

# 自组织临界现象在地震空间演化 特征上的应用研究

兰从欣 郭大庆

(北京市地震局, 北京 100080)

石特临 杨立明

(中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 将自组织临界现象理论在地震预报领域作深入的应用研究, 根据各量的物理含义重新讨论了在地震科学中的应用, 并用重整化群方法对强震前中小地震增强现象的临界点问题进行研究, 将临界概率、相关长度的临界值量化. 空间演化图实际上是一种定量的地震活动分布图, 可用于估计未来地震发生的空间范围.

**主题词** 地震预报 自组织临界现象 临界概率 相关长度 地震空间演化图像

**中国图书分类号** P315.7

## 0 引言

地震作为自组织临界现象已被国内外许多地震学家所认同. Scholz(1991)提出岩石圈到处都处在自组织临界状态; Sornette等(1990)和 Barriere(1994)也提出了类似的观点, 而且为研究地震活动规律设计了细胞自动机模型; 郭大庆等(1994)对地震作为自组织临界现象的研究也作了很多工作, 指出一些7级以上地震前存在中小地震临界点现象, 超过临界点后将发生强震<sup>[1]</sup>; 兰从欣等(1997)定义了自组织临界行为的结构强度CSI值, CSI值是反映地震活动的一个综合指标<sup>[2]</sup>. 他们从不同角度研究了地震活动的自组织临界现象, 本文将着重从空间演化特征上进行研究与讨论.

## 1 地震前的自组织临界状态

自组织临界现象最初是由P. Bak等人提出的, 其含义是指一个自然系统处在稳定态的边缘, 受到扰动偏离这个稳定态, 然后经自组织演化再次回到边缘稳定态. 如果系统总是处在临界点附近, 就称系统处于自组织临界状态<sup>[3]</sup>.

大地震发生前的地震活动行为表明: 地震活动区域将不断增大, 相关的构造活动不断增强, 表现为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增大. 这种活动特点与自组织临界现象是一致的, 即使对于在空区中发生的地震, 其孕震及发震过程也是自组织临界现象. 空区是局部的, 用几何相变理论的愈渗模型可以对大地震前的自组织临界现象作较好的

收稿日期: 1997-12-08

第一作者简介: 兰从欣, 女, 1971年2月出生, 助研, 从事地震分析预报工作.

理论解释.如图1所示:随着占据座概率 $P$ 逐渐增大,形成的无限大集团将整个研究区连通起来,此时达到了临界点 $P_c$ .

## 2 临界现象在地震研究应用中的修正

兰从欣等在以前的工作中定义了自组织临界行为的结构强度CSI值<sup>[2]</sup>.经过对多个震例的应用研究表明,结构强度对地震预报有一定的实用价值.虽然如此,但也存在一些实际问题,如CSI值中 $N_{em}$ 的比重过大,可能会掩盖 $F_s, R_g$ 的某些信息,同时也没有一个定量指标.为此,在本文的研究中作了如下修改:

(1)基本上严格按照理论重新定义(计算)两个量,即概率 $P$ 和相关长度 $R_g$ :

$$P = \frac{\text{各集团的占座数之和}}{\text{研究单元内总座数}}$$

$$R_g = \frac{\text{各集团的回旋半径之和}}{\text{总集团数}}$$

(2)不再用乘积形式,而是分别研究每一个量,看它们是否具有某些共性或含有对地震预报有价值的信息.

(3)几个重要物理量的定义与应用:

①座与占据座 在地震研究中,座的划分是个很重要的问题,它关系到临界值的大小等重要因素.研究单元中座的划分依赖于地震震级以及研究区域内的地震活动水平,一般来说,如果考虑的震级较小,座的划分就应较密集.相反,震级下限较大时,点座的划分就要疏松些.本文选用两种划分法:震级下限取2.0级时,在 $1^\circ \times 1^\circ$ 范围内取 $32 \times 32$ 个座;震级下限为3.0级时,在 $1^\circ \times 1^\circ$ 范围内取 $16 \times 16$ 个座.这样做一方面便于在确定临界概率 $P_c$ 时应用重整化群方法,另一方面也便于比较研究不同的划分方法对计算结果是否有影响.

考虑到中地震和小地震对孕震系统造成的影响明显不同,为了区别它们,当震级下限 $M_0=2.0$ 时,将每个2.0级以上地震都折合成2.0级地震;当震级下限 $M_0=3.0$ 时,将每个3.0级以上地震都折合成3.0级地震.折合公式如下:

$$N_0 = \sum 10^{(m-2)b} N_m$$

其中 $N_0$ 是折合成2.0级或3.0级地震的个数; $b$ 为当地的 $b$ 值; $N_m$ 为 $m$ 级地震的次数.折合后将每个2.0级或3.0级地震看成一个占据座,并将每个2.0级或3.0级以上地震看成一个有限集团,每个有限集团的占据座数的大小就等于 $N_0$ ,但集团总数并不简单等于地震个数之和.

②相关长度 研究集团的几何结构时重要的物理量是它的相关长度,相关长度的临界现象表现在地震活动空间上的不断扩大的过程,其物理含义是反映地震空间分布的物理量.相关长度的定义中最重要一个量是回旋半径 $R$ ,回旋半径依然按如下公式计算<sup>[4]</sup>:

$$R^2 = \frac{1}{S^2} \sum_{i < j} |r_i - r_j|^2$$

其中 $S$ 是集团中的占座数, $R$ 表示两点座间的平均距离.理论上,每个有限集团可能有多种构形,即集团中占据座的排列方式有多种,且不同的构形得到的回旋半径的值可能相差很大,为简单起见,采用相同的构形方式.如图2所示,首先以原点 $O$ 为中心,从 $O$ 点右方的1点开始

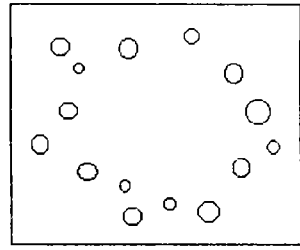


图1 空区地震的自组织行为

Fig. 1 The sketch of self-organized action of earthquakes in a gap.

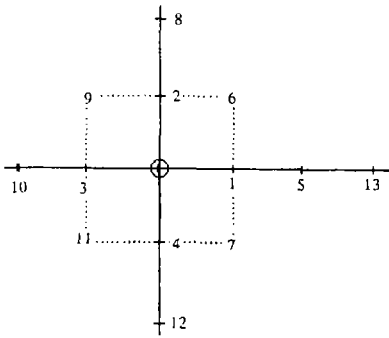


图2 构形方式

Fig.2 Configuration pattern.

逆时针排列得 2, 3, 4 点, 再以 1 点为中心, 同样从 1 点右方的座开始逆时针排列, 得到 5, 6, 7 点, 这时被占据的座将不能被重复占据. 其次, 以 2 点为中心, 同样从 2 点右方的 6 点开始逆时针排列, 得到 8, 9 点, 然后再以 3, 4 点为中心, 从其右方的座开始, 按逆时针排列并得到 10、11、12 等点, 依次类推, 直到排完所有的占据座, 最后按这种构形计算出回旋半径的大小.

相关长度用来描述研究单元内地震间的相互关系. 如图 3 所示, 有限集团 A, B, C 的回旋半径分别为  $R_a, R_b, R_c$ , 若  $R_a + R_b \geq R_{ab}$  或  $R_b + R_c \geq R_{bc}$ , 即 A 和 B, B 和 C 集团相临或相交, 则认为两集团可以当作一个集团处理,

即它们融合为一个较大集团, 依次类推, A, B, C 三个集团可以融合, 融合后的集团的回旋半径等于各小集团的回旋半径之和, 图中 D 集团由于不满足上述关系而只能被作为孤立集团对待. 这样处理, 在地震研究中是合理的, 因为当中、小地震成丛、成带时, 就会出现此种图像, 这些地震彼此相互影响, 显示出地震活动性的增强. 同时, 没有将回旋半径约等于 0 的有限小集团计算到总集团数中.

更进一步讲, 如果研究单元中的有限集团处于无序状态, 即分布较散乱, 集团融合的可能性较小, 且集团总数大, 则相关长度值小, 表现出该单元发震的可能性较小; 相反, 有限集团分布有序, 成丛、成带或成环等等, 集团融合的可能性就大, 且集团总数小, 则相关长度值大, 说明该单元发震的危险性较大.

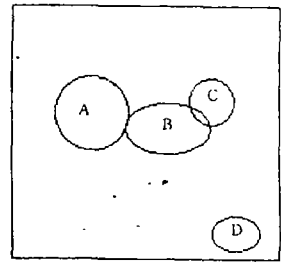


图3 集团间关系

Fig.3 Relationship between clusters.

③ 临界概率  $P_c$  的确定 概率  $P$  在临界阈值附近, 特别是过了临界点时, 有限集团的扩展、连接性将发生质的变化<sup>[4]</sup>. 图 4a 中, 当  $P = 0.58$  小于  $P_c = 0.593$  时, 就连最大的集团也没有把整个模型区域连接起来; 图 4b 中,  $P = P_c$  时, 最大集团中包含的占据座数比  $P = 0.58$  时多得多, 连通了整个研究区, 但只是刚刚连通; 当  $P$  略微增加一点到 0.60 时, 那个大集团则占据了整个研究区的绝大部分, 如图 4c 所示.

可见, 在自组织临界现象的研究中, 临界概率起着极其重要的作用, 因此如何确定临界值的大小也就成了问题的关键. 本文采用重整化群的方法从理论上计算临界值<sup>[5]</sup>.

图 5 中, 设  $P$  为发生相应震级地震的概率, 则  $1 - P$  为不发生相应震级地震的概率. 如果假定 4 个单元中有两个发生了相应层次的地震, 则下一层次可能发生更大震级的地震, 此时的概率和即为 2/4 构形的映射, 于是得到:

$$P_{n+1} = 6P_n^2(1 - P_n)^2 + 4P_n^3(1 - P_n) + P_n^4$$

将  $P_{n+1} = f(P_n)$  改写成  $x = f(x_n)$  的形式, 解到 3 个固定点: 0, 0.2324 和 1. 而 0 和 1 为两个稳定点, 0.2324 则为要寻求的临界点的理论值. 图 6 给出了临界点的物理意义: 当  $P$  落在  $P_c$  左边时, 重整化过程使  $P_n \rightarrow 0$ ; 当  $P$  落在  $P_c$  右边时, 重整化过程使  $P_n$  趋于 1. 在地震研究中则表明: 当概率  $P > P_c$  时, 地震一定会发生, 但并不一定立即发生. 这样得到的临界点与所研究的区域无关. 实际工作中, 应结合某一确定区域, 详细研究较大地震的临界行为, 经验地确定临界概率  $P_c$ .

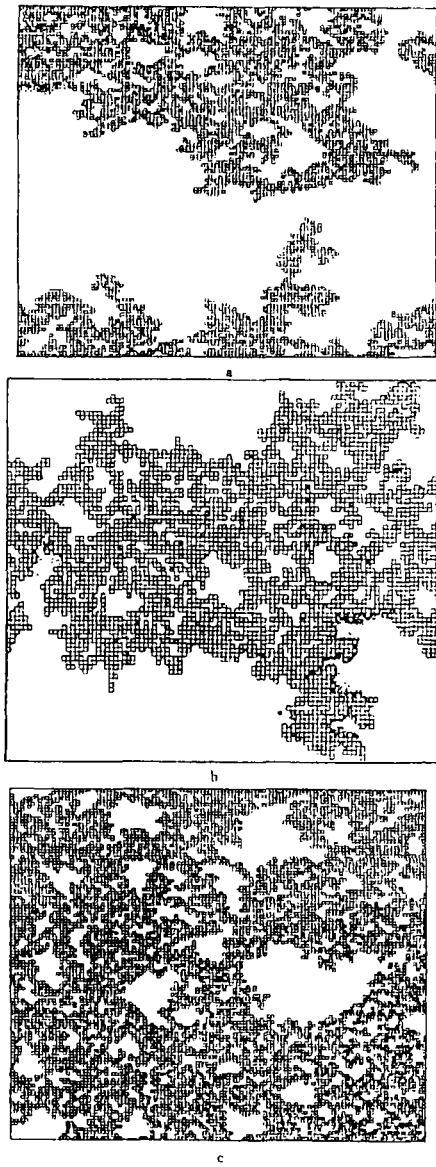


图 4 集团扩展连接变化

Fig. 4 Largest connected cluster developing sketch.

a  $P = 0.58$ ; b  $P = 0.59275$ ; c  $P = 0.60$

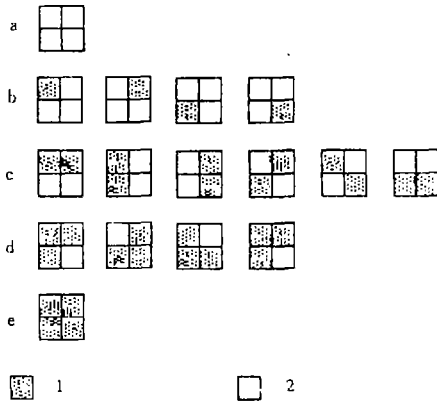


图 5 重整化群构形-映射原理

Fig. 5 The diagram of principle between configuration and shine on renormalization.

1 活跃, 概率为  $P$ ; 2 不活跃, 概率  $1 - P$ ;  
 a  $(1 - P)^4$ ; b  $P(1 - P)^3$ ; c  $P^2(1 - P)^2$ ;  
 d  $P^3(1 - P)$ ; e  $P^4$

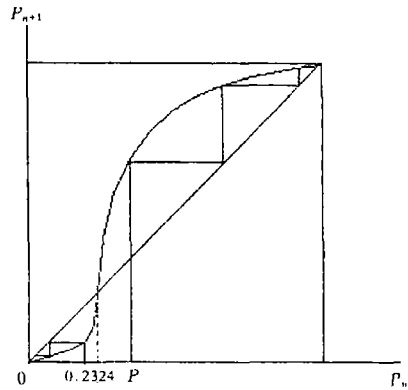


图 6 映射  $P_{n+1} - P_n$  过程

Fig. 6 The process diagram of shine upon  $P_{n+1} - P_n$ .

### 3 震例的应用研究

选用 6 个月为时间滑动窗, 以 12 个月计算方式进行时间扫描, 空间上用  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  滑动,  $1^\circ \times 1^\circ$  计算进行空间扫描, 并将所有  $P \geq 0.23$  的区域勾划成空间变化图. 若  $P \geq 0.23$  的区域表明已经进入临界状态, 则地震的危险性较大. 为了使图像更直观、清楚, 这里给出了立体图和等值线图. 但由于篇幅所限, 本文只给出临界概率的空间分布图. 事实上, 相关长度与概率的空间演化特征基本相同, 因为相关长度的临界值是根据概率的临界值取得的, 为  $R_{gc} = 26.13$ .

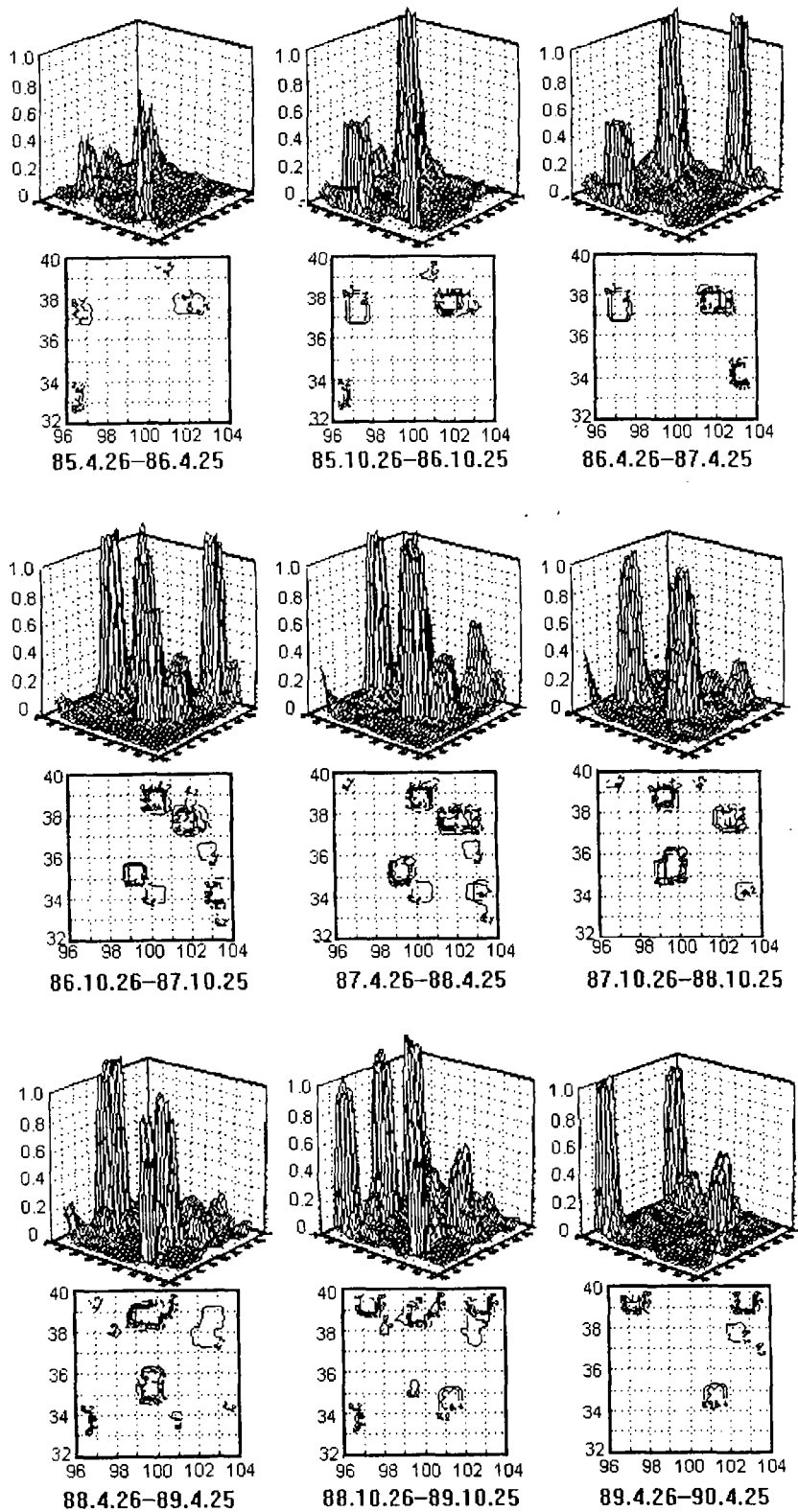


图7 共和地震前空间演化(震级下限为2.0)

Fig.7 The spatial evolutionary sketch of Gonghe earthquake.

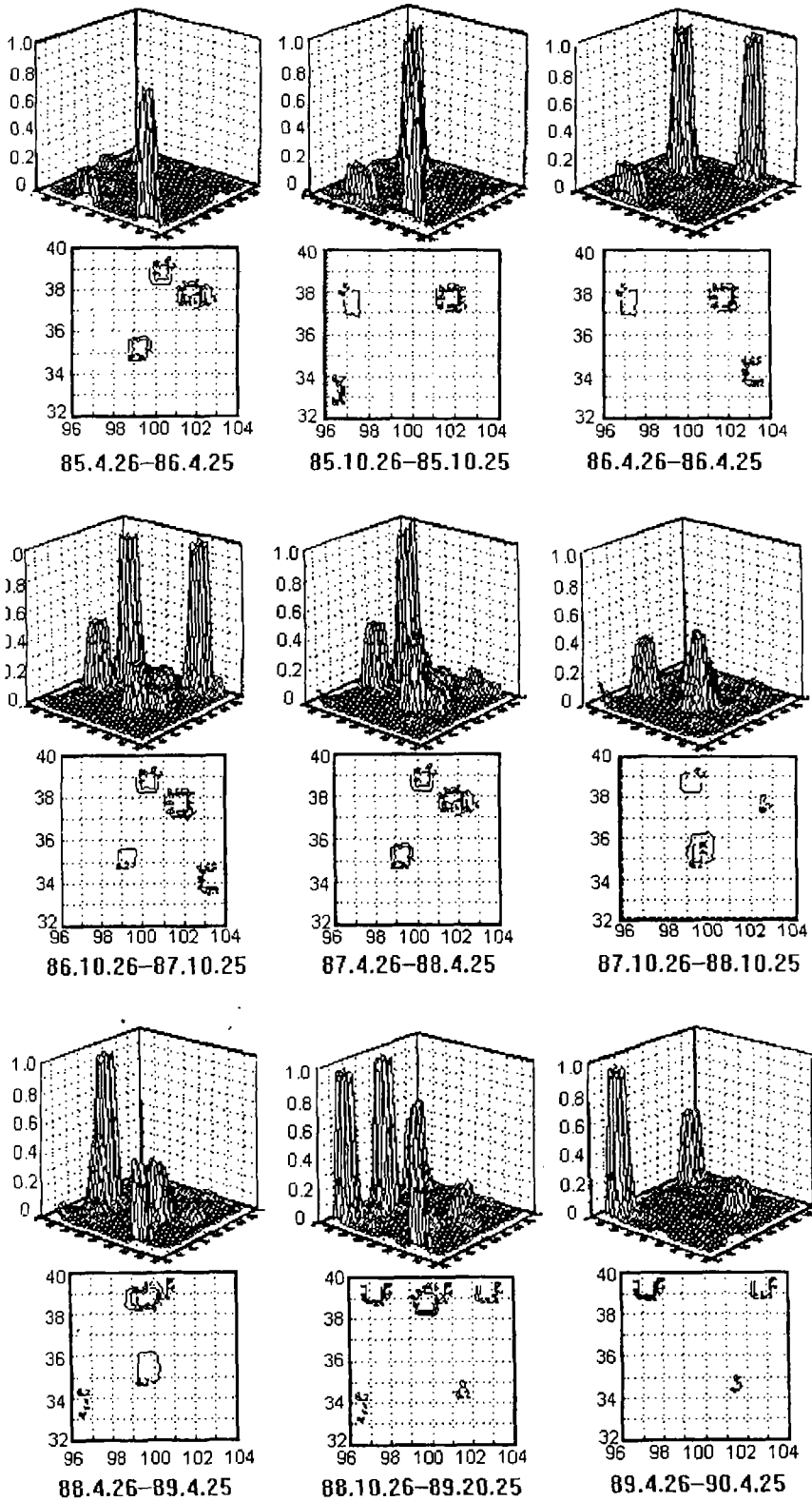


图 8 共和地震前空间演化(震级下限为 3.0)

Fig. 8 The spatial evolutionary sketch of Gonghe earthquake.

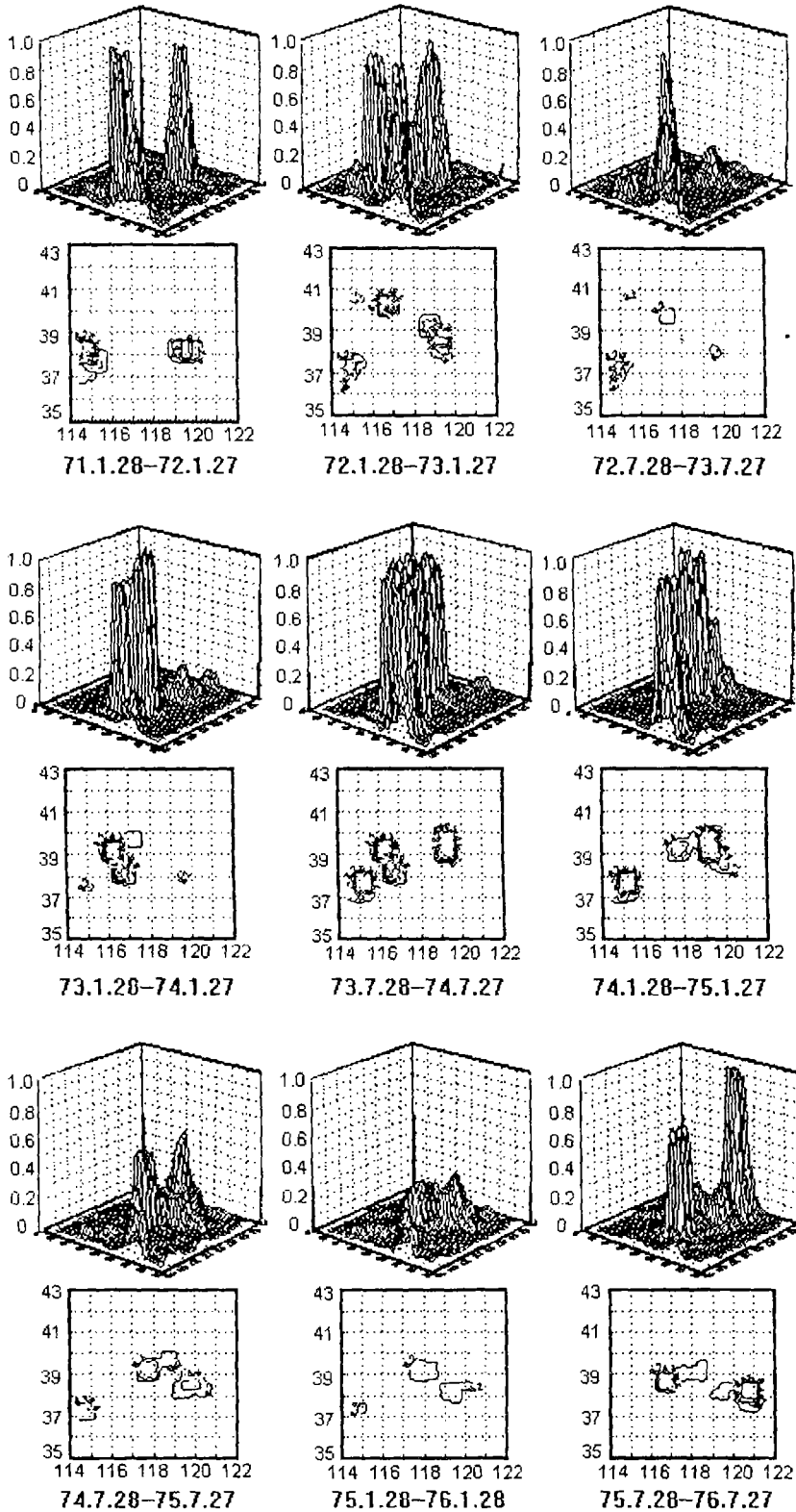


图9 唐山地震前空间演化(震级下限为2.0)

Fig.9 The spatial evolutionary sketch of Tangshan earthquake.

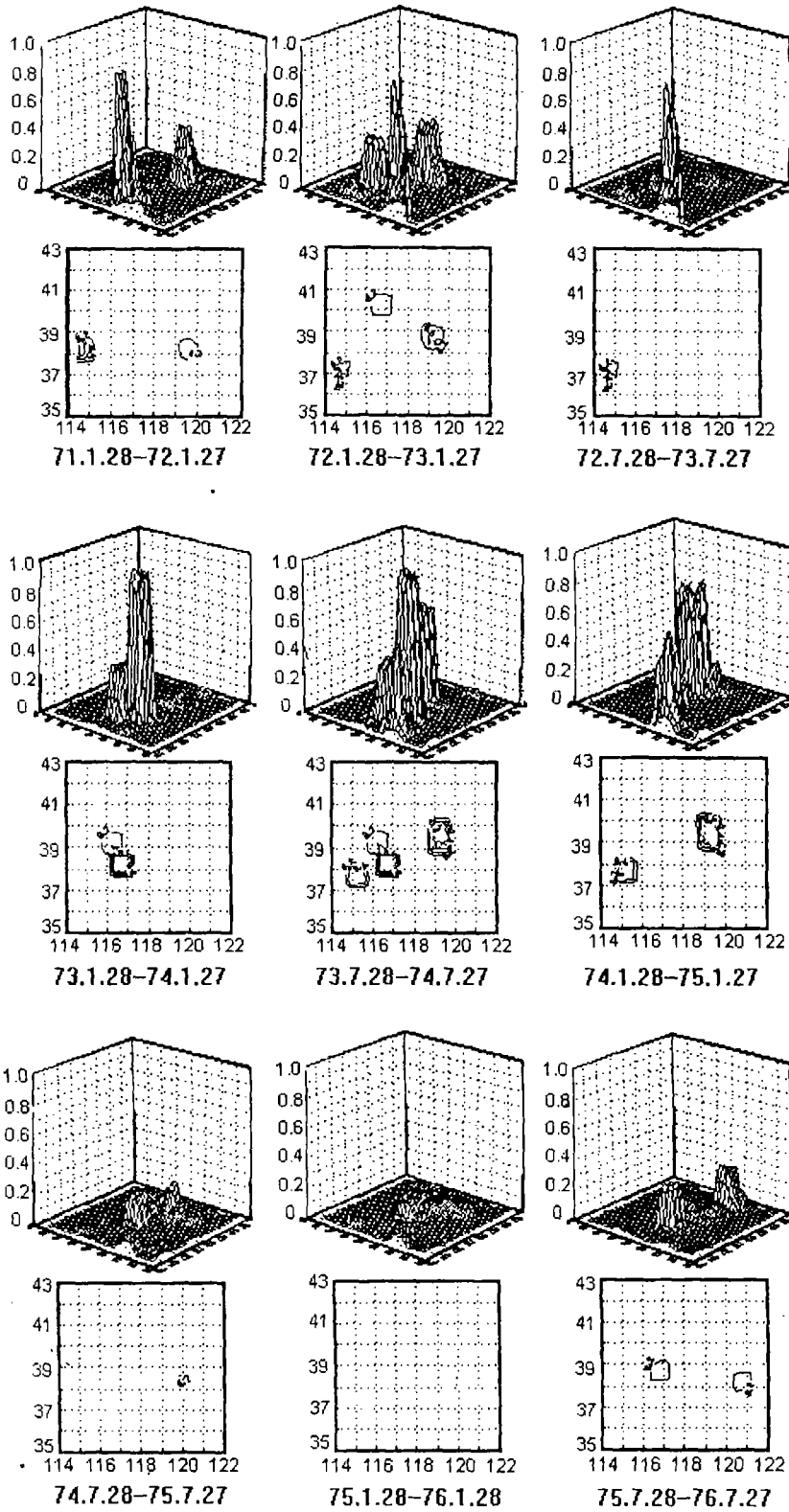


图 10 唐山地震前空间演化(震级下限为 3.0)

Fig. 10 The spatial evolutionary sketch of Tangshan earthquake.



以1976年7月28日唐山7.8级和1990年4月26日共和7.0级地震为例进行研究.唐山地震的震中位置是 $39^{\circ}38'N$ ,  $118^{\circ}11'E$ , 研究范围为 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}N$ ,  $114^{\circ}\sim 122^{\circ}E$ ; 共和地震的震中位置是 $36^{\circ}07'N$ ,  $100^{\circ}08'E$ , 空间研究范围为 $32^{\circ}\sim 40^{\circ}N$ ,  $96^{\circ}\sim 104^{\circ}E$ . 从这两次地震的空间演化图(图7~图10)可以看出如下特点:

(1) 无论单元内是 $32\times 32$ 点座还是 $16\times 16$ 点座, 计算结果均显示出空间特征的一致性, 即不仅整体上异常空间展布的范围有一个不断增大的过程, 而且震源区附近也有增大的过程.

(2) 对同一地震而言, 单元内的点座数不同, 其特征不尽相同. 如 $32\times 32$ 点座时, 震前一段时间内, 震源区异常空间分布较明显; 而 $16\times 16$ 点座时, 空间异常明显呈升高后回落, 最后发生地震的格局. 这说明大震前3级地震可能会很活跃, 有逐渐增强的态势, 而4级中等地震活动在大震前出现增多后又转而平静的过程. 无论点座大小, 大地震作为临界行为的演化过程是一致的.

这些特征也可用于预报地震发生的空间范围, 具体步骤是: ① 首先按上面的方法作出异常空间分布图, 研究其是否具有以上特征; ② 确定可能的孕震区, 即由异常区围成的区域, 暂定为初级预测区, 因为在自组织临界现象的演化过程中, 系统需要一定时间才能达到临界状态; ③ 若在初级预测区内出现新的异常区, 且异常持续时间达1a以上, 则在其边缘部位就有可能发生地震.

用这种方法曾对1976年松潘7.2级地震、1989年巴塘震群和1988年澜沧7.6级地震等作过空间位置的预测, 都有一定的效果.

## 4 结果与讨论

地震活动服从自组织理论, 大地震前的临界现象可以从地震活动的长程关联性和分形特征得到证实. 在生成空间演化图像时将临界概率、相关长度定量化, 并探讨了未来地震发生的空间范围. 据空间演化特征提出的确定地震发生地点的方法对地震预报有一定的实用价值. 但必须说明的是:

(1) 自组织理论在地震活动的具体应用研究中, 虽然临界值 $P_c = 0.23$ 时可以很好地显示出地震前的空间演化特征, 但由于 $P_c$ 是重整化群 $2/4$ 构形的理论计算结果, 可能与实际地震会有一些偏差.

(2) 实际应用中, 少数单元发生了中强地震, 这是临界现象演化过程中由低级单元向较高级单元演化的过程, 表明向无限大单元(对应大地震)的演化趋势, 概率 $P$ 此时将接近于1.

(3) 这种预测方法只能对未来地震的地点给出大概估计, 其预测精度目前尚不尽如人意, 尤其是发震时间的精度, 尚需进一步研究.

## 参考文献

- 1 郭大庆, 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.
- 2 兰从欣, 等. 基于自组织临界现象的中期地震预报算法研究. 西北地震学报, 1997, 19(1): 5~14.
- 3 Bak P, Tang C. Earthquake as a self-organized critical phenomenon. Journal of Geophysical Research, 1989. 94(BH): 15636~15637.
- 4 Creswick R J, et al. Introduction to Renormalization Group Method in Physics. A Wiley-Interscience Publication, 1991.
- 5 Turcotte D L. 分形与混沌——在地质与地球物理学中的应用. 北京: 地震出版社, 1993.

## STUDY ON THE SEGMENTATION IN EAST SEGMENT OF THE NORTHERN QILIANSHAN FAULT ZONE

Yuan Daoyang Liu Baichi Lu Taiyi  
He Wengui Liu Xiaofeng Gan Weijun  
(*Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000*)

### Abstract

In this paper, according to the 1:50 000 geological mapping information in east segment of the northern Qilianshan active fault zone, authors systematically analysed the geometry, inhomogeneity features of the displacement distribution, slip rates, palaeoearthquakes and historical earthquakes in time and space along the fault zone, then summarized the rupture segmentation. It is considered that the east segment of the active fault zone can be divided into Laohushan and Maomaoshan-Jinqianghe first class rupture segments. The Laohushan fault can be divided into east and west segments, the Maomaoshan-Jinqianghe fault can be divided into the Maomaoshan and Jinqianghe second class segments.

**Key words** Northern Qilianshan fault zone, Seismic activity, Palaeoearthquake, Segmentation

(上接 26 页)

## THE STUDY ON SEISMIC SPATIAL CHARACTERS BY USING THE SELF-ORGANIZED CRITICAL PHENOMENON

Lan Congxin Guo Daqing  
(*Seismological Bureau of Beijing City, Beijing 100080*)  
Shi Telin Yang Liming  
(*Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000*)

### Abstract

The theory of self-organized critical phenomenon is used to do a deepgoing research in earthquake prediction. Based on the physical meaning of all the variables, their usability in seismic science is discussed. The critical point problem about increasing small or moderate events before a strong earthquake is studied. Both the critical probability and the threshold of the correlation length are quantified. The spatial evolution pattern is essentially a kind of quantitative seismicity distribution map and can give approximate prediction for the spatial position of a future earthquake.

**Key words** Earthquake prediction, Self-organized critical phenomenon, Critical probability, Correlation length, Seismically spatial evolution pattern