

# 三维大型 CA 的“地震”能量-频度、时空分布<sup>\*</sup>

刘长海 陈军 凌学书

(中国合肥 230031 安徽省地震局)

**摘要** 设计了  $200 \times 200 \times 10$  网格的三维大型地震细胞自动机模型, 生成了 94 304 个“地震”事件。结果表明, 对于能量-频度的分形关系小地震和大地震有不同的无标度区; 较大地震容易在相对较短时间、较近距离内相互互应地发生。

**主题词** 地震孕育 分形 细胞自动机 能量 频度

## 引言

Bak 和 Tang(1989)使用细胞自动机(CA)模型运用自组织临界(SOC)概念来描述地震这一复杂现象的演化。这种模型中的破坏事件统计上是分形的, 它与 Gutenberg-Richter 的地震震级-频度关系式相似。国内对 CA 的研究也取得了一些可喜成果(郑捷, 1993; 陆远忠, 吕脱军, 1994; 高原, 刘昭军, 1995)。

SOC 概念适用于大的相互作用系统。为了研究统计特性, CA 需要大型的网格; 天然地震是发生在三维空间的地壳内。显然, 三维的地震 CA 模型比二维模型更接近真实情况。故此我们设计了  $200 \times 200 \times 10$  总计为 40 万个网格(细胞)的三维大型地震 CA 模型, 并进行了长时间运行, 试图从其结果中探求对天然地震活动特征的启示。

## 1 模型和结果的初步分析

本模型网格的划分, 水平方向( $x, y$ )和垂直方向( $z$ )分别为 200, 200 和 10; 每个细胞的初始能量是随机分布的(0 ~ 5 个粒子); 输入方式是每个时间步长随机的选择细胞输入 1 份能量(1 个粒子); 每个细胞的破裂阈值是相同的, 即阈值 = 6, 能量剩余值为 0; 细胞破裂后其能量传播采用近邻原则, 向 6 个方向传播的能量均为 1 份; 边界的能量逸出作为整个系统的能量耗散; 1 个时间步长内细胞破裂的总个数作为该地震事件的能量  $E$ 。

长时间的运行, 已输入了 500 000 个粒子(模拟时间长度  $t=500 000$ ), 生成了 94 304 个地震, 最大的一次地震  $E=1 112$ 。我们用下式:

$$\lg N(\geq E) = a - \tau \lg E \quad (1)$$

研究能量分布问题。对本模型,  $E$  与破裂体等效半径  $r$  的关系有  $E \approx r^3$

\* 1996-08-02 收到初稿, 1997-01-21 收到修改稿并决定采用。

故可写出分形关系式

$$N \propto E^{-\tau} \propto r^{-3\tau} \propto r^{-D} \quad (2)$$

显然, 分数维  $D = 3\tau$ .

图 1 为不同时间段内  $E$  与  $N(\geq E)$  的关系, 左图起始时间均为  $t=1$  而截止时间不同, 右图为起始和截止时间不同但时间长度均为 100 000,  $E$  轴的右端点为本模型最大地震的极限值  $E=400 000$ . 从图中可明显看出, 小地震和大地震有不同的无标度区; 随着时间的增长, 小地震的  $\tau$  值逐步减小、大地震的  $\tau$  值逐步增大、无标度区小地震的上限和大地震的下限亦增大, 并都渐渐趋于稳定.

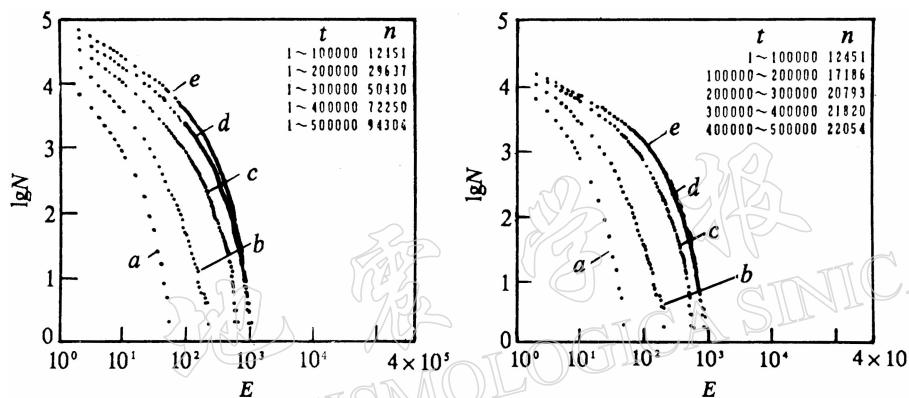


图 1 不同时间段内能量  $E$  与频度  $N(\geq E)$  的统计分布.

$t$  为时间,  $n$  为地震个数. 右图上方  $d$  和  $e$  两条点迹几乎重合

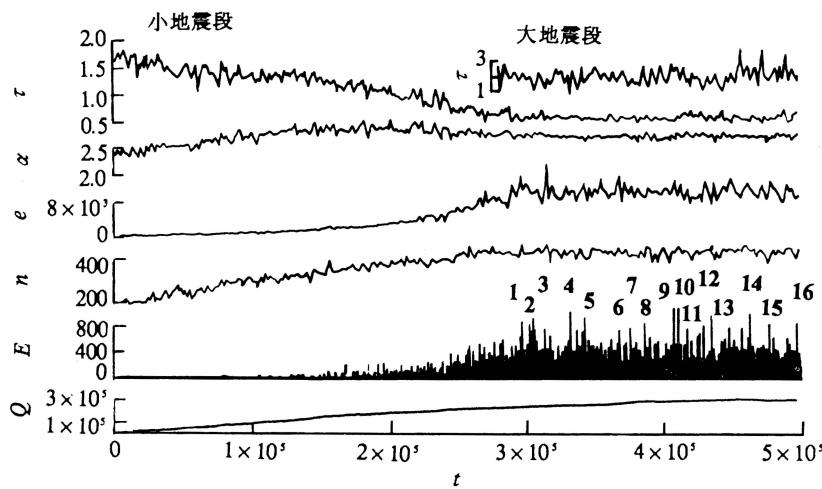


图 2 大小地震  $\tau$  值, 小地震  $a$ ,  $e$ ,  $n$  值, 及  $E$ ,  $Q$  值的时间分布.

1~16 为  $E > 800$  的地震标号

对  $t=1 \sim 500\,000$  时段, 有小地震 ( $E \leqslant 100$ )  $\tau \approx 0.73$ , 大地震 ( $E \geqslant 130$ )  $\tau \approx 3.5$ . 对  $t = 300\,000 \sim 400\,000$  和  $t = 400\,000 \sim 500\,000$  时段, 有小地震  $\tau \approx 0.61$ 、大地震  $\tau \approx 3.2$ .

图 2 为由等时间窗长 2 000 滑动计算的小地震 ( $E \leqslant 100$ ) 和大地震 ( $E \geqslant 110$ )  $\tau$ 、小地震  $a$ ,  $e$ ,  $n$  值, 以及  $E$ ,  $Q$  值随时间的分布.  $e$  为窗内  $E$  之和,  $n$  为窗内地震个数,  $Q$  为粒子总数(自  $t=0$  开始的输入—逸出). 从图 2 可看出, 当  $t$  达到 286 000 后, 系统内总能量  $Q$  长趋势相对平稳, 小地震的  $a$  值和  $\tau$  值比较稳定,  $\tau$  的平均水平为 0.62; 大地震  $\tau$  值波动较大, 平均水平为 1.8.

图 3 为  $E > 400$  的地震震中平面分布. 从图 2、图 3 可以看到, 较大地震容易在相对较短期间内在较近距离相互对应地发生, 最典型的如标号为 1 与 2、4 与 5、6 与 7、9 与 10 的“地震对”. 我们以  $\Delta t$  和  $\Delta S$  分别表示相邻较大地震时间间隔和震中的水平距离, 以  $1/\delta t$  ( $1/4 \overline{\Delta t}$ ) 和  $1/\delta S$  ( $1/4 \overline{\Delta S}$ ) 分别作为统计时间间隔和空间间隔分布的单位. 从图 4 给出的  $\Delta t$ 、 $\Delta S$  及  $\Delta S < 3 \delta S$  的  $\Delta t$  统计分布可以看出, 落在小间隔区的, 即  $\Delta t \leqslant 3 \delta t$  的占优势分布.

图 5 为  $t=496\,747$ 、 $E=888$  的一次“大地震”前后震中周围平面  $50 \times 50$  网格内垂直

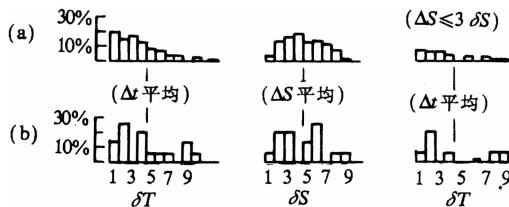


图 4 较大地震的时间间隔  $\Delta t$ 、空间间隔  $\Delta S$  和  $< 3 \delta S$  的  $\Delta t$  的统计分布

- (a)  $E \geqslant 400$ , 地震个数 260;
- (b)  $E \geqslant 800$ , 地震个数 16

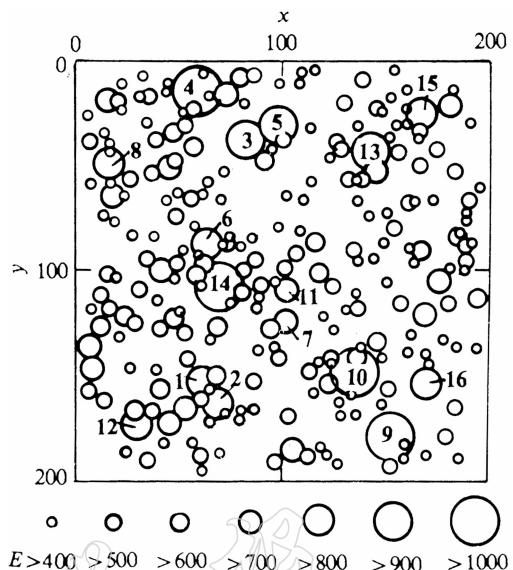


图 3 较大地震的震中平面分布.

$t$  为  $1 \sim 500\,000$

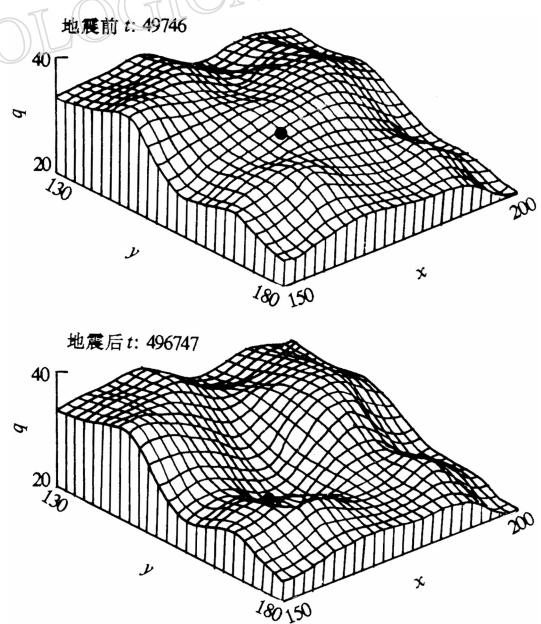


图 5 1 次大地震前后震中周围平面  $50 \times 50$  网格内垂直向粒子总数的分布.  
地震标号为图 2 和图 3 中的 16;  
 $t$  为 496 747,  $E=888$ ; ● 为震中

向粒子总数  $q$ (平滑后)的分布. 地震发生在能量分布较高地区, 震后震中附近能量降低.

## 2 结论与讨论

本模型的“地震”时间序列(无余震)和平面分布与天然地震的图象是比较相似的.“地震”的能量  $E$  和频度  $N$  的分形关系, 小地震和大地震有不同的无标度区, 即在  $\lg E$ - $\lg N$  图中高震级端出现低头现象, 这和许多作者注意到的天然地震震级-频次的  $G-R$  式在高震级端往往出现低头现象相似. 本模型中“地震”的破坏是三维破裂区. 从结果可容易看出: 深度方向存在大震易发层,  $E \geq 600$  的较大“地震”均发生在  $z$  方向的中间层即 4, 5, 6 层内, 表明大小“地震”的几何约束不同; 一个“地震”事件的记录  $E$  值越大, 边界处能量逸出(尤其是  $z$  方向)也越大, 而每一份逸出的能量都意味着可能减少细胞进一步多米诺骨牌式破裂的机会, 致使该事件最终记录的  $E$  值远远没能达到足够大. 这可能就是引起高震级端出现低头现象的原因.

较大“地震”容易在相对较短期间、较近距离内相互互应地发生, 这与邢台(1966 年 3 月)-河间(1967 年 3 月)、海城(1975 年 2 月)-唐山(1976 年 7 月)、固镇(1979 年 3 月)-溧阳(1979 年 7 月)等“地震对”的相互互应情况相似.

由本模型推测天然大地震孕育、发生和可能的前兆现象的演化过程可能是:

孕育阶段——能量从未来震源区周围向震源区传递, 前兆现象亦由周围向震源区迁移, 各方向能量的差异导致前兆现象的差异;

地震发生——能量从震源区向周围扩散, 前兆观测手段可能出现震后效应.

## 参 考 文 献

- 高原, 刘昭军, 1995. 随机性细胞自动机的动力学含义. 中国地震, 11(1): 8~13  
 陆远忠, 吕悦军, 1994. 带断层的细胞自动机模型和算法复杂性. 地震学报, 16(2): 183~189  
 郑捷, 1993. 非线性科学方法和地震机理实验研究进展. 地震科学中的非线性问题. 北京: 地震出版社. 137~169  
 Bak P, Tang C, 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J Geophys Res*, 94(B11): 15 635~15 637