

# 地震资料精度和完整性对地震危险性参数的影响<sup>\*</sup>

邵辉成 谢家树 王平 王亚秀

(中国西安 710068 陕西省地震局)

**摘要** 针对现有地震目录中存在的不完备性问题, 提出了考虑不同精度和完整性估计地震危险性参数的极大似然法。作为一个例子, 计算了汾渭地震带和陕南地区的地震危险性参数。并在此基础上用单参数和多参数敏感性分析方法对参数的敏感性和结果的不确定性进行了分析和讨论。

**主题词** 地震危险性 不完备 不确定性 极大似然法 敏感性

## 引言

地震目录是地震危险性分析的基础资料, 但由于确定地震参数的方法与条件以及地震观测台网在不同时段和不同地区检测能力的不同(李全林等, 1991), 地震目录上的地震强度参数的时间序列是一组不等精度和不同完整性的数据集合, 包含有偏离“真”值的误差, 这种偏差对不同地区、不同时间段、不同震级范围是不一样的(Жалковский, 1991), 而且能造成地震活动率的明显变化。因此, 不等精度和资料的不完整性是地震目录中存在的最大问题。同时, 地震危险性分析中必须把震级范围有限而误差大的历史地震资料和记录时间短而较完整的现代地震资料结合起来, 以延长震级区间扩大样本量, 使大小地震间得到合理的匹配。参数的敏感性和结果的不确定性问题, 也是人们关心的重要问题(陈汉尧, 1994)。本文采用处理不同精度数据的极大似然法估计地震危险性参数, 并讨论了参数的敏感性。

## 1 方法

根据地震目录的实际情况, 把目录分为历史地震目录和  $S$  个时间段为  $T_i$ , 震级阈值为  $m_i^l$  的完整子目录。历史地震资料从  $T_0 = (t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0n})$  个时间间隔中选取最大地震  $X_0 = (X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0n})$ (图 1)。本文中震级单位为  $M_S$ 。假设地震发生服从活动率为  $\lambda$  的泊松分布和两端截去的震级  $X$  的 G-R 分布, 则其密度和累积密度分布函数为(邵辉成等, 1992)

\* 地震科学联合基金会资助项目。

1995-03-25 收到初稿, 1995-08-15 收到修改稿, 1995-11-02 决定采用。

$$\begin{cases} f(x \mid m_{\min}) = \frac{\beta A(x)}{A_1 - A_2} \\ F(x \mid m_{\min}) = \frac{A_1 - A(x)}{A_1 - A_2} \end{cases} \quad m_{\min} \leqslant x \leqslant m_{\max} \quad (1)$$

其中,  $A_1 = \exp(-\beta m_{\min})$ ,  $A_2 = \exp(-\beta m_{\max})$ ,  $A(x) = \exp(-\beta x)$ ,  $m_{\min}$  为震级的阈值.  $m_{\max}$  是区域震级的极大值,  $\beta$  为分布参数. 为方便记,  $\theta = (\beta, \lambda)$ , 这就是待求的 3 个地震活动性参数.

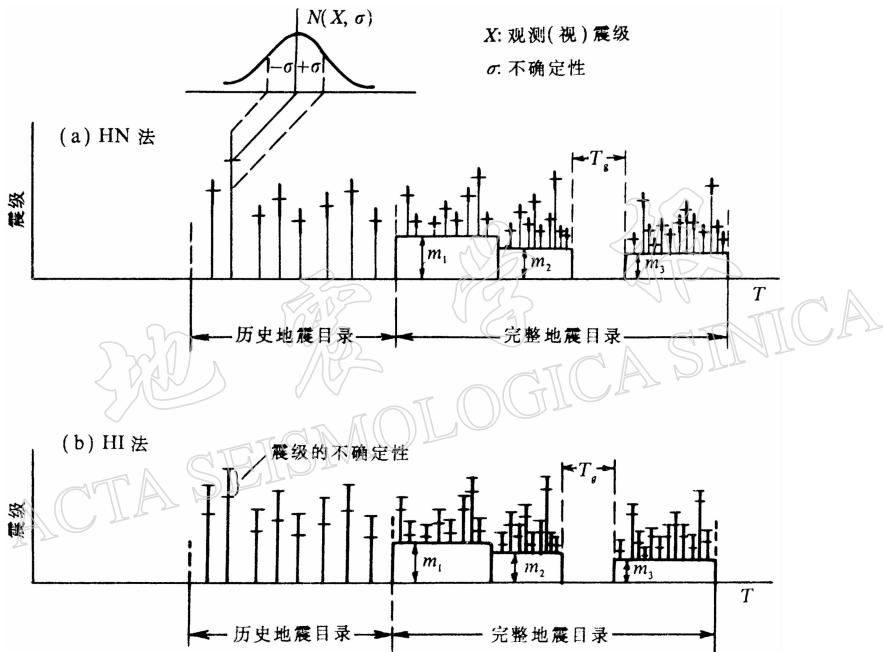


图 1 估计地震危险性参数示意图.  $m_i$  为相应时间段震级阈值,  $T_g$  为目录空段

## 1.1 震级不确定性的表示及处理方法

### 1.1.1 HN 法

把地震震级用观测(视)震级和震级误差来表示, 并假定震级误差服从平均值为  $O$  标准差为  $\sigma$  的正态分布(Tinti *et al.*, 1985), 记为  $X_{ji} = \langle X_{ji}, \sigma_{ji} \rangle$ ,  $i=1, \dots, n_j$ .  $n_j$  为第  $j$  个子目录的地震数,  $j=0, \dots, s$ (图 1a). 这样归一化的视震级概率密度和累积概率密度分布函数成为(Gibowicz *et al.*, 1993)

$$\begin{cases} \bar{f}(x \mid m_{\min}, \sigma) = \frac{f(x \mid m_{\min}, \sigma)}{1 - F(m_{\min} \mid m_{\min}, \sigma)} \\ \bar{F}(x \mid m_{\min}, \sigma) = \frac{F(x \mid m_{\min}, \sigma) - F(m_{\min} \mid m_{\min}, \sigma)}{1 - F(m_{\min} \mid m_{\min}, \sigma)} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$f(x \mid m_{\min}, \sigma) = f(x \mid m_{\min}) C_\sigma(x \mid m_{\min}, \sigma)$$

$$F(x \mid m_{\min}, \sigma) = F(x \mid m_{\min}) D_\sigma(x \mid m_{\min}, \sigma)$$

$$C_\sigma(x \mid m_{\min}, \sigma) = \frac{\exp(\gamma^2)}{2} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{m_{\max} - x}{\sqrt{2}\sigma} + \gamma\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x - m_{\min}}{\sqrt{2}\sigma} - \gamma\right) \right]$$

$$D_a(x \mid m_{\min}, \sigma) = \left\{ A_1 \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x - m_{\min}}{\sqrt{2}\sigma}\right) + 1 \right] + A_2 \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{m_{\max} - x}{\sqrt{2}\sigma}\right) - 1 \right] - 2C_\sigma(x \mid m_{\min}, \sigma)A(x) \right\} / 2[A_1 - A(x)]$$

$\operatorname{erf}$  是误差函数,  $\gamma = \beta\sigma/\sqrt{2}$ .

为反应地震活动真实情况, 引入视震级活动率  $\tilde{\lambda}(x)$  和地震活动率  $\lambda(x)$  关系为

$$\tilde{\lambda}(x) = \lambda(x) \frac{\exp(\gamma^2)}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{m_{\max} - x}{\sqrt{2}\sigma} + \gamma\right) \right] \quad (3)$$

### 1.1.2 HI 法

把地震震级用下限和上限两个值表示, 真正的震级限定在此范围内(图 1b), 记为  $X_{ji} = <X_{ji} - \delta_{ji}, X_{ji} + \delta_{ji}>$ ,  $\delta$  为震级不确定性. 可得到归一化的视震级概率密度和累积概率密度分布函数为(邵辉成等, 1992)

$$\bar{f}(x \mid m_{\min}, \delta) = (C_f A_1 - A_2)^{-1} \times$$

$$\begin{cases} C_f \beta A(x) & m_{\min} \leqslant x \leqslant m_{\max} - \delta \\ [A(x - \delta) - A_2]/(2\delta) & m_{\max} - \delta \leqslant x \leqslant m_{\max} + \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{F}(x \mid m_{\min}, \delta) = (C_f A_1 - A_2)^{-1} \times$$

$$\begin{cases} C_f [A_i - A(x)] & m_{\min} \leqslant x \leqslant m_{\max} - \delta \\ [A_1 - A(m_{\max} - \delta)] - A_2(x - m_{\max} + \delta)/(2\delta) - & m_{\max} - \delta \leqslant x \leqslant m_{\max} + \delta \\ [A(x) - A(m_{\max} - \delta)] \exp(\beta\delta)/(\beta\delta) & \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$C_f = [\exp(\beta\delta) - \exp(-\beta\delta)]/(2\beta\delta)$$

同样假定视地震活动率  $\tilde{\lambda}(x)$  和真地震活动率  $\lambda(x)$  的关系为

$$\tilde{\lambda}(x) = \lambda(x) \times \begin{cases} C_f & m_{\min} \leqslant x \leqslant m_{\max} - \delta \\ \{\exp(\beta\delta) - \exp[-\beta(m_{\max} - x)]\}/(2\beta\delta) & m_{\max} - \delta \leqslant x \leqslant m_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

### 1.2 似然函数

通过上面的分析, 就可得到历史资料部分的似然函数

$$L_0(\theta \mid X_0) = \text{const} \prod_{i=1}^{n_0} \bar{\lambda}(m_i) t \bar{f}(x \mid m_i, \Delta) \exp\{-\bar{\lambda}(m_i)t[1 -$$

$$\bar{F}(x \mid m_i, \Delta)]\} / [1 - \exp(-\bar{\lambda}(m_i)t)] \quad (7)$$

其中, const 为归一化因子,  $m_0$  为历史地震目录的震级阈值,  $\Delta$  为震级不确定性.

第  $i$  个完整子目录的似然函数为

$$L_i(\theta \mid x_i) = \text{const} \exp[-\tilde{\lambda}(m_{\min}^i) T_i] [\lambda(m_{\min}^i) T_i]^{n_1} \times \prod_{j=1}^{n_i} \tilde{f}(x_{ij} \mid m_{\min}^i, \Delta_{ij}) \quad (8)$$

其中, const 为归一化因子.

这样就可得到全部资料的联合似然函数, 应用极大似然法可得参数  $\theta = (\beta, \lambda)$ .

最大似然法没有提供  $m_{\max}$  的估计，只有引进一些附加条件或信息，或根据其它方法确定的值。在假设估计  $m_{\max}$  是基于均匀分布的终点估计值的某些特性条件下 (Gibowicz et al., 1993) 得到

$$m_{\max} = -\frac{1}{\beta} \ln \left\{ A_1 - [A_1 - A(X_{\max})] \frac{\lambda T + 1}{\lambda T} \right\} \quad (9)$$

或引入观测到的最大震级  $X_{\max}$  等于目录时间段  $T$  中期望震级 (邵辉成等, 1992)。当  $\delta=\sigma=0$  时可得到不同阈值的资料估计地震危险性参数，称 HE 法； $S=1$ ,  $\sigma=\delta=0$ ，且  $m_{\max} \rightarrow \infty$  时可得到 Aki-Utsu 计算  $b$  值公式 (金学申等, 1994)。

## 2 地震危险性参数的计算结果

因地震精度评价是一项很复杂的工作，笔者仅根据地震等震线等资料把历史地震震级的不确定性划分为 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 等几个等级 (邵辉成等, 1992)。并根据资料本身的“可信时间域”和“可信震级域”，给出了资料及计算结果 (表 1)。可以看出，考虑震级不确定性后， $\beta$  比不考虑震级时的不确定性要大一些，而地震年发生率有所减小。

表 1 资料的选取及计算结果

时间段	汾渭地震带				陕南地区	
	1300~1939	1940~1969	1970~1979	1980~1993	1400~1969	1970~1993
震级阈值 $m_{\min}^i$	5.0	4.5	3.0	2.4	5.0	2.4
震级不确定性	0.5~0.2	0.25	0.2	0.1	0.5~0.2	0.15
地震数 $n$	42	15	17	183	17	106
对 $\beta$ 提供信息量	71%~72%	10%~11%	9%~10%	10%~11%	77%~78%	22%~23%
最大观测震级	1556 年华县 8.0 级地震				788 年房县 6.5 级地震	
结果	HN	$\beta=1.857, \lambda=0.137$ (对于 5.0), $m_{\max}=8.9$				$\beta=1.922, \lambda=0.030$ (对于 5.0), $m_{\max}=6.8$
	HI	$\beta=1.838, \lambda=0.145$ (对于 5.0), $m_{\max}=8.8$				$\beta=1.898, \lambda=0.032$ (对于 5.0), $m_{\max}=6.7$
	HE	$\beta=1.827, \lambda=0.150$ (对于 5.0), $m_{\max}=8.8$				$\beta=1.886, \lambda=0.035$ (对于 5.0), $m_{\max}=6.7$

## 3 参数的敏感性分析

由于地震和地质资料的缺少以及人们对地震发生规律认识的贫乏，在地震危险性分析中每个步骤都带有很大的不确定性。敏感性分析的目的是检验哪一个参数对总体地震危险性的确定最为重要，能够使决策者对影响最大的参数给予特别的关注。从表 1 的结果可以看出，历史地震资料部分对  $\beta$  值提供的相对信息量最大，也就是历史地震目录对  $\beta$  值计算起决定作用。在实际地震危险性分析中，对历史地震资料应认真甄别和修订，才能得到较准确的地震危险性参数 (贾素娟等, 1993)。

### 3.1 地震震级不确定性对各参数的影响

图 2 给出了地震震级的不确定性对地震危险性参数的影响。可以看出，历史地震资料的不确定性对  $\beta$  值和区域震级的极大值有较大的影响，且随震级不确定性的增大而增加，地震年发生率随震级不确定性的增大而减小，对大震级地震年发生率的影响比对小震级地震年发生率的影响要大。 $\beta$  和  $\lambda$  值随现代地震资料的不确定性的增加而减小，而且对小震级地震的年发生率的影响要大于对大震级地震年发生率的影响，对区域震级的极大值影响较小。HN 法比 HI 法对震级的不确定性要敏感。现代地震资料部分对  $\beta$  值提供的信息量随

现代地震资料的不确定性明显增加, 对  $\lambda$  值提供的信息量基本保持不变。相对而言, 历史地震资料的不确定性对  $\beta$  值的影响要大于现代地震资料。

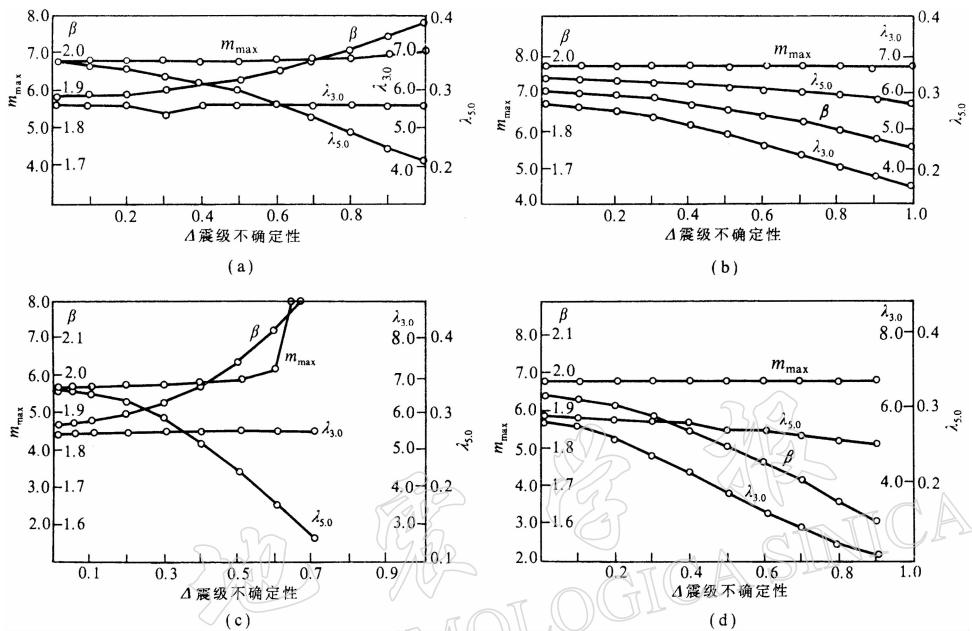


图 2 震级不确定性对地震危险性参数的影响。(a) 历史地震资料的不确定性对地震危险性参数的影响(HI 法);(b) 现代地震资料的不确定性对地震危险性参数的影响(HI 法);(c) 历史地震资料的不确定性对地震危险性参数的影响(HE 法);(d) 现代地震资料的不确定性对地震危险性参数的影响(HE 法)

### 3.2 震级下限和不同数据结构的计算结果

因已考虑到了地震资料的完整性和可靠性, 因此在数据完整的前提下, 震级下限在一定程度上对结果的影响应比较小(金学申等, 1992; 邵辉成等, 1995)。

表 2 最大观测震级的选取对地震危险性参数的影响

最大观测震级选取	参数	$\beta$	$\lambda$	$m_{\max}$	$T_{5.0}/a$	$T_{5.5}/a$
研究时间段(同表 1) 内的最大观 测震级 5.5 级	HN	$1.648 \pm 0.11$	$5.49 \pm 0.52$	$5.54 \pm 0.11$	28.7	610
	HI	$1.674 \pm 0.10$	$5.55 \pm 0.52$	$5.54 \pm 0.11$	27.7	587
	HE	$1.652 \pm 0.10$	$5.59 \pm 0.54$	$5.54 \pm 0.11$	26.1	551
公元 46-10-28 6.5 级	HN	$1.917 \pm 0.10$	$5.50 \pm 0.53$	$6.66 \pm 0.13$	33.3	94.1
	HI	$1.893 \pm 0.09$	$5.59 \pm 0.53$	$6.64 \pm 0.13$	31.1	86.4
	HE	$1.882 \pm 0.09$	$5.66 \pm 0.55$	$6.63 \pm 0.13$	29.8	82.6
公元 788-03-08 6.5 级	HN	$1.922 \pm 0.09$	$5.50 \pm 0.53$	$6.77 \pm 0.16$	33.7	93.3
	HI	$1.898 \pm 0.09$	$5.59 \pm 0.53$	$6.74 \pm 0.15$	31.2	85.7
	HE	$1.886 \pm 0.09$	$5.67 \pm 0.56$	$6.72 \pm 0.15$	29.9	82.0

注: 在讨论的时间段中发生 5 级以上地震 18 次,  $T_{5.0}=33$  年左右; 5.5 级以上地震 7 次,  $T_{5.5}=85$  年左右。

根据稳健统计计算,  $T_{5.8}=32$  年,  $T_{5.0}=85$  年

### 3.3 最大观测震级的选取及不确定性对结果的影响

从式(9)可以看出，区域震级的极大值，与所选取的最大观测震级有直接关系。在陕鄂豫川交界地区，研究时间段前公元46年10月河南南阳和788年3月湖北房县分别发生了6.5级地震。考虑研究时间段前最大震级与仅选取研究时间段内最大震级得到的地震危险性参数有很大的不同(表2)。图3示出最大观测震级的不确定性对地震危险性参数的影响。

由于历史地震资料记载的时间远小于大地震的重复周期，这种资料的不完备性在很大程度上造成了地震危险性评价中结果的不确定性(张培震，1994)。因此，为得到较准确的危险性参数，应尽量考虑研究时间段前的地震资料甚至古地震资料，以延长研究资料的时间段。

### 3.4 地震震级不确定性对分布函数的影响

从式(2)和(4)可以看出，考虑了地震震级不确定性后，分布函数发生了变化，其修正函数可以写为

$$\begin{cases} C_N = \exp(\beta^2 \sigma^2 / 2) \\ C_I = \exp[(\beta\delta) - \exp(-\beta\delta)] / (2\beta\delta) \\ C_E = 1 \end{cases} \quad (10)$$

且有  $\lim_{\sigma \rightarrow 0} C_N = \lim_{\delta \rightarrow 0} C_I = C_E = 1$ 。图4给出了  $\beta$  为 2.0 和 1.5 时，修正函数随震级不确定性的变化曲线。从图可以看出：震级的不确定性越大，修正函数值越大，对分布函数的影响越大；震级的不确定性越小，观测(视)震级的分布函数  $f(x|m_{\min}, \Delta)$  越接近不考虑震级不确定性的分

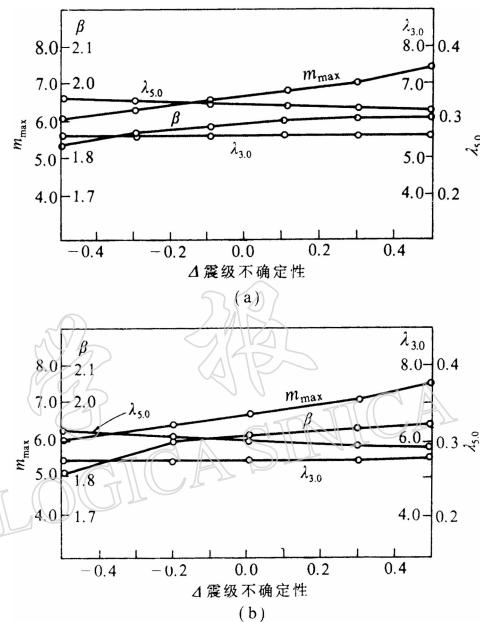


图3 最大观测震级的不确定性

对地震危险性参数的影响

(a)  $X_{\max} = 6.5$ , 公元 788 年 HI 法

(b)  $X_{\max} = 6.5$ , 公元 788 年 HN 法

布函数  $f(x|m_{\min})$ 。修正函数随  $\beta$  值的增大也在增大，也就是震级的不确定性对危险性参数的影响随  $\beta$  值的增加而增大。修正函数  $C_N$  随震级不确定性增加比  $C_I$  快得多，对同一震级不确定性， $C_N > C_I$ ，因此 HN 法比 HI 法对震级不确定性要敏感一些。由此可见，考虑震级不确定性后，其本质是使分布函数发生了变化，且这种变化与  $\beta$  值及震级不确定性成正比。实际上震级的不确定性在一定程度上也反映了该地震震级的可靠程度。

### 3.5 参数交叉影响

本文应用多参数敏感性分析方法(Rabinowitz et al., 1991)，讨论历史地震资料的不确定性和最大观测震级的不确定性的交叉影响。多参数敏感性分

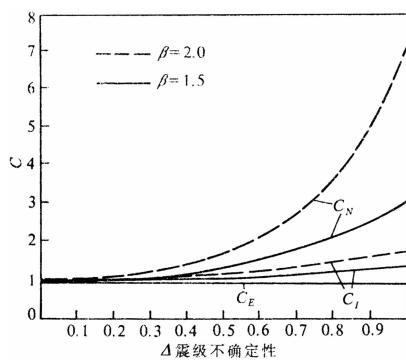


图4 震级不确定性对分布函数的影响

大观测震级的不确定性的交叉影响。多参数敏感性分

表 3 参数的设置水平

输入参数	低水平	高水平
极值资料的不确定性	0	0.5
最大观测震级	6.0(6.5-0.5) (-)	7.0(6.5+0.5) (+)

定。根据资料情况,选取参数的水平如表 3.

图 5 给出了历史地震资料的不确定性和最大观测震级之间的交叉影响。可以看出,历史地震资料的不确定性对地震活动性参数的影响程度与最大观测震级的不确定性水平设置有关,最大观测震级的不确定性取低水平(-)设置时,历史地震资料的不确定性对  $\beta$  值和地震年发生率的影响,要比最大观测震级的不确定性为高水平(+)设置时要大一些,而对  $m_{\max}$  的影响要小一些。当资料的不确定性较大时,这种差别越明显。且这种交叉影响 HN 法要明显小于 HI 法。从计算结果还可发现,最大观测震级对地震危险性参数的影响,与历史地震资料不确定性水平设置的选取关系不大。

从上面两部分的分析可以看出,对高  $\beta$  值的地震活动区以及历史上发生过强震而资料记载较差的地区,震级不确定性对地震活动性参数的影响较大。

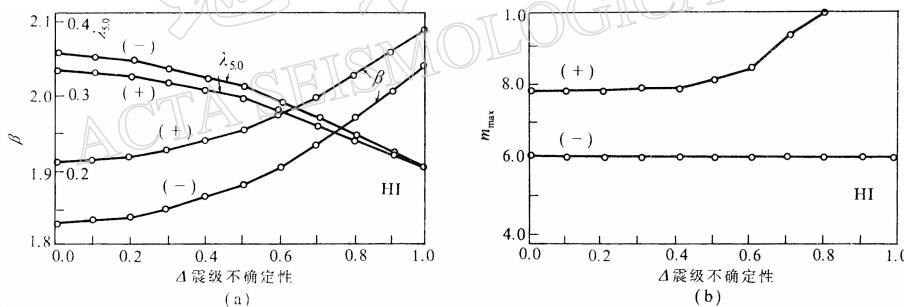


图 5 参数之间的交叉影响

## 4 结束语

从上面的分析计算中可看出,最大观测震级和资料的不确定性对地震危险性参数有比较明显的影响,特别是高  $\beta$  值地区。在实际工作中,应考虑这种影响。

(1) 本文介绍的考虑地震资料震级精度和完整性估计危险性参数的方法能有机地把历史地震与现代地震资料结合起来求  $\beta$  值,这符合现有地震目录的实际情况,具有其现实意义。

(2) 历史地震资料的不确定性对大震级地震的年发生率和  $\beta$  值有明显的影响;现代地震资料的不确定性对小震级地震发生率有较大的影响,对  $\beta$  值也有一定的影响;震级不确定性对危险性参数的影响程度与研究区的  $\beta$  值和最大观测震级的不确定性水平有关;相对而言,历史地震资料的不确定性对  $\beta$  的影响要更大一些。

(3) 考虑震级的不确定性后所得的  $\beta$  值比不考虑震级不确定性时要大一些,而地震年

析的优点能够评价一个参数的重要性是否依赖于其它参数的缺省值。当参数的不确定性能用对称的概率分布表达时,可以选取高于平均值和低于平均值一个标准差作为参数的高水平(+)和低水平(-)设

发生率则有所减小；HN法比HI法对震级的不确定性要敏感。因此，在实际工作中，应根据研究对象的重要性来选取计算地震危险性参数的方法。

(4) 地震危险性分析直接受资料源的限制。本文介绍的方法可利用研究时段前的地震资料，甚至考古地震资料来估计 $m_{\max}$ 。改善和丰富了地震资料，扩大了资料源，能得到更加准确的危险性参数。

## 参 考 文 献

- 陈汉尧, 1994. 地震危险性分析中不确定性的概率分析及其估计. 国际地震动态, (2): 17~18  
黄玮琼, 时振梁, 曹学锋, 1989.  $b$  值统计中的影响因素及危险性分析中 $b$  值的选取. 地震学报, 11(3): 351~361  
贾素娟, 鄢家全, 1993. 论地震基本参数的甄别与修定及其工程地震意义. 地震学报, 15(增刊): 629~634  
金学申, 靳艳萍, 赵军, 1992. 最大似然法在地震活动性参数估计中的应用. 国家地震局震害防御司(编), 中长期地震危险性预测研究文集. 北京: 地震出版社. 55~62  
金学申, 戴英华, 赵军, 等, 1994. 不同精度的地震资料在确定地震活动性参数中的应用. 地震学报, 16(3): 281~287  
李全林, 宋锐, 陈锦标, 等, 1991. 中国地震各时期目录汇编. 北京: 地震出版社. 25~42  
邵辉成, 陈党民, 张春生, 1992. 用不等精度的地震目录估计地震危险性. 中国地震, 8(4): 108~111  
邵辉成, 谢家树, 王平, 等, 1995. 考虑震级精度和可靠性的地震危险性估计. 地震研究, 18(3): 246~251  
张培震, 1994. 第 27 届 IASPEI 大会概述专辑. 国际地震动态, (6): 8~10  
Gibowicz G S, Kijko A, 1993. *An Introduction to Mining Seismology*. San Diego: Academic Press. 329~335  
Kijko A, Sellevoll M A, 1990. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. *Natural Hazard*, (3): 1~13  
Rabinowitz N, Steinberg D M, 1991. Seismic hazard sensitivity analysis: a multi-parameter approach. *Bull Seism Soc Amer*, 81: 796~817  
Tinti S, Mularigia F, 1985. Effects of magnitude uncertainties on estimating the parameters in the Gutenberg-Richter frequency-magnitude law. *Bull Seism Soc Amer*, 75: 1 681~1 697  
Жалковский Н Д, 1989. Закоя ловторяемост и землетрясений и проблема предвестн инов. *Гедогия и ГеоФизика*, 7: 93~99