

文章编号: 0253-3782(2007)05-0500-12

# 四川及邻区地震动衰减关系\*

雷建成<sup>1,2),\*</sup> 高孟潭<sup>1)</sup> 俞言祥<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

**摘要** 根据地震构造环境和震害分布特点,将四川及邻区划分为西南地区 and 四川盆地地区。收集了西南地区 96 次、四川盆地地区 40 次近代破坏性地震资料,并对各次地震的震级参数进行了统一校核。按照该地区震中烈度与震级、有感半径与震级的统计关系,对地震烈度衰减进行了近场与远场特征控制,建立了地震烈度沿长轴、短轴和平均轴的衰减关系。统一了中国与美国面波震级的震级标度,利用最新得出的美国西部基岩水平向地震加速度反应谱衰减关系,采用考虑地震加速度的近场距离饱和与震级饱和特征的衰减模型,转换得到了该地区的基岩水平向地震加速度反应谱衰减关系。

**关键词** 西南地区 四川盆地地区 地震烈度 地震加速度 衰减关系

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

## 引言

在地震安全性评价工作中,一个重要环节就是建立场址所在地区的地震动参数衰减关系。受到我国缺乏强震记录的限制,通过转换方法间接得到我国地震动衰减关系仍是当前的主要方法。转换时,需要首先建立参考地区的地震烈度、地震动衰减关系以及本地区的地震烈度衰减关系。一般地,参考区以及参考区的地震烈度、地震动衰减关系的选取大致是成熟、相同的。所以,如何体现我国各地区地震活动及震害分布的地域性特点,科学地确定各地区地震烈度衰减关系,成为确定我国地震动衰减关系一个极为重要的环节。

地震动衰减具有很强的地域性,在衰减关系的统计确定中,所考虑的区域范围大小和强震资料多少是控制地震动衰减关系合理性和适用性的两个矛盾性因素(李小军, 2006)。对于我国不同地区的地震动衰减关系,许多学者给出过不同的研究成果(霍俊荣等, 1992; 汪素云等, 2000; 俞言祥, 汪素云, 2004; 俞言祥, 汪素云, 2006)。但对于当前地震安全性评价的实际需要来说,还存在一定的缺憾:有的使用的美国西部的强震资料较老、较少,有的建立衰减关系的区域太大,如仅将中国分为中国东、西部,或分为华南、华北、西北、西南,淹没了地震活动与震害分布的区域性特点等。在对地震烈度衰减远场特征的控制中,一般采用汪素云和时振梁(1993)用中国大陆 1900—1979 年的地震资料统计得到的有感半径与震级的统计关系。随着地震资料的丰富和研究深入,雷建成等(2006)得出了四川

\* 国家科技支撑计划(2006BAC13B01-0604)、科技部社会公益研究专项(2005DIB3J119)资助。中国地震局地球物理研究所论著 07AC1021。

2007-02-08 收到初稿, 2007-07-24 决定采用修改稿。

† 通讯作者。 e-mail: jclei@126.com

及邻区的有感半径与震级的更为细致、准确的统计关系。由于使用的计算公式与仪器记录分向的不同，我国与美国测定的地震面波震级在不同震级段存在系统偏差(刘瑞丰等, 2006)。在当前的转换工作中，这种差异还未见有考虑的报道。

四川及邻区是我国西部地震活动强烈且特征明显的一个区域。本文对该地区的近代地震资料进行了较为系统、全面的清理：首先按地震构造环境和震害特点进行地震区域分区，全面收集不同区域的既有仪器测定震级，又有宏观烈度调查资料的地震，并以《中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年,  $M_s \geq 4.7$ )》(中国地震局震害防御司, 1999)和国家地震局地球物理研究所测定面波震级(1990 年以来)<sup>①、②</sup>为依据，对各次地震的震级参数进行统一校核；其次按照四川及邻区震中烈度与震级、有感半径与震级的统计关系进行地震烈度衰减的近场与远场特征控制，建立不同区域的地震烈度衰减关系；最后考虑中国与美国面波震级标度的系统偏差(刘瑞丰等, 2006)，利用最新得出的美国西部基岩水平向地震加速度反应谱衰减关系(俞言祥, 汪素云, 2002, 2004)，转换得到不同区域的基岩水平向地震加速度反应谱衰减关系。

### 1 地震活动特征分区

受地震构造环境的影响和控制，中国大陆内部的地震活动及其震害分布具有明显的地区性特征。根据地震构造环境(徐锡伟等, 2005)和震害分布特征，本文将四川及邻区分成西南地区和四川盆地地区两个区域进行研究(图 1)。

#### 1.1 西南地区

主要为川滇块体及巴颜喀拉块体中的龙门山次级块体(徐锡伟等, 2005)的区域，大致相当于《中国地震动参数区划图》(胡聿贤, 2001)中鲜水河—滇东地震带的中南段、龙门山地震带南段、巴颜喀拉地震带南段。该地区多次孕育、发生 7 级以上强震，地震活动的频度高、强度大。地震发生一般受断层活动的明显控制，发震断层活动方式以走滑、逆走滑为主。震害分布大多表现为明显的椭圆形，在大型走滑断层上以及块体边界断层上，受地震破裂传播方向性的影响，地震震害呈更为狭长的椭圆分布。

#### 1.2 四川盆地地区

指龙门山断裂带以南，安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带以东，包括四川马

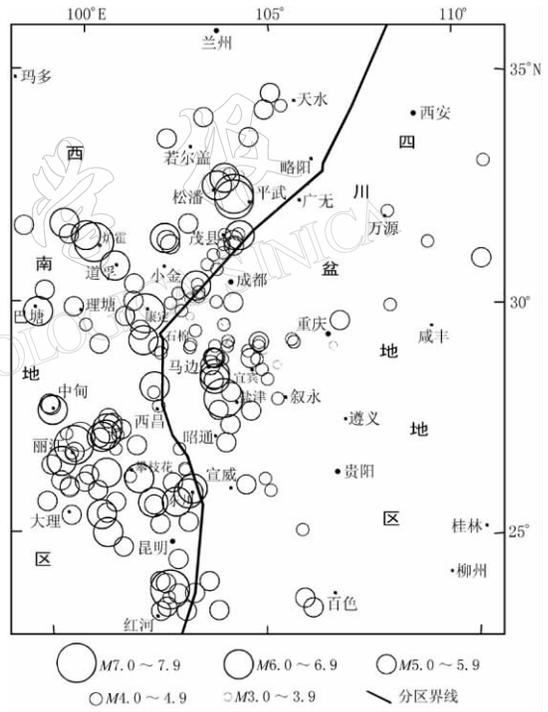


图 1 地震活动分区及用于统计的地震震中分布图

① 国家地震局地球物理研究所. 中国地震年报. 1990—2000 年.

② 中国地震局地球物理研究所. 中国数字地震台网观测报告. 2001—2006 年.

边、雷波、四川盆地、滇东北、重庆、贵州、湖北等地区。主要为华南块体(徐锡伟等, 2005)的西部地区, 大致相当于《中国地震动参数区划图》(胡聿贤, 2001)中长江中游地震带的西部。该区域处于青藏高原向华南地区的过渡地带, 地形较为平坦, 地壳结构较为均匀, 断层规模较小, 活动性较弱。断层性质以逆断层为主, 地震活动一般受到断层或者与断层共生的褶皱的控制和影响。地震活动的频度和强度均较低, 除四川马边、雷波地区有 6~7 级地震活动外, 其余地区的地震活动大多以 5 级左右的中等强度地震为主。该区域的地震分布呈现一定的方向性椭圆形, 但接近圆形。

## 2 震例选取、参数确定及数据分布

### 2.1 震例选取及参数确定

为了得到客观、可靠的统计规律, 本文选用上述区域的近代破坏性地震资料分别进行统计。其中震级  $M$  是由仪器测定的面波震级, 地震烈度是由现场详细的宏观调查资料评定的。震例资料主要取自《四川地震资料汇编》(《四川地震资料汇编》编辑组, 1981; 《四川地震资料汇编》(第三卷)编辑组, 《四川地震志》编辑组, 2000)、《云南省地震资料汇编》(云南省地震局, 1988)、《甘肃省地震资料汇编》(国家地震局兰州地震研究所, 1989)、《中国震例》(陈棋福等, 2002a, b; 张肇诚等, 1990a, b; 张肇诚等, 1999, 2000)、《云贵地区地震等震线图集》(云南省地震工程院, 2000), 以及有关地震的宏观考察报告等。为保证资料的可靠性, 还选取了西南地区 1950 年以来的震例资料、四川盆地地区 1930 年以来的震例资料分别进行统计。

《中国近代地震目录(公元 1912—1990 年,  $M_s \geq 4.7$ )》(中国地震局震害防御司, 1999)是中国地震局编制的我国最新版本的地震目录。该目录是在对 20 世纪我国编制的 3 个本地震目录的清理和总结的基础上修编而成, 既保持了地震目录的系统性和连续性, 又充分应用了各方面的研究成果, 具有更新和更扎实的科学基础(汪素云等, 1998)。本文所选取的整理资料来自于不同年代、不同省区的地震考察资料。为保证统计结果的系统性和科学性, 对所选震例的震级参数  $M$  均以《中国近代地震目录(公元 1912—1990 年,  $M_s \geq 4.7$ )》(中国地震局震害防御司, 1999)和国家地震局地球物理研究所测定面波震级(1990 年以来)<sup>①②</sup> 为依据进行核校。对于等烈度线长短轴半径的量取, 我们采用了长轴可转向的方法。

### 2.2 数据分布

按照上述方法, 本文对四川及邻区的近代破坏性地震资料进行了全面的收集和清理, 得到西南地区 1950—2006 年的破坏性地震 96 次(图 1), 震级范围 4.0~7.8 级, 地震烈度

表 1 震级分布表

震级	西南地区		四川盆地地区	
	次数	比例	次数	比例
3.5~3.9	0	0%	1	2.5%
4.0~4.4	4	4.2%	3	7.5%
4.5~4.9	13	13.5%	13	32.5%
5.0~5.4	32	33.3%	12	30.0%
5.5~5.9	16	16.7%	7	17.5%
6.0~6.4	15	15.6%	2	5.0%
6.5~6.9	11	11.5%	1	2.5%
7.0~7.4	2	2.1%	1	2.5%
7.5~7.9	3	3.1%	0	0%
合计	96	100%	40	100%

① 国家地震局地球物理研究所。中国地震年报。1990—2000 年。

② 中国地震局地球物理研究所。中国数字地震台网观测报告。2001—2006 年。

从Ⅳ～Ⅹ度，共计 236 条等烈度线；得到四川盆地地区 1932—2004 年的破坏性地震 40 次（图 1），震级范围 3.8～7.1 级，地震烈度从Ⅳ～Ⅹ度，共计 91 条等烈度线。西南地区、四川盆地地区震例的震级分布，等烈度线分布及距离分布分别见表 1、表 2 和表 3。

表 2 等烈度线分布表

地区	烈度	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	Ⅹ	合计
西南地区	数量	8	45	85	53	28	14	3	236
	比例	3.4%	19.1%	36.0%	22.5%	11.9%	5.9%	1.3%	100%
四川盆地地区	数量	6	22	35	21	5	2	0	91
	比例	6.6%	24.2%	38.5%	23.1%	5.5%	2.2%	0%	100%

表 3 距离分布表

距离 /km	西南地区				四川盆地地区			
	长轴		短轴		长轴		短轴	
	数量	比例	数量	比例	数量	比例	数量	比例
0~4.9	27	11.4%	76	32.2%	22	24.2%	42	46.2%
5~9.9	45	19.1%	60	25.4%	23	25.3%	21	23.1%
10~19.9	58	24.6%	47	19.9%	28	30.8%	16	17.6%
20~29.9	35	14.8%	21	8.9%	5	5.5%	8	8.8%
30~39.9	19	8.1%	13	5.5%	6	6.6%	1	1.1%
40~49.9	20	8.5%	8	3.4%	3	3.3%	1	1.1%
50~69.9	18	7.6%	6	2.5%	2	2.2%	1	1.1%
70~99.9	7	3.0%	3	1.3%	1	1.1%	1	1.1%
≥100	7	3.0%	2	0.9%	1	1.1%	0	0.0%
合计	236	100%	236	100%	91	100%	91	100%

### 3 地震烈度衰减关系

#### 3.1 地震烈度衰减模型及回归方法

从实际震例发现，四川及邻区地震烈度等烈度线图表现为显著的椭圆形。采用通常的做法，本文选用椭圆模型来确定地震烈度衰减关系

$$\begin{cases} I_a = d_{a1} + d_{a2}M + d_{a3} \lg(R_a + R_{a0}) & \epsilon_a \\ I_b = d_{b1} + d_{b2}M + d_{b3} \lg(R_b + R_{b0}) & \epsilon_b \end{cases} \quad (1)$$

式中， $M$  为震级， $R$  为震中距（单位：km）， $R_0$  为距离预置项， $\epsilon$  是随机误差； $d_1, d_2, d_3$  是回归系数； $a, b$  分别代表长、短轴。

本文中，地震烈度衰减的近场和远场特征也是通过近场、远场增加控制点来实现的（陈达生，1996；汪素云等，2000）。雷建成等（2006）根据西南地区 116 次、四川盆地地区 60 次地震资料统计得出的震中烈度与震级的关系，根据西南地区 96 次、四川盆地地区 45 次地震资料统计得出的有感半径与震级的关系，较好地体现了该地区地震烈度分布的近场、远场特征。运用这些成果，本文对地震烈度衰减的近场和远场特征进行了反映和控制，按有感半径与震级的统计关系，取有感烈度为 3.5 度，在远场增加控制点，当西南地区地震震中烈度 ≥ Ⅶ 度、四川盆地地区地震震中烈度 ≥ Ⅵ 度时，在震中区采用震中烈度与震级的统计关系适当增加控制点。

为考虑长轴和短轴的相关性,更好地体现地震烈度衰减的近场和远场特征,本文采用了陈达生和刘汉兴(1989)提出的长短轴联合椭圆模型,用最小二乘法进行回归分析。

为了便于实际应用,取等效半径  $R = \sqrt{R_a R_b}$ 。本文还同时统计得出了西南地区、四川盆地地区的地震烈度平均轴衰减关系。

### 3.2 地震烈度衰减关系

采用上述模型和方法,分别得到西南地区、四川盆地地区的地震烈度沿长轴、短轴和平均轴的衰减关系(表4、图2)。在4代区划图的编制中,汪素云等(2000)统计求出了东经  $105^\circ$  以西的中国西部地震烈度衰减关系,西南地区和四川盆地的大部分地区均位于中国西部,它们之间的对比见图2。

表4 地震烈度衰减关系系数表

地区	轴向	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$R_0$	$\sigma$
西南地区	长轴	7.356 8	1.278 0	-5.065 5	24.0	0.70
	短轴	3.950 2	1.278 0	-3.756 7	9.0	0.70
	平均轴	5.360 3	1.296 3	-4.366 6	15.0	0.51
四川盆地地区	长轴	4.029 3	1.300 3	-3.640 4	10.0	0.45
	短轴	2.381 6	1.300 3	-2.857 3	5.0	0.45
	平均轴	3.372 7	1.275 5	-3.285 8	7.0	0.42

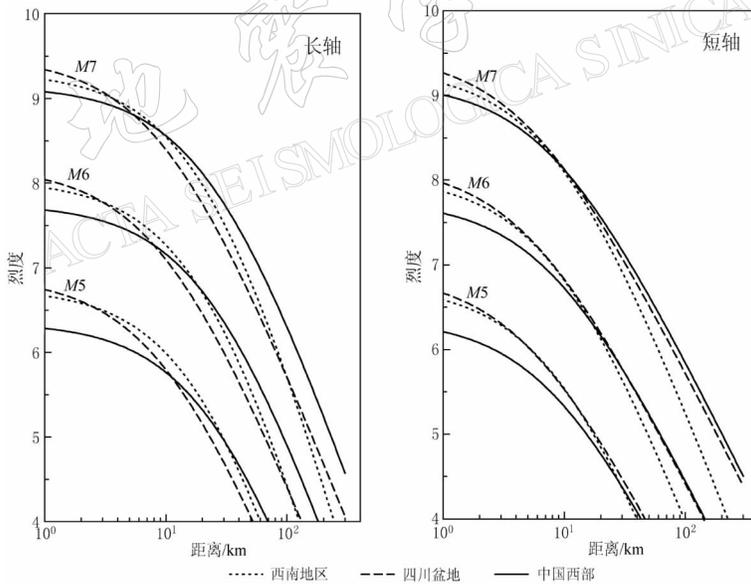


图2 西南地区、四川盆地地区和中国西部地震烈度衰减曲线

从图2可以看出:在小于10 km左右的近场范围内,西南地区长、短轴地震烈度均高于中国西部,对5~6级地震尤为明显;在大于10 km左右时,西南地区的烈度衰减快于中国西部,对6~7级地震更为明显。

在小于6~10 km的近场范围内,四川盆地地区长、短轴地震烈度均高于中国西部,对5~6级地震尤为明显;在大于6~10 km时,长轴烈度衰减快于中国西部,短轴烈度衰减

与中国西部基本相同。

在小于 5~10 km 的近场范围内,四川盆地地区长、短轴地震烈度略高于西南地区.四川盆地地区烈度的远场衰减较西南地区慢.地震烈度分布在四川盆地地区表现得较为圆胖,在西南地区表现得较为瘦长.

总体而言,上述特征较好地体现了西南地区、四川盆地地区的地震震害分布特点.其合理性和适用性均较强,可以应用于地震安全性评价、震害预测、损失快速评估等防震减灾领域.

## 4 基岩水平加速度衰减关系

### 4.1 衰减模型及转换方法

大量观测数据表明(胡聿贤,1999),在近震中区,加速度衰减存在两种饱和现象:随着震中距的减小,加速度峰值可能不随震中距减小而增大;随着震级的加大,如在震级接近 7 或 7.5 之后,震中附近的加速度峰值可能也不随震级的加大而加大.为充分体现地震加速度的近场距离饱和与震级饱和特征,本文选取如下加速度衰减模型(霍俊荣,胡聿贤,1992):

$$\lg S_a(T) = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg[R + c_5 \exp(c_6 M)] \quad \epsilon \quad (2)$$

式中,  $S_a(T)$  为峰值加速度或加速度反应谱(单位:  $\text{cm/s}^2$ ),  $M$  为面波震级,  $R$  为震中距(单位: km),  $\epsilon$  是随机误差;  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  和  $c_6$  是回归系数.

本文中,仍取美国西部作为参考区,选用俞言祥和汪素云(2002,2004)最新统计得出的美国西部基岩水平加速度峰值与反应谱衰减关系,以及 Chandra(1979)用 San Andreas 地区 1906~1966 年的 10 次地震得出的美国西部地震烈度衰减关系:

$$I = 0.514 + 1.5M - 0.00659R - 2.014 \lg(R + 10) \quad \sigma = 0.274 \quad (3)$$

刘瑞丰等(2006)对 1983—2004 年 14 808 次 3.5~8.5 级地震面波震级资料的统计表明,中国地震台网测定的面波震级( $M_{\text{中}}$ )与美国地震台网的面波震级( $M_{\text{美}}$ )存在系统偏差,二者之间的关系为

$$M_{\text{美}} = 1.07M_{\text{中}} - 0.61 \quad (4)$$

我们把上式应用于美国西部的地震加速度反应谱及地震烈度衰减关系中,将美国震级转变为中国震级,达到震级标度的统一.

在转换四川及邻区的地震动衰减关系时,本文采用了霍俊荣等(1992)提出的转换方法.该方法可考虑地震动的震级饱和及距离饱和特征,利用数字解的方式,对参考区、工作区不同函数形式的衰减关系进行转换.转换时还使用了二步回归法,对西南地区和四川盆地地区分别取饱和震级为 8.0 级和 7.5 级,先进行震级与距离项解耦,分别求出上述两个地区长轴和短轴方向的  $c_5$  和  $c_6$ ,再将  $\lg S_a(T)$  作为单随机变量,利用最小二乘法确定式(2)中的  $c_1, c_2, c_3$  和  $c_4$ .此外,本文中的转换标准差直接使用了美国西部的标准差(胡聿贤,1999).

### 4.2 西南地区基岩水平加速度反应谱衰减关系

运用上述地震动衰减模型及转换方法,得到了西南地区基岩水平加速度反应谱衰减关系,如表 5、表 6 和图 3、图 4 所示.

表 5 西南地区基岩水平加速度反应谱衰减关系系数(长轴, 阻尼比 5%)

周期/s	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$\sigma$
峰值	-0.334 9	1.380 7	-0.066 5	-2.192 0	2.529 2	0.333 4	0.232
0.04	1.814 7	0.683 2	-0.016 1	-2.041 1	2.529 2	0.333 4	0.225
0.05	1.815 5	0.669 4	-0.015 3	-1.991 0	2.529 2	0.333 4	0.226
0.07	2.151 9	0.601 9	-0.010 4	-2.028 6	2.529 2	0.333 4	0.226
0.10	2.542 9	0.552 3	-0.006 4	-2.083 8	2.529 2	0.333 4	0.231
0.12	2.504 3	0.559 7	-0.006 2	-2.048 4	2.529 2	0.333 4	0.251
0.14	2.531 6	0.556 8	-0.005 8	-2.054 7	2.529 2	0.333 4	0.258
0.16	2.539 2	0.559 2	-0.005 2	-2.057 7	2.529 2	0.333 4	0.253
0.18	2.426 3	0.585 8	-0.005 5	-2.081 0	2.529 2	0.333 4	0.259
0.20	2.338 3	0.582 8	-0.005 5	-2.018 9	2.529 2	0.333 4	0.268
0.24	2.226 8	0.584 1	-0.005 3	-1.967 6	2.529 2	0.333 4	0.269
0.26	2.212 4	0.590 0	-0.005 2	-1.977 7	2.529 2	0.333 4	0.276
0.30	2.235 4	0.578 8	-0.004 3	-1.991 3	2.529 2	0.333 4	0.292
0.34	2.207 0	0.578 3	-0.003 7	-1.999 5	2.529 2	0.333 4	0.308
0.36	2.091 4	0.594 8	-0.004 3	-1.989 6	2.529 2	0.333 4	0.318
0.40	2.010 6	0.598 2	-0.004 7	-1.970 5	2.529 2	0.333 4	0.324
0.44	1.840 7	0.612 7	-0.004 7	-1.945 8	2.529 2	0.333 4	0.331
0.50	1.604 3	0.650 2	-0.005 2	-1.960 9	2.529 2	0.333 4	0.337
0.60	1.284 6	0.675 3	-0.005 9	-1.889 1	2.529 2	0.333 4	0.339
0.70	1.043 9	0.721 8	-0.006 7	-1.957 5	2.529 2	0.333 4	0.340
0.80	0.915 4	0.731 9	-0.006 9	-1.948 7	2.529 2	0.333 4	0.348
1.00	0.602 3	0.776 8	-0.007 6	-1.976 9	2.529 2	0.333 4	0.345
1.20	0.445 9	0.792 3	-0.007 6	-1.999 9	2.529 2	0.333 4	0.338
1.50	0.157 3	0.823 5	-0.007 6	-2.018 7	2.529 2	0.333 4	0.334
1.70	-0.129 4	0.837 7	-0.006 8	-1.958 7	2.529 2	0.333 4	0.333
2.00	-0.293 6	0.847 2	-0.006 4	-1.964 9	2.529 2	0.333 4	0.329
2.40	-0.215 6	0.770 2	0.000 0	-1.988 4	2.529 2	0.333 4	0.322
3.00	-0.498 3	0.792 9	0.000 0	-1.998 3	2.529 2	0.333 4	0.306
4.00	-0.681 8	0.810 4	0.000 0	-2.034 4	2.529 2	0.333 4	0.307
5.00	-0.979 0	0.821 0	0.000 0	-1.990 7	2.529 2	0.333 4	0.324
6.00	-1.223 1	0.830 7	0.000 0	-1.956 3	2.529 2	0.333 4	0.328

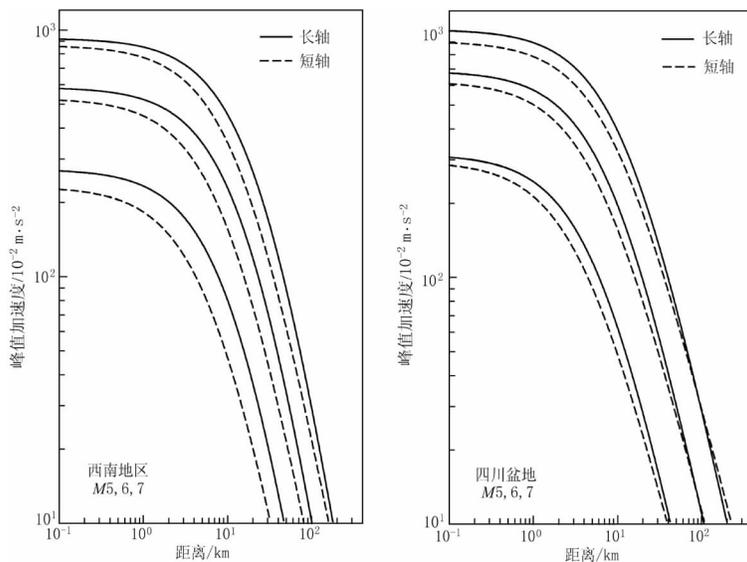


图 3 西南地区、四川盆地地区基岩水平峰值加速度衰减关系(长、短轴)

表 6 西南地区基岩水平加速度反应谱衰减关系系数(短轴, 阻尼比 5%)

周期/s	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$\sigma$
峰值	-1.520 6	1.453 9	-0.071 5	-1.849 9	1.061 7	0.385 4	0.232
0.04	0.994 0	0.667 8	-0.014 6	-1.723 4	1.061 7	0.385 4	0.225
0.05	1.010 3	0.653 6	-0.013 8	-1.678 2	1.061 7	0.385 4	0.226
0.07	1.369 4	0.582 3	-0.009 0	-1.713 1	1.061 7	0.385 4	0.226
0.10	1.770 6	0.529 1	-0.005 1	-1.762 3	1.061 7	0.385 4	0.231
0.12	1.731 0	0.535 9	-0.004 8	-1.726 4	1.061 7	0.385 4	0.251
0.14	1.757 1	0.532 5	-0.004 4	-1.731 1	1.061 7	0.385 4	0.258
0.16	1.758 7	0.533 9	-0.003 7	-1.730 2	1.061 7	0.385 4	0.253
0.18	1.621 2	0.559 8	-0.004 0	-1.744 6	1.061 7	0.385 4	0.259
0.20	1.546 0	0.557 0	-0.004 0	-1.688 2	1.061 7	0.385 4	0.268
0.24	1.440 8	0.558 2	-0.003 8	-1.639 8	1.061 7	0.385 4	0.269
0.26	1.418 8	0.563 6	-0.003 6	-1.646 4	1.061 7	0.385 4	0.276
0.30	1.443 6	0.551 7	-0.002 7	-1.658 7	1.061 7	0.385 4	0.292
0.34	1.410 4	0.550 4	-0.002 1	-1.663 6	1.061 7	0.385 4	0.308
0.36	1.285 8	0.567 0	-0.002 7	-1.651 7	1.061 7	0.385 4	0.318
0.40	1.207 1	0.570 9	-0.003 0	-1.634 7	1.061 7	0.385 4	0.324
0.44	1.028 6	0.584 8	-0.003 0	-1.607 2	1.061 7	0.385 4	0.331
0.50	0.760 1	0.621 4	-0.003 3	-1.611 0	1.061 7	0.385 4	0.337
0.60	0.434 5	0.646 7	-0.003 9	-1.539 7	1.061 7	0.385 4	0.339
0.70	0.146 6	0.692 2	-0.004 6	-1.591 0	1.061 7	0.385 4	0.340
0.80	0.011 3	0.702 1	-0.004 8	-1.580 2	1.061 7	0.385 4	0.348
1.00	-0.341 3	0.746 2	-0.005 4	-1.594 8	1.061 7	0.385 4	0.345
1.20	-0.516 0	0.761 0	-0.005 3	-1.610 6	1.061 7	0.385 4	0.338
1.50	-0.835 5	0.790 9	-0.005 1	-1.617 4	1.061 7	0.385 4	0.334
1.70	-1.129 4	0.803 7	-0.004 3	-1.554 1	1.061 7	0.385 4	0.333
2.00	-1.306 5	0.812 2	-0.003 8	-1.554 5	1.061 7	0.385 4	0.329
2.40	-1.242 2	0.751 9	0.000 0	-1.570 1	1.061 7	0.385 4	0.322
3.00	-1.547 2	0.774 4	0.000 0	-1.571 4	1.061 7	0.385 4	0.306
4.00	-1.752 5	0.791 5	0.000 0	-1.598 8	1.061 7	0.385 4	0.307
5.00	-2.052 2	0.802 2	0.000 0	-1.554 9	1.061 7	0.385 4	0.324
6.00	-2.299 5	0.812 0	0.000 0	-1.520 0	1.061 7	0.385 4	0.328

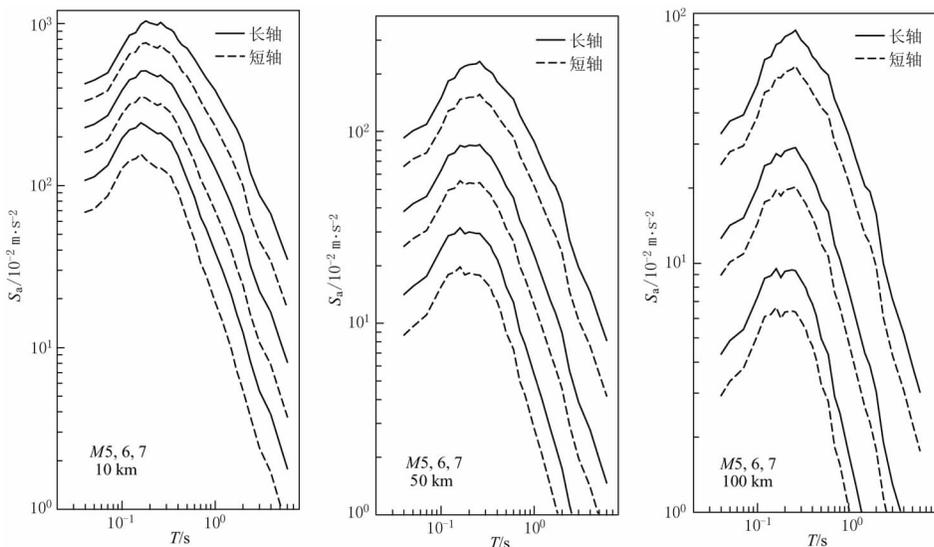


图 4 西南地区基岩水平加速度反应谱衰减关系(阻尼比 5%, 长、短轴)

### 4.3 四川盆地地区基岩水平加速度反应谱衰减关系

运用上述地震动衰减模型及转换方法,得到了四川盆地地区基岩水平加速度反应谱衰减关系,如表 7、表 8 和图 3、图 5 所示.

表 7 四川盆地地区基岩水平加速度反应谱衰减关系系数(长轴,阻尼比 5%)

周期/s	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$\sigma$
峰值	-1.824 4	1.540 8	-0.084 5	-1.639 2	0.869 1	0.384 4	0.232
0.04	-0.056 7	0.978 2	-0.040 9	-1.584 7	0.869 1	0.384 4	0.225
0.05	-0.011 8	0.955 0	-0.039 3	-1.541 4	0.869 1	0.384 4	0.226
0.07	0.480 2	0.834 0	-0.030 3	-1.574 5	0.869 1	0.384 4	0.226
0.10	0.989 9	0.739 4	-0.022 7	-1.620 2	0.869 1	0.384 4	0.231
0.12	0.944 4	0.748 7	-0.022 7	-1.583 9	0.869 1	0.384 4	0.251
0.14	0.978 2	0.742 1	-0.021 9	-1.587 8	0.869 1	0.384 4	0.258
0.16	0.980 8	0.742 4	-0.021 2	-1.585 0	0.869 1	0.384 4	0.253
0.18	0.796 1	0.783 6	-0.022 7	-1.595 3	0.869 1	0.384 4	0.259
0.20	0.726 3	0.780 5	-0.022 6	-1.541 4	0.869 1	0.384 4	0.268
0.24	0.618 5	0.783 5	-0.022 5	-1.494 1	0.869 1	0.384 4	0.269
0.26	0.587 7	0.791 4	-0.022 5	-1.499 1	0.869 1	0.384 4	0.276
0.30	0.631 1	0.772 1	-0.021 0	-1.510 7	0.869 1	0.384 4	0.292
0.34	0.598 4	0.769 8	-0.020 2	-1.513 9	0.869 1	0.384 4	0.308
0.36	0.442 0	0.797 7	-0.021 7	-1.501 2	0.869 1	0.384 4	0.318
0.40	0.352 9	0.805 9	-0.022 5	-1.485 2	0.869 1	0.384 4	0.324
0.44	0.146 2	0.829 6	0.023 2	-1.456 3	0.869 1	0.384 4	0.331
0.50	-0.192 7	0.889 4	-0.025 4	-1.454 8	0.869 1	0.384 4	0.337
0.60	-0.569 4	0.933 8	-0.027 6	-1.383 6	0.869 1	0.384 4	0.339
0.70	-0.948 4	1.008 4	-0.030 7	-1.427 4	0.869 1	0.384 4	0.340
0.80	-1.106 3	1.026 2	-0.031 4	-1.415 6	0.869 1	0.384 4	0.348
1.00	-1.548 2	1.099 7	-0.034 4	-1.424 0	0.869 1	0.384 4	0.345
1.20	-1.758 0	1.125 4	-0.035 2	-1.436 6	0.869 1	0.384 4	0.338
1.50	-2.142 1	1.176 0	-0.036 7	-1.437 9	0.869 1	0.384 4	0.334
1.70	-2.464 4	1.198 7	-0.036 6	-1.372 7	0.869 1	0.384 4	0.333
2.00	-2.665 0	1.214 3	-0.036 5	-1.370 4	0.869 1	0.384 4	0.329
2.40	-1.419 6	0.752 6	0.000 0	-1.379 1	0.869 1	0.384 4	0.322
3.00	-1.726 9	0.775 3	0.000 0	-1.376 3	0.869 1	0.384 4	0.306
4.00	-1.935 7	0.792 5	0.000 0	-1.399 7	0.869 1	0.384 4	0.307
5.00	-2.233 7	0.803 5	0.000 0	-1.355 5	0.869 1	0.384 4	0.324
6.00	-2.479 7	0.813 6	0.000 0	-1.320 1	0.869 1	0.384 4	0.328

## 5 讨论和结论

受到我国强震记录缺乏的限制,选择美国西部作为参考区,通过转换方法间接得到了我国地震动衰减关系.这一方法仍是当前的主要方法.其中,进行适宜的地震活动特征分区,大量收集研究区地震烈度资料,兼顾衰减关系的统计合理性和地区适用性,充分体现研究区地震烈度分布的近场、远场特性,建立研究区的地震烈度衰减关系是极为重要的环节.

根据地震构造环境和震害分布特点,本文将四川及邻区划分为西南地区 and 四川盆地地区,全面收集了该地区的近代破坏性地震资料,并对各次地震的震级参数进行统一校核.

表 8 四川盆地地区基岩水平加速度反应谱衰减关系系数(短轴, 阻尼比 5%)

周期/s	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$\sigma$
峰值	-2.137 6	1.486 0	-0.081 2	-1.384 6	0.402 2	0.445 6	0.232
0.04	-0.491 7	0.975 0	-0.041 6	-1.350 8	0.402 2	0.445 6	0.225
0.05	-0.441 1	0.951 9	-0.040 0	-1.310 7	0.402 2	0.445 6	0.226
0.07	0.048 0	0.831 9	-0.031 0	-1.345 8	0.402 2	0.445 6	0.226
0.10	0.549 8	0.738 2	-0.023 5	-1.390 4	0.402 2	0.445 6	0.231
0.12	0.501 7	0.747 3	-0.023 4	-1.352 2	0.402 2	0.445 6	0.251
0.14	0.532 9	0.740 8	-0.022 6	-1.355 0	0.402 2	0.445 6	0.258
0.16	0.529 2	0.741 1	-0.021 8	-1.349 0	0.402 2	0.445 6	0.253
0.18	0.330 4	0.782 0	-0.023 4	-1.351 1	0.402 2	0.445 6	0.259
0.20	0.267 3	0.778 8	-0.023 3	-1.300 2	0.402 2	0.445 6	0.268
0.24	0.161 6	0.781 7	-0.023 2	-1.253 5	0.402 2	0.445 6	0.269
0.26	0.125 4	0.789 6	-0.023 2	-1.255 6	0.402 2	0.445 6	0.276
0.30	0.167 2	0.770 5	-0.021 7	-1.267 0	0.402 2	0.445 6	0.292
0.34	0.129 3	0.768 2	-0.020 9	-1.267 7	0.402 2	0.445 6	0.308
0.36	-0.030 9	0.795 9	-0.022 4	-1.252 2	0.402 2	0.445 6	0.318
0.40	-0.117 5	0.804 0	-0.023 1	-1.237 1	0.402 2	0.445 6	0.324
0.44	-0.330 2	0.827 5	-0.023 8	-1.204 2	0.402 2	0.445 6	0.331
0.50	-0.687 6	0.886 9	-0.026 1	-1.191 7	0.402 2	0.445 6	0.337
0.60	-1.067 0	0.930 8	-0.028 2	-1.117 2	0.402 2	0.445 6	0.339
0.70	-1.471 5	1.005 1	-0.031 3	-1.146 4	0.402 2	0.445 6	0.340
0.80	-1.633 4	1.022 7	-0.032 0	-1.132 1	0.402 2	0.445 6	0.348
1.00	-2.096 9	1.095 7	-0.035 1	-1.127 6	0.402 2	0.445 6	0.345
1.20	-2.317 7	1.121 3	-0.035 9	-1.134 0	0.402 2	0.445 6	0.338
1.50	-2.721 1	1.171 5	-0.037 4	-1.124 2	0.402 2	0.445 6	0.334
1.70	-3.052 3	1.194 1	-0.037 2	-1.053 3	0.402 2	0.445 6	0.333
2.00	-3.262 5	1.209 5	-0.037 2	-1.045 6	0.402 2	0.445 6	0.329
2.40	-2.010 0	0.744 1	0.000 0	-1.058 9	0.402 2	0.445 6	0.322
3.00	-2.331 3	0.766 7	0.000 0	-1.048 4	0.402 2	0.445 6	0.306
4.00	-2.552 8	0.783 7	0.000 0	-1.064 8	0.402 2	0.445 6	0.307
5.00	-2.853 9	0.794 8	0.000 0	-1.018 7	0.402 2	0.445 6	0.324
6.00	-3.103 1	0.804 9	0.000 0	-0.981 4	0.402 2	0.445 6	0.328

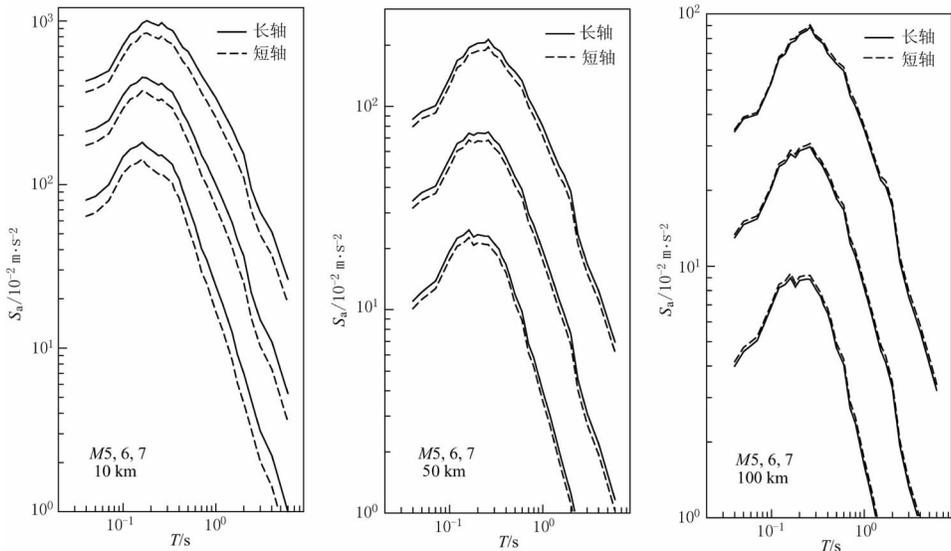


图 5 四川盆地地区基岩水平加速度反应谱衰减关系(阻尼比 5%, 长、短轴)

在地震烈度衰减的近场与远场特征控制和体现中,使用了该地区震中烈度与震级、有感半径与震级的统计关系.在转换地震动衰减关系时,还首次考虑了中国与美国面波震级标度的系统偏差,其结果可应用于地震安全性评价、震害预测、损失快速评估等防震减灾领域.

应该指出的是,根据本地区实际强震观测资料直接统计得出的地震动衰减关系是更为可靠和适用的.在地震动衰减的研究中,如何进一步考虑断层类型的影响以及逆断层的上盘效应,研究震级与方差之间的关系,是我们未来努力的方向.

四川省地震局蒲晓虹高级工程师绘制了本文的部分图件,黄伟、晏存厚、亢川川等帮助查阅了部分地震资料,在此表示衷心地感谢!

### 参 考 文 献

- 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.
- 陈达生.1996.地震烈度衰减关系[G]//国家地震局编.中国地震烈度区划图(1990)概论.北京:地震出版社:137-144.
- 陈棋福,郑大林,车时.2002a.中国震例(1992—1994)[M].北京:地震出版社:96-249.
- 陈棋福,郑大林,刘桂萍,等.2002b.中国震例(1995—1996)[M].北京:地震出版社:50-487.
- 国家地震局兰州地震研究所.1989.甘肃省地震资料汇编[M].北京:地震出版社:535-586.
- 胡聿贤.1999.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社:282~320.
- 胡聿贤主编.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:26-35.
- 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,胡聿贤,冯启民.1992.关于通过烈度资料估计地震动的研究[J].地震工程与工程振动,12(3):1-15.
- 雷建成,高孟潭,俞言祥.2006.西南地区近代地震的震中烈度与有感地震的统计研究[J].震灾防御技术,1(2):137-145.
- 李小军.2006.工程场地地震安全性评价工作的相关技术问题[J].震灾防御技术,1(1):15-24.
- 刘瑞丰,陈运泰, Bormann P, 等.2006.中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比(II):面波震级[J].地震学报,28(1):1-7.
- 《四川地震资料汇编》编辑组.1981.四川地震资料汇编第二卷(1949—1979年)[M].成都:四川人民出版社:2-168.
- 《四川地震资料汇编》(第三卷)编辑组,《四川地震志》编辑组.2000.四川地震资料汇编第三卷(1979年6月—1999年12月)[M].成都:成都地图出版社:1-570.
- 汪素云,时振梁.1993.有感半径与震级的关系及其应用[G]//国家地震局震害防御司编.中国地震区划文集.北京:地震出版社:179-184.
- 汪素云,吴戈,时振梁,等.1998.《中国近代地震目录(公元1912年—1990年,  $M_s \geq 4.7$ )》简介[J].中国地震,14(3):83-87.
- 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.
- 徐锡伟,张培震,闻学洋,等.2005.川西及其邻近地区地震活动构造基本特征与强震复发模型[J].地震地质,27(3):446-461.
- 云南省地震局.1988.云南省地震资料汇编[M].北京:地震出版社:395-540.
- 云南省地震工程院.2000.云贵地区地震等震线图集[J].地震研究,23(增刊):34-112.
- 俞言祥,汪素云.2002.美国西部水平向基岩加速度反应谱衰减关系[G]//新世纪地震工程与防震减灾.北京:地震出版社:559-565.
- 俞言祥,汪素云.2004.青藏高原东北地区水平向基岩加速度峰值与反应谱衰减关系[J].地震学报,26(6):591-600.
- 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,  $M_s \geq 4.7$ ) [M].北京:中国科学技术出版社:95-439.
- 张肇诚,罗兰格,李海华,等.1990a.中国震例(1976—1980)[M].北京:地震出版社:29-326.

- 张肇诚, 罗兰格, 李海华, 等. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社: 1-282.
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社: 15-302.
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社: 1-415.
- Chandra U. 1979. Attenuation of intensities in the United States[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **69**(6): 2 003-2 024.

## SEISMIC MOTION ATTENUATION RELATIONS IN SICHUAN AND ADJACENT AREAS

Lei Jiancheng<sup>1,2)</sup> Gao Mengtan<sup>1)</sup> Yü Yanxiang<sup>1)</sup>

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

2) *Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China*

**Abstract:** The Sichuan and adjacent areas is divided into southwest China region (SWCR) and Sichuan Basin region (SCBR) according to tectonic backgrounds and seismic damage distribution features. 96 modern destructive earthquakes in SWCR and 40 in SCBR are gathered respectively. All their magnitude parameters are checked. Based on the statistic relations between epicentral intensity and magnitude as well as relation between sensible radius and magnitude, the near and far field seismic intensity attenuation features are represented and controlled. And then the seismic intensity attenuation relations along major axis, minor axis and mean axis are established separately. The systematic deviations of surface wave magnitude between China seismograph network and U. S. seismograph network are considered in this paper. By making use of the new attenuation relations of bedrock horizontal ground acceleration response spectrum in west U. S. , the attenuation relations of bedrock horizontal ground acceleration response spectrum in SWCR and SCBR are digital transformed based on the attenuation model considering acceleration saturation of distance and magnitude in near field.

**Key words:** southwest China region (SWCR); Sichuan Basin region (SCBR); seismic intensity; ground acceleration; attenuation