

河西重点监视区烈度预测的研究

齐吉琳

(西安理工大学, 西安 710048)

孙崇绍

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 在前人研究的基础上,建立了适合于重点监视区烈度预测的概率方法的数学模型,并对该模型中影响预测结果的因素进行了灵敏度分析。发现预测的不确定性主要来自烈度衰减规律。根据概率分析中对正态分布函数不确定性校正的原理,提出了适于重点监视区内烈度预测中不确定性的校正方法,并将该方法应用于河西重点监视区。在确定震级-频度关系的过程中,考虑了地震活动性周期及震级间隔两方面的因素,使得求出的震级-频度关系更为精确。

关键词: 重点监视区 烈度预测 河西走廊地震构造带 不确定性预测 灵敏度分析

1 前言

河西走廊地震重点监视区是 1989 年以来全国地震趋势会商会上划定的重点监视区之一。自划定以来,兰州地震研究所在地震监测预报、防震减灾、地球物理和地震地质、地震活动性等方面的研究上已做了大量的工作。通过这些工作,在监视区内给出了较确定的中期预报意见。本文在上述研究的基础上,着重对重点监视区内的烈度预测方法及其不确定性问题进行了研究。

烈度的估计是进行震害损失评估和制定预报期内防震减灾对策的基础。尽管近年来在预测地震烈度的理论和方法上取得了很大的进展,但对重点监视区这样有较准确的 10 年左右预报意见的地区来说,现有的方法都不能得到令人满意的结果。

现有的烈度预测方法中大体可划分为确定性和概率性两种途径 (Robin and McGuire, 1981; 胡聿贤等, 1992)。确定性的方法要求一定的震中位置和震级,按照一定的衰减规律预测某地区未来可能遭受到的烈度。这种方法的出发点与本工作区的情况有较大的差异:本工作区的面积较大,长宽都在百公里以上,区内包括了若干条活动断裂带,所预报的地震只能指明发生在一定的范围之内,而并不能确定其具体的发震位置,何况衰减规律自身也带有不确定性。概率性的预测方法是近几十年来为适应工程抗震设防而提出来的,它根据可能影响到场地的每一震源所可能发生的地震的震级预测某一基准期内指定场地上超过某烈度的可能性。这种方法的思路和出发点与重点监视区内估计烈度的要求也有较大的差别。主要是重点监视区中所考虑的发震危险区段只限在本区范围之内,对震级上限的估计,对大小地震的比例与地

震危险性分析中所采取的原则皆不相同,因而也不能照搬地震危险性分析中的原理和方法。

本文在方法上吸收了地震危险性分析中的若干处理方法,研究了具有相对较确定的震源区内烈度预测的概率方法。针对本工作区的具体情况,确定了可能发生强震的危险区域,确定了各危险区内发生不同震级地震的可能性,给出了区内在预报期间遭到不同烈度袭击的概率,其结果用来估计本重点监视区内可能蒙受的震害损失的期望值。

2 河西重点监视区的地震地质构造背景

河西走廊重点监视区位于青藏高原东北边缘,祁连山与河西走廊中段。地理位置为东经 $97^{\circ}-104^{\circ}$,北纬 $36.5^{\circ}-41.5^{\circ}$,包括甘肃省张掖地区大部、酒泉地区的东南部以及青海省的北部边缘地区。区域地质构造上属于祁连山构造带中段,构造活动强烈,历史上曾发生过公元 180 年高台 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1609 年红崖堡 $7\frac{1}{4}$ 级地震、1954 年山丹 $7\frac{1}{4}$ 级地震。自 1988 年以来,本区已发生过 5 级以上的中强地震 7 次。根据本区的地震地质构造背景及地震活动状况,估计今后还有发生较大地震的可能。经验证明,这一地区较强地震的活动都和区域上较大的活动断裂有关。

本区主要的活动断裂有如下几条 (图 1):

(1) 昌马—俄博断裂。西起昌马,向东经镜铁山、大岔牧场至俄博附近,全长 450 km,为一走向北 60° 西、高角度的左旋走滑逆冲断层,断裂深度已达岩石圈。

本断裂在监视区内由两段构成,在大岔牧场附近雁列交叉。如全段一次性活动,所发生的地震可达 7 级左右,分段活动时也可发生 6—6.5 级地震。这是本区危险程度最高的一条活动断裂。

(2) 祁连山北麓断裂带。沿祁连山北麓和走廊南缘通过,走向与昌马—俄博断裂平行,相距 15—20 km,较明显的活动段在监视区以东的马营河口一带,其危险程度较之昌马—俄博断层要弱一些。

(3) 中祁连北麓断裂。全长约 300 km,总体走向北 65° 西,是一条以左旋走滑为主的逆断层,有发生 6.5 级地震的可能性。

(4) 榆木山北缘断裂。为一逆掩推覆构造,全长 96 km,走向由西端的近东西转向东端的北西。断裂带西段活动性较强,有可能发生 6.5 级地震,东段活动性相对较弱,有可能发生 6 级地震。由于本断裂临近走廊中部人口密集地区,其影响较大。

(5) 北山南麓断裂。活动性较弱,有发生 5 级左右地震的可能。

3 重点监视区的烈度预测方法

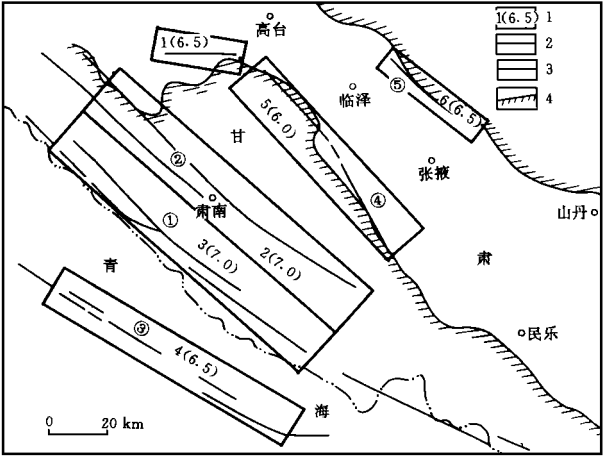


图 1 预报期内危险区的分布

Fig. 1 Distribution of seismic risk regions in allotted time predicted.

- 1 危险区 (括号内的数字为预报期内的震级上限,括号外的数字为编号);
- 2 主要活动断裂;
- 3 一般性活动断裂 (圆圈数值为断裂编号);
- 4 山区 (阴影一侧)和走廊间界线

重点监视区烈度预测分析的前提和各种假定以及已有的模型都不完全相同,其预计的震源被限定在监视区之内,通常在半径几十公里的范围之内;预测的时间是监视期之内,通常也不过 10—15 年左右。显然,在这样一个预报期内,地震活动的模式和地震危险性分析中所采用的方法有本质的差别,地震的强度和破坏性地震的次数均由预报确定。发震的地点也不宜再采用“潜在震源”这一概念,我们用“危险区”来表示在监视期内可能发震的地点(图 1)。同时,所分析的结果也不是用于工程设防,而是用于监视期内震害损失评估以及防震减灾的措施和对策。

重点监视区中某危险区内对应某震级的地震的年发生率也与地震危险性分析中的年平均发生率有所区别,这里指的是监视期内发生某震级的地震的可能性,一般不强调复发周期的问题,但大小地震数目间的比例仍假定其服从古登堡-李希特公式。

根据全概率定理,某场地在本预报期内可能遭到来自某一危险区大于或等于某烈度 I' 的概率为:

$$P_{\geq I'} = \sum \sum \sum \sum P(M) \cdot P(r|M) \cdot P(\theta|r, M) \cdot P(\geq I'|r, \theta, M) \quad (1)$$

式中 $P(M)$ 为预报期内发生震级为 M 的地震的概率。按古登堡-李希特公式:

$$P(M) = \int_{M_0}^{M_u} f(m) dm \quad (M_u - M_0)$$

$$f(m) = \frac{U \cdot \exp[-U(M_j - M_0)]}{1 - \exp[-U(M_u - M_0)]} \quad (2)$$

$P(r|M)$ 表示震级为 M 的地震发生在距场地 r 处的概率。根据预报意见,假定在某一危险区内各点发生 M 级地震的可能性相等。于是,可将一个危险区划分为若干足够小的子区 Δr , $P(\Delta r|M) = \text{const}$

$P(\theta|r, M)$ 表示在 r 处发生 M 级地震时,破裂方向为 θ 的概率。对于每个危险区,等震线长轴的延伸方向 θ 都假定与断层破裂方向 θ_0 一致,即与危险区的延伸方向一致,于是有

$$P(\theta|r, M) = \begin{cases} 1 & \theta = \theta_0 \\ 0 & \theta \neq \theta_0 \end{cases}$$

$P(\geq I'|r, \theta, M)$ 表示当 r, θ, M 都确定的情况下,场地上遭受到 $\geq I'$ 烈度的概率,取决于烈度衰减规律的不确定性

经过简化,式 (1) 可以写成:

$$P_{\geq I'} = \sum_i \sum_j P(M_j) \cdot P(\geq I'|r_i, M) \quad (3)$$

若重点监视区内有多个危险区时,则场地上遭受到 $\geq I'$ 的概率等于每一危险区贡献之和。

上式中的重要问题是计算 $P(\geq I'|r_i, M)$, 我们采用了如下方法:

如图 2, 设四边形 ABCD 为某一危险区, 椭圆 O 为发生 M_j 级地震时某烈度 I' 的等震线。将座标变换后, O 为所考虑的场地, 发生在阴影区 AEF 内的 M_j 级地震影响到 O 点必然使该点的烈度 $\geq I'$ 。由于已经假定, 某一危险区内各处发生 M_j 级地震的可能性相等, 于是有:

$$P_i(\geq I'|r, M_j) = S_{AEF} / S_{ABCD} \quad (4)$$

其中 S_{AEF} 为图 2 中阴影区的面积, 可用数值积分方法求得(孙崇绍, 1993)

4 计算参数的选取

4.1 烈度衰减规律

烈度衰减规律是用回归统计方法求得的。选取重点监视区内及其附近场地条件相近地区的 12 次 5 级以上地震的等震线,分别按长轴、短轴进行多元回归求得本区的衰减关系:

长轴 $I = 4.781 + 1.508 M - 1.782 \ln(R + 20), \quad \sigma_I = 0.564$

短轴 $I = 1.950 + 1.500 M - 1.429 \ln(R + 5), \quad \sigma_I = 0.665$

(5)*

4.2 某震级 M_i 的发震概率 $P(M_i)$

欲求 $P(M_i)$, 首先须求得震级-频度关系。考虑到重点监视区内地震活动性的重复周期,选取震级资料时尽可能取在几个活动周期内的资料;同时在进行回归分析时考虑到不同震级间隔对结果的影响,最后得出关系式如下:

$$\log N = 5.00 - 0.83 M$$
$$e_{\log N} = 0.94$$

于是 $U = 0.83 / \log e = 1.911$

由式 (2)得:

$$P(M_i) = \frac{2}{U} f(M_i) \cdot$$
$$\cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{2} U \cdot \Delta M\right) \quad (6)$$

$\operatorname{sh}\left(\frac{1}{2} U \cdot \Delta M\right)$ 为以 $\left(\frac{1}{2} U \cdot \Delta M\right)$ 为宗量的双曲正弦函数,上式中的 $P(M_i)$ 即为整个重点监视区内发生在 $\left[M_i \pm \frac{1}{2} \Delta M\right]$ 内的地震的发生概率。

对每个危险区,根据预报意见,采用专家决策的方法确定分配权系数,然后将 $P(M_i)$ 按此权系数分配到每一危险区内。

5 影响烈度预测结果的因素及灵敏度分析

从式 (5)、(6) 可以看出,影响烈度预测结果的因素主要有某震级地震的发震概率和烈度衰减关系。下面将对这两个因素作灵敏度分析。

5.1 预报期内某震级地震 M_i 的发震概率

由式 (6) 可知,影响 $P(M_i)$ 的因素只有参数 U 。根据数理统计理论, $\log N = a - bM$ 中 b 的误差可表示为:

$$D(b) = \frac{e^2}{\sum_{j=1}^n (M_j - \bar{M})^2}$$

(7)

于是

$$D(U) = D(b) \cdot \frac{1}{\log e}$$

式 (7) 中 e 是 $\log N$ 的标准差, $\bar{M} = \frac{1}{2} (M_0 + M_n)$ 为平均震级

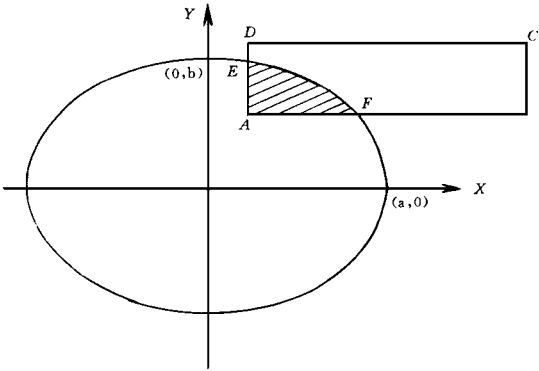


图 2 $P_j(\geq I' | r, M_i)$ 计算原理示意图
Fig. 2 Sketch map of calculation principle of $P_j(\geq I' | r, M_i)$.

* 国家地震局兰州地震研究所. 河西地震重点监视区震害预测及损失评估. 1991.

我们用差异系数来分析 U 值对计算结果的影响,定义差异系数:

$$cov = \frac{\Delta P(M_i)}{P(M_i)} \tag{8}$$

式中 $\Delta P(M_i)$ 为给定一微小差值 ΔU 后 M_i 级地震发震概率的变化值, $\Delta P(M_i) = P(M_i)_{U+\Delta U} - P(M_i)_U$.

选取 $M \geq 2$ 和 $M \geq 3$ 的地震活动性资料求得 $D(U)$ 和 cov 值 计算发现: (1) $D(U)$ 的范围在 0.05—0.2 之间,可取 $\Delta U = 0.02 - 0.2$ 计算 cov 值; (2) cov 值总小于 0.3 (图 3). 由此可以断定, U 的变化对 $P(M_i)$ 的影响不大,实际上可以忽略.

5.2 烈度衰减关系

根据数理统计理论,相同震级下同一烈度的等震线的震中距 R 在一定区间内呈正态分布,于是所有这些 R 在一定区间内就构成了一个正态总体 (Anderson, 1978). 河西重点监视区在预报期内的震级为 6—7 级,对应的震中烈度为 IX 度. 因此选取该区及附近地区的 9 次震中烈度 I_0 为 IX 度的地震,分别量取 VI—IX 度的等震线的震中距,得到某一组合 (I_0, I_1) 对应的 $R_1, R_2, \dots, R_N$ 为正态

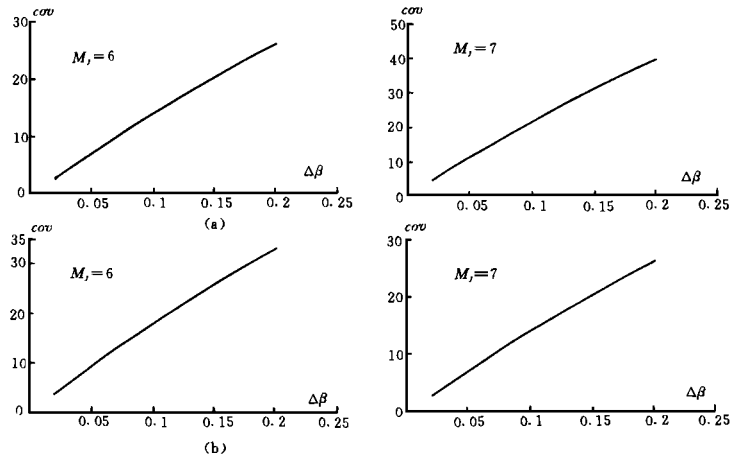


图 3 $cov \Delta U$ 图

Fig. 3 The $cov \Delta U$ relationship map

(a) 利用 $M \geq 2$ 的资料, $\Delta M = 0.3$; (b) 利用 $M \geq 3$ 的资料, $\Delta M = 0.3$

总体中容量为 N 的样本 (这里 I_0 为 IX 度, I_1 为 VI—IX 度中的任一烈度值. 取统计量

$$T = \frac{\bar{x} - E(x)}{S^2 / N} \tag{9}$$

式中 $\bar{x}$ 为样本的期望值, S 为统计方差, T 服从于自由度为 $n - 1$ 的 t 分布, 给定置信度, 查表可得 $n - 1$ 的 t 分布概率密度函数为 $1 - T$ 的自变量 λ , 由此即可求得等震线震中距的期望

$E(x)$ 的置信区间, $E(x) \in (\bar{x} - \lambda_T \frac{S}{N}, (\bar{x} + \lambda_T \frac{S}{N})$. 所求置信区间的物理意义是: 当震中烈度为 IX 度时, 某一烈度 I_1 的等震线以 $1 - T$ 的置信度落入该区间, 即超出该区间的概率为 T .

我们取置信度 68.26% 和 95.46% 来研究 $P(\geq I' | r, M)$ 对烈度衰减关系所确定的 R 的灵敏度. 因为上述二数值分别是 $|x - E(x)| < e$ 和 $|x - E(x)| < 2e$ 时所对应的正态分布概率积分值.

以某一 (I_0, I_1) 的长短轴期望值作出衰减椭圆如图 2. $R_{长}$ 和 $R_{短}$ 在各自置信区间增大时, S_{AET} 相应增大, $P(\geq I' | r, M)$ 也相应增大, 以此可以求得 $P(\geq I' | r, M)$ 对 R 的灵敏度

同样,用差异系数来分析衰减规律对预测结果的影响,这时将其定义为衰减长轴半径或短轴增加一个步长后场地遭到某震级地震袭击的概率增值:

$$\text{cov} = \frac{|P_1 - P|}{P}$$

(10)

我们取本地最大可能的震中烈度,即IX度。根据衰减规律,当震级 $M=7$ 时,长、短轴的期望值分别为 10.2和 3.74 km。在长轴和短轴的置信区间内增加 $r_{\text{长}}$ 或 $r_{\text{短}}$ 一个步长,求得的 cov 值如表 1。

表 1 $M=7$ 地震时不同置信水平下长短轴的变化所产生的差异系数

(a) 置信度 50%			(b) 置信度 68.26% (e)			(c) 置信度 95.46% (2e)		
长轴	短轴	差异系数	长轴	短轴	差异系数	长轴	短轴	差异系数
10.26	3.768	0.243	10.344	3.792	0.510	10.62	3.866	1.52
10.26	3.796	0.40	10.344	3.844	0.918	10.62	3.992	2.82
10.26	3.824	0.648	10.344	3.896	1.36	10.62	4.118	4.31
10.26	3.852	0.867	10.344	3.948	1.84	10.62	4.244	5.95
10.26	3.880	1.10	10.344	4.00	2.36	10.62	4.37	7.73
10.32	3.768	0.308	10.488	3.792	0.683	11.04	3.866	2.19
10.32	3.796	0.510	10.488	3.844	1.12	11.04	3.992	3.69
10.32	3.824	0.725	10.488	3.896	1.59	11.04	4.118	5.39
10.32	3.852	0.950	10.488	3.948	2.10	11.04	4.224	7.25
10.38	3.880	1.19	10.488	4.00	2.64	11.04	4.37	9.24
10.38	3.768	0.374	10.632	3.792	0.864	11.46	3.866	2.90
10.38	3.796	0.583	10.632	3.844	1.33	11.46	3.992	4.61
10.38	3.824	0.803	10.632	3.96	1.83	11.46	4.118	6.51
10.38	3.852	1.03	10.632	3.948	2.36	11.46	4.244	8.59
10.44	3.880	1.28	10.632	4.00	2.93	11.46	4.37	10.81
10.44	3.768	0.441	10.776	3.792	1.05	11.88	3.866	3.65
10.44	3.796	0.656	10.776	3.844	1.54	11.88	3.992	5.56
10.44	3.824	0.882	10.776	3.896	2.07	11.88	4.118	7.68
10.44	3.852	1.12	10.776	3.948	2.63	11.88	4.244	9.97
10.5	3.880	1.37	10.776	4.00	3.23	11.88	4.37	12.41
10.5	3.768	0.51	10.92	3.792	1.24	12.3	3.866	4.44
10.5	3.796	0.73	10.92	3.844	1.76	12.3	3.992	6.55
10.5	3.824	0.963	10.92	3.896	2.32	12.3	4.118	8.88
10.5	3.852	1.21	10.92	3.984	2.91	12.3	4.244	11.39
	3.88	1.46	10.92	4.00	3.54	12.3	4.37	14.05

由表 1可以看出,衰减规律的不确定性所引起的差异系数很大,最大可超过 14,即,当 R 在置信区间内变化时, $P(\geq I^0 | r, M)$ 的变化很显著,必须予以校正。

当然,对重点监视区烈度估计中的不确定因素还不止以上两个,其他如震源深度、地震震源的类型以及地震波的频谱成分等对烈度的分布都应当有所影响。但因资料所限,本文不予研究。

6 烈度衰减规律不确定性的校正及应用

烈度衰减关系的一般表达式为 $I = a + bM - c \ln(R + \Delta) + X$, 将该式改写成

$$R = \exp\left[\frac{1}{c}(a + bM - I)\right] - \Delta + X \tag{11}$$

或
$$\ln(R + \Delta) = (a + bM - I) \cdot \frac{1}{c} + \frac{X}{\ln(R + \Delta)} \tag{12}$$

由于 $\ln(R + \Delta)$ 是用 I 表示出来的,误差 $X_{\ln(R + \Delta)}$ 是由 I 的误差造成的,于是上式可以写成

$$\ln(R + \Delta) = \frac{1}{c} [a + bM - (I - x)] \tag{13}$$

式中 x 表示 I 的不确定性,比较以上两式,可以发现 $X_{\ln(R + \Delta)} = \frac{1}{c}x$, 可见 I 和 R 的不确定性实际上是一致的。

对上式的 $\ln(R + \Delta)$ 进行校正:

$$\ln(R + \Delta)_{\text{校}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{c} [a + bM - (I - x)] \cdot \frac{1}{2ce} \cdot \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2e^2}\right] \cdot dx \tag{14}$$

式中 $\bar{x}$ 为 I 的误差均值

将上式中的常量提至积分号之外,由式 (14) 及式 (3) 可得:

$$P_{\text{校}}(I \geq I') = \sum_i \sum_j P_i(M_j) \cdot P_i(I \geq I' | M_j) \tag{15}$$

实际计算时仿照了地震危险性分析中所用的方法:积分区间取 $-3e - 3e$

7 高烈度区超越概率的修正结果

根据预报意见,监视区在预报期内可能发生一次 6—7 级地震。对于高烈度区域,不确定性的修正尤为重要。按上节所述的方法,分别计算了 VII 度地区校正前后遭 4% 和 2% 概率的地区范围(图 4)。图 4 中未考虑 6 级以下地震的影响,目的仅在说明,对衰减规律不确定性的校正是重要的。图 4 中给出的结果是研究性的结果,而不是对河西重点监视区烈度的预报意见。

8 结论

本文所建立的计算模型中,分析了重点监视区的烈度计算方法。对于重点监视区来说,采用概率方法预测烈度较之确定性的或外包线的方法更为合理。

研究表明,造成不确定性的因素主要是烈度衰减关系,发震概率的不确定性的影响(b 值的影响)小于 U 值本身变化的 10%,其误差范围在 0.05—0.2 之间,因此,其影响可以忽略。

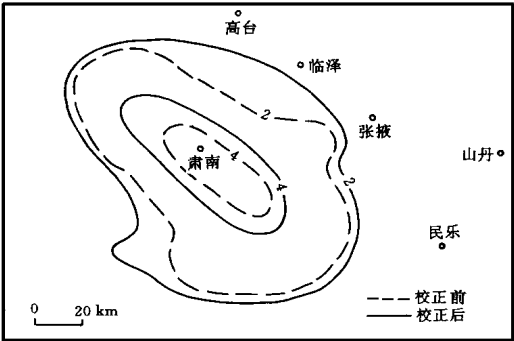


图 4 重点监视区内 VII 度地震的概率等值线(%)
Fig. 4 Probability isoplethis curve of earthquakes with intensity in Hexi key monitoring area.

对衰减关系灵敏度的分析表明,随着 r 的变化 $P(\geq I' | I_0)$ 的变化相当显著,必须予以校正。

本文中的方法对衰减关系不确定性的校正是偏向于安全的。重点监视区具有相对较确定的中短期地震预报,不涉及复发周期的问题,所得的等值线是监视期内遭到某烈度袭击的概率。本文中所述的原理和方法可用于重点监视区内的烈度预测和损失评估中去。

参考文献

- 1 胡聿贤,陈汉尧. 不确定性概念的合理描述及处理方法. 地震工程与工程振动, 1992, 12(4): 1- 8.
- 2 孙崇绍. 中长期预报区内地震烈度的评估方法. 高原地震, 1993, 5(3): 6- 12.
- 3 McGuire R K. Effect of uncertainty in seismicity on estimates of seismic hazard for the east coast of the United States. BSSA, 67(3). 827- 848.
- 4 Anderson J G. On the attenuation of modified mercalli intensity with distance in the United States. BSSA, 68(4): 1147 - 1179.
- 5 McGuire R K and Shedlock K M. Statistic uncertainties in seismic hazard evaluation in the United States. BSSA 71(4): 1287- 1308.

STUDY ON EARTHQUAKE INTENSITY PREDICTION IN HEXI KEY MONITORING AREA

Qi Jilin

(Xi'an University of Science and Engineering, Xi'an 710048)

Sun Chongshao

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

Abstract

Based on the previous studies, a new mathematical model is established, which is suitable for probabilistic method of predicting seismic intensity in key monitoring area. The sensitivities of the factors affecting prediction to the results are analysed. It is found that the intensity attenuation law plays an even more important role in bringing about the uncertainty. In the light of the principle of uncertainty correction for normal distribution function in seismic hazard analysis, an improved method to correct the uncertainty in intensity prediction is demonstrated and is applied in Hexi key monitoring area. Seismicity period and magnitude interval are taken into account to determine the magnitude-frequency relation. Therefore, the relation secured in this paper may be more accurate.

Key words Focal monitoring area, Intensity prediction, Hexi corridor seismotectonic zone, Uncertain prediction, Sensitivity analysis