

陕西分区烈度衰减关系研究*

王晓军¹, 文 毅², 鲁 权³, 邵辉成¹, 聂大巍¹

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049;
3. 户县地震办公室, 陕西 户县 710300)

摘 要: 在合理分区、收集整理陕西及邻近地区 1900 年以来 5 级以上地震资料的基础上, 利用烈度衰减的椭圆模型, 采用多元稳健线性回归方法, 分区统计计算得到陕西陕南、关中和陕北地区的烈度衰减关系, 并对结果进行了分析讨论。

关键词: 烈度; 衰减关系; 陕西; 分区

中图分类号: P315. 919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)04-0098-06

地震烈度衰减关系在地震区划、地震灾害快速评估和工程场地的地震安全性评价工作中是十分重要的, 特别是对我国大陆这样一个缺乏强震记录的地区烈度衰减关系的研究尤为重要。在结构抗震设计中无论考虑哪些地震动参数, 都离不开地震动衰减关系, 而烈度衰减关系是这些地震动参数确定的前提和基础。

在中国地震动参数区划图编制工作中, 汪素云等^[1]大致以 105°E 为界, 将中国分为东部和西部两个区, 给出了我国西部和东部地区的地震烈度衰减关系。然后, 进一步将中国东部细分为华北及华南两个子区, 西部地区细分为甘宁青、云川藏及新疆等 3 个子区, 分别进行了烈度特征的研究。

陕西地处我国大陆东西、南北的交汇地带, 横跨了不同的地质单元, 地质构造复杂, 震害分布特征、表层沉积物性质、地形地貌等存在很大的差异, 而且陕西北部、中部、南部受不同的构造带影响^[2]。因此, 对地震等震线资料进行补充, 分区重新统计计算, 得到适应本区的地震烈度衰减关系是重要和必要的。

1 分区及资料选取

1.1 区域的划分

由于不同地区的震源特性、传播介质与场地条件不同, 地震烈度的衰减关系有强烈的地区性, 因此, 选择研究区及其附近具有相似震源特性、传播介质与场地条件地区的地震烈度资料, 用来建立陕西地区的地震烈度衰减关系。

陕北地区: 主要指鄂尔多斯地台内的铜川以北、神木与府谷以南地区, 该区是重要的能源化工基地, 主要受外围大地震影响, 烈度衰减关系的最小统计震级按 6 级考虑较为合理。该区主要受甘肃、内蒙、宁夏、关中地区地震影响, 以此范围进行地震烈度衰减关系统计。

关中地区: 主要指铜川以南、秦岭北坡以北地区, 该区主要受汾渭地震带影响, 以及河南、

甘肃、湖北等地区地震影响, 以大华北西部地区进行地震烈度衰减关系统计。

陕南地区: 主要指秦岭及南部地区, 该区主要受华南及四川北部地区地震影响, 以此范围进行地震烈度衰减关系统计。

1.2 资料的选取

根据上述区域划分的原则, 考虑地震烈度衰减关系的资料要求和地震安全性评价工作的实际, 选取了 1900-2006 年宁夏、甘肃、青海、内蒙、山西、四川、湖北和河南等地区的 59 个 5.0 级以有仪器测定震级的有等震线的地震资料^[1,3-6], 这些地震的目录及等震线数据如图 1 所示。

2 处理方法及结果

2.1 模型

在地震烈度衰减关系的确定中, 通常将地震震源假设为点源, 地震烈度衰减取椭圆模型。因此, 长、短轴的衰减曲线在起始点是重合的, 在中间距离上长、短轴之间有差别(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。在地震烈度衰减关系的回归分析中, 采用椭圆长、短轴联合衰减模型^[7-8], 以保证长、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。联合衰减模型的衰减关系为:

$$I = a + bM - c_1 \ln(R_a + R_{0a}) - c_2 \ln(R_b + R_{0b}) - d_1 R_a - d_2 R_b + \varepsilon. \quad (1)$$

式中: I 为地震烈度; M 为震级; R_{0a} 、 R_{0b} 分别为长、短轴两方向烈度衰减的近场饱和因子; R_a 、 R_b 分别是烈度为 I 的椭圆等震线的长半轴和短半轴长度; a 、 b 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_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, 通常假定为对数正态分布, 其均值为零, 标准差为 σ 。

令式(1)中的 $R_b=0$, 得到沿长轴的衰减关系:

* 收稿日期: 2012-03-23

修回日期: 2012-05-21

基金项目: 陕西省地震局项目“陕西分区地震动衰减关系研究”(2007-40)

作者简介: 王晓军(1965-), 男, 陕西长安人, 高级工程师, 主要从事工程地震研究工作. E-mail: l_s0116@163.com

$$I_a = a' + bM - c_1 \ln(R_a + R_{0a}) - d_1 R_a + \varepsilon_0 \quad (2)$$

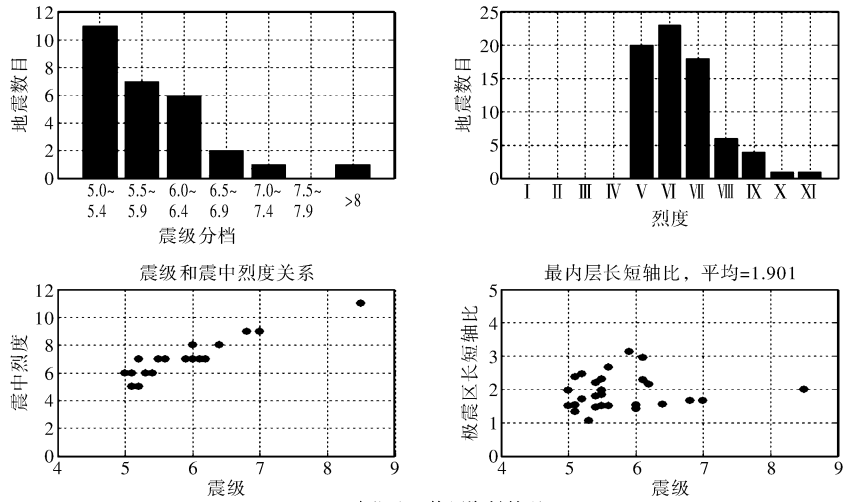
式中: $a' = a - c_2 \ln R_{0b}$ 。

令式(1)中的 $R_a = 0$, 得到沿短轴的衰减关系:

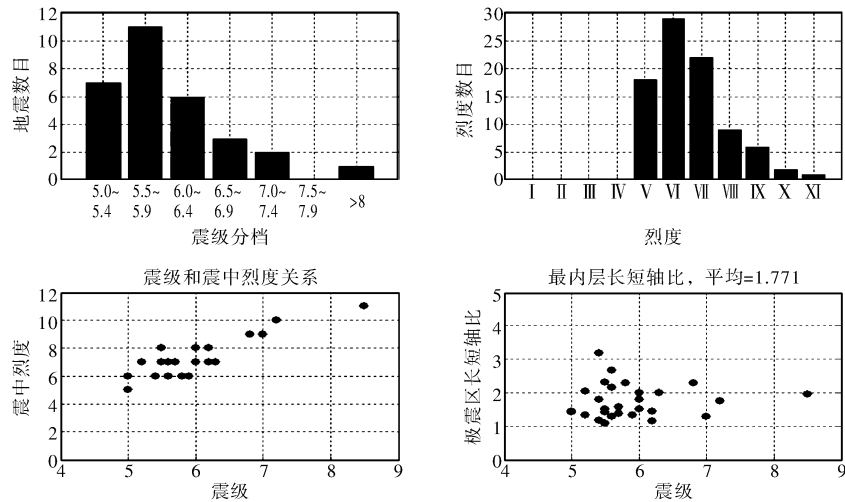
$$I_b = b' + bM - c_2 \ln(R_b + R_{0b}) - d_2 R_b + \varepsilon_0 \quad (3)$$

式中: $b' = a - c_1 \ln R_{0a}$ 。

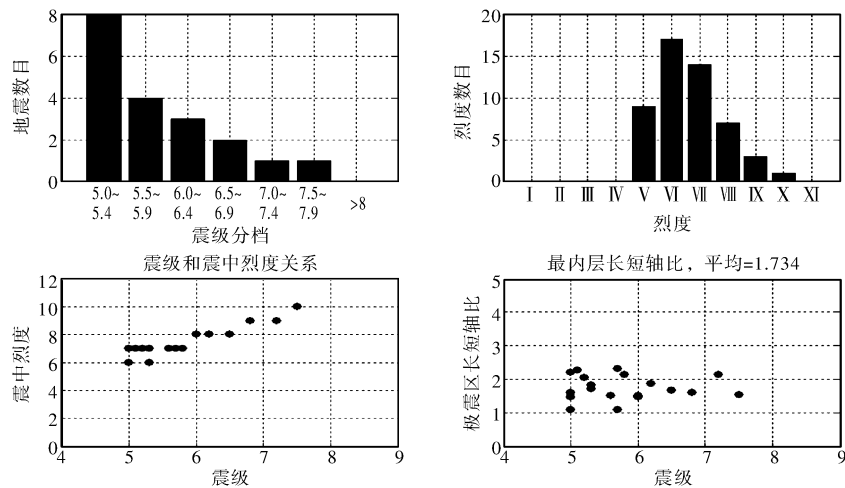
由式(2)和式(3)可知, 由联合衰减模型的衰减关系式(1)退化而来的长轴、短轴的衰减关系具有相同的标准方差。



(a) 陕北地区使用资料情况



(b) 关中地区使用资料情况



(c) 陕南地区使用资料情况

图1 选取的地震资料情况

2.2 回归分析方法

式(1)中的系数通过回归分析方法确定。在回

归分析中, 一般采用最小二乘法。经典的最小二乘法由于对于每个观测数据都给予相同的权重,

由此带来对异常值的处理不当,从而影响了回归模型的有效性。另外经典的最小二乘法以使误差的平方和到达最小为其目标函数,而方差为一不稳健统计量,因此最小二乘回归是一种不稳健的方法。目前在 Matlab 中回归分析方法有:非负线性回归、多元线性回归、多元稳健回归、非线性回归、非线性曲线拟合等 5 种方法。本文选用了多元稳健线性回归方法。

当 R_{0a} , R_{0b} 给定,令 $M = x_1$, $-\ln(R_a + R_{0a}) = x_2$, $-\ln(R_b + R_{0b}) = x_3$, $-R_a = x_4$, $-R_b = x_5$, $I = y$, $a = \beta_0$, $b = \beta_1$, $c_1 = \beta_2$, $c_2 = \beta_3$, $d_1 = \beta_4$, $d_2 = \beta_5$, 则式(1)可改写为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (4)$$

式(4)为线性回归模型。若变量 y , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 有 n 组值,代入式(4)可得:

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{41} & x_{51} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{42} & x_{52} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & x_{4n} & x_{5n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式(5)可简写为:

$$Y = X\beta \quad (6)$$

对给定的一组值 $\{R_{0a}, R_{0b}, M, R_a, R_b, I\}$ 可给出 X 矩阵和列向量 Y 。先给出长轴的 X_a 矩阵和列向量 Y_a 为:

$$Y_a = \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{Bmatrix}, X_a = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & -\ln(R_{a1} + R_{0a}) & -\ln R_{0b} & -R_{a1} & 0 \\ 1 & M_2 & -\ln(R_{a2} + R_{0a}) & -\ln R_{0b} & -R_{a2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_n & -\ln(R_{an} + R_{0a}) & -\ln R_{0b} & -R_{an} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

再给出短轴的 X_b 矩阵和列向量 Y_b 为:

$$Y_b = \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{Bmatrix}, X_b = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & -\ln(R_{b1} + R_{0b}) & -\ln(R_{a1} + R_{0a}) & 0 & -R_{b1} \\ 1 & M_2 & -\ln(R_{b2} + R_{0b}) & -\ln(R_{a2} + R_{0a}) & 0 & -R_{b2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_n & -\ln(R_{bn} + R_{0b}) & -\ln(R_{an} + R_{0a}) & 0 & -R_{bn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可得 X 矩阵和列向量 Y 为:

$$Y = \begin{Bmatrix} Y_a \\ Y_b \end{Bmatrix}, X = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

这样,式(1)中系数的确定化为求解如下非负最小二乘曲线拟合问题:

$$\min \frac{1}{2} \|X\beta - Y\| \quad \text{s. t. } \beta \geq 0 \quad (10)$$

文本利用了 MatLab 多元稳健线性回归函数 robustfit 实现了对式(10)的求解。

2.3 等震线资料处理

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。为了使衰减曲线达到这样的要求,采取汪素云等^[1]的作法,在极震区内不同距离上适当增补一些数据点,称为近场补点,这种补点仅在震中烈度Ⅶ度以上和最内圈等震线半径 > 5 km 情况下进行。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。汪素云等^[9]研究地震震级与有感半径的关系后,给出了相应的经验公式 $\lg R = 0.161 + 0.289 \times M$, 其中 R 为地震的有感半径, M 为地震震级。有感烈度通常为Ⅲ ~ Ⅳ度,所以,烈度衰减关系式在 $R = 10^{(0.611 + 0.289M)}$ 处的值应在Ⅲ ~ Ⅳ度之间(表1)。本文将此作为在回归衰减关系时的一个限制条件。

表 1 有感半径与震级的关系表

震级 M	4	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{2}$	$4\frac{3}{4}$	5	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2}$	$5\frac{3}{4}$	6	$6\frac{1}{2}$	7	$7\frac{1}{2}$	8	$8\frac{1}{2}$
有感半径/km	15	25	40	75	150	170	200	230	260	340	450	600	800	1 100

2.4 结果

从图 1 可以看出选取的资料符合地震的一般规律,可以用来进行统计计算。采用椭圆衰减模型和长轴不转向的统计方法,按前述烈度衰减公式,

利用多元稳健线性回归分别对烈度衰减的长、短轴进行统计,表 2 给出了不同研究区域的地震烈度衰减关系。

表 2 不同研究区烈度衰减关系

地区	资料情况	烈度衰减关系
陕北	28 个地震 73 条等震线资料	$Ia = 0.4193 + 1.5620M - 1.932\text{Log}(Ra + 8.0) - 0.0044Ra$
		$Ib = -0.1677 + 1.5620M - 1.924\text{Log}(Ra + 4.0) - 0.0033Rb$
		$\sigma = 0.508$
关中	30 个地震 87 条等震线资料	$Ia = 3.1447 + 1.5179M - 1.4787\text{Ln}(Ra + 17.0)$
		$Ib = 1.4430 + 1.5179M - 1.2347\text{Ln}(Ra + 7.5)$
		$\sigma = 0.529$
陕南	19 个地震 51 条等震线资料	$Ia = 1.0752 + 1.4307M - 1.943\text{Log}(Ra + 7.0) - 0.0040Ra$
		$Ib = 0.9258 + 1.4307M - 2.108\text{Log}(Ra + 5.0) - 0.0027Rb$
		$\sigma = 0.574$
陕南	19 个地震 51 条等震线资料	$Ia = 3.7634 + 1.4101M - 1.4834\text{Ln}(Ra + 17.0)$
		$Ib = 2.2636 + 1.4101M - 1.2631\text{Ln}(Ra + 8.5)$
		$\sigma = 0.581$
陕南	19 个地震 51 条等震线资料	$Ia = 3.9646 + 1.2185M - 2.933\text{Log}(Ra + 13.0) - 0.0013Ra$
		$Ib = 2.6220 + 1.2185M - 2.475\text{Log}(Ra + 6.0) - 0.0012Rb$
		$\sigma = 0.526$
陕南	19 个地震 51 条等震线资料	$Ia = 4.9077 + 1.1947M - 1.4897\text{Ln}(Ra + 15.0)$
		$Ib = 3.1250 + 1.1947M - 1.2029\text{Ln}(Ra + 6.5)$
		$\sigma = 0.523$

从上面的结果结合图 2 可以看出, 对陕北和关中地区而言, 虽然 R 项的系数较小, 但在 100 km

处的影响在 0.3 ~ 0.4 度, 且从标准差来看, 考虑 R 项的结果要好一些, 而陕南则相反。

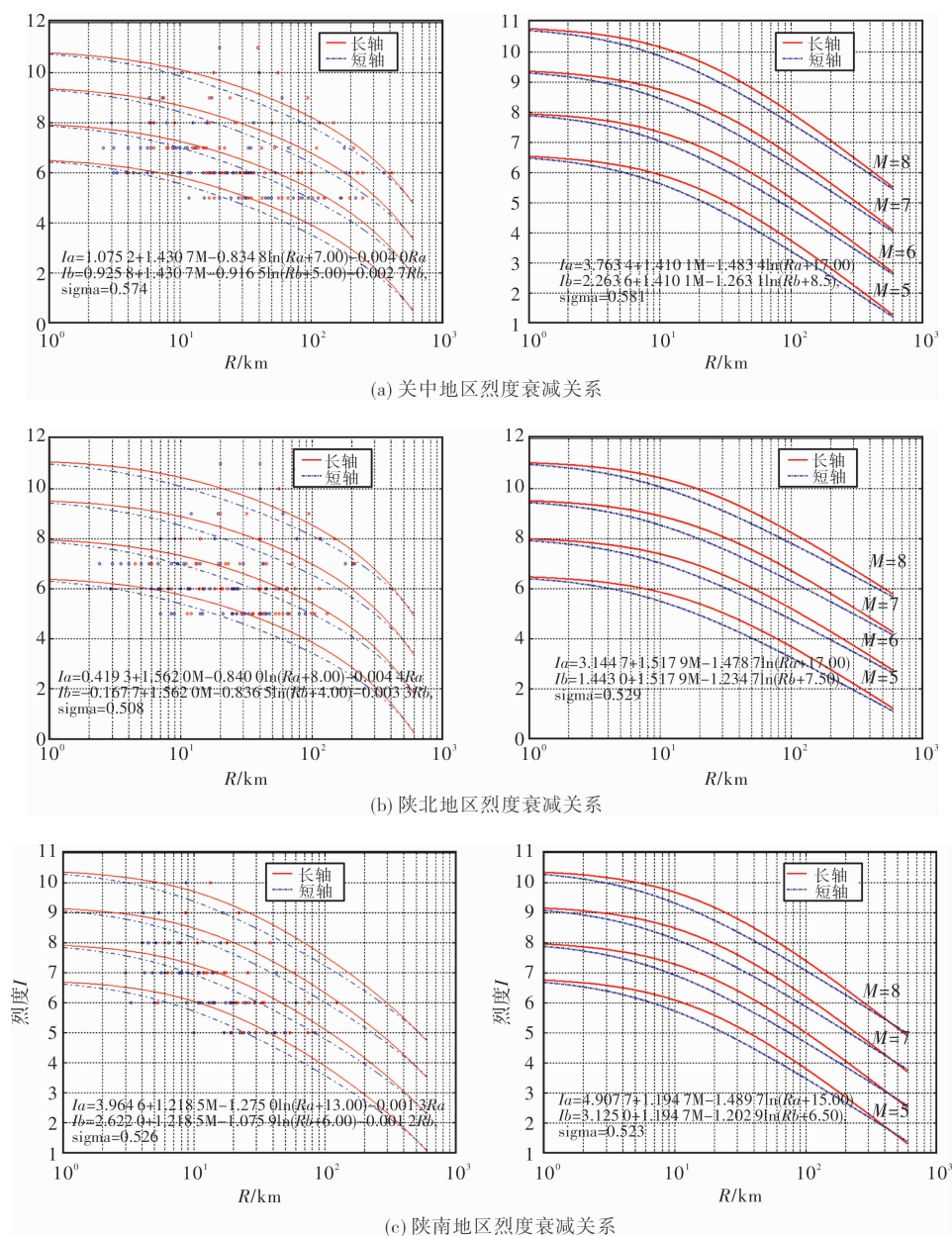


图 2 研究区不同区域衰减关系比较

2.5 结果对比分析

汪素云等^[1]给出了华北地区的地震烈度衰减关系为:

$$\begin{cases} I_a = 5.0190 + 1.4460M - 1.7962\log(R+24); \\ I_b = 2.2400 + 1.4460M - 1.3333\log(R+9). \end{cases} \quad (11)$$

可以看出 R_0 无论是长轴还是短轴, 华北地区要大一些, 说明华北地区的衰减要比关中和陕北地区慢一些。从公式的 R 项系数发现, 华北地区衰减关系的系数要大一些, 也就是衰减要快一些。图 3 给出了华北地区和关中地区地震衰减关系的比较结果。结合表 3 和表 4 可以看出, 对不带 R 项的

结果, 在 20 km 范围内两者的差在 0.1 度范围内, 随距离的增大, 关中地区的结果要明显大于华北地区的结果, 长轴的结果表现得更为明显。对带 R 项的结果的短轴而言, 在 10 km 范围内, 短轴两者基本一致, 差别比较小, 在 10 ~ 400 km 范围内, 关中的结果要大于华北的结果, 最大达 0.3 度, 在 400 km 以后, 关中的结果要小于华北的结果。对长轴而言, 在 40 km 范围内, 关中地区要小于华北地区, 差异最大不超过 0.2 度, 在 40 ~ 400 km 范围内, 关中的结果要大于华北的结果, 最大差异到 0.4 度。

表 3 不同地区衰减关系的烈度比较(长轴)

震级	区域	距离/km								
		1	10	25	50	100	150	200	250	300
8	华北	10.81	10.25	9.60	8.85	7.93	7.32	6.87	6.50	6.20
	关中	10.76	10.16	9.50	8.81	7.98	7.45	7.06	6.76	6.50
	陕北	11.01	10.41	9.76	9.07	8.25	7.72	7.33	7.03	6.77
7	华北	9.36	8.81	8.15	7.41	6.48	5.87	5.42	5.06	4.76
	关中	9.35	8.75	8.09	7.40	6.57	6.04	5.65	5.35	5.09
	陕北	9.50	8.90	8.24	7.55	6.73	6.20	5.81	5.51	5.25
6	华北	7.91	7.36	6.70	5.96	5.04	4.43	3.97	3.61	3.31
	关中	7.94	7.34	6.68	5.99	5.16	4.63	4.24	3.94	3.68
	陕北	7.98	7.38	6.73	6.03	5.21	4.68	4.30	3.99	3.74
5	华北	6.47	5.92	5.26	4.52	3.59	2.98	2.53	2.17	1.87
	关中	6.53	5.92	5.27	4.58	3.75	3.22	2.83	2.53	2.27
	陕北	6.46	5.86	5.21	4.52	3.69	3.17	2.78	2.47	2.22

表 4 不同地区衰减关系的烈度比较(短轴)

震级	区域	距离/km								
		1	10	25	50	100	150	200	250	300
8	华北	10.74	9.88	9.11	8.37	7.55	7.05	6.69	6.40	6.16
	关中	10.70	9.86	9.11	8.41	7.62	7.15	6.80	6.53	6.30
	陕北	10.94	10.05	9.29	8.58	7.81	7.34	7.00	6.73	6.51
7	华北	9.29	8.44	7.66	6.93	6.11	5.60	5.24	4.95	4.72
	关中	9.29	8.45	7.70	6.99	6.21	5.74	5.39	5.12	4.89
	陕北	9.43	8.53	7.77	7.07	6.29	5.82	5.48	5.21	4.99
6	华北	7.85	6.99	6.21	5.48	4.66	4.16	3.79	3.51	3.27
	关中	7.88	7.04	6.29	5.58	4.80	4.33	3.98	3.71	3.48
	陕北	7.91	7.02	6.25	5.55	4.78	4.30	3.96	3.70	3.48
5	华北	6.40	5.54	4.77	4.03	3.22	2.71	2.35	2.06	1.83
	关中	6.47	5.63	4.88	4.17	3.39	2.92	2.57	2.30	2.07
	陕北	6.39	5.50	4.73	4.03	3.26	2.79	2.45	2.18	1.96

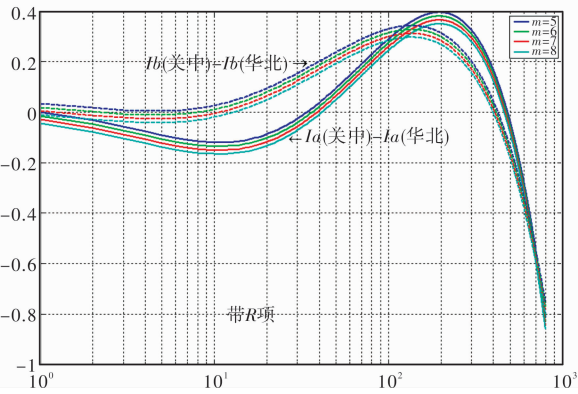


图 3 关中地区衰减关系和华北地区衰减关系的比较

3 结论

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。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。

本文采用椭圆衰减模型,利用研究区及邻区

的等震线资料,考虑长轴不转向,采用多元稳健线性回归方法建立了陕西分区的地震烈度衰减关系。其中 R_0 的取值符合一般规律。

本文所建立的陕西分区地震烈度衰减关系为陕西省地震烈度速报和地震灾害损失快速评估提供了重要的基础资料。

参考文献:

[1] 汪素云,俞言祥,高阿甲,等.中国分区地震动衰减关系的确定[J].中国地震,2000,16(2):9-106.
[2] 邵辉成,刘春,刘华峰.陕西未来15年地震灾害损失预测研究[J].灾害学,2008,23(4):36-38.
[3] 沙海军,吕悦军,彭燕菊,等.地震烈度椭圆衰减的限定模型及其在华北地区的应用[J].防灾减灾工程学报,2004,24(1):28-36.
[4] 雷建成,高孟潭,俞言祥.四川及邻区地震动衰减关系[J].地震学报,2007,29(5):500-511.
[5] 中国地震局震害防御司.中国近代地震目录(公元1912年~公元1990年MS≥4.7)[M].北京:地震出版社,1999.
[6] 陕西省地震局.陕西省地震目录(公元前1189年至公元2001年)[M].北京:地震出版社,2005.
[7] 陈达生,刘汉兴.地震烈度椭圆衰减关系[J].华北地震科学,1989,7(3):31-42.
[8] 陈达生.地震烈度衰减关系[C]//国家地震局.中国地震烈度区划图(1990)概论.北京:地震出版社,1996:137-144.
[9] 汪素云,时振梁.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,1993:179-184.

(下转第113页)