

面波震级与体波震级、地方震震级间 的经验关系及不确定性评价^{*}

杨智娴¹⁾ 张培震²⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

摘要 利用中国大陆、台湾和中国周边 3 个地理区域内实测的 IASPEI 面波震级 M_S 、古登堡体波震级 m_b 和地方震震级 M_L ，建立了 M_S 与 m_b 、 M_S 与 M_L 之间的经验关系，那就是 $M_S = 0.9884m_b - 0.0420$ 和 $M_S = 0.9919M_L - 0.1773$ 。 M_S 与 m_b 的关系由 292 次(1964~1996 年)大陆地震、291 次(1964~1995 年)台湾地震和 170 次中国周边地震，共计 753 次事件的震级数据求得，其标准偏差为 0.445。 M_S 与 M_L 的关系由 36 次大陆地震、293 次台湾地震和 212 次周边地震，总计 541 次事件的震级数据求得，其标准偏差为 0.4673。

利用余累积分布函数的概念和方法，对不同震级区间拟合的面波震级值评价其不确定性。 M_S-m_b 关系中，取震级的不确定范围为 ± 0.25 级，在 m_b 位于 4.0~4.9 级时， M_S 取值小于 $(M_S - 0.25)$ 和大于 $(M_S + 0.25)$ 的概率分别为 17% 和 27%；位于 5.0~5.9 级时，相应概率为 34% 和 20%；而位于 6.0~6.9 级时，相应的概率为 11%~47%。 M_S-M_L 关系中，如仍取不确定范围为 ± 0.25 ，则 M_S 取值小于 $(M_S - 0.25)$ 和大于 $(M_S + 0.25)$ 的概率，在 M_L 位于 4.0~4.9 级时为 22% 和 38%； M_L 位于 5.0~5.9 级时，相应的概率为 20% 和 15%； M_L 位于 6.0~6.9 级时，相应概率为 15% 和 29%。

本研究建立的经验关系可以方便地用于不同标度震级间的归算，而文中的不确定性评价则更客观地反映了原始数据中本来存在的离散性差别，并可以一定概率水平评价这些归算的不确定性，这比通常的剩余标准差给出的不确定性范围更精细，给出的相应概率水准也更便于与地震危险性总体评定的不确定性校正接轨。

关键词 震级 经验关系 不确定性 余累积分布函数

引言

要求以一个统一的标度来度量地震大小是现代地震学研究中的重要问题。无论是地震灾害评定、地震预测研究、还是作为基础研究的地震震源参数测定，都应当有一个均一的标度表述地震的规模。

矩震级(Kanamori, Anderson, 1975; Kanamori, 1977, 1978)可以在广阔的频段内度量地震大小，不产生饱和，可以方便地反映地震造成的形变规模，因而被作为一个均匀的震

* 1997-05-20 收到初稿，1998-03-31 收到修改稿，1998-04-22 决定采用。

级标度推广使用。但是, 矩震级定义和直接测量的历史, 相对于地震记录的历史实在太短, 故当必须使用尽可能充分完整的地震资料来进行地震危险性评定和其它研究时, 就要面对不同标度震级间的相互转换问题。

在仪器记录的地震时期中, 由于台网覆盖和仪器的改善、地球精细结构认识的提高、定位方法变化以及区域性差别等原因, 形成了地震目录中的震级标度彼此不一致, 令使用者常无所适从, 需要均一化; 而多种标度向矩震级转换前, 也必须首先归一到一个统一的震级标度(如 IASPEI 面波震级); 因此, 不同振幅震级之间的相互关系在地震研究中仍是不可少的。

地震定标度的理论研究、阐述基于不同震相的振幅震级之间的定量关系(Kanamori, Anderson, 1975; Geller, 1976; Hanks, Boore, 1984; 陈培善, 陈海通, 1989; 陈培善, 白彤霞, 1991)。然而, 观测数据在不同地域、不同震级范围并非都与这些理论关系符合得很好。为保证资料的连续性, 采用研究地区观测资料拟合的经验关系作归算, 不失为有效的均一震级途径。本研究利用中国大陆、台湾和中国周边地区的面波震级、体波震级和地方震震级数据, 建立了它们之间的经验关系, 并利用余累积分布函数的概念, 估算了不同震级区间拟合结果的不确定性(McQuire, 1990, 1996; Coppersmith, 1986)。

1 资料方法和结果

本研究建立的 M_s - m_b 和 M_s - M_L 经验关系, 震级数据有以下 3 个来源: 中国大陆部分, 震级资料取自冯浩的地震目录^①。本文用作确定不同标度震级间关系的数据, 主要是该目录中 1964 年后(M_L 为 1977 年以后)的地震, 该目录中 M_L 是中国地方台网测定的地方震级; m_b 和 M_s 取自国家地震局地球物理研究所编的《中国地震台网观测报告》; 台湾地震资料采用台湾中央气象局编 1898~1995 年台湾地区地震目录^②。该目录的面波震级是 IASPEI 震级。 $M_L(s)$ 为辛在勤(Shin, 1993)推导的已考虑了深度影响的台湾地区衰减函数

$$\begin{aligned} \lg A_0(\Delta) = & -0.00716R - 0.39 (0 < \Delta < 80 \text{ km}) \\ & - 0.00261R - 0.831 \lg R - 1.07 (\Delta > 80 \text{ km}) \\ & - 0.00326R - 0.831 \lg R - 1.01 (\text{较深} > 35 \text{ km}) \end{aligned}$$

后, 由其估计的近震规模。台湾地区地震目录^②采用辛在勤近震标度 [$M_L(s)$], 将其它目录的震级做了均一处理。本文确定震级间关系的数据也是 1964 年以后的资料。中国周边地区地震目录是笔者由美国 NGDC 光盘数据编辑的^③, 其范围由中国境外延至少 300 km。北部地震多源于俄罗斯, 其它地区是 PDE 和 BJI 资料。本研究用于拟合的是 1964 年, 世界标准地震台网建立以后测定的参数(m_b 始于 1972, M_L 始于 1964), 这就能排除早期仪器记录时期资料的不一致性。以下我们分述 3 个子区和它们合并在一起的拟合结果。

1.1 M_s - m_b 关系

使用中国大陆 $m_b = 3.7 \sim 6.5$ 的地震 292 次, 用这些数据得到的 M_s - m_b 关系式为: $M_s = 0.8751m_b + 0.8168$, 标准偏差为 0.341, 拟合直线示于图 1a。图中细直线是坐标对角线。拟合结果(图中粗直线)在整个拟合区间, M_s 大于 m_b , 而差值在高震级端小、低震级端相

① 冯浩, 1996. 1900~1996 年 5 月中国 4.6 级以上地震目录。个人交流, 未发表。

② 郑世楠等, 1996. 1898~1995 年台湾地区地震目录。个人交流, 未发表。

③ 杨智娴, 1997. 中国及周边地区强地震目录。内部资料。

对大一些。

台湾地震的 M_S - m_b 数据示于图 1b, 数据点 291 个. 拟合结果: $M_S = 1.3129m_b - 1.7039$, 偏差为 0.395. 在 $m_b < 5.6$ 的区间, 拟合的 M_S 小于 m_b ; 而在 $m_b > 5.6$ 区间, 则 M_S 大于 m_b .

周边地区使用 170 次地震的数据, 拟合公式为 $M_S = 0.9540m_b - 0.0284$, 其标准偏差为 0.452. 图 1c 的数据和结果表现出所有拟合的 M_S 均小于 m_b .

上述 3 个子区拟合的 M_S 和 m_b 关系不尽相同, 部分原因是地区差别, 部分原因是资料不完整. 3 个子区并在一起拟合 M_S - m_b 关系, 可能是这一地区平均状况的良好近似, 这些数据的拟合公式为

$$M_S = 0.9884m_b - 0.0420 \quad (1-1)$$

其标准偏差为 0.445(图 1d). 这一经验关系显示两个标度的震级值在整个拟合范围几乎相等. 应予指出的是, m_b 通常在 6.5 级附近会出现饱和, 我们利用 $m_b < 6.5$ 数据(745 次事件), 用同样方法建立了一个拟合关系

$$M_S = 0.9828m_b - 0.0700 \quad (1-2)$$

其标准偏差为 0.446, 在 $m_b = 4.0 \sim 6.5$ 范围内, 它和式(1-1)事实上一致.

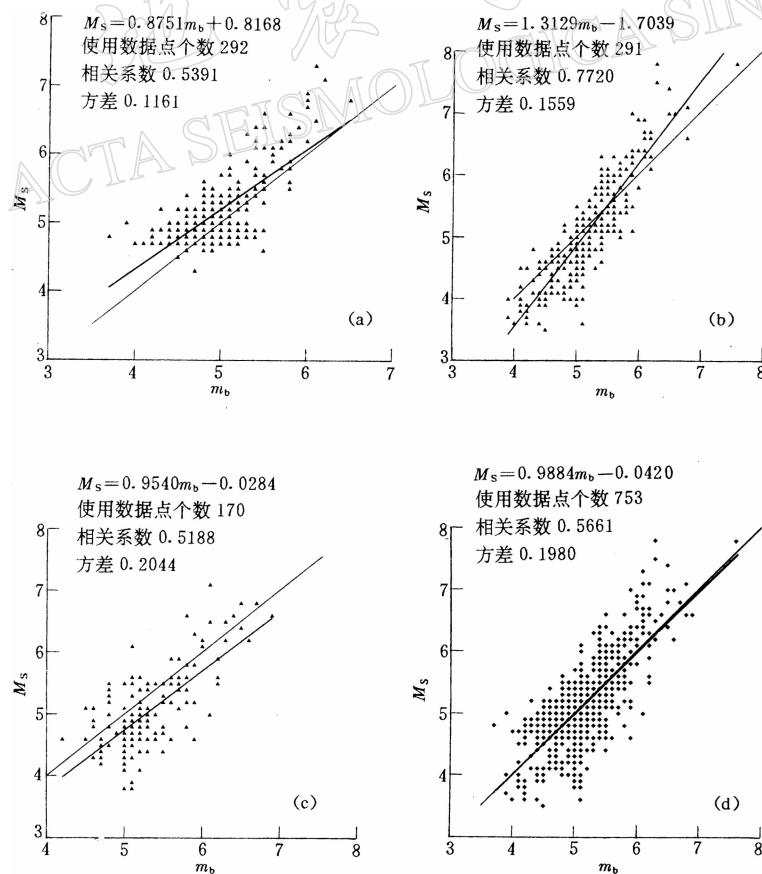


图 1 3 个子区和全区 M_S - m_b 关系

1.2 M_s - M_L 关系

大陆地区 M_s 和 M_L 数据仅 36 个, 示于图 2a. 由于数据量少, 离散较大, 难以单独建立它的关系.

台湾地区 292 次地震的 M_s - M_L 数据, M_L 的震级范围为 4.1~6.7(极个别地震在 M_L = 7 以上). 这些数据和拟合结果示于图 2b, 拟合公式为 $M_s = 1.2267M_L - 1.4987$, 偏差 0.502. 由于数据量大, 离散也相对比较大.

中国周边地区 212 次事件的数据示于图 2c, 拟合公式为 $M_s = 0.8906M_L + 0.4236$, 偏差 0.351.

3 个子区总计 541 次地震, 合并在一起的拟合图示于图 2d, 公式为

$$M_s = 0.9919M_L - 0.1773 \quad (2-1)$$

其标准偏差为 0.467. 结果显示, M_s 和 M_L 的大小, 在整个震级区间(4.0~8.1) $M_s < M_L$. 和 m_b 一样, 地方震震级 M_L 也有高震级区出现饱和的问题, 用 $M_L \leq 6.5$ 的数据(508 条)单独拟合的 M_s - M_L 关系为

$$M_s = 0.9541M_L - 0.0170 \quad (2-2)$$

其标准偏差为 0.466, 与上述 m_b - M_s 关系相类似, 这些 6.5 级以下数据建立的关系与式(2-1)亦别无二致.

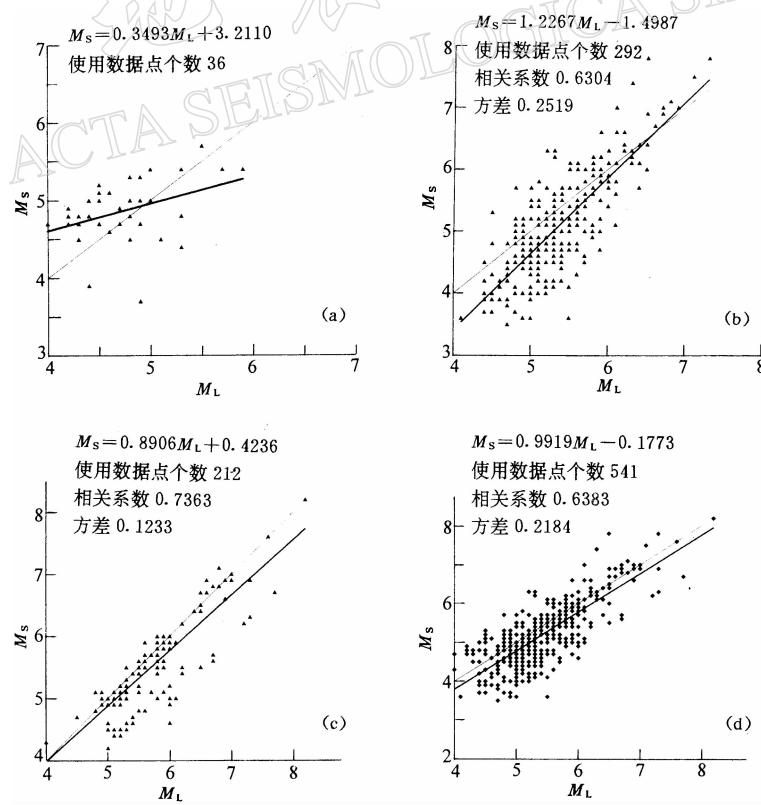


图 2 3 个子区和全区 M_s - M_L 关系

我们注意到, 中国大陆和台湾地区观测数据中, 在高震级端似有多数 M_s 大于 m_b (参

见图 1a, b), 即图中数据点位于细直线上方的现象, 这或许与 m_b 趋于饱和有关。周边地区观测的 M_s 值似乎有相对较低趋势。由图 1c 和图 2c 可看出, 多数数据点位于图中细直线下方。作为相对比较, 图 1a, b 和图 2a, b 中数据点在对角线的上方和下方差不多均匀地分布。这提示我们, 不同研究机构, 采用不同的震相读数(如 PDE 自 1975 年采用垂直向勒夫波, 中国则采用水平向最大振幅, 台湾也采用垂直向振幅)报道的震级值可能会有系统偏差。

无论如何, 我们已建立了如式(1)和(2)的 M_s - m_b 和 M_s - M_L 经验关系, 用于实际震级数据转换时, 我们还希望了解这样转换得到的 M_s 有多大的确定性。以下我们将利用余累积分布函数的概念, 评价不同震级区间内拟合的 M_s 的不确定性。

2 不确定性评价

对拟合不确定性的评价, 通常由剩余标准差给出。以本文 M_s - m_b 拟合为例, 其值为 0.445, 即使取用一倍标准差, M_s 值的浮动范围为 0.89(±0.445)震级单位, 也是很大的。实际观测的每一对 M_s 和 m_b 之差只能是“单边的”(或正, 或负, 或零), 不可能既正又负。换句话说, 即使是一倍标准差给出的拟合 M_s 浮动范围, 也远大于实际观测数据的平均离散程度, 使得在具体的震级间隔内, 这样归算的 M_s 的误差范围估计显得不够精细。因为剩余标准差是基于所有参与拟合的数据点之残差平方和求得, 也就是说, 每个数据都对拟合结果有等权的贡献。就总体说, 偏差基本对称。然而事实是, 在不同震级间隔内, 数据点对拟合线的关系是有变化的, 偏差分布(即使假定在所述及的震级间隔内拟合偏差仍是正态分布的)不一定是零均值的。这就提示我们, 在不同震级间隔上来评定拟合的不确定性可以给出更精细的评定结果。这里, 我们提出一个用逻辑树方法给出的余累积分布函数的概念, 分震级区间评定不确定性的方法。

还以 M_s - m_b 关系为例, 我们将 m_b 划分为 4.0~4.9、5.0~5.9、6.0~6.9 3 个震级间隔(7 级以上数据少, 信度低, 不作评价), 每一间隔内的数据点对拟合直线的偏离分布列于表 1。很明显, 观测数据与拟合直线间偏离(ΔM)在 1 倍标准差内的占大多数, 2 倍的次之, 而偏离在 2σ 以外者则是极少数。我们可以用不同偏离的数据个数作权来评定不确定性。假定偏离 $|\Delta m| > 2\sigma$ 的数据具有单位权重, 则 $\sigma < |\Delta m| \leq 2\sigma$ 和 $|\Delta m| \leq \sigma$ 的数据权重则依事件倍数相应给出。表 1 中 4 个震级区间内归一的权值列于表 2, 它描述的是观测的 M_s (M_s -obs) 与拟合的 M_s (M_s -fit) 之间偏离(表中用 ΔM 表示)的程度。

表 1 M_s - m_b 关系中数据分布表

m_b	数据点数	$ \Delta M \leq \sigma$	$\sigma < \Delta M \leq 2\sigma$	$ \Delta M \geq 2\sigma$
4.0~4.9	275	201	72	2
5.0~5.9	427	298	106	23
6.0~6.9	46	27	10	9
≥7	5			
总计	753			

表 2 各震级区间权数分配

m_b	$ \Delta M \leq \sigma$	$\sigma < \Delta M \leq 2\sigma$	$ \Delta M \geq 2\sigma$
4.0~4.9	0.8862	4.409×10^{-3}	0.1137
5.0~5.9	0.8830	2.963×10^{-3}	0.1117
6.0~6.9	0.801	0.0297	0.110
			0.0110
			0.089
			9.890×10^{-3}

注: 每栏中前一个数据是该区间内总权, 后一个数据是单个数据点的权

以 $M_s(\text{obs}) - M_s(\text{fit})$ (观测的 M_s 减去拟合的 M_s) 为横坐标, 其对应的余累积分布函数 CCDF (complementary cumulative distribution function) (McQuire, 1990, 1996; Coppersmith, 1986) 为纵坐标, 作出以上 3 个震级间隔的余累积分布曲线 (图 3a~c). 由这一曲线估计拟合的 M_s 不确定性, 我们既可以给定拟合 M_s 的浮动范围, 例如 ± 0.25 震级单位, 求得 M_s 取值小于 ($M_s - 0.25$) 和大于 ($M_s + 0.25$) 的概率; 也可以给定一定的分位水平, 例如 80% 和 20%, 求得相应的 M_s 最小取值和最大取值的范围. 对 $M_s - m_b$ 拟合而言, 如取 ± 0.25 为浮动范围, $4.0 \leq M_s \leq 4.9$ 区间, M_s 取值小于 ($M_s - 0.25$) 的概率为 17%, 取值大于 ($M_s + 0.25$) 的概率为 20% (图 3a); $5.0 \leq M_s \leq 5.9$ 区间, 这两个概率值则为 34% 和 20% (图 3b); $6.0 \sim 6.5$ 区间, 概率值为 11% 和 47% (图 3c).

反过来, 设定分位数为 80% 和 20%, 则以上前 3 个震级区间内, M_s 取值的不确定范围分别是 $-0.19 \sim +0.31$ 、 $-0.28 \sim +0.32$ 和 $-0.07 \sim +0.43$.

对 $M_s - M_L$ 关系, 我们用完全相同的途径估计其不确定性 (图 4a~c), 其结果与 $M_s - m_b$ 关系的结果一并列于表 3 和图 4, 不再赘述.

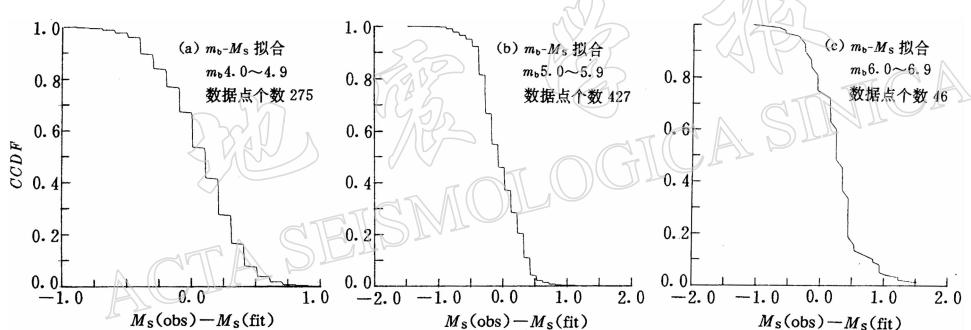


图 3 由 m_b 向 M_s 归算时, 不同震级间隔的余累积分布函数曲线

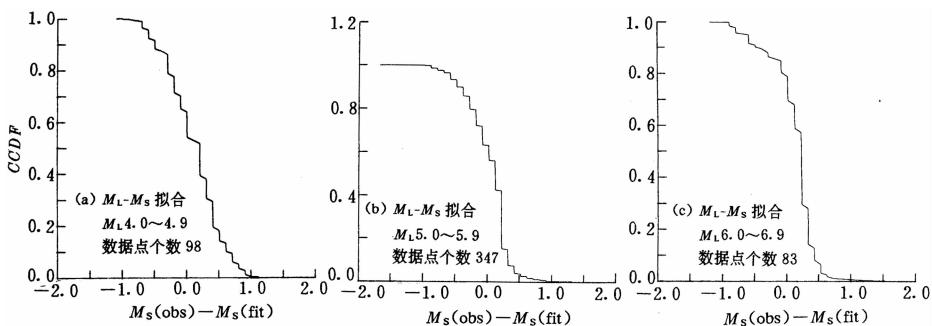


图 4 由 M_L 向 M_s 归算时, 不同震级间隔的余累积分布函数曲线

表 3 各震级区间拟合的 M_s 不确定性估计

震级区间	$M_s - m_b$ 关系			$M_s - M_L$ 关系		
	取值 $< M_s - 0.25$ 和 $> M_s + 0.25$ 的概率		对应的震级范围	取值 $< M_s - 0.25$ 和 $> M_s + 0.25$ 的概率		对应的震级范围
	分位数 80% 和 20%	对应的震级范围		分位数 80% 和 20%	对应的震级范围	
4.0~4.9	17%	27%	$-0.19 \sim +0.31$	22%	38%	$-0.28 \sim +0.42$
5.0~5.9	34%	20%	$-0.28 \sim +0.32$	21%	15%	$-0.28 \sim +0.22$
6.0~6.9	11%	47%	$-0.07 \sim +0.43$	14%	29%	$-0.07 \sim +0.33$

3 结论

关于地震震级, 尽管已有定标度的理论研究结果, 但由于仪器记录相对于研究所需要的地震记录历史来说还是太短; 以及由于仪器改进, 台网优化, 测量方法演变等原因, 致使不同时期、不同地区对地震大小的表述不统一. 矩震级概念明确, 不饱和, 又便于反映地震变形而被推广使用. 但一方面其定义和直接测量地震矩的历史太短, 另一方面, 实践中仍然有考虑不同振幅震级之间相互转换的需求.

建立了中国及周边地区 M_s - m_b 之间的经验关系 $M_s = 0.9884m_b - 0.0420$, 以其样本与拟合直线间不同偏离程度的事件数为加权依据, 建立了不确定性估计的余累积分布函数. 如取 M_s 不确定范围为 ± 0.25 震级单位, 在 M_s 为 4, 5 和 6 级 3 个震级区间内, 则 M_s 取值小于 $(M_s - 0.25)$ 和大于 $(M_s + 0.25)$ 的概率分别为 17% 和 27%、34% 和 20% 以及 11% 和 47%. 如果取分位数为 80% 和 20%, 以上 3 个震级区间内 M_s 的不确定范围则分别是 $-0.19 \sim +0.31$, $-0.28 \sim +0.32$ 和 $-0.07 \sim +0.43$.

建立了中国及周边地区 M_s - M_L 之间的经验关系 $M_s = 0.9919M_L - 0.1773$, 与上述 M_s - m_b 关系相类似, ± 0.25 震级单位的不确定性, 在 M_s 为 4, 5 和 6 级 3 个区间里, 对应的概率为 22% 和 38%、21% 和 15% 以及 14% 和 29%. 而分位数 80% 和 20% 所对应的 3 个震级区间内, 拟合的 M_s 不确定范围是 $-0.28 \sim +0.42$ 、 $-0.28 \sim +0.22$ 和 $-0.07 \sim +0.33$.

本研究建立的面波震级与体波震级、面波震级与地方震震级间的关系, 可作为中国及邻区地震震级间相互归算之依据. 而本研究提出的分震级区间估计不确定性的方法, 比总体标准偏差估算的不确定性更为精细, 从而更方便与地震危险性评定的总体不确定性估计相衔接.

参 考 文 献

- 陈培善, 陈海通, 1989. 由二维破裂模式导出的地震定标率. 地震学报, 11(3): 337~350
- 陈培善, 白彤霞, 1991. 震源参数之间的定量关系. 地震学报, 13(4): 401~411
- Coppersmith, 1986. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessment within intraplate tectonic environments. *Proceedings of the 3rd US Conference on Earthquake Engineering*. Charleston, South Carolina. 301~312
- Geller R J, 1976. Scaling relations for earthquake source parameter and magnitude. *Bull Seism Soc Amer*, 66: 1 501~1 523
- Hanks T C, Boore D M, 1984. Moment magnitude relations in theory and practice. *J Geophys Res*, 89(B7): 6 229~6 235
- Kanamori H, Anderson D L, 1975. Theoretical basis of some empirical relation in seismology. *Bull Seism Soc Amer*, 65: 1 037~1 095
- Kanamori H, 1977. The energy release in great earthquakes. *J Geophys Res*, 82: 2 981~2 987
- Kanamori H, 1978. Quantification of earthquakes. *Nature*, 332: 319~323
- McQuire R K, 1990. Demonstrations of a risk-based approach to high-level waste repository evaluations. EPRI, NP-7075, 9.1~9.16
- McQuire R K, 1996. *Frisk 88m User's Manual*. Risk Engineering, Inc. 4155 Darley Avenue, Suite A Boulder, Colorado 80303 USA
- Shin T C, 1993. The calculation of local magnitude from the simulated Wood-Ander Son seismograms of the short-period seismograms in the Taiwan area. *TAO*, 4: 155~170