5.5—5.9	6.0—6.4	6.5—6.9	7.0—7.4	7.5—7.9	8.0	合计
东部强震区	0	3	12	26	15	13	3	6	1	0	79
中强地震区	4	5	14	14	9	5	0	0	0	0	51
新疆区	0	0	1	8	11	10	7	4	1	3	45
青藏区	0	2	3	71	38	33	27	17	7	4	202
合计	4	10	30	119	73	61	37	27	9	7	377

地震烈度衰减关系模型为：

$$I = A + BM + C \lg(R + R_0) \quad (1)$$

式中, I 为地震烈度; M 为面波震级; R 为震中距; A 、 B 、 C 和 R_0 为回归系数。

地震烈度衰减关系模型采用椭圆模型,为了保证烈度衰减关系长短轴在 $R=0$ 时烈度相等,而中间距离仍保持长短轴烈度的差别,同时在远场也使等震线成圆形的特征,采取了在远、近场补点的步骤,即在极震区内不同距离上适当增补一些数据点,以使震中区的烈度大致相同。另外,为了体现远场区发震构造影响消失,衰减形状趋于圆形的特点,取有感范围的半径作为远场控制点,有感烈度值为 3—4 度(汪素云等, 1993)。

在回归衰减关系时,采用椭圆长短轴联合衰减模型(陈达生等, 1989),使用最小二乘法进行统计回归,得到我国各分区地震烈度衰减关系,与式(1)相应的系数见表 2。具体方法与步骤可参考肖亮等(2011)和卢建旗等(2009)。

表 2 地震烈度衰减关系系数

Table 2 Coefficients for the seismic intensity attenuation models

系数 分区	A	B	C	R_0	标准差
东部强震区	5.7123	1.3626	-4.2903	25	0.5826
	3.6588	1.3626	-3.5406	13	

续表

系数 分区	A	B	C	R_0	标准差
中强地震区	5.8410	1.0710	-3.6570	15	0.5200
	3.9440	1.0710	-2.8450	7	
新疆区	5.6018	1.4347	-4.4899	25	0.5924
	3.6113	1.4347	-3.8477	13	
青藏区	6.4580	1.2746	-4.4709	25	0.6636
	3.3682	1.2746	-3.3119	9	

4 参考地区地震动参数衰减关系

将美国西部作为参考地区,采用美国 NGA 强震数据库作为基础数据,选取了 1970 - 2002 年发生在美国西部地震的基岩地震动资料,绝大部分地震发生在加利福尼亚。为增加高震级地震的强震数据,加入中国台湾集集地震主震等少数世界其他地区浅源大震的强震资料,有助于对大震级地震动数值的估计。地震目录见表 3。

表 3 强震地震目录

Table 3 Catalog of strong earthquakes

序号	地震名称	发震时刻	M_S 震级
1	Parkfield	1966.6.28	6.2
2	Lytle Creek	1970.09.12	5.4
3	San Fernando	1971.02.09	6.5
4	Coyote Lake	1979.08.06	5.7
5	Imperial Valley	1979.10.15	6.9
6	Coalinga	1983.05.02	6.5
7	Morgan Hill	1984.04.24	6.1
8	Whittier Narrows	1987.10.01	5.8
9	Loma Prieta	1989.10.18	7.1
10	Landers	1992.6.28	7.5
11	Northridge	1994.01.17	6.8
12	Hector Mine	1999.10.16	7.4
13	Yountville	2000.09.03	5.0

续表

序号	地震名称	发震时刻	M_s 震级
14	Tabas, Iran	1978.9.16	7.4
15	Manjil, Iran	1990.6.20	7.7
16	Chi-Chi	1999.09.20	7.7

选取这 16 个地震在基岩场地的水平方向记录共 268 条进行衰减关系模型的确定。同一台站的 2 个水平向记录视为独立的 2 条记录。对于场地的划分主要使用基于 V_s30 (场地地表 30m 土层的平均剪切波波速) 的 NEHRP 划分标准。本次工作选取 V_s30 在 500m/s 以上的场地, 将其视为基岩场地。强震资料的震级 - 距离分布如图 1 所示。

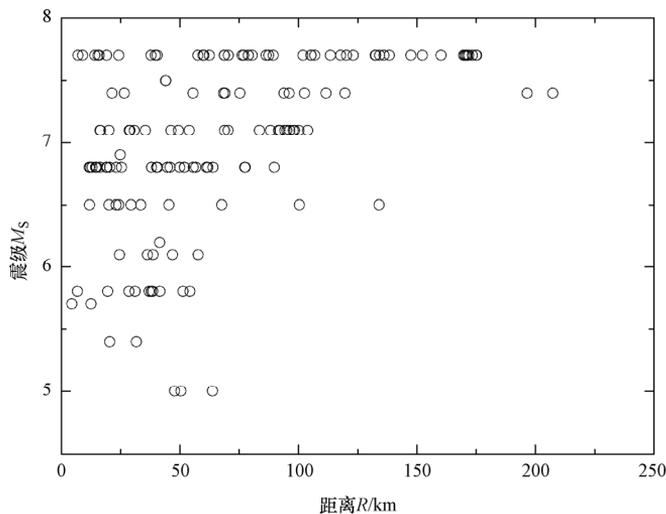


图 1 强震资料的震级 - 距离分布

Fig. 1 Distribution of magnitude-distance of strong earthquakes

对所有 268 条记录, 计算临界阻尼比 0.05 的绝对加速度反应谱和拟速度反应谱, 分别确定加速度反应谱和拟速度反应谱的平台值, 再将它们分别除以 2.5, 得到 2 个值 a_E 和 v_E , a_E 在数值上对应了新区划图的峰值加速度参数, 而通过 $T_g = 2\pi \frac{v_E}{a_E}$ 则得到反应谱特征周期。

衰减关系模型的形式与第四代区划图相同:

$$\lg Y = A + BM + C \lg(R + De^{EM}) \quad (2)$$

式中, Y 为地震动参数 a_E 或 v_E ; M 为面波震级; R 为震中距; A 、 B 、 C 、 D 和 E 为回归系数。

为更准确地反映地震动的大震近场饱和特征, 式(2)是震级分段的, 即以震级 6.5 为界, 震级高于 6.5 和低于 6.5 的地震, 式(2)中的系数是不同的。

采用一种新的分步回归方法对地震动衰减关系进行统计分析(肖亮等, 2010), 并对截

尾效应进行了消除 (Chiou 等, 2008), 得到了参考地区地震动参数 a_E 和 v_E 的衰减关系系数, 分别见表 4 和表 5, 式中 σ 为标准差。

表 4 a_E 衰减关系系数Table 4 Coefficients of attenuation relation of a_E

系数与方差	A	B	C	D	E	σ
M 6.5	0.561	0.746	-1.925	0.956	0.462	0.236
M 6.5	2.501	0.448	-1.925	0.956	0.462	

表 5 v_E 衰减关系系数Table 5 Coefficients of attenuation relation of v_E

系数与方差	A	B	C	D	E	σ
M 6.5	-1.819	0.879	-1.731	0.956	0.462	0.271
M 6.5	0.425	0.533	-1.731	0.956	0.462	

5 我国分区地震动衰减关系

采用转换方法 (胡聿贤等, 1984) 建立我国各分区的地震动参数衰减关系。利用本文建立的参考地区地震动参数衰减关系和我国各分区地震烈度衰减关系, 以及参考地区地震烈度衰减关系 (Chandra, 1979), 采用中线映射原则, 可以得到我国各分区的地震动参数衰减关系, 衰减关系模型同式 (2)。一般建议在以下范围适用: $M=4.5 - 8.0$ (中强地震区 $M=4.5 - 7.0$), $R=0 - 200\text{km}$ 。在转换过程中, 还加入了我国部分地区的基岩强震动数据, 包括汶川地震的强震记录。表 6 和表 7 分别是我国各分区 a_E 和 v_E 的衰减关系系数, 图 2—图 5 是 4 个分区的 a_E 衰减曲线。

表 6 中国分区 a_E 衰减关系参数Table 6 Coefficients of attenuation relation of a_E for China

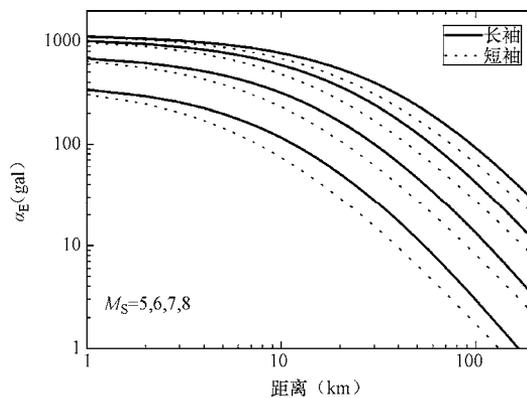
地区	6.5 级以下		6.5 级以上		C	D	E	标准差
	A	B	A	B				σ
新疆区长轴	1.791	0.720	3.403	0.472	-2.389	1.772	0.424	0.236
新疆区短轴	0.983	0.713	2.610	0.463	-2.118	0.825	0.465	0.236
青藏区长轴	2.387	0.645	3.807	0.411	-2.416	2.647	0.366	0.236
青藏区短轴	1.003	0.609	2.457	0.388	-1.854	0.612	0.457	0.236
东部强震区长轴	1.979	0.671	3.533	0.432	-2.315	2.088	0.399	0.236

续表

地区	6.5 级以下		6.5 级以上					标准差
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	σ
东部强震区短轴	1.176	0.660	2.753	0.418	-2.004	0.944	0.447	0.236
中强地震区长轴	2.417	0.498	3.706	0.298	-2.079	2.802	0.295	0.236
中强地震区短轴	1.715	0.471	2.690	0.321	-1.723	1.295	0.331	0.236

表 7 中国分区 v_E 衰减关系参数Table 7 Coefficients of attenuation relation of v_E for China

地区	6.5 级以下		6.5 级以上					标准差
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	σ
新疆区长轴	-0.547	0.840	1.310	0.554	-2.181	1.772	0.424	0.271
新疆区短轴	-1.351	0.843	0.569	0.549	-1.945	0.825	0.465	0.271
青藏区长轴	-0.064	0.766	1.714	0.491	-2.205	2.647	0.366	0.271
青藏区短轴	-1.301	0.741	0.443	0.474	-1.696	0.612	0.457	0.271
东部强震区长轴	-0.363	0.791	1.437	0.513	-2.103	2.088	0.399	0.271
东部强震区短轴	-1.147	0.788	0.712	0.502	-1.825	0.944	0.447	0.271
中强地震区长轴	0.093	0.621	1.640	0.382	-1.889	2.802	0.295	0.271
中强地震区短轴	-0.589	0.601	0.671	0.407	-1.559	1.295	0.331	0.271

图 2 新疆区 a_E 衰减关系曲线Fig. 2 Attenuation relation curves for a_E in Xingjiang zone

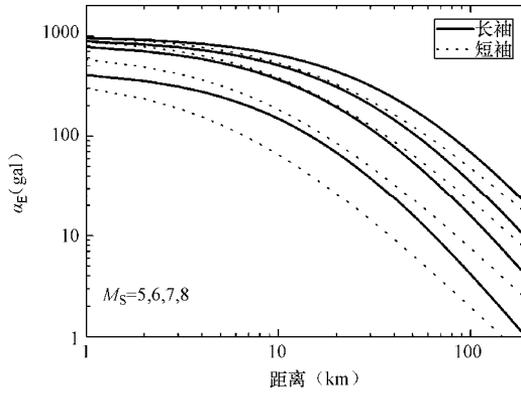


图 3 青藏区 a_E 衰减关系曲线

Fig. 3 Attenuation relation curves for a_E in Qinghai-Xizang zone

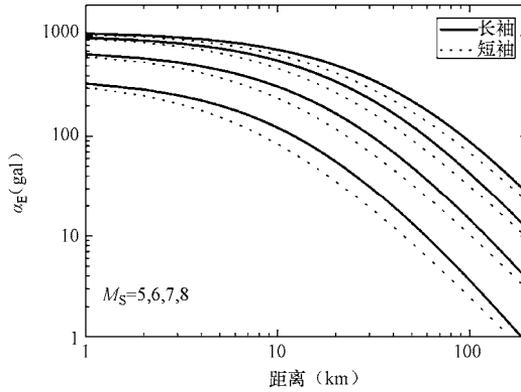


图 4 东部强震区 a_E 衰减关系曲线

Fig. 4 Attenuation relation curves for a_E in tectonic active regions of east China

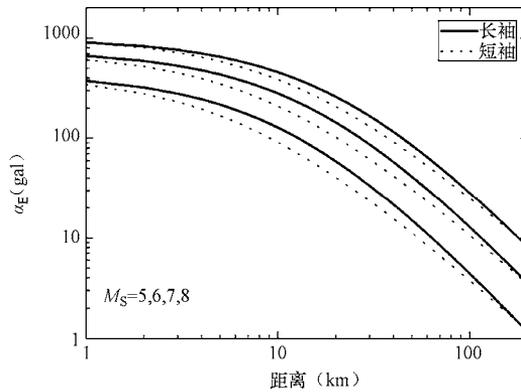


图 5 中强地震区 a_E 衰减关系曲线

Fig. 5 Attenuation relation curves for a_E in tectonic stable regions of China

6 结语

新的地震动衰减关系的建立, 在继承的基础上, 有如下特点: 一是基于更加丰富可靠的强震记录和烈度资料; 二是采用了具有大震近场饱和特征的地震动衰减模型; 三是采用了使结果更加稳定的分步回归方法; 四是在地震动衰减关系分区时考虑了地震活动性特征。与第四代地震区划图衰减关系相比, 由于地震动衰减模型的变化和高震级强震记录的增加, 高震级下的峰值加速度有所降低, 而中强地震区的峰值加速度则在低震级时有所提高。

致谢: 本文使用了国家强震动台网中心和美国 NGA 项目的强震动数据。参加本工作的还有卢建旗、靳超宇、李伟、于海英、常莹、王继、吕坚、袁媛、刘志坚、杨丽萍、唐丽华、童远林等。

参考文献

- 陈达生, 刘汉兴, 1989. 地震烈度椭圆衰减关系. 华北地震科学, 7(3): 31 - 42.
- 胡聿贤, 张敏政, 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估计方法. 地震工程与工程振动, 4(1): 1—11.
- 靳超宇, 俞言祥, 2009. 欧洲中小震基岩水平向地震动衰减关系研究. 中国地震, 25(2): 170 - 177.
- 卢建旗, 李山有, 李伟, 2009. 中强地震活动区地震动衰减关系的确定. 世界地震工程, 25(4): 33 - 43.
- 汪素云, 时振梁, 1993. 有感半径与震级的关系及其应用. 国家地震局震害防御司编, 见: 中国地震区划文集. 北京: 地震出版社, 179 - 184.
- 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. 中国地震, 16(2): 99 - 106.
- 汪素云, 裴顺平, 许忠淮等, 2007. 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值: 不同构造区的衰减特征. 地球物理学报, 50(6): 1740 - 1747.
- 汪素云, 裴顺平, Hearn 等, 2008. 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值: Q 横向变化特征. 地球物理学报, 51(1): 133 - 139.
- 王继, 俞言祥, 2008. 华中、华南中强地震区地震烈度衰减关系研究. 震灾防御技术, 3(1): 20 - 25.
- 肖亮, 俞言祥, 2010. 一种新的拟合地震动衰减关系的分步回归法. 地震学报, 32(6): 725 - 732.
- 肖亮, 俞言祥, 2011. 中国西部地区地震烈度衰减关系. 震灾防御技术, 6(4): 358 - 371.
- Chandra U., 1979. Attenuation of intensities in the United States. Bull. Seism. Soc. Amer., 69(6): 2003 - 2024.
- Chiou B. and Youngs R.R., 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthquake Spectra, 24(1): 173 - 216.
- Power M., Chiou B., Abrahamson N. et al., 2008. An overview of the NGA project. Earthquake Spectra, 24(1): 3 - 21.
- US Geological Survey, 2008. Documentation for the 2008 update of the United States National Seismic Hazard Maps. USGS Open-File Report.

Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic Hazard Map of China

Yu Yanxiang¹⁾, Li Shanyou²⁾ and Xiao Liang¹⁾

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

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract The general idea for establishing ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China is introduced. The developing procedures are briefly summarized through strong motion data, attenuation zoning, attenuation model, regression strategy, and transformation. The development of the new attenuation relations is characterized by the following four aspects: more abundant data is based on; a model representing ground motion saturation is used; a more robust step-regression approach is applied; and a new attenuation zoning scheme is utilized. As compared with the attenuation relations used in the previous version of seismic hazard map of China, the predicted PGA for large earthquake in the new map is lower due to the application of the new attenuation model and more strong motion data in new field, while the predicted PGA for smaller earthquake is higher in moderate seismicity regions than before.

Key words: Seismic hazard map; Attenuation relation; Seismic intensity; Ground motion acceleration