

# 地震蕴育过程中地壳形变场图象 动力学参数的研究\*

周硕愚<sup>1)</sup>吴 云<sup>1)</sup>王若柏<sup>2)</sup>杨国华<sup>2)</sup>

1) 中国武汉 430071 国家地震局地震研究所

2) 中国天津 300180 国家地震局第一地形变监测中心

## 摘 要

地震蕴育过程中的地壳形变场具有分形特征, 分数维随时间而演变。强震发生在降维、减熵和有序化过程之后, 震后维数、熵值和有序度均恢复到正常基准, 反映了地壳形变场由均匀变形—非均匀变形—失稳—均匀变形的过程。分数维、信息熵和有序度可作为地壳形场图象动力学参数使用, 它们定量刻划了变形局部化过程。

**关键词** 地震蕴育; 变形局部化; 分数维; 信息熵; 有序度

## 1 岩石圈地壳形变结构的静态与动态分形

岩石圈具有层次结构, 它由板块边界带-亚板块边界带-断层-裂纹-微裂纹-晶体界面等多层次的边界嵌套不同尺度的块体组成, 尺度范围为  $10^5$ — $10^{-8}$  km, 因此, 岩石圈中的地壳形变可能具有分形特征。地球科学家们研究过岩石圈地壳形变的两种分形, 一种是岩石圈中断层系的分形, 其分数维  $D$ :  $1.01 \leq D \leq 1.60$  (Scholz and Aviles, 1986; Takayasu, 1985; 石特临, 1990); 另一种是天然岩石表面地形的分形,  $1 \leq D \leq 1.68$  (Brown and Scholz, 1985)。它们反映了与时间无关的分形, 或者说反映了作为地壳动力学过程结果的分形; 可视为地壳形变结构的静态分形。

地震的蕴育与发生是一种岩石圈动力学过程, 可将发震断层(近源区)及其周围相关的断层网络(近源区)视为一个具有多层次结构的非线性的蕴震动力学系统。在蕴震过程中系统内将产生出随时间而演化的地壳形变, 呈现出一幅幅十分复杂的动态图象(周硕愚 1988; 1990)。需要研究和证实: ①这种动态的地壳变形是否也具备分形特征? ②若具有分形特征, 其分数维是否随时间变化, 并可作为一种刻划蕴震系统动力学过程的参数来使用? 现已发表文章中, 尚无对此问题的实际研究。

\* 1993 年 5 月 20 日收到初稿, 1993 年 9 月 17 日决定采用。

## 2 地震孕育过程中地壳形变场的分形

在以北京为中心的  $3^\circ \times 2^\circ$  范围内(东经  $114^\circ 30' - 117^\circ 30'$ , 北纬  $39^\circ 00' - 41^\circ 00'$ ), 以 1965—1991 年 26 年间 7 期精密水准重复测量为基础. 王岩柏、杨国华编制了 6 幅随时问演化的地壳垂直形变系列图(图 1).

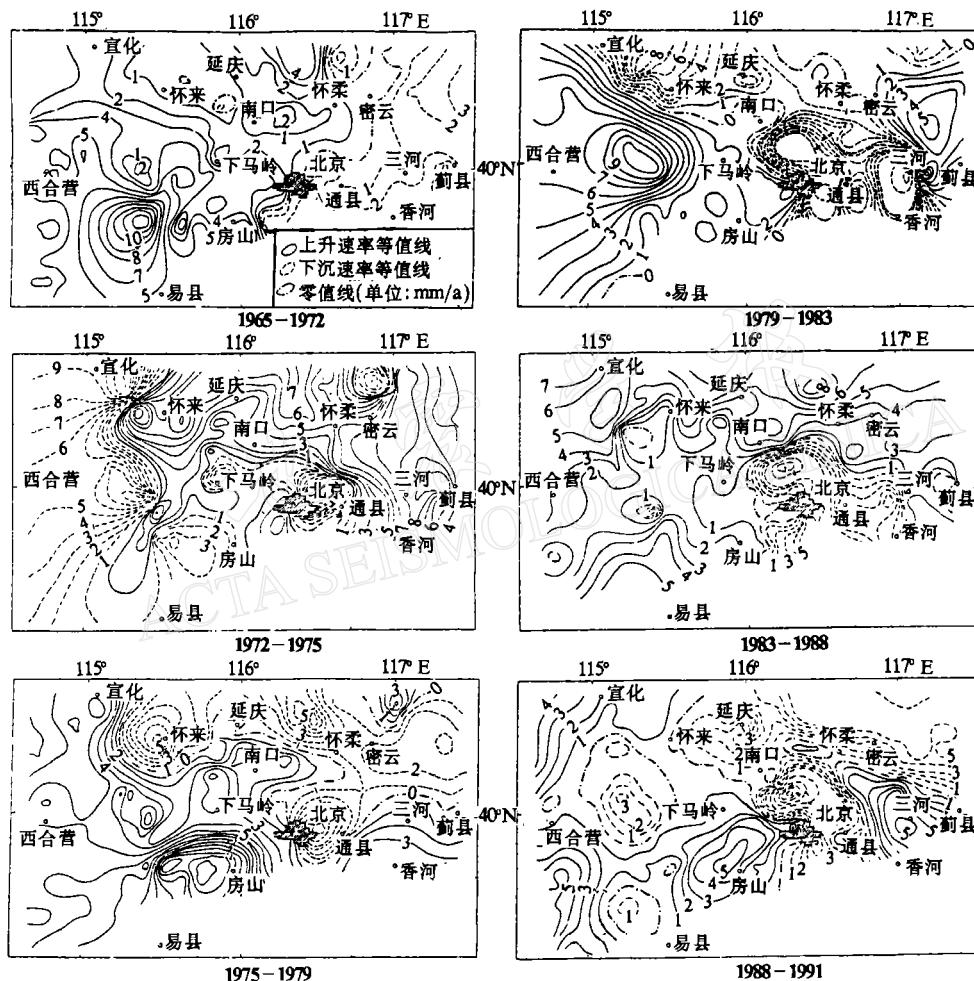


图 1 首都圈地壳垂直形变场动态演化系列图(1965—1991)

这一套系列图表达了该区由三条 NNE 向断裂带(紫荆关、八宝山和夏垫断裂带)及一条基本与它们相垂直的、贯穿此区的 NW 向断裂带(南口至宁河、渤海一线)交互作用所构成的断层块体网络系统, 垂直形变场 26 年间 的实际演化过程. 时空演化图象十分复杂, 我们希望每一幅图用一个图象动力学参数定量描述

$$\text{信息熵 } H(t) = I(t) = \sum_{i=1}^{N(r)} P_i(t) \lg P_i(t) \quad (1)$$

$$\text{有序度 } R(t) = 1 - \frac{H(t)}{H_{\max}} \quad (2)$$

$$\text{信息维 } D_1(t) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I(t)}{\lg \left( \frac{1}{r} \right)} \quad (3)$$

将每幅等变线图划分为大小相等的  $N$  个量测单元, 量测每个单元中的线条数并求出相应的概率  $P_i$  (用频率代替,  $P_i = n_i / \sum_1^N n_i$ ).  $r$  是量测单元边长缩小的倍数,  $N(r)$  为量测单元数.  $H_{\max}$  为最大熵.

由式(1)可见, 信息熵  $H(t)$  反映了形变场空间分布的不均匀程度. 当分布完全均匀时  $P_i = 1/N(r)$ , 则式(1)之值为最大

$$H_{\max} = \lg N(r) \quad (4)$$

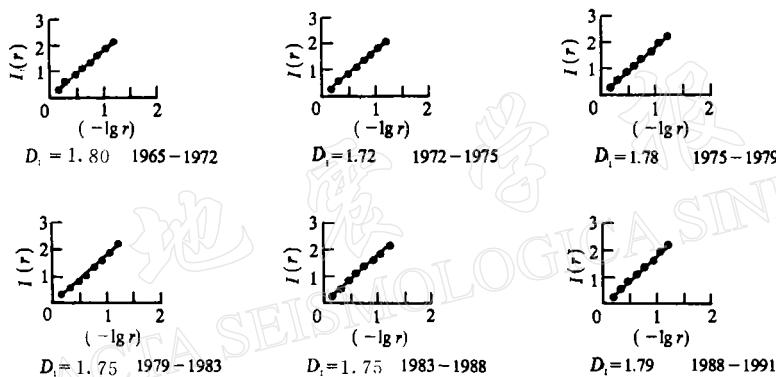


图 2 首都圈垂直形变场系列图的分维-信息维  $D_1(t)$

当变形极度不均匀, 所有变形均集中于某一个单元内时

$$H_{\min} = 0 \quad (5)$$

可见, 信息熵  $H(t)$  越小, 则变形分布越不均匀, 即形变局部化越强烈.

有序度  $R(t)$  是  $H(t)$  的归一化, 反映了  $H(t)$  对  $H_{\max}$  的相对变化率.  $0 \leq R(t) \leq 1$  归一化有利于在不同样本之间进行比较 (周硕愚, 1988).

信息维  $D_1(t)$  与信息熵  $H(t)$  不同之处在于, 前者考虑了量测单元的尺度变换. 因此, 它不仅能刻画形变场空间分布的不均匀性, 还揭示了形变场统计自相似性, 反映了其分形结构特征.

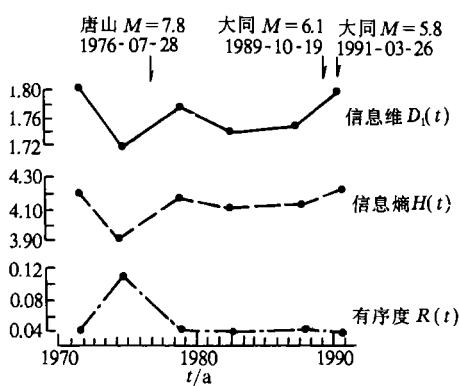


图 3 首都圈地壳垂直形变场图象动力学参量的时间演化与地震的关系

信息熵、信息维越小, 有序度越大, 表示变形局部化(不均匀化)程度越高; 反之亦然。因此  $H(t)$ ,  $D_1(t)$  和  $R(t)$  可作为变形局部化参数使用, 用以跟踪与定量刻划形变场空间分布不均匀程度和其结构的分形维数随时间的变化。

根据式(1)–(4), 对图 1 中的每一幅图分别计算其图象动力学参数——信息维  $D_1(t)$ 、信息熵  $H(t)$  和有序度  $R(t)$ , 计算结果示于表 1 和图 3。计算到小数后 4 位, 但初步的精度估算表明, 参数有效数字仅为小数点后第 2 位。

经过多次尺度变换由 6 个时区中分别求得的信息维  $D_1(t)$ , 每个均具有良好的线性无标度区(见图 2); 且  $D_1(t)$  随时间变化的形态与由单一尺度(量测单元固定为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ )求得的信息熵  $H(t)$  的形态十分相似(见表 1 与图 3), 说明地震孕育过程中的动态的地壳形变具有显著的统计自相似性, 和静态地壳形变一样也具分形特征。

表 1 首都圈地壳垂直形变场图象动力学参数

变形局部化 参 数	时 间 区 间					
	1965—1972	1972—1975	1975—1979	1979—1983	1983—1988	1988—1991
信息维 $D_1(t)$	1.80	1.72	1.78	1.75	1.75	1.79
信息熵 $H(t)$ (bit)	4.20	3.94	4.20	4.13	4.16	4.28
有序度 $R(t)$	0.04	0.10	0.04	0.04	0.04	0.03

### 3 蕴震过程的地壳形变图象动力学参数 ——分维、熵与有序度

以上对首都圈 26 年间(1965—1991)的地壳形变场演化图象及其参数作了研究。在此时间域中恰好经历了地壳运动与地震活动的两个相对活跃段(1976 年唐山  $M_s7.8$  地震前后; 1989 年大同  $M_s6.1$ 、1991 年大同  $M_s5.8$  地震前后)和它们之间的一个相对平静段。从表 1 与图 3 中可看出, 在唐山和大同强震前均出现了信息维  $D_1(t)$  和信息熵  $H(t)$  的下降以及有序度  $R(t)$  的上升过程, 强震发生在此过程终结并反向之后。

地震孕育过程中的地壳形变场具有分形特征,  $1.72 \leq D \leq 1.80$ , 其分维  $D$  随时间而变化。在强震之前会出现地壳形变场的降维、减熵和有序度增加的过程。它们反映了蕴震过程中地壳形变场时空分布由较均匀向较不均匀(局部化)的演进。岩石断裂力学和实验启示我们, 一个岩石系统的变形均匀化意味着柔性和处于较稳定状态; 而变形局部化则意味着局部应变率增加, 微裂隙在局部集中, 有可能导致宏观破裂发生, 即处于较不稳定状态(马瑾, 1987)。因此, 变形局部化可能是地震地壳形变中期前兆的一项基本特征。从复杂的时空图象中直接计算分维、信息熵和有序度, 是定量描述和跟踪地壳变形局部化过程的有效途径。

地震孕育过程中地壳形变场的分形特征表明, 震前的变形局部化(不均匀分布)关系, 不仅是震源区主破裂对蕴震系统而言, 也存在任一局部区域中。本研究区域东西长度约 330 km, 南北长度约 220 km, 区域的中心距唐山 7.8 级和大同 6.1 级地震的震中分别为 300 km 和 350 km, 整个区域位于此两次地震震源区之外的“近源区”中。说明在

强震蕴育过程中,在震源区外的近源区内也会出现可观测到的地壳形变局部化过程,表现了蕴震系统震源区和近源区的整体联系,这对地震预报是有利的。强震蕴育过程中近源区内会出现一些空间上彼此分散,具有形变高梯度特征的“形变岛屿”、应变(应力)相对集中的局部地区(“类似震源区”)。它们也会在自己的周围激发出多种前兆异常现象,从而使前兆的空间分布范围远大于震源区范围。强震发生后,这些“形变岛屿”会自动解体,整个地壳形变场调整,重新趋于与正常继承性运动相应的准均匀化。分数维、信息熵和有序度将大致返回到本区域的基准值(本例中分数维的基准值大约是1.80)。表现了地壳形变场在强震发生后仍要自动地恢复到基准态(继承性构造运动平衡稳定态)的自组织特性。

信息维、信息熵与有序度可直接由观测值生成的图象算出,具有明确的物理意义。可望作为地壳形变系统动力学和图象动力学(周硕愚,1990;1992;陈颙、季颖,1992;吴云,1993)的参量使用。它们沟通了唯象学与动力学,具有现今地壳动力学和地震前兆标志意义。

### 参 考 文 献

- 陈颙、季颖,1992. 图象动力学,中国地球物理学会年刊, p. 25. 地震出版社,北京。
- 马瑾,1987. 构造物理学概论,386pp. 地震出版社,北京。
- 石特临、郭大庚、杨玉衡、郭建康、肖丽珠、孙景春,1990. 祁连山与龙首山断层的分维特征. 西北地震学报, **12**, 3, 23—32.
- 吴云、龚凯虹,1993. 孕震前兆场图象演化的整体特征. 地壳形变与地震, **13**, 3, 39—46.
- 周硕愚,1988. 系统科学导引,229pp. 地震出版社,北京。
- 周硕愚,1990. 板内地壳形变系统动力学与地震预报. 地壳形变与地震, **10**, 4, 1—7.
- 周硕愚,1992. 非线性理论在地震预报中的应用. 地球物理学进展, **7**, 1, 36—44.
- Brown, S. R. and Scholz, C. H., 1985. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *J. Geophys. Res.*, **90**, 12575—12582.
- Scholz, C. H. and Aviles, C. A., 1986. The fractal geometry of faults and faulting. In: Das, S., Boatwright, J., Scholz, C. H. and Maurice Ewing (editors). *Earthquake Source Mechanics*, Vol. 6, 147—155. AGU, Washington, D. C.
- Takayasu, H., 1985. A deterministic model of fracture. *Prog. Theor. Phys.*, **74**, 1343—1345.