

文章编号: 0253-3782(2002)02-0162-07

应力释放模型的改进及其在研究台湾 地区地震预测问题中的应用^{*}

朱守彪^{1,2)} 石耀霖¹⁾

1) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

2) 中国北京 101601 防灾技术高等专科学校

摘要 应力释放模型过去主要用于研究大范围历史大地震活动规律. 本文对应力释放模型进行了改进, 对其能否运用于区域更小、时段更短、震级更低的情况进行了探讨; 以台湾地区近百年 6 级以上地震为例的研究结果表明, 应力释放模型仍然适用. 在回溯性的地震预测检验中, 用改进的应力释放模型计算出台湾地区地震发生的条件概率强度, 并用其预测 6 级以上地震的发震时刻. 结果表明, 其预测精度优于泊松模型.

关键词 改进应力释放模型 条件概率强度 泊松模型 台湾地区

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

引言

应力释放模型(stress release model, 简称 SRM)是 Vere-Jones(1978)提出的用于研究地震活动规律的统计模型, 该模型的物理本质是弹性回跳理论. 经典的地震弹性回跳模型认为, 应力在区域内慢慢积累, 随后在地震时突然释放. 在随机过程领域, 这一概念可用跳跃型 Markov 过程模拟(Knopoff, 1971). 应力释放模型就是在 Knopoff 的 Markov 模型的基础上发展起来的. Vere-Jones(1988)将该模型应用于我国华北地区的历史地震目录, 取得了一定的结果. Zheng 和 Vere-Jones(1991, 1994)详细研究了该模型, 给出了完整具体的计算方法, 实际应用中取得了较好的结果. 尽管 Zheng 和 Vere-Jones(1991)在研究中曾将华北地区分成 4 个地震带, 联合起来求每个地震带上应力释放模型的参数, 但其并未考虑地震带之间(或各部分之间)的相互作用, 采用的仍是简单应力释放模型. 此后, 石耀霖等(1998)及刘杰等(1998)考察了该模型对人工合成地震目录的应用, 发现该模型应用于整个系统时效果较佳, 而应用于系统中空间局部地区时, 因为忽略了外区地震对该区的作用, 则效果较差. 为此, 加入各部分地震之间的相互作用对各地区地震危险性造成的影响, 提出了耦合应力释放模型(coupled stress release model, 简称 CSRM). 刘杰等(1998)将耦合应力释放模型应用到华北历史地震目录(1480~2000 年, $M>6.0$)中, 采用 AIC 判别准则, 对各种模型所得结果进行了对比分析研究, 发现耦合应力释放模型优于其它模型, 尤其突出的是显著地提高了一些主要地震前对地震发生概率的估计.

^{*} 国家重点基础研究项目(G98040706)资助.
2001-03-13 收到初稿, 2002-01-11 收到最后修改稿并决定采用.

迄今为止, 应力释放模型(SRM & CSRM)主要是对历史地震目录、大震活动进行了探讨. 是否可以将应力释放模型应用于区域更小、时段更短, 即对近百年甚至几十年、数百千米范围的地震进行分析, 并用于中期地震预报呢? 本研究将进一步改进方法, 检验其适用范围; 并尝试用计算出的研究区域内的地震发生条件概率强度预测该区域的地震.

1 应力释放模型简介

1.1 简单应力释放模型

Vere-Jones(1988)指出: 在研究区内, 假定应力水平可简化为一标量函数 $X(t)$, 其随时间的变化可表示为

$$X(t) = X(0) + \rho t - S(t) \quad (1)$$

其中, ρ 为外部构造应力定常加载率, $S(t)$ 为该区域在时间 $(0, t)$ 内全部地震造成的累积应力释放

$$S(t) = \sum_{0 < t_i < t} S_i \quad (2)$$

假定应力降只与震级有关, 这时第 i 次地震的应力释放 S_i 表示为

$$S_i = 10^{0.75(m_i - m_0)} \quad (3)$$

其中, m_i 为地震震级; m_0 为归化震级, 是一常数. 假定该区域地震发生的条件概率强度 λ 与应力水平指数相关, 即

$$\lambda = \exp\{a + b[t - cS(t)]\} \quad (4)$$

其中, a, b, c 是参数, 它们可通过对其对数似然求极大得到.

$$\ln L = \sum_{i=1}^{N(T)} \ln \lambda(t_i) - \int_0^T \lambda(u) du \quad (5)$$

其中, T 为观测时间的长度(一般假定起始时刻 $t=0$), $N(T)$ 为这段时间内地震发生的总数, t_i 为每次地震发生的时刻.

与泊松模型不同的是: 泊松模型不管应力如何, 地震发生的风险总被认为是一常数; 而应力释放模型研究了应力变化对地震发生概率的影响, 认为应力增大时, 发震概率以指数形式迅速增加.

1.2 考虑应力耦合作用的改进模型

在简单应力释放模型的基础上, 石耀霖等(1998)和刘杰等(1998)提出了耦合应力释放模型. 其物理机制是区域之间的地震有相互作用. 这样, 1 区和 2 区(假设只有两个区域)发生地震的条件概率强度 λ_1 和 λ_2 可表示为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \exp\{a_1 + b_1[t - c_{11}S_1(t) - c_{12}S_2(t)]\} \\ \lambda_2 = \exp\{a_2 + b_2[t - c_{21}S_1(t) - c_{22}S_2(t)]\} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 分别为第一个子区以及第二个子区的累积应力释放, 计算方法同式(2)和(3); $a_1, b_1, c_{11}, c_{12}, a_2, b_2, c_{21}, c_{22}$ 为模型的参数(c_{12} 为 2 区地震对 1 区的影响系数, 可为正也可以为负. 同样, c_{21} 是 1 区对 2 区的影响), 这些模型参数也可通过最大似然方法求得.

改进应力释放模型(improved stress release model, 简称 ISRM)是利用耦合应力释放模型的物理思想, 将整个体系分为内区和外区, 内区是我们研究的对象, 但要考虑内区对外

区的影响, 这时有

$$\lambda = \exp\{a_1 + b_1[t - c_1 S_1(t) - c_2 S_2(t)]\} \tag{7}$$

这里, S_1 是区内累积应力释放, $c_1 \geq 0$; S_2 为区外累积应力释放, c_2 不限; 式(7)中各模型参数的求法与式(6)中的相同. 内区一般可以取为圆形, 对于 $M \geq 6.0$ 地震, 实际优化计算表明, 其半径 r 可取为 300 km 左右.

1.3 AIC 判别准则

统计模型的优劣用 Akaike (1977) 提出的一种 AIC(Akaike 信息准则)来判别. 其方法是: 假定 $\ln L$ 是所得到的模型的对数似然值, 则

$$AIC = -2\ln L + 2k \tag{8}$$

其中, k 是模型中所采用的参量的个数. 对于不同模型计算出的 AIC 值, AIC 值最小的模型应作为最优来选择. 一般来说, 如模型的差别达到 5% 的置信水平, 这相当于 AIC 值差别为 1.5~2, 这时这两个模型就可以比较其优劣.

对于 ISRM, 总的模型参量的个数为外区 1 个加内区 3 个, 共 4 个, 即 $k=4$.

$$AIC = -2\ln L + 2 \times 4 \tag{9}$$

2 预测方法与计算结果

2.1 区域的划分与地震的选取

从物理概念上讲, 应力释放模型只有在大地震(即对系统应力水平造成显著影响的地震)条件下才适用. 研究实际资料分析也表明确实如此(刘杰等, 1998). 那么, 应力释放模型能否用于较小区域、中强地震呢? 本研究在试图用于小区域、短时段、中强震的危险性估计方面进行了一些尝试, 主要基于耦合应力释放模型的思想, 在研究方法上作了进一步地改进. 根据近年来关于应力触发和应力影的研究(Harris, 1998), 我们优选半径 300 km 的圆内为内区, 在这样的区域内, 一次 6 级地震可以造成系统的应力降低; 圆外视作外区, 外区的大地震也可以影响内区应力变化. 显而易见, 外区地震到内区的距离越近, 其对内区的影响就越大; 距离越远, 影响越小. 我们选取 1900~2000 年发生的地震, 内区震级取 $M \geq 6.0$ 、外区按 $M \geq 6.0 \times (r/300)^{3/5}$ (其中 r 为震中到内区中心的距离)选择地震.

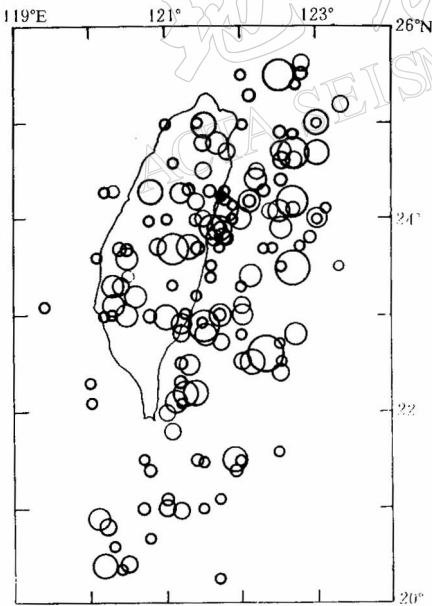


图 1 台湾地区地震活动空间分布图
(1900~2000 年, $M_s \geq 6.0$)

根据台湾地区地震活动时空规律(图 1, 2), 文中以北纬 $21^\circ \sim 25^\circ$ 、东经大致分别以 120° 、 122° 交错成 10 个点, 即 $(21^\circ N, 120^\circ E)$ 、 $(22^\circ N, 120.3^\circ E)$ 、 $(23^\circ N, 120^\circ E)$ 、 $(24^\circ N, 120^\circ E)$ 、 $(25^\circ N, 120.5^\circ E)$ 及 $(21^\circ N, 122^\circ E)$ 、 $(22^\circ N,$

122°E)、(23°N, 122°E)、(24°N, 122°E)、(25°N, 122°E). 再分别以这 10 个点为圆心、300 km 为半径的圆内作为内区(部分重叠), 圆周以外视为外区(选取区域时必须充分考虑区内有足够数量的地震, 以保证符合统计要求), 然后把耦合应力释放模型运用到这些区域. 在计算外区地震对内区的影响时, 按式(3)计算 S_2 与选择外区地震的情况类似, 根据 $M' = M/(300/r)^{1/2}$ 的形式计算地震的影响随距离的衰减.

图 3 是典型的泊松模型、应力释放模型的条件概率强度随时间的变化曲线及 $M-t$ 图. 由图可见, 在简单应力释放模型的情况下, 内区地震发生的条件概率强度随时间而增大, 但内区的地震可立即降低条件概率强度值, 震级越大, 变化的幅值也越大, 即内区的地震降低了该区地震发生的风险; 同样, 在 CSRM 的情况下, 内区地震发生的条件概率强度随着内区的地震或外区发生地震立即降低(有时也有外区地震使得内区地震发生的条件概率强度升高的现象(当 $c_{12} < 0$ 时)). 并且, 由表 1 可见, ISRM 的 AIC 值比相应区域的简单应力释放模型的 AIC 值都要小(一个例外).

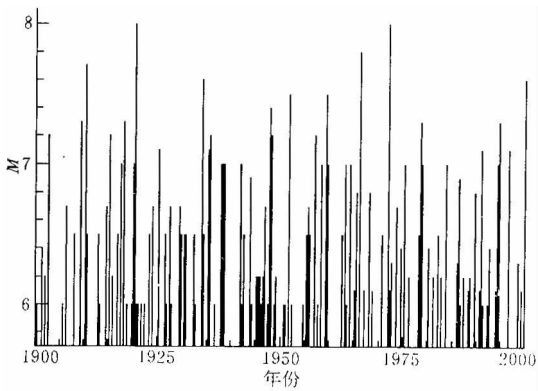


图 2 台湾地区地震活动 $M-t$ 图

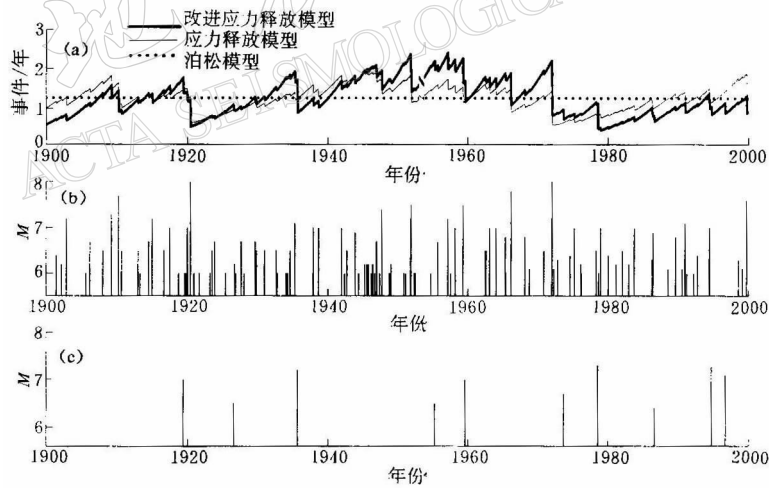


图 3 泊松模型、应力释放模型的条件概率强度随时间的变化曲线及 $M-t$ 图
(a) 泊松模型、简单应力释放模型和 ISRM 的条件概率强度随时间的变化曲线;
(b) 内区地震 $M-t$ 图; (c) 外区地震 $M-t$ 图

2.2 地震预报评分 R 值

过去的工作侧重于对应力释放模型进行理论上的研究. 由于我们选取的地震发生的空间和时间范围都比以前小得多, 因此, 可以探讨它们用于长期地震预报以至中期地震预报的可能性. 我们分别用 SRM 及 ISRM 模型计算区内和由于外区对内区影响时内区的地震

发生风险概率强度、回溯检验预报评分 R 值, 其中 R = 预报的地震数/实发地震数—预报的时段/总的时段(石耀霖, 1992). 在回溯预报检验中, 把用应力释放模型计算出的 λ 值大于泊松模型的时段视为作出预报的时段. 计算结果见表 1. 由表 1 可知: ISRM 的 AIC 值均低于 SRM 的 AIC 值, 且 ISRM 的预报评分 R 值也高于 SRM 的 R 值(仅 1 个例外).

表 1 台湾地区分别应用 Poisson, SRM, ISRM 模型计算出的 R 和 AIC 值

| 位置 | 模型 | AIC 值 | R 值 | 位置 | 模型 | AIC 值 | R 值 |
|---------------|------|---------|-------|-------------|------|---------|-------|
| 21°N, 120°E | 泊松 | 182.1 | 0 | 21°N, 122°E | 泊松 | 194.5 | 0 |
| | SRM | 178.9 | 0.067 | | SRM | 193.6 | 0.028 |
| | ISRM | 162.8 | 0.116 | | ISRM | 169.1 | 0.071 |
| 22°N, 120.3°E | 泊松 | 202.1 | 0 | 22°N, 122°E | 泊松 | 192.0 | 0 |
| | SRM | 190.8 | 0.140 | | SRM | 186.2 | 0.062 |
| | ISRM | 187.6 | 0.185 | | ISRM | 179.7 | 0.130 |
| 23°N, 120°E | 泊松 | 197.8 | 0 | 23°N, 122°E | 泊松 | 183.1 | 0 |
| | SRM | 186.7 | 0.116 | | SRM | 176.2 | 0.125 |
| | ISRM | 178.6 | 0.171 | | ISRM | 172.9 | 0.127 |
| 24°N, 120°E | 泊松 | 202.6 | 0 | 24°N, 122°E | 泊松 | 187.6 | 0 |
| | SRM | 200.1 | 0.007 | | SRM | 178.8 | 0.151 |
| | ISRM | 189.5 | 0.126 | | ISRM | 180.6 | 0.125 |
| 25°N, 120.5°E | 泊松 | 198.7 | 0 | 25°N, 122°E | 泊松 | 194.6 | 0 |
| | SRM | 193.9 | 0.133 | | SRM | 189.4 | 0.094 |
| | ISRM | 186.0 | 0.148 | | ISRM | 184.7 | 0.097 |

简单应力释放模型中 R 的平均值为 0.092, 而 ISRM 中平均预报评分 R 值是 0.130. 虽然这一 R 值不高, 但考虑到我国(1990~1998 年)年度地震预报 R 评分也仅有 0.18(Shi *et al.*, 2001),

所以, 文中的结果具有一定的实用意义.

2.3 利用应力释放模型预测地震发生时间

用应力释放模型预测发震时间的方法是: 如果 t_0 时刻模型参数(如简单应力释放模型中的 a, b, c)已根据发生的地震序列算出, 根据强度函数 λ_0 , 则可以按应力释放模型公式 $\lambda = \exp\{a + b[t - cS(t_0)]\}$ 计算出下一时刻($t_0 + \delta t$)时段内地震发生的概率, 此时由计算机生成一随机数, 根据此随机数是否小于该时段发震概率确定该时段是否发生地震. 如果发生地震, 这时

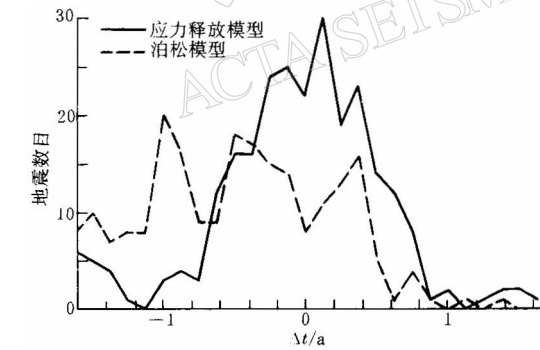


图 4 用 ISRM、泊松模型预测的发震时刻和实发地震的时刻差与预测地震数目关系图

由计算机根据该区 b 值随机确定震级大小; 如不发生地震, 再给定时段 δt . 如此继续下去, 直到产生地震为止. 类似地, 把以上过程从时刻 t_0 重复很多遍(本文中是 5 万), 用下一次地震发生时间的平均值作为预报的发震时间.

对于 ISRM, 由式(6)得

$$\begin{aligned} \lambda(t_0 + \delta t) &= \exp\{a_1 + b_1[(t_0 + \delta t) - c_1 S_1(t_0 + \delta t) - c_2 S_2(t_0 + \delta t)]\} \\ &= \lambda_0 \exp\{b_1[\delta t - c_1 S_1(\delta t) - c_2 S_2(\delta t)]\} \end{aligned} \tag{10}$$

与简单应力释放模型不同的是, 在 ISRM 中, 如在 t_0 时刻后, 外区发生地震, 则按式(2)及(3)计算 $S_2(\delta t)$ (计算应力降时随距离衰减同上), 预报地震的方法同 SRM (这时 $S_1(\delta t)$ 也仍等于 0)。

为检验该方法的预报效果, 文中对台湾地区, 时间从 1905~1995 年, 每 5 年预测一次, 并与实际发生的地震进行比较; 同时, 用泊松模型进行同样的预报检验, 结果见图 4。该图横轴表示预测的发震时刻与实际地震发生时间的差 Δt , 纵轴表示分别用泊松模型、应力释放模型预测的地震 (在相应的时间差内) 发生次数。由图可明显看出, 应力释放模型的预测结果优于泊松模型。泊松模型预测的地震发生时间与实际地震发生的时间差 Δt 的均方差是 1.40 年, 而应力释放模型预测的均方差则是 0.74 年。可以预期, 用应力释放模型的方法可更准确地预测下一次 $M>6$ 地震的发生。

3 讨论

本研究对 CSRM 的改进中, 一个关键的问题是如何评估外区大地震对本区应力调整的影响。从物理意义上讲, 地震越大, 其影响越大; 而地震离本区越远, 其影响则越小。这是一个合理的准则。考虑到空间问题的特点, 本研究选择了 $(r/r_0)^{-1/3}$ 衰减的形式 (Sokolnikoff, 1956)。在实际运算中, 我们确定 r_0 是在分别将 r_0 选取为 300, 400 和 500 km 等不同值后优化出来的结果。其中, 衰减指数 1/3 也是在分别取 1/2, 1/2.5, 1/3 和 1/4 等试验后获得的最佳结果。

理论上讲, 相同震级的不同断层类型 (正断层、逆断层、走滑断层等) 的地震造成的研究区域内的应力释放是不同的, 地震的位置和断层的走向对研究区域内部应力调整和其它地震发生的影响也是不同的。由于应力释放模型是统计模型, 无法对一次具体地震的影响进行评估, 这是它的弱点, 但统计模型可以在不了解力学细节的情况下进行总体活动构造研究, 这也是它的优点。统计模型和力学模型各有所长, 两者都有必要开展更深入的研究。如何将应力释放模型与实际的力学过程系统地结合起来, 是个有待进一步探索的问题。

本模型中预测未来地震发生时间的 Monte Carlo 实验方法, 原则上也可用于概率预测未来地震的震级。在进一步研究地震空间分布特征后, 也可能用于概率预测未来地震位置。这对强震风险估计量化研究提供了新的途径。

以上结论只对台湾地区适用, 其它区域如何尚待继续探讨。怎样把 ISRM 预测地震的方法应用到实际的地震预报中去, 仍有不少问题需要解决。ISRM 中考虑外区对内区的作用时, 加入活动构造和实际的应力场分布方面的信息, 也是一个值得研究的课题; 同时, 还可以考虑如何根据条件概率强度, 用数理统计的方法求出发震时刻和震级的数学表达方式。

4 结论

通过本研究, 可以看出改进了的应力释放模型在区域更小、时段更短、震级更低的情况下仍然适用。模型参数仍可由最大似然法求出, 曲线的形态与前人的结果一致, 由此说明它所反映出的物理本质也与实际情况相吻合。在范围更小、时段更短、震级更低的情况下, ISRM 的 AIC 值仍低于简单应力释放模型的 AIC 值, 说明在此情况之下, ISRM 仍优于简单应力释放模型; 此外, ISRM 的 R 值仍高于简单应力释放模型的 R 值, 表明 ISRM

预测地震的效能高于简单应力释放模型和泊松模型。总体来说, ISRM 优于简单应力释放模型, 且 ISRM 预测地震效能高于简单应力释放模型和泊松模型。在回溯性地震预测检验中, 用 ISRM 方法预测的发震时间比泊松模型方法预测的结果更接近于实际, 预测的精度几乎提高了一倍。

在计算过程中, 中国地震局分析预报中心刘杰研究员提供了诸多帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 刘杰, Vere-Jones D, 马丽, 等. 1998. 耦合应力释放模型的原理及应用[J]. 地震学报, **20**(3): 232~240
- 石耀霖. 1992. 地震概率预报效能评分和预报发布决策[J]. 中国地震, **8**(2): 23~28
- 石耀霖, 刘杰, Vere-Jones D, 等. 1998. 力学和统计模型结合研究人工合成地震活动性及其对预报真实地震的启示[J]. 地震学报, **20**(4): 363~372
- Akaike H. 1977. On entropy maximization principle[A]. In: Krishnaian P R ed. *Applications of Statistics*[C]. Amsterdam: North Holland, 27~41
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24 347~24 385
- Knopoff L. 1971. A stochastic model for occurrence of main-sequence earthquakes[J]. *Rev Geophys Space Phys*, **9**: 175~188
- Shi Yaolin, Liu Jie, Zhang Guomin. 2002. Performance of Chinese annual earthquake predictions in the nineties[J]. *Appl Prob* (in Press)
- Sokolnikoff I S. 1956. *Mathematical theory of elasticity, Chapter 6*[M]. New York: McGraw-Hill, 328~376
- Vere-Jones D. 1978. Earthquake prediction—a statistician view[J]. *J Phys Earth*, **26**: 129~146
- Vere-Jones D. 1988. On the variance properties of stress release models[J]. *J Statist*, **30**: 123~135
- Zheng X G, Vere-Jones D. 1991. Application of stress release models to historical earthquakes from north China[J]. *Pure Appl Geophys*, **135**: 559~576
- Zheng X G, Vere-Jones D. 1994. Further application of stress release models to historical earthquakes data[J]. *Tectonophysics*, **229**: 101~121
- Zhu S B, Shi Y L. 2001. Application of coupled stress release model to earthquake prediction[A]. *Abstracts of IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly*. Hanoi, 300~301

IMPROVED STRESS RELEASE MODEL: APPLICATION TO EARTHQUAKE PREDICTION IN TAIWAN AREA

Zhu Shoubiao^{1,2)} Shi Yaolin¹⁾

1) Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2) College of Disaster Prevention Technique, Beijing 101601, China

Abstract: Stress release model used to be applied to seismicity study of large historical earthquakes in a space of large scale. In this paper, we improve the stress release model, and discuss whether the stress release model is still applicable or not in the case of smaller spatio-temporal scale and weaker earthquakes. As an example of testing the model, we have analyzed the $M \geq 6$ earthquakes in recent about 100 years. The result shows that the stress release model is still applicable. The earthquake conditional probability intensity in Taiwan area is calculated with the improved stress release model. We see that accuracy of earthquake occurrence time predicted by the improved stress release model is higher than that by Poisson model in the test of retrospect earthquake prediction.

Key words: improved stress release model; conditional probability intensity; Poisson model; Taiwan area