

# 带断层的细胞自动机模型及算法复杂性\*

陆远忠 吕悦军

(中国北京100085国家地震局地壳应力研究所)

## 摘 要

用带断层的细胞自动机模型模拟地震活动,得到一些具有普适性的结果.证实地震活动具有某些有序性,说明断层的存在及相互位置都对地震活动总体特征有明显的影响,并用自组织临界状态理论解释了模型各演化阶段的特征,最后用算法复杂性分析了模型所产生的序列,初步表明算法复杂性 AC 可以用作地震活动图象及其演化的研究.

**关键词** 细胞自动机模型; 算法复杂性; 自组织临界状态; 演化; 断层

## 1 前 言

地震活动某些指数律、幂律关系的存在,如地震-频度关系的 G-R 公式、余震活动的加森公式、地震破裂区尺度与频度的幂律关系等,说明地震活动具有时-空上的某些有序性(Kanamori and Anderson, 1975; Bak *et al.*, 1988), Bak 和 Tang 指出,这些有序性是地震活动体处于自组织临界状态的结果,即地震活动体是一个开放的耗散系统,由于组成系统的各单元之间的相互作用(注:这种单元之间的作用规律即是自组织),从系统外输入的能量被吸收和耗散掉,使系统永远不会达到平衡态,系统组织永远处于一个临界状态,即系统的能量在其一个临界值附近呈无规律的变化. Bak 和 Tang (1989), Chen 和 Bak (1991), Ito 和 Matsuzaki (1990), Sornette 和 Sornette (1989), 郑捷 (1992), 伊东敬佑 (1990) 等用细胞自动机模型模拟的地震活动,得到与实际资料一致的某些幂函数规律,并用自组织临界状态理论解释了震中的空间分布及大地震之间的时间间隔. Schuster (1989) 将算法复杂性 AC 值引入时间序列的分析研究,吕悦军和陆远忠 (1993) 将它用于地震活动的研究,其最大优点是可以用于非等时的高维离散系统. 本文在细胞自动机模型中引入了单断层,共线、平行或斜交的双断层的存在,研究地震孕育和破裂发生的规律,并用算法复杂性 AC 值来定量表征地震活动性的变化. 文中“地震”、“地壳块体”、“应力应变”、“地震破裂”等用词,均指的是细胞自动机模型中相应的模拟量,而不是真实的物理概念. 不要把本文的结果与实际的地壳应力应变和地震活动研究相混淆.

\* 1992年9月29日收到初稿,1993年3月9日决定采用.

## 2 带断层的细胞自动机模型

弹簧-滑块模型是一个重要的地震力学模型,它广泛地应用于地震活动的研究中.这种模型将断层活动抽象为单纯的力学过程,用弹簧蓄能、滑块运动释能来反应地震的应力积累与释放过程.这类模型可以具有不同的摩擦定律、弹性系数和弹性规律、初态、加载方式和弹簧、滑块组合方式(李东升、陆远忠,1992). Ito 和 Matsuzaki (1990)将该模型表述如下:用板簧将元件连结到一个刚性板上,每一元件由4个螺旋弹簧与相邻元件相连,元件所受到的力为弹簧力和元件与运动的平板的摩擦力之和,当运动平面使某一元件的弹性力之和超过静摩擦力时,该元件就相对于运动平面滑动,滑动的元件所受板簧之作用力降为零,并通过螺旋弹簧将力传给四邻,若导致其中某一元件的弹性力之和超过该元件的静摩擦力时,该元件产生滑动.重复上面过程,直至所有元件上的弹性力都小于静摩擦力时,则一次连锁滑动终止,即相当于发生一次地震.地震的大小可由一次连锁滑动过程中滑动元件数目来代表.最初滑动的那个元件位置即代表震中.为了在该模型中模拟断层的存在,在二维滑动元件的矩阵中,选择沿一线段分布的确定个数的元件,元件数可代表断层长度,使它们与运动平面之间的静摩擦力比其它元件小,从而作用其上较小的弹性力就足以使其超过静摩擦力而滑动.

我们作出细胞自动机模型,对上述弹簧-滑块模型进行计算机模拟.把一平面分成  $N \times N$  个方块矩阵(元胞),矩阵中位置  $(i, j)$  代表元胞位置,  $Z_k(i, j)$  表示  $k$  时刻  $(i, j)$  元胞上弹性力(取离散整数),阈值  $Z_c$  相当于滑块原件上的静摩擦力.本文中元胞自动机的演化规则规定为

$$\begin{aligned} \text{当 } Z_k(i, j) \geq Z_c \text{ 时 } \quad & Z_{k+1}(i, j) = 0 \\ Z_{k+1}(i \pm 1, j) &= Z_k(i \pm 1, j) + 1 \\ Z_{k+1}(i, j \pm 1) &= Z_k(i, j \pm 1) + 1 \end{aligned}$$

规定一般情况元胞阈值  $Z_c = 4$ ,在断层上的元胞阈值  $Z_c = 3$ .本文分别取无断层、单断层和不同位置的双断层的细胞自动机模型进行研究.取64列 $\times$ 64行元胞系统(受计算机能力限制).开始时,元胞  $(i, j)$  随机放置0, 1, 2, 3离散值(断层上放置0, 1, 2),相当于地壳块体中应力应变分布的无序状态.在时刻  $t_1$ ,我们随机选取一个  $Z$  值为3的元胞  $(i_0, j_0)$  (断层上选  $Z$  值为2的元胞),使之加1,即

$$Z_1(i_0, j_0) = Z_0(i_0, j_0) + 1$$

随后按照上述规则进行演化.直至所有元胞上的  $Z$  值均小于其阈值  $Z_c$ ,一次演化过程结束,即作为一次地震,地震大小  $M$  等于一次演化过程中  $Z$  值大于  $Z_c$  值的元胞的总数目,  $(i_0, j_0)$  为震中.在该演化后的  $Z$  值分布格局上,重复上面过程,进行下一次演化,如此类推,这样就得到一个地震序列.

本模型反应出一种由许多相互作用的组元构成的复合系统,自然地向着一种临界状态进化,小事件引起的连锁反应,能对系统中任何数目的组元产生影响,小事件与大事件的发生起因于同一种机制.开始只发生小地震,最终进化到既发生小地震又发生大地震的临界状态.整个演化过程可分为三个阶段:第一阶段为只发生小地震的初始阶段;第二阶段为增长阶段,即为向临界状态进化过程;第三阶段为自组织临界状态.

选择一定数目的地震为窗长和步长,计算地震序列的平均震级的变化,如图1所示.图2表示  $N(Z)-N$  图,  $N$  为地震次数,  $N(Z)$  为每一次地震发生前  $Z(i, j)=3$  的元胞总个数(相当于应力集中点的点数).图3是对有断层状态下模型所发生较大地震震中分布图.以上三图均取无断层、单断层和不同位置的双断层的数类情况作对比.所得结果讨论如下:

### 2.1 关于平均震级 $\bar{M}$

(1) 图1是取一定地震个数(如200)为窗长和滑动步长(如10)所作的平均震级变化曲线.从图中可以看出,随着时间的增长,  $\bar{M}$  曲线很好地反映出三个演化阶段.在第一阶段,  $\bar{M}$  很小,大体稳定在一定值,它说明此时系统只发生小地震,表示自组织还不明显;第二阶段  $\bar{M}$  迅速增长,自组织作用加强,有序性增加,系统向临界状态进化;第三阶段  $\bar{M}$  在

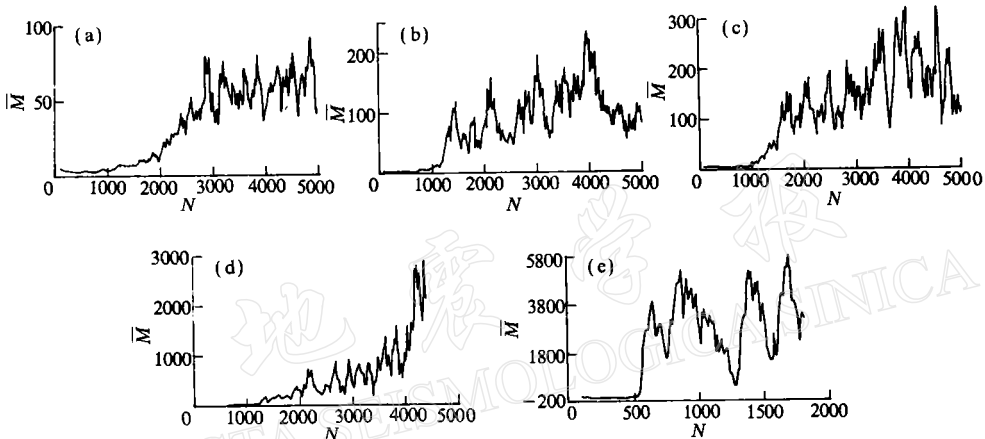


图1 模型的平均震级  $\bar{M}$  变化曲线

(a)无断层, (b)单断层, (c)共线双断层, (d)平行双断层, (e)斜交双断层

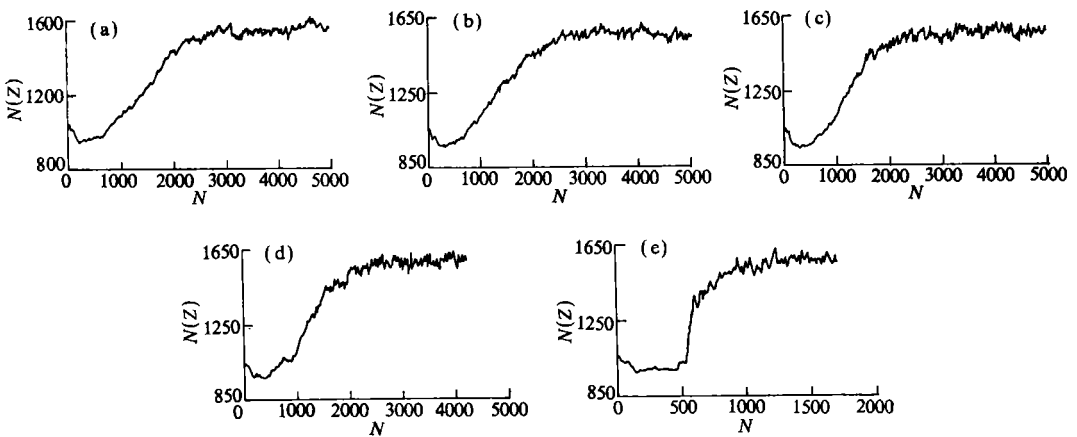


图2 模型的  $N(Z)-N$  图

(a)无断层, (b)单断层, (c)共线双断层, (d)平行双断层, (e)斜交双断层

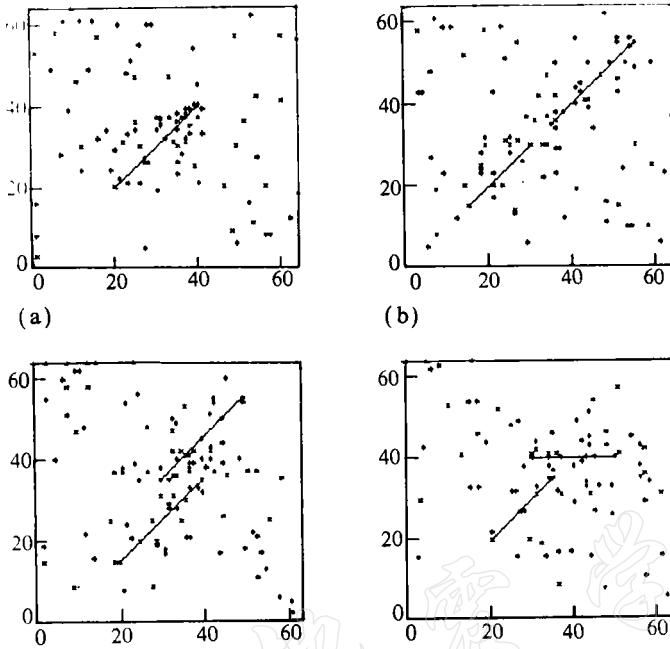


图3 有断层状态下所发生较大地震震中分布图

(a)单断层, (b)共线双断层, (c)平行  
双断层, (d)斜交双断层

某一数值范围起伏变化,它代表系统已锁定在临界状态.第三阶段可分为两期,前期 $\bar{M}$ 起伏较小,数值小;后期起伏大,数值大(平行双断层例外).

(2) 比较无断层、有单一断层和不同位置分布的双断层存在的情况,可以看出,平均震级 $\bar{M}$ 曲线在第三阶段后期的起伏变化,有断层比无断层大得多,且 $\bar{M}$ 值本身也较大.无断层时 $\bar{M}$ 值及其起伏变化是10的一次方量级,有单一断层和共线双断层时, $\bar{M}$ 及其起伏是10的二次方量级,而斜交双断层时, $\bar{M}$ 及其起伏变化达10的三次方量级,可见断层的存在对自组织演化锁定的临界状态有重大影响,它使元胞之间的相互作用大大加强,链锁演化的长度(指参与演化元胞数目)迅速增长.

间的相互作用大大加强,链锁演化的长度(指参与演化元胞数目)迅速增长.

(3) 第二阶段 $\bar{M}$ 迅速上升,其上升速率按无断层、单一断层、共线双断层、斜交双断层的次序起步更早,增长更快,即断层的存在使自组织作用的速率加快,起步提前.

(4) 对于平行双断层情况,上述特征有所不同.虽然临界状态 $\bar{M}$ 亦为10的三次方量级,但起伏变化不大,而 $\bar{M}$ 增长时段延长,速率小,表现出其自组织演化较慢,只到接近临界状态才发生显著迅速地加强.由于计算时间的限制,临界锁定状态的演化观测得很短,但似乎临界现象持续不会很长.

## 2.2 关于 $N(Z)$ (高应力应变元胞数目)的演化

图2是每次地震发生前所研究的块体内, $Z(i, j)=3$ 的元胞数目,它反映整个块体处于高应力应变状态的所有区域总尺度的大小.由图可以看出,对于无断层、双断层的存在, $N(Z=3)$ 的曲线均表现极为相似的演化特征,同样能很好地反映出演化过程的三个阶段,即初始阶段,表现为略为下降后趋于平稳,随后是迅速增长阶段和变化很小的临界状态阶段.而且对于块体元胞点总个数相同的各种断层分布, $N(Z=3)$ 值在第一阶段初值与第三阶段的稳定值相差均不大,只是第二阶段增长的速率按无断层、有单一断层、共线双断层、平行双断层、斜交双断层的次序增加.由此可见,块体初始高应力应变状态区总尺度的大小受断层影响不大,且锁定于临界状态有相当的稳定值,但是由 $N(Z=3)$ 的加速段的速率则可推断未来强震发生的总体特征(如 $\bar{M}$ 的曲线表示).

### 2.3 地震的空间分布

图3表示有断层情况下,较大震级的地震的空间分布.其共同特点是:(1)震级大的地震在断层上明显集中;(2)在平行断层存在时,地震在平行断层之间集中,而共线、斜交双断层不明显;(3)小地震发生的随机性大,受元胞自组织作用和断层影响不大.我们也分别研究了各阶段中,两大地震(比如破裂块数大于1000)间小地震空间分布的变化,并计算其空间 AC 值,但发现这种空间 AC 值不能显示出大震前存在前兆.可能是因为小地震震中分布的随机性占了主导的缘故.但如果提高小震阈值,由于地震数量减小,AC 的可靠性就会降低.

### 3 地震的算法复杂性的意义

Schuster(1989)将算法复杂性引入时间序列的分析研究,结果表明,它可以较好地表征时间序列所反映的动力特征.吕悦军和陆远忠(1993)用它分析地震序列,认为它可用于地震活动及演化的研究.对用细胞自动机模型得到的序列,我们按计算平均震级的方法,取一定地震个数为窗长及滑动步长,计算地震震级 AC 值的演化曲线(图4)以及有断层存在时,地震活动空间分布的算法复杂性 AC(图5).并且计算三个演化阶段的两大震间地震孕育过程中小地震的震级 AC 随地震个数的变化(图6).

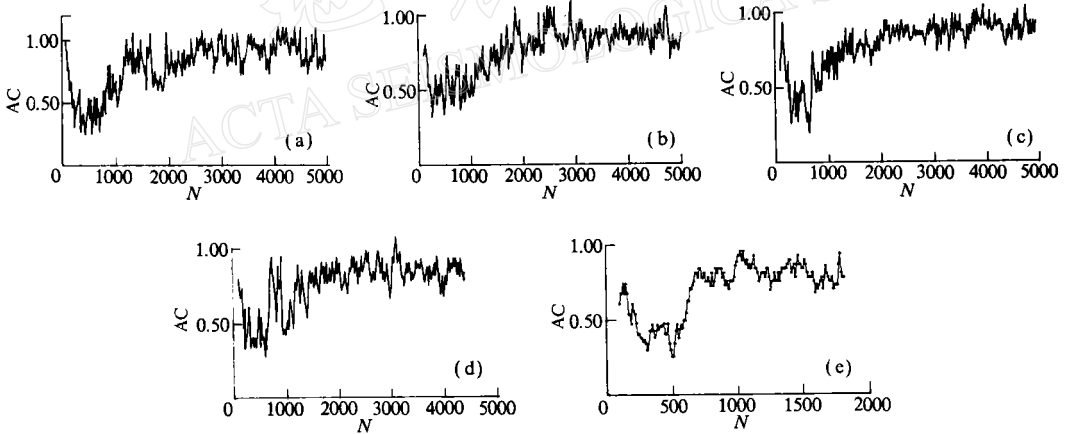


图4 地震震级 AC 值演化曲线

(a)无断层, (b)单断层, (c)共线双断层, (d)平行双断层, (e)斜交双断层

从图4看出,在模型自组织演化过程中,震级 AC 值在初始阶段下降,趋于稳定.随后进入第二阶段迅速增加,到临界状态稳定在0.8—0.9左右.从图5看,地震空间分布的 AC 的变化也可分为3个阶段,与高应力( $Z=3$ 的元胞)块体数  $N(Z)$  的变化大致呼应;在演化过程中,空间 AC 呈现出总体下降趋势,在增长阶段,空间 AC 值有相对趋势性增加,到自组织临界状态阶段,空间 AC 基本上稳定.由此说明,系统经历初期无序到有序性增加,最后锁定在围绕临界值呈无规律变化的自组织临界状态.因此,当一个地块的地震活动如经历过平静到地震活动增加到活跃阶段后,似乎只可能利用统计方法进行趋势预测.而在中

间阶段,由于系统按一定规律自组织演化,它遵从某些规律,有序性增加,因而可以探索某种动力预报途径. 系统这种演化行为,在时-空域内都有大体一致的特征. 图6是对不同断层存在时,从一个强震发生后到下一个强震前的孕震期,AC值随地震个数 $N$ 的变化. 图中是针对系统的3个阶段中,每个阶段取一次强震,作出其孕震期的AC演化图. 从图中可以看出,在临界阶段,对于有单断层、平行断层和共线断层的情况,强震前都出现了AC随时间推移而下降,即地震序列的复杂性减少,这就是说,尽管在临界阶段,系统地震活动的趋势,主要应依赖于统计预测,但对于单个强震的发生,可以利用AC值的下降进行短期

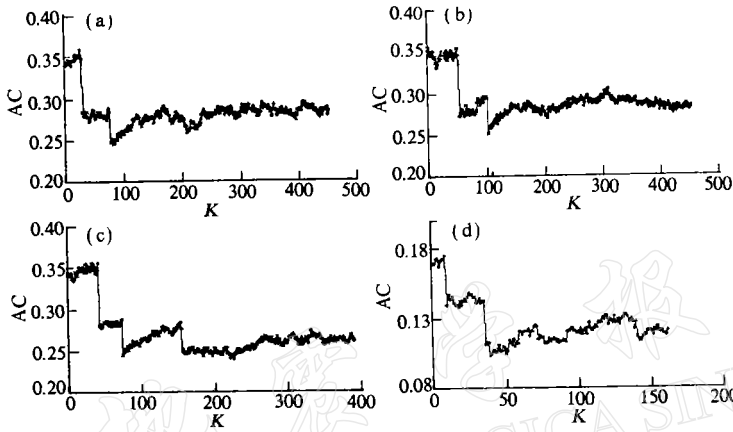


图5 有断层状态下,地震空间分布AC值演化曲线

(a)单断层, (b)共线双断层, (c)平行双断层, (d)斜交双断层

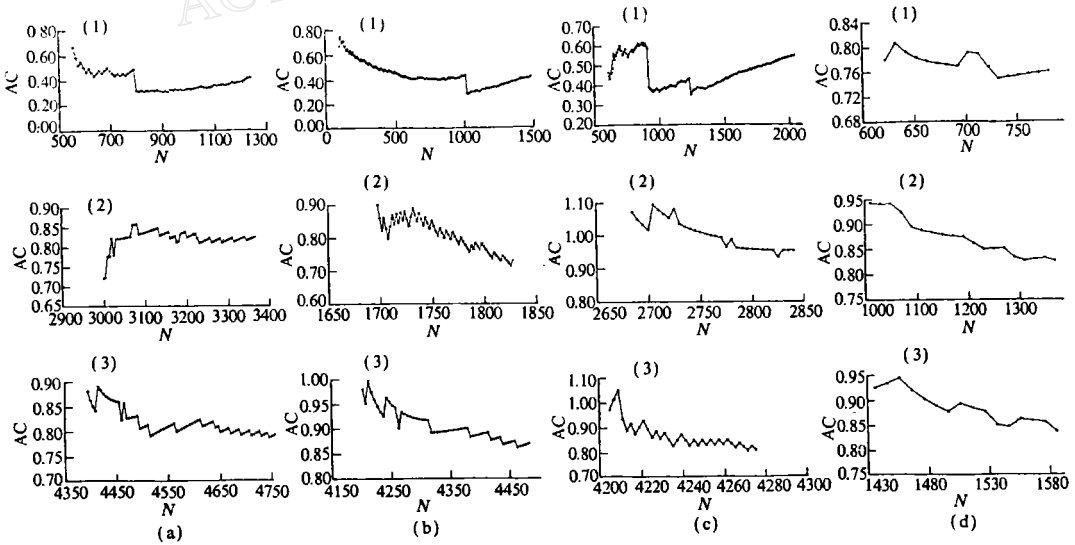


图6 有断层状态下,系统的三个演化阶段中,每阶段两大地震间小震震级AC值演化曲线

(a)单断层, (b)共线双断层, (c)平行双断层, (d)斜交双断层(其中

(1), (2), (3)分别表示3个不同的演化阶段的情况)

预测.

## 4 讨 论

(1) 我们所研究的细胞自动机, 由 $64\text{行} \times 64\text{列}$ 单元细胞组成. 试作由 $50\text{行} \times 50\text{列}$ 以及 $80\text{行} \times 80\text{列}$ 的单元细胞组成的自动机, 其演化规则不变. 结果发现, 与 $64\text{行} \times 64\text{列}$ 的情况相似, 其进入临界状态均在地震破裂次数为细胞总数的50%左右处. 由此可见, 模型所得结果的基本特征具有某种空间尺度变化的自相似性.

(2) 研究模型中每一次地震破裂结束时, 将系统中低应力应变状态(元胞  $Z$  值为0, 1), 中应力应变状态(元胞  $Z$  值为2)的演化过程与高应力应变状态(元胞  $Z$  值为3)的情况相比较, 结果发现, 它们的变化是同步的, 随着地震破裂的增多, 地块中应力较高的元胞增多, 应力较低的元胞减少, 直至锁定在临界状态后, 应力状态则稳定在某一平均水平, 即  $Z$  值为0, 1, 2, 3的元胞总数均保持在自己一个平均值附近起伏变化.

(3) 本研究结果表明, 有断层存在的细胞自动机模型, 可以模拟地壳在某初应力状态下受随机触发力的作用, 自组织演化产生的应力应变状态和地震破裂情况, 它对研究地体地震孕育和演化的总体特征有一定指导意义. 地震复杂性 AC 值对于描述应力状态、地震活动趋势、地震破裂随时间演化的前兆特征等是值得进一步探讨的有意义的参数. 但用地震破裂的空间复杂性直接描述地震破裂的空间演化则有一定困难, 需进一步探索改进.

(4) 断层的存在对地壳应力应变状态和地震破裂过程有明显的影响, 特别是平行断层和交叉断层与单断层和无断层状况区别较大. 由此推知, 复杂断层系、地壳弱化带的存在, 对地震孕育和地壳应力应变状态似有重要影响, 是需要深入探索的. 文中关于有断层存在时地震活动趋势判断和强震前可能出现的 AC 值下降的结果, 需要用实际地震资料加以检验.

## 参 考 文 献

- 吕悦军、陆远忠, 1993. 用算法复杂性分析时间序列. 中国地震, 9, 3, 229—234.
- 李东升、陆远忠, 1992. 地震活动性和动力学模型研究进展. 世界地震译丛, 3: 1—4.
- 伊东敬佑, 1990. 地震与临界现象. 国际地震动态, 10: 23—26.
- 郑捷, 1992. 研究地震和岩石破裂现象的非线性科学方法, 非线性科学在地震预报中的应用, 45—53. 地震出版社, 北京.
- Bak, P., Tang, C. and Kurt, W., 1988. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*, 38, 1, 364—374.
- Bak, P. and Chao, T., 1989. Earthquake as a self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.*, 94, B11, 15635—15637.
- Chen, K. and Bak, P., 1991. Self-organized criticality in a crack-propagation model of earthquakes. *Phys. rev. A*, 43, 2, 625—630.
- Ito, K. and Matsuzaki, M., 1990. Earthquake as self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.*, 95, B5, 6853—6860.
- Kanamori, H. and Anderson, D. L., 1975. Theory basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 65, 1073—1095.
- Schuster, H., 1989. Information content of chaotic of signals. *Phys. Scripta*, 40, 367—372.
- Sornette, A. and Sornette, D., 1989. Self-organized criticality and earthquakes. *Europhys. Lett*, 9, 3, 197—202.