# 地震活动性的细胞自动机模型:

刘桂萍 石耀霖" 马 丽

(国家地震局分析预报中心)

**摘要** 本文在二维平面上设计了一个模拟地震活动性的细胞自动机模型, 分析了模拟地震序列的地震活动性,并探讨了强震前场兆和源兆的物理机制。结果 表明,模型的地震序列很好地反映了实际地震的丛集特性、幂律关系和空间转移概 率的稳定性等特点。

主题词: 地震活动性 强震 地震预报 地震前兆 应力 模型模拟

1 引言

地震是一种复杂的现象,地震活动具有明显的非线性特征。为要从经验地震预报向物理 预报过渡,人们根据地震观测和实验结果提出了多种数理模式或模型。例如用障碍体和凹凸 体模型模拟地震过程中应力不均匀分布和能量释放的特征来研究单断层活动和单个地震的 过程;用弹簧滑块模型和多断层系统模型可以模拟多个断层共同作用产生的地震活动图象。

基于耗散系统自组织理论和思想,一些学者提出了细胞自动机模型,主要用于模拟地震序列的某些性质<sup>[1]</sup>。Held 用沙堆模型<sup>[2]</sup>、Bak 和 Chao Tang<sup>[3]</sup>、Ito 和 Matsuzakl<sup>[4]</sup>和郑捷<sup>[5]</sup>用 细胞自动机模型及 Bak 和 Kan Chen<sup>[6]</sup>用一块弹性板在一块刚性板上摩擦滑动的模型研究 了地震活动的自组织临界现象及其相应的岩石破裂和有关现象,均获得了类似于 Gutenberg-Richter 定律的幂律分布,从而十分有效地揭示了地震活动作为自组织临界现象的特征和统计规律。

石耀霖等<sup>[7]</sup>用多个非线性元件构成的平面网络系统模拟相互作用的活动断层体系。基本单元由一个 Maxwell 体和一个刚性滑块组成,代表一个孕震区。此模型考虑了断层间耦合,在破裂后各孕震区受破裂区应力释放影响的大小与距破裂区的远近有关。该模型较以前的弹簧滑块模型更接近于实际。但应用该模型必须解微分方程组,由于计算量很大,它的规模受到制约。

本文提出的细胞自动机继承了上述模型有关应力调整的特点,确定了简单的数学规律, 不需再解微分方程组,可以在较文献[7]模型大得多的规模上模拟实际地震。由于引入了合 理的力学机制,使模型更接近于实际情况。

2 细胞自动机模型

一般的细胞自动机模型,是通过简单的相同的单元(细胞)按一定的演化规则(往往也按

<sup>•</sup> 地震科学联合基金资助课题

<sup>••</sup> 中国科学院中国科学技术大学研究生院

第2期

# 刘桂萍等;地震活动性的细胞自动机模型

简单的离散值变化)来模拟复杂系统的整体特征。然而为了模拟地震的分形特征·Burriere和 Turcotte(1991)<sup>[8]</sup>也曾提出用具有不同大小分形结构的细胞单元来模拟地震过程。可是在他们的模型中应力调整的规律仍然十分简单,一个单元的应力释放引起周围所有单元的应力增加,尽管不同相邻单元的应力增加量会有所不同。

对于实际的断层网络系统,无论是有限单元法的数值模拟,还是简化的弹簧-滑块模型, 都表明一个地震的发生,固然会造成断层破裂两端邻近部位的应力增加,但也可能造成其它 某些部位特别是大体平行于发震走滑断层的其它断层上的应力减少。文献[7]曾用弹簧-滑 块网络模型分析过这种情况下应力调整的特征。基于该分析,我们提出一种新型的细胞自动 机模型。

设在二维平面上有 n 条平行断裂带,每条断裂带由 m 个独立细胞单元组成,在统一应 力场作用下发生变形。当某细胞单元的应力达到静摩擦强度时发生破裂,该单元上的应力从 静摩擦强度值降到动摩擦强度值,该断裂带上的其它细胞单元的应力升高,但该断裂带的总 应力变化为下降。其它断裂带释放等量应力,但应力降在各单元上的分布有所不同,图 1 为 应力调整示意图。设第 i 条断裂带上第 j 个细胞单元的初始应力值为 S<sub>o</sub>(i,j),静摩擦强度为 S<sub>j</sub>(i,j),动摩擦强度为 S<sub>a</sub>(i,j),应力随时间的增长率 A<sub>o</sub>(i,j)满足下列条件:

$$\sum_{j=1}^{m} S_{o}(i,j) = \sum_{j=1}^{m} S_{o}(2,j) = \dots = \sum_{j=1}^{m} S_{o}(n,j)$$
(1)

$$\sum_{i=1}^{m} A_{o}(i,j) = \sum_{j=1}^{m} A_{o}(2,j) = \dots = \sum_{j=1}^{m} A_{o}(n,j)$$
(2)

应力随时间线性增加,即在 t 时刻第 i 条断裂带上第 j 个细胞单元的应力值为:

$$S(i,j) = S_o(i,j) + A_o(i,j) * t$$
(3)

将(1)和(2)式代入(3)式可见,在任一时刻,各断裂带上的应力的总和相等。由(3)式得到:  $t = \frac{S(i,j) - S_o(i,j)}{t = \frac{S(i,j) - S_o(i,j)}}}$ (4)

$$t = \frac{1}{A_o(i,j)} \tag{6}$$

t 为第 i,j 个细胞单元的应力从 So 增长到 S(i,j)所需的时间。

令第i,j单元的应力增长到静摩擦强度所需时间为t(i,j),则:

$$t(i,j) = \frac{S_j(i,j) - S_o(i,j)}{A_o(i,j)}$$
(5)

t(i,j)的最小值为下一次地震距前次地震的时间间隔。

设某一时刻 t<sub>b</sub>,第 ib、jb 个单元上的应力 S(ib,jb)达到静摩擦强度 S<sub>i</sub>(ib,jb)时,规定该 细胞单元发生破裂,应力从静摩擦强度值降到动摩擦强度值。该单元上的应力降为 S<sub>c</sub>:

$$S_c(ib, jb) = S_j(ib, jb) - S_d(ib, jb)$$
(6)

同时释放能量 Et<sub>b</sub> 为:

$$Et_b = 1/2 * S_c^2 \tag{7}$$

规定与释放能量 Et。相对应的地震的震级为:

$$M = 1.5 log 10(Et_b) \tag{8}$$

第 ib 断裂带上其它细胞单元上的应力增高,距破裂单元越远应力增加的越多,由近到远应 力的增长量按指数衰减。即满足:

$$\sum_{j=1}^{n} S_{\epsilon}(ib,j) + \sum_{j=jb+1}^{n} S_{\epsilon}(ib,j) = \lambda S_{\epsilon}(ib,jb) \quad j=1,\dots,jb-1,jb+1,\dots,m$$
(9)  
式中  $\lambda = 0.6$ 。 $\lambda$  的大小影响着模拟地震 b 值的计算结果,即  $\lambda$  不同,大小地震的数目比例不

同。经过反复实验最后选定了入值。

第 ib 断裂带上的总应力降是:  $(1-\lambda)S_{a}(ib.jb)$ 

$$S_{c}(ib,j) = X_{o} * e^{EXP[(-|jb-j|) * \lambda]}$$
(10)

将(10)式代入(9)式得到:

$$X_{o}\left(\sum_{j=1}^{jb-1} e^{-\lambda(jb-j)} + \sum_{j=jb+1}^{m} e^{-\lambda(j-jb)} = \lambda S_{c}(ib \cdot jb)$$
(11)

模型规定各断裂带上的总应力降相等。即第i条断裂带(i≠ib)上的总应力降为:

$$\sum_{j=1}^{\infty} S_c(i,j) = (1-\lambda) * S_c(ib,jb)$$
(12)

第i,j个细胞单元上的应力降由下列公式得到:

$$S_{c}(i,j) = X_{o}i \star e^{EXP(-\lambda|j-jb|)}$$
(13)

式中 λ*i*=λ/(|*j*-*jb*|+1) 将(13)式代入(12)式得到:

$$X_{oi}\left(\sum_{j=1}^{jo}e^{EXP(-\lambda_i(jb-j))}+\left(\sum_{j=jb+1}^{m}e^{EXP(-\lambda_i(j-jb))}\right)=\lambda S_c(ib,jb)$$

由此式求出 X。参数,即可由(13)式求得各细胞单元上的应力降。

上式中λ的大小对模拟地震的 b 值的计算结果有影响。应力调整示意图见图 1:



- 图1 模型中第4条断裂带上第40个细胞单元 破裂后的应力降分布。横轴为细胞单元序 号,8条水平方向的曲线代表8条断裂上的 应力变化,各自对水平线的偏离代表应力 的调整值。曲线上升,应力增加,曲线下降, 应力减少。
- Fig. 1 Distribution of stress drop of the 40th cell unit along the 4th fault band in the model after fracturing.

一个细胞单元破裂后,同一断裂带 上其它细胞单元上的应力升高,其中某 些细胞单元会因此达到静摩擦强度,这 样一个细胞单元破裂后有可能触发同一 断裂带相邻细胞单元发生连破。将同一 时刻同一断裂带上的多个相邻细胞单元 的破裂看成一个地震,该地震释放的能 量 E 为各破裂单元释放的能量之和:

E=1/2\*(S<sup>2</sup><sub>ib</sub>+…+S<sup>2</sup><sub>ibk</sub>) (14)
 k为同时发生破裂的相邻细胞单元的个数。

一次地震发生后,将调整后的应力 值作为初值,此后继续随着时间线性增 长,直到某个细胞单元发生破裂。整个模 拟过程即为这个过程的不断重复。

从以上模型得到一条模拟地震目录。计算该地震序列的 b 值、M-T 图、 logN-M 图及空间转移概率。

定义第i条断裂带上第j个细胞单元在t时刻的应力指标X(i,j)为:

 $X(i,j) = (S(i,j) - S_{\alpha}(i,j)) / (S_{j}(i,j) - S_{\alpha}(i,j)) * 100\%$ 

X(i,j)越大,该细胞单元上的应力就越接近静摩擦强度。当X(i,j)>90%时,我们认为 该细胞单元处于高应力状态。设处于高应力状态的细胞单元的总数为N<sub>b</sub>。当N<sub>b</sub>值较高时, 处于高应力的细胞单元较多,整个系统处于高应力状态;反之则认为系统处于低应力状态。 高应力点集中的区域认为是高应力区。高应力单元的数量及其分布的变化反映了整个系统的应力场随时间的变化。

3 计算结果

本文中的模型设有 8 条平行断裂带,每条断裂带上有 79 个细胞单元。其静摩擦强度是 9.0 到 11.0 间的随机数组,动摩擦强度是 7.0 到 9.0 间的随机数组。平均动摩擦强度是平 均静摩擦强度的 80%。细胞单元破裂后的应力降 Sc 在 0.0 到 4.0 之间。上述模型的地震目 录的绝对时间 t 从 0.0 到 120.0。最大地震震级为 2.6,共有 12.000 余个模拟地震。

取时间 0.0-120.0 作为计算窗口,用最小二乘法计算模拟地震的 b 值(图 2)。图中 b

值最大变化幅度为 0.6.均方差在 0.1 左右。可见 b 值随时间的变化起伏是较 明显的。图 3 为 0.0-20.0 时间内的 logN-M 曲线。曲线在 M0.1 到 M2.3 之间比较接近直线.即地震个数与震级 间存在着幂律关系。

我们定义模拟地震在各断裂带间的 空间转移概率<sup>[9]</sup>为:

$$P\{i/j\} = N(i/j) / (\sum_{i=1}^{m} N(i/j))$$
  
$$i, j = 1, \cdots, m$$

等式左端表示第j条断裂带上发生地震 后,第i条断裂带上随后发生地震的概



率;右端分子表示第;条断裂带上发生地震后第;条断裂带紧跟着发生地震的总数,分母表示第;条断裂上的地震总数。利用转移概率可以研究各断裂带间的地震活动的相关性。

取不同时间、震级范围计算在时间 0-120.0 内的地震序列在各断裂带间的空间转移概 率(见表 1),结果表明模拟地震的转移概率不受震级范围的影响,在各时间段内基本保持不 变。

表1	模拟地震的转移概率分布(第)	一个数是平均转移概率	,第二个数为均方差)

新	1	2	3	4	5	6	7	8
1	22.0.9	11.0.4	9.0.5	8.0.3	9,0.4	10,0.5	10.0.4	17,0.6
2	17.0.8	19,0.7	10.0.4	9.0.3	8,0.6	8,0.7	11.0.6	15,0.9
3	16.0.8	11,0.7	15,0.8	10.0.6	8,0.5	11,0.6	9,0.5	16,0.7
4	14,0.8	10,0.7	9,0.8	17.1.0	11.0.8	10,0.8	13,0.5	14.1.0
3	15.0.8	11,0.7	9,0.3	10,0.6	15,0.7	10,0.6	10,0.9	17,0.9
6	14,0.9	10.0.6	11,0.7	9,0.7	9,0.6	15,1.0	13,0.7	14,0.9
7	16.1.0	12,0.8	11,0.5	9,0.5	8,0.8	11.0.4	16,0.7	14.0.8
8	15.0.8	12,0.8	9.0.7	7.0.5	10,0.5	10,0.5	11.0.5	21.0.5

为更详细地观察模拟地震的活动性,将时间 9-10 间的地震序列作为一个窗口,进行更 细致的研究。在t=9.03,9.6,9.8,9.96时发生了4个1.8-2.4级较大模拟地震,每个地震



earthquakes during time t=0-20.

地震带间的转移概率。

在以前的同类二维模型中,规 定的变化规则比较简单,主要从数 学上模拟实际地震的一些特征。在 本模型中引入了复合断裂带,按照 力学原理设计应力调整规律,使每 个细胞单元都具有各自的力学特 性。由于合理地引入了力学概念,本 模型较以前的同类模型具有更清楚 的力学意义,更接近实际情况。

然而每个实际的地震活动带是 一个平面,在强震孕育过程中,这个 平面上的地震图象有着千姿百态的 变化。如果将本模型中的断裂带展 成平面,使模型成为一个三维立体 的系统,更细致地模拟实际地震带

上的地震活动性,可使细胞自动机更接近实际情况。 感谢耿鲁明、陈棋福对本文的支持。

前地震活动都有一个频度由小到大,震级由低 到高的过程,表现出明显的丛集特性。各条带上 的地震也有明显的丛集特性,地震频度与震级 间有较明显的线性关系。由于篇幅所限,此处没 有给出计算结果。统计时间 9-10 间每个地震 前的高应力点的个数随着时间而变化(见图 4)。

#### 讨论 4

纵观上述计算结果,由本文的细胞自动机 模型得到的模拟地震序列具备了丛集特征和幂 律关系,在不同时间内计算各个震级范围内模 拟地震空间转移概率,计算结果表明具有一定 的稳定性,不受时间范围和震级范围的影响。这 说明该细胞自动机模型基本上具有实际地震最 基本的特性。这反映出在给定力学模式的情况 下,地震的空间转移概率保持稳定。这会使以往

的以震报震的内容更加丰富。可将较低震级地震的转移概率外推到强震,从而得到强震在各



图 4 9-10 时间内模型中高应力点的个数随 时间的变化

Fig. 4 The variation of the number of high stress points in the model during time t=9-10.

(本文1992年10月13日收到)

### 参考文献

- 1 李升东,陆远忠. 地震活动性与动力学模型研究进展. 世界地震译丛, 1992, (3): 1-4
- 2 Held G. A., et al. Experiment Study of Critical-Mass Fluctuations In an Envolving Sandpile. Physics Reviews Letters, 1990,65(9) : 1120-1123
- 3 Bak, P. and Tang, C. Earthquakes as a Self-organized Critical Phenomenon. J. G. R., 1989, 94 (B11)
- 4 Ito, K. and Matsuzaki, M. Earthquake as Self-organized Critical Phenomenon. J. G. R., 1990, 95(6) : 6853-6860
- 5 郑捷. 岩石反平面剪切断纹扩展的 2-D 自动机模型. 中国地球物理学会年刊,1991:221
- 6 Bak, Per and Kan Chen. Self-organized Criticality. Scientific American, 1991, 264(1): 26-33
- 7 Shi,Y., Geng,L., Zhang,G., Non-linear Dynamic Modeling of Earthquake Prediction, in Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena 81-90, eds. W. I. Newman, A. Gabrielov, and D. L. Turcotte, Geophysical Monograph, 83 IUGG
- 8 Barriere, B. and D. L. Turcotte. A Scale-invariant Cellular-automata Model for Distributed Seismicity. Geophys. Res. Lett. 1991, 18(11) : 2011-2014
- 9 朱元清,石耀霖. 地震活动性研究中的非线性动力学模型. 地球物理学报,1991,34(1):20-31
- 10 马丽,高旭.大同一阳高震群前兆现象的综合分析.地震,1990,(4):45-57

## A CELLULAR AUTOMATION MODEL OF SEISMICITY\*

Liu Guiping, Shi Yaolin\*\* and Ma Li

(Center for Analysis and Prediction, SSB, China)

### Abstract

In this paper a 2-D cellular automation model of seismicity is designed, the seismicity of the synthetic earthquakes is analyzed and the physical mechanisms of field precursors and source precursors before a strong earthquake are discussed. The results show that the clustering, frequency-magnitude power law relation and spatial transfer probability of synthetic earthquakes are consistent with the actual earthquakes.

Subject words: Seismicity, Strong earthquake.Earthquake prediction, Earthquake precursor, Stress, Model simulation

<sup>\*</sup> This study is supported by the Joint Seismological Science Foundation.

<sup>\*\*</sup> Graduate School, Chinese Sciences and Technology University, Academia Sinica.