

# 基于自组织临界现象的中期地震预报算法研究<sup>\*</sup>

兰从欣 郭大庆

(国家地震局分析预报中心, 北京 100036)

石特临

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 在自组织临界现象、几何相变等物理理论的基础上,开发研究了基于自组织临界现象的中期地震预报算法。提出并定义了自组织临界行为的结构强度,简称 *CSI* 值。*CSI* 值是反映地震活动的一个综合指标,其变化较好地反映了地震活动演化进程。对多个震例的研究表明,大地震发生前结构强度 *CSI* 值存在一个增大的过程,这和理论结果基本一致。利用演化图和时程曲线可以估计地震发生的时空范围。

**关键词:** 自组织临界现象 几何相变 中期预报算法 结构强度 地震活动演化图象

## 1 引言

在不久前召开的第 21 届 IUGG 大会上,美国的一些首席科学家提出地震预报和研究理论的三大进展,即

- (1)特征地震和地震空区在地震预报研究中应用以及发布预报的概率方法;
- (2)物理学家和地震学家相结合将物理思想引入到地震科学中来;
- (3)非线性科学在地震活动性研究和地震预报研究上的最新成果。

因此,基于物理理论、物理思想的预报和方法的研究代表着地震预报研究的主要方向,也是本文的着眼点所在。

地震作为自组织临界现象是 Tang 和 Bak(1988)首先提出的。它们的贡献在于将物理学中临界现象和临界点理论用来解释地震活动的群体行为,认为一个多体的岩石圈系统类似于一个宏观的物理系统,一次大地震的发生相当于一个相变过程,并且得到地震频次及地震强度负幂律的规律等。

地震作为自组织临界现象的基本问题在于:(1)地震活动中大地震的发生是突变行为,是一种相变和临界点问题;(2)和临界点问题相关的基本物理行为,如分形、相关长度等在地震发生和发展过程中是存在的;(3)在临界点和相变过程中重整化群方法是解决相变问题的有利工具。本文从以上三个方面对地震作为临界现象的理论作进一步探讨和研究。

## 2 相变、自组织临界现象等物理理论、方法及其地震学含义的研究

<sup>\*</sup> 本文是兰从欣硕士学位论文《基于自组织临界现象的中期地震预报算法》的部分内容。  
第一作者简介:兰从欣,女,1971年 2 月生,1996 年获硕士学位,现在国家地震局分析预报中心工作。

## 2.1 地震作为自组织临界现象的基本理论与研究

自组织临界现象最初是由 Bak 等提出来的,其含义是指一个自然系统处在稳定态的边缘,一旦受到扰动偏离这个稳定态,便会自己演化回到边缘稳定态。如果系统总是处在临界点附近,就称系统处在自组织临界状态。

自组织临界现象是对自然系统而言的,地震活动本身属于一种自然系统,其含义是自然界中一些广泛分布的耗散系统总是自然地维持在一种稳定态,而这种稳定态又是临界的,在这种意义上,系统在空间和时间上的行为遵从幂律关系。

为了进一步讨论地震问题,以沙堆模型对自组织临界现象的基本物理思想作一介绍。

一个沙堆可以由两种方式得到,一是在平坦的沙堆上逐步加沙子,并且在边界上允许沙子从边缘流出;一种方式是将平坦的沙堆盘倾斜,在沙堆盘的另一侧将达到临界状态。具体地可以使用以下规则:

$$\begin{aligned} Z_{ij} &\rightarrow Z_{ij} - 4 \\ Z_{i,j\pm 1} &\rightarrow Z_{i,j\pm 1} + 1 \\ Z_{\pm 1,j} &\rightarrow Z_{\pm 1,j} + 1 \end{aligned}$$

边界条件是:  $Z = 0$

此种情况序参量是粒子流,如果对照传统的临界现象,“流” $j$  是磁化强度,加入的沙子相当于外磁场  $h$ ,而沙堆的斜率  $\theta_c - \theta$  相当于归一化温度,流的变化相当于磁化率  $x$  对外场的响应:

$$\delta(x, t) = \iint x(x, x'; t, t') \delta h(x', t') dx' dt'$$

相关长度相当于线性尺度的边界并和集团的大小满足:  $S_\infty = \alpha^D$

二维沙堆模型数值模拟结果为:

$$\beta = 0.7 \quad \gamma = 1.35 \quad D = 2.1 \quad \tau = 2 \quad Z = 1.29 \quad \nu = 0.74 \quad \varphi = 1.57 \quad \sigma = 0.72$$

三维沙堆模型数值模拟结果为:

$$\beta = 0.82 \quad \gamma = 1.7 \quad D = 3.0 \quad \tau = 2.33 \quad Z = 1.7 \quad \nu = 0.85 \quad \varphi = 1.1 \quad \sigma = 0.41$$

## 2.2 几何相变的基本思路与方法及地震作为几何相变的讨论

地震是自组织临界现象已被国内外许多地震学家所认识,一般将强震的发生与孕育过程视为临界现象,并且用几何相变理论来研究与处理。

地震问题之所以能用几何相变来处理是因为孕震系统是一个宏观系统,组成系统的是破碎的尺度不等的地壳块体,依碎形理论,块体的尺度大小与频数间是分形的,块体相互作用产生的地震也是分形的。

地震活动在平面问题是明确的,一次大地震发生前,相关的构造活动将不断增强,活动区域不断增大,表现在中小地震活动增多或其它地球物理、地球化学等方面的异常变化,直到发生大震。这相当于一个逾渗过程,即几何相变过程,而且断层地震活动涉及到一维几何相变,区域地震活动涉及到二维几何相变。

几何相变最好的描述借助于集团数的概念  $n_s(p)$ ,其含义是单位面积格座内具有  $s$  个座组成的集团数目:

$$n_s(p) = \sum g_{sb} p^s (1-p)^b$$

其中,  $p$  是单个格座占座概率,  $b$  是  $s$  座集团周围未被占据的座数目,  $g_{sb}$  反映集团位形,称为“格点动物”(lattice animals)。

各种尺度集团数总和为:  $\Gamma = \sum_s n_s(p)$

集团总数  $\Gamma$  一般在  $p \ll 1$  和  $p \approx 1$  时是很小的,而在几何相变阈值或临界点时  $p_c$  将显示尖锐的奇异性,即:

$$\Gamma \sim |p - p_c|^{2-T}$$

其中  $T$  是 临界指数

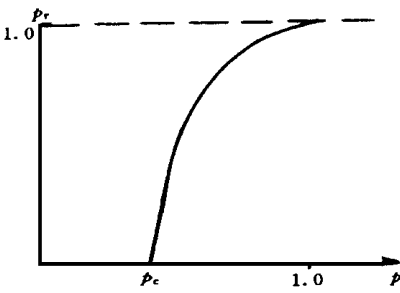


图 1 序参量  $p_r$  与占座率  $p$  的关系图

Fig. 1 Relation of the percolation order parameter  $p_r$  to the occupation probability  $p$ .

在几何相变时,一个格座被随机地变为无穷集团的概率值  $p_r$  是系统的序参量,序参量随  $p$  也显示了奇异性(图 1):

$$p_r \sim |p - p_c|^U$$

其中  $U$  为序参量指数

$p_r$  和  $p$  之间有如下关系:

$$p_r + \sum s n_s(p) = p$$

上式说明,在临界点以下时,无无穷集团,此时  $p_r = 0$ ,反过来当  $p \rightarrow 1$  时,不属于无穷集团的部分消失,此时  $p_r = 1$

另一个量是在一定的占据概率  $p$  时,点阵上有限集团格点的平均数  $S$ ,

$$S = \frac{\sum n_s(p) s^2}{\sum n_s(p) s}$$

一般说来,当  $P$  逐渐增大时集团的平均数也相应会增大。当  $p \rightarrow p_c$  时  $S$  按下式发散:

$$S \sim |p - p_c|^{-\nu}$$

这个结论是合理的,因为在  $p = p_c$  时就有无穷大集团出现,它必然使  $S$  变成无穷大。当  $P$  略小于  $p_c$  时尽管集团的  $s$  值(座数)已经很大,但它仍然是一个有限数值,故  $S$  也是个有限值(图 2)。

当占据概率  $p$  逐渐增大时,集团的结构也相应地发生质的变化,从分形结构变为一个均匀体。研究集团的几何结构时重要的物理量是它的相关长度及回旋半径。利用回旋半径  $R_s$  作为集团的特征长度,相关长度  $a$  反映集团的平均大小。

$$R_s^2 = \frac{1}{S} \sum_{i < j} |\vec{V}_i - \vec{V}_j|^2$$
$$a \sim |p - p_c|^{-\nu}$$

其中  $\nu$  是相关长度指数,  $a$  在临界点  $p_c$  处发散。

在几何相变理论中,无论二维或三维问题都没有完全得到解答,但是,一些精确的二维座形问题是得到较好解答的。从理论研究发现,当占据概率  $p$  逐渐增大到临界点  $p_c$  时,集团数不断增大,相关长度增大到无穷大,大小集团间呈现出分形结构。

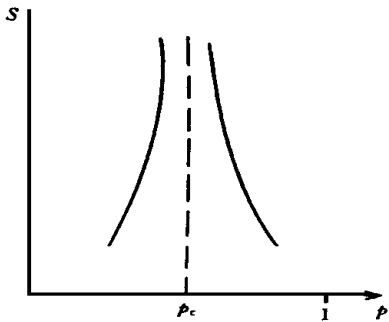


图 2 集团平均数与占座率  $p$  的关系

Fig. 2 Relationship between average number of sites in a cluster  $S$  and the occupation probability  $p$ .

3 基于自组织临界现象的中期地震预报算法的研究及应用

3.1 算法的研究

通过以上的理论研究得出,在相变和临界过程中存在三个主要特征,即当系统逐渐接近临界点时,集团数增大,相关长度趋于无穷以及集团结构呈现分形特征. 为实现对地震临界行为的中期预报算法,根据以上三个特征,结合地震活动特性,定义如下地震活动的自组织临界行为的结构强度,简称 *CSI* 值

$$CSI = N_{em} \cdot R_g \cdot F_s$$

其中, *N<sub>em</sub>* 是序参量, *R<sub>g</sub>* 是相关长度, *F<sub>s</sub>* 是结构参数. 对各量的物理含义分述如下:

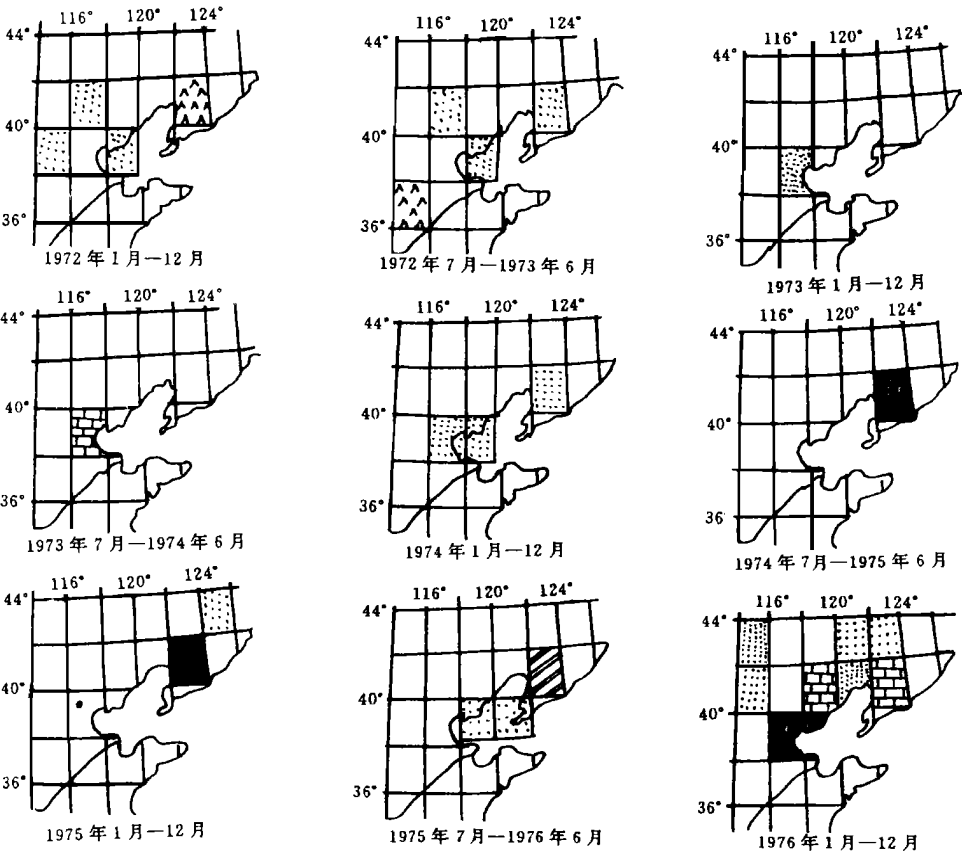


图 3 1975 年海城 7.3 级地震和 1976 年唐山 7.8 级地震 *CSI* 值演化图

Fig. 3 The developing evolutionary sketch of *CSI* value for the Haicheng earthquake (*M*= 7. 3) in 1975 and the Tangshan earthquake (*M*= 7. 8) in 1976

3.1.1 序参量 *N<sub>em</sub>*

在细胞自动机和沙堆模型中,序参量是流函数 *j* 或流密度函数 *j* / *L<sup>d</sup>*. 在地震活动中地震流相当于地震能量的释放,一定能量的地震频数存在如下尺度关系:

$$N \sim E^{-\tau-1}$$

在二维细胞自动机中  $\tau=2$ , 三维情况下  $\tau \approx 2.3$ , 故流函数可以写成:

$$j(t) \sim \left\{ \frac{n(t)}{t} \right\} \langle E \rangle (t)$$

根据上式,在算法中可以计算地震频次,又可计算平均能流,所以序参量  $Nem$  的物理含义是反映地震活动水平高低的量

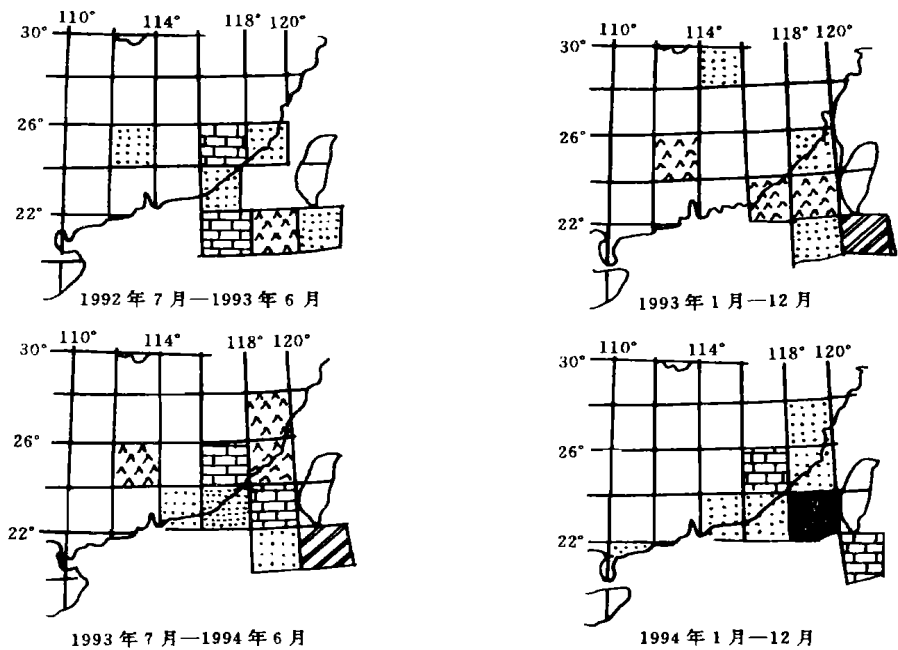


图 4 1994 年台湾海峡 7.3 级地震 CSI 值演化图

Fig. 4 The developing evolutionary sketch of CSI value for the Taiwan Strait M 7.3 earthquake in 1994.

3. 1. 2 相关长度  $R_g$

依自组织临界现象的平均场理论,相关长度  $a$  和沙堆斜率  $\theta_c$  满足:

$$a \sim |\theta_c - \theta|^{-\nu}$$

在地震预报中,相关长度的临界现象表现在地震活动在空间上的不断增长的过程,将一定震级  $m_0$  以上地震发生增长区的半径作为相关长度,相关长度越大,相当于无穷集团的空间尺度越大,利用回旋半径的定义计算相关长度。在地震活动中,相关长度的物理含义是反映地震空间分布的物理量。

3. 1. 3 结构参数  $F_s$

地震大小频度一般认为满足负幂律关系,即

$$N \sim M^{-D}$$

一定区域的地震活动满足负幂律关系在临界点是成立的,远离临界点分形结构受到破坏。实际计算中可以计算各种档次地震的结构参数。在临界点时,不存在特征尺度,所以对地震活动来说不存在“特征地震”,即各档次中都应该有地震发生,所以结构参数  $F_s$  的物理含义是反映地震结构完整性,反映地震活动的分形特征。

据以上参量的物理含义可以看出,结构强度  $CSI$  值是建立在物理基础之上的,它是地震活动的综合反映,包括了能量分布、空间分布以及分形特征等,用结构强度研究地震活动是动

力的

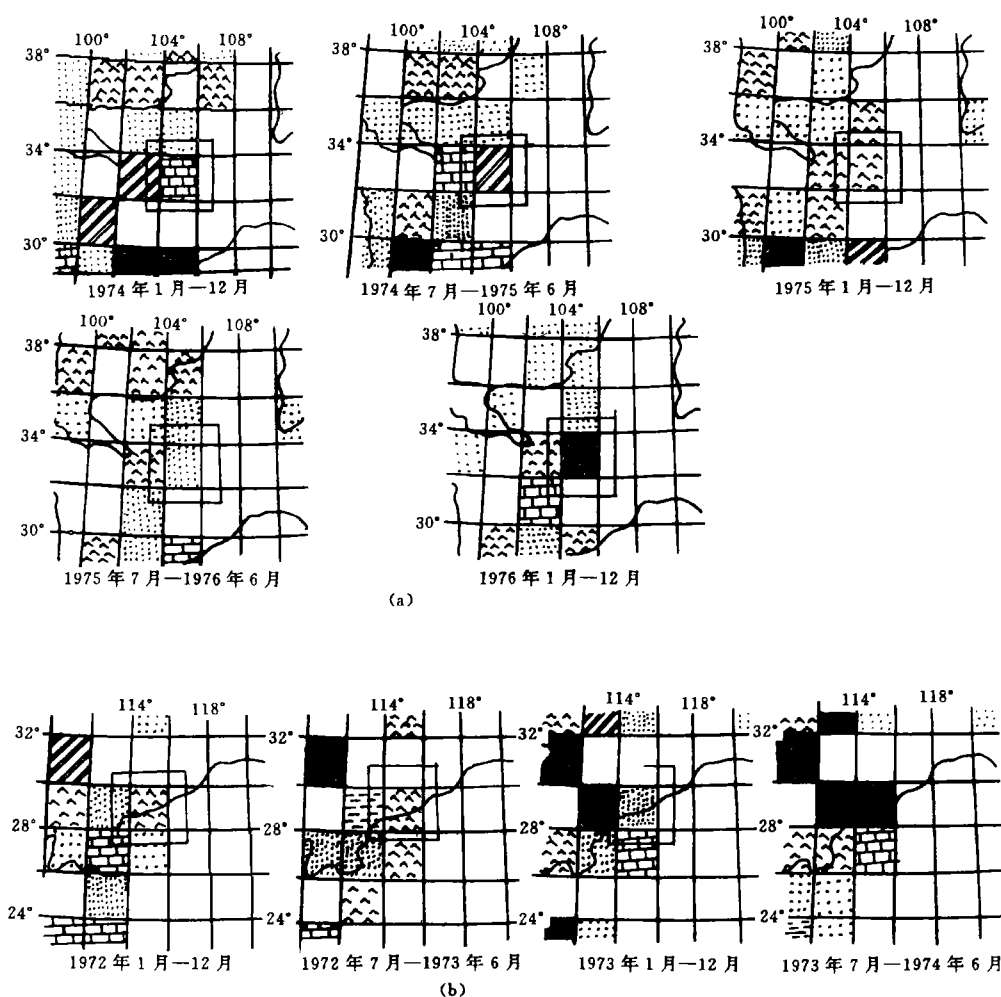


图 5 1976年松潘 7.2级地震和 1974年大关 7.1级地震 CSI 值演化图

Fig. 5 The developing evolutionary sketch of CSI value for the Songpan earthquake ( $M=7.2$ ) in 1976 and the Daguan earthquake ( $M=7.1$ ) in 1974.

(a) 1976年松潘地震; (b) 1974年大关地震

3. 2 算法的应用研究

根据结构强度 CSI 值各量的物理含义,对它们进行具体计算.

3. 2. 1 计算序参量  $Nem$

运用 Gutenberg-Richter 公式,将  $M \geq 3.0$  以上地震折合成 3.0 级地震次数 (将每一个 3.0 级地震看成一个占据座),经数学推导,得

$$Nem = \sum 10^{(m-3)b} N$$

对所有大于 3.0 级地震进行求和,  $N$  是  $m$  级地震次数,利用地震目录拟合得到  $b$  值

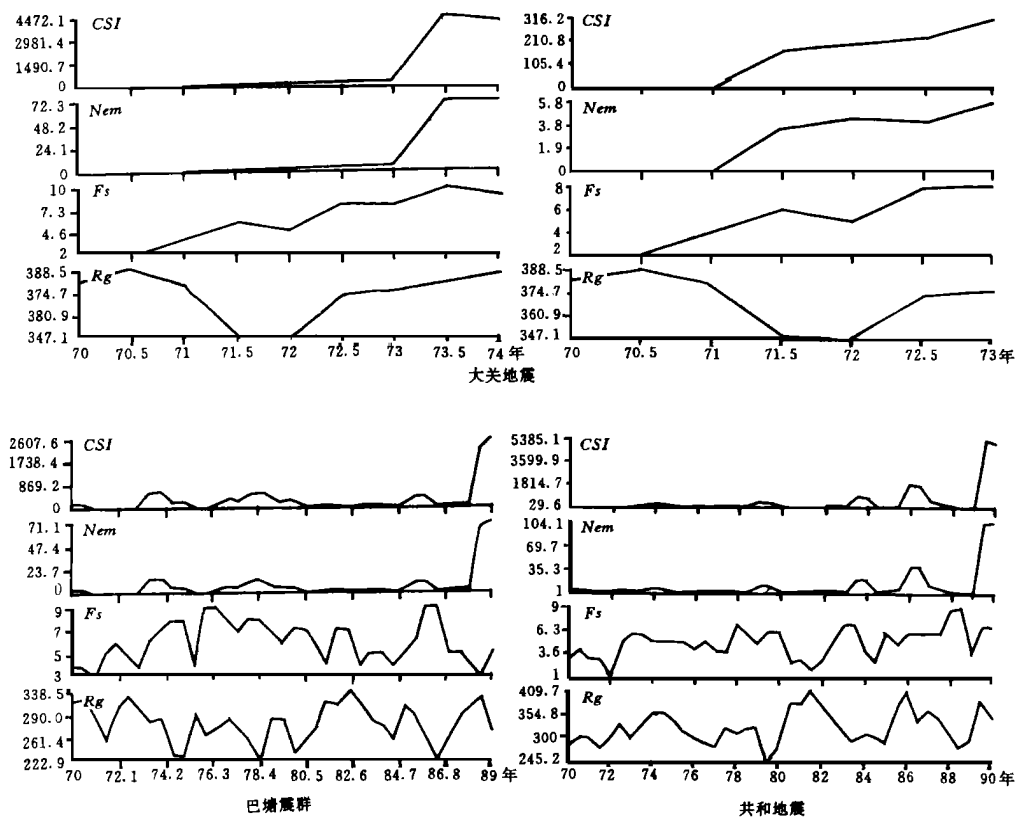


图 6 大关地震、巴塘震群和共和地震的时程曲线

Fig. 6 Time curves of the Daguan earthquake, the Batang seismic swarm and the Gonghe earthquake.

3. 2. 2 计算结构参数  $F_s$

首先将地震震级 ( $M_i$ ) 划分成 12 个档次, 分别为: 2.0~2.5, 2.6~3.0, 3.1~3.5, 3.6~4.0, 4.1~4.5, 4.6~5.0, 5.1~5.5, 5.6~6.0, 6.1~6.5, 6.6~7.0, 7.1~7.5, 7.6 以上。在空间上划分成  $4^\circ \times 4^\circ$  单元。求出每个单元中各震级档次的平均地震个数, 用  $AVER_i (i=1, 2, \dots, 12)$  表示, 然后进行空间扫描, 找到每个单元中各档次的地震个数, 用  $N_i (i=1, 2, \dots, 12)$  表示, 最后做相应比较。若  $N_i > AVER_i$ , 则  $N_s = 1$ , 否则  $N_s = 0$ 。累加所有  $N_i > AVER_i$  的事件便得到  $F_s$  值。总之通过将当前的与历史的情况相比较, 就能发现当前阶段处在哪个活动水平,  $F_s$  表明地震结构的完整性。

3. 2. 3 计算相关长度  $R_g$

利用公式

$$R_g = \frac{1}{C_n} \sum_{i < j} |\vec{V}_i - \vec{V}_j|$$

计算本区域内 3.0 级以上的两两地震间的平均距离作为相关长度, 其中  $n$  是研究范围内的地震个数。

为能较好地反映地壳活动的时间进程, 选用 6 个月滑动, 12 个月计算的方式进行时间扫

描,空间上  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  扫描,并把每个  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  网格视为一个单元,求出每个单元的  $CSI$  值。

根据结构强度  $CSI$  值的大小,可以绘制全国或分区的地震活动演化图,即  $CSI$  值演化图象,也可以绘制单元时程曲线,用它们来研究强震的时空演化过程。图 3 图 4 和图 5 给出了 1970 年以来的几次大地震的结构强度  $CSI$  值的动态演化图象,图 6 图 7 和图 8 分别给出了 7 次地震的时程曲线。

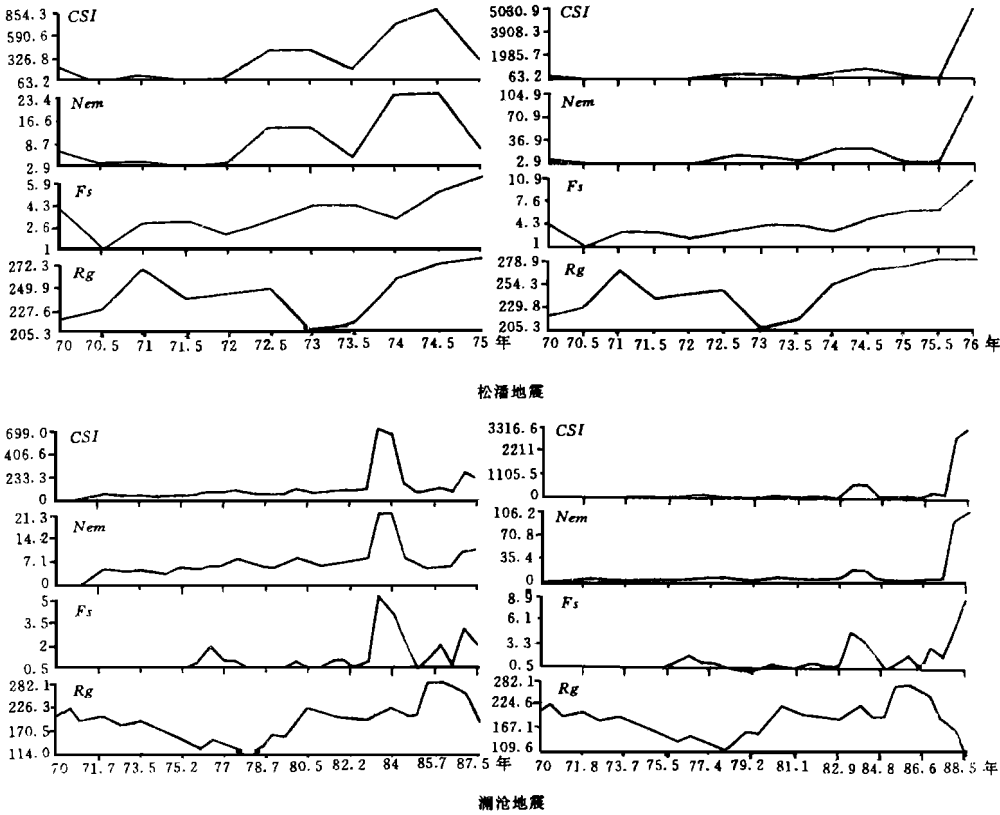


图 7 松潘地震和澜沧地震的时程曲线

Fig. 7 Time curves of the Songpan earthquake and the Lancang earthquake.

在  $CSI$  值演化图中,单元的灰度越大表示活动性越高、危险性越大或已经发生过地震。时程曲线由  $CSI, Nem, Rg$  和  $Fs$  随时间的变化曲线组成,时间轴标度相同,这样有助于比较在相同时间里各量的变化,并综合每个量的变化来预测未来是否有发震的可能。

无论  $CSI$  值演化图还是时程曲线都较好地反映了地震活动演化进程,而且可以发现大地震发生前,结构强度变化有一定规律:一种形态是  $CSI$  值逐渐增大直到发震;另一种形态是增大后在下降过程中发震。但无论哪种形态,结构强度都存在着逐步增强的变化过程,这是符合临界现象理论的。当然  $CSI$  值增大后没有立即发震的现象也可以从物理上得到解释,这是因为相变是达到或超过临界点时发生的,超过临界点时相关长度迅速减少,分形结构也逐步受到破坏而使  $CSI$  值减小。在地震活动中,由于地壳不断运动,自组织过程不同,即使在同一地区发生的地震,震前也会表现出不同的前兆情态,显示地震的多变性、复杂性。

作者研究了大关、海城、唐山、龙陵、松潘、乌恰、澜沧、巴塘震群、孟连、台湾海峡、共和等地

由于篇幅限制,只给出以上几个图形,但这些已经基本验证了结构强度  $CSI$  值在大震发生前存在逐渐增大变化过程的理论结果,可以利用  $CSI$  值演化图和时程曲线来预测未来地震发生的空间范围和时间范围。

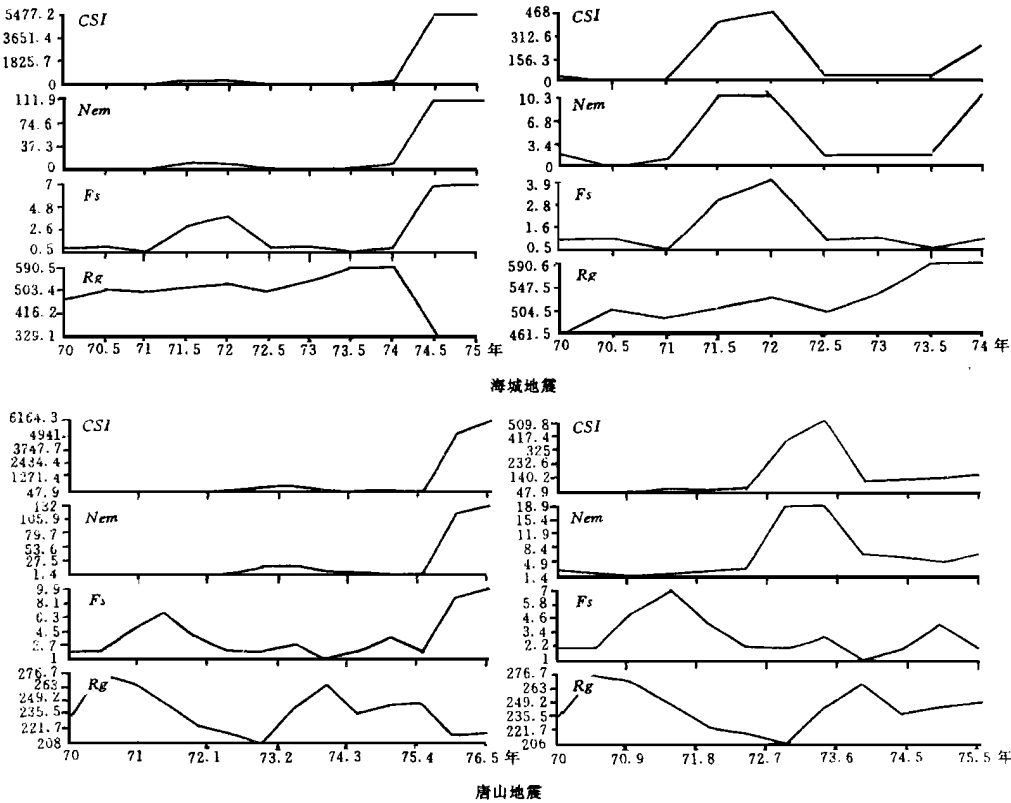


图 8 海城地震和唐山地震的时程曲线  
Fig. 8 Time curves of the Haicheng earthquake and the Tangshan earthquake.

4

定义了自组织临界行为结构强度  $CSI$  值,从动态图象演化的角度设计了中期地震预报算法,包括了能量分布。结构强度具有增大的过程已被许多震例所验证,而且根据这一现象,利用  $CSI$  值演化图和时程曲线估计地震发生的时空范围具有一定的可行性。

由于非线性科学是前沿科学,自组织临界现象引入到地震科学中来的时间不长,参考文献较少,定义的结构强度虽然对地震预报有一定的实用价值,但不可否认地存在着某些问题,如没有定量化等,因此还需要不断完善,需要在以后的工作中作进一步研究。

- 1 John B Rundle and William Klein. New ideas about the physics of earthquakes. *Reviews of Geophysics*, 1995, Supplement 283~ 286.
- 2 Bak P, Tang C and Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys Rev*, 1988, A38 364~ 374.
- 3 Bak P and Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(BH): 15636~ 15637.
- 4 Creswick R J, Farach H A, Poole JR C P. *Introduction to Renormalization Group Method in Physics*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1991.
- 5 石特临,等.利用重整化群方法讨论强震前地震活动的临界点现象. *华南地震*, 1994, 14(3): 1~ 7.

THE STUDY OF ALGORITHM FOR INTERMEDIATE-TERM EARTHQUAKE  
PREDICTION BASED ON THE SELF-ORGANIZED  
CRITICAL PHENOMENON

LAN Congxin      GUO Daqing

(*The Center for Analysis and Prediction, SSB, Beijing 100036*)

SHI Telin

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

In this paper, an algorithm for intermediate-term earthquake prediction is made according to percolation theory and the phenomenon of self-organized criticality. The self-organized critical structure intensity (*CSI*) is defined. The form is as follow:

$$CSI = Nem \cdot Rg \cdot Fs$$

Where order parameter *Nem* indicates the seismic activity level, correlation length *Rg* the space distribution of earthquakes, structure parameter *Fs* the seismic fractal character. So the value of *CSI* is a comprehensive parameter and is used to draw evolution pattern of the earthquake activity and to plot unit time curves. They better reveal the preceding character of seismicity. It is proved by many earthquakes occurred in China that the value of *CSI* has an increasing process before strong earthquake. This is approximately identical with the theoretical result. The region and time interval of future earthquake can be estimated.

**Key words**    Self-organized critical phenomenon, Percolation, Medium-term prediction algorithm, Structure intensity, Seismicity evolution pattern