

地震活动前兆的三种广义分形维

敖力布

(内蒙古师范大学物理系, 呼和浩特 010022)

摘要 地震研究及其预报是多学科的交叉, 而非线性科学即分形学和混沌理论给人以新启示。本文叙述了地震的广义能量分维, 广义时间分维和广义空间分维, 探讨了三种广义分维在地震的前兆和余震中的变化规律, 进而指出三种广义分维由主震前的低值异常变为震后再度回升现象。作者对第 5 个地震活跃期的特点提出了一些看法。

主题词: 地震前兆; 分形; 分维; 非线性理论

0 引言

地震预报是涉及国计民生的大事情, 又是难度极大的世界性课题。分别单一利用分形学或混沌理论去分析地震活动不足以捕捉它的全部信息, 进而影响较准确掌握地震规律, 及时、空、强的预测。

地震的孕育及发震是一个非线性过程, 这一点已经得到共识。地震的多项信息服从分形和混沌规律^[1], 多数中强震表现出明显的分形结构和混沌机制。本文讨论三种广义分维在地震及其预报中的应用。

1 分形分维

分形体内任何相对独立的部分(分形元和生成元)在一定程度上都是整体的再现和缩影。分形的表现是具有自相似性、层次性、递归性和标度不变性。在无特征长度的无规形体内比如树叶枝干、海岸线、雪花冰晶、地震、地下石油、金属断裂表面, ……这种几何形体的维数是分数(个别整数)。分形概念的精髓在于貌似杂乱无章的东西不见得毫无自己的特征和内在规律性^[2], 分数维是分形的表征参量。非线性科学含三个内容即分形混沌及孤粒子, 前两种理论是科学上的“双生子”, 目前在地震及其预报的研究中应用较多的是分形和混沌。地震活动是一种高度自我排列和自我组织的复杂多重分形运行机制^[1,3], 为准确掌握某次地震的情况必须同时考虑的它强度、时间和空间三种广义分形维^[2]。由时空强序列信息组成的数据库和资料库明显提示地震活动是一个非线性非平衡开放系统, 它的非线性机理由其分形结构和混沌机制来剖析。

2 地震活动的分形分维

主要由地震的时间分维、空间分维和能量分维来表征。

2.1 广义能量分维^{[2][4]}

地震能量由其震级决定,释放的能量越多震级越高,破坏性越大。震级根据仪器记录的震波来测定,震级的分布有自相似结构,震级越高发生的次数越少。因此我们可以引入能量分形概念。由地震学知,震级 M 与震波能量 E 的关系为:

$$\log E = A + 1.5M \quad (1)$$

据地震频度—震级线性关系式

$$\log N_T = a - bM \quad (2)$$

和(1)式可得

$$N_T \propto E^{-D/1.5} \propto E^{-D} \quad (3)$$

以能量为标度分别取

$$E_0, E_1, E_2, \dots, E_n = \frac{E_0}{2^0}, \frac{E_0}{2^1}, \frac{E_0}{2^2}, \dots, \frac{E_0}{2^n} \quad (4)$$

为了实际操作方便,根据统计原理,定义广义能量分维

$$D_0 = \frac{D_{b_1}(E_0/2^0) + D_{b_2}(E_0/2^1) + \dots + D_{b_n}(E_0/2^n)}{n} \quad (5)$$

由(3)式知

$$D_0 = b/1.5 \quad (6)$$

其中 b 为 $b = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{n}$ (7)

对震例实际观测发现, b 值的范围在 $0.7 \leq b \leq 1.3$, 所以 $0.47 \leq D_0 \leq 0.87$ 。 b 值所反映的自相似性跨度很大,而且它随时间空间在变化。主震来临前的中小地震中 b 值有明显下降。比如 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级大震, 1960 年 5 月 22 日智利 8.9 级大震实际观测结果是震前 53 次其平均 b 值为 $b = 0.55$, 余震 186 次其平均 b 值为 $b = 1.33$, 显然主震前 b 值下降, 主震后升高。看得出, 广义能量分维 D_0 可做为地震预报的单项新参考参数之一。

2.2 广义时间分维^{[2][5]}

地震事件在时间轴上为点过程,地震序列在时间轴上是一个不连续的点集合。现取时间序列起点为一单位时间,时间标度 ϵ 可取 $(1/2)^n$ 天, $n = 1, 2, \dots$, 相应地有震时间段数 $N[(1/2)^n]$ 。以 $\ln N(\epsilon)$ 为纵坐标以 $\ln(1/\epsilon)$ 为横坐标,在双对数纸上绘出 $\ln N(\epsilon) - \ln(1/\epsilon)$ 曲线,其斜率不为 1 的直线部分即是无标度域。无标度域的存在说明时间序列具有分形结构,其广义分维

$$D_1 = \ln N(\epsilon) / \ln \epsilon \quad (8)$$

为操作方便时间标度分别可取 $\epsilon \rightarrow 2^1, 2^2, \dots, 2^n$ 天相应的分维为 $D_{11}(2^1), D_{12}(2^2), D_{13}(2^3), \dots, D_{1n}(2^n)$, 按统计规律时间序列广义分维 D_1 为

$$D_1 = \frac{D_{11}(2^1) + D_{12}(2^2) + \dots + D_{1n}(2^n)}{n} \quad (9)$$

地震学者认为广义时间分维 $D_1 < 0.5$ 时被认为低值异常,低值异常预示着主震的来临。对 1970~1988 年在华北南部发生的固镇、溧阳、菏泽、南黄海和射阳等五个震例中取主震震中附近 $4^\circ \times 4^\circ$ 范围,震前 6 年至震后 1 年的时段,在华北北部发生的海城、和林格尔、唐山、巴音木仁、介休、五原和丰镇等 7 个震例中取 $3^\circ \times 3^\circ$ 范围,共 165 次震前活动时间序列

的分析表明,多数有分形结构,分维值由低值异常再度回升。表1列出部分地震时间序列分维低值异常情况^[6]。

表1 时间序列分维

震区	震级/M	震前/D ₁	余震/D ₂	震区	震级/M	震前/D ₁	余震/D ₂
溧阳	≥2.0	0.46	0.78	唐山	≥0.40	0.438	0.66
菏泽	≥3.0	0.375		巴音木仁	≥4.0	0.432	
海城	≥2.0	0.459	0.67	介休	≥3.0	0.402	
和林格尔	≥2.0	0.449		五原	≥3.0	0.423	

上述几个主震的震前的广义时间分维均低于0.5,部分学者认为可作中期地震趋势判断的统计单项前兆指标参考参数。综合研究表明,时序分维值大小受多种因素所制约,由于参数选取不同,同一震例可能得出不同结果,必须尽可能掌握近期信息,十分小心地拟合各种参数的协同作用才能得出可信度较高的结论。

2.3 广义空间分维^{[2][5]}

研究表明,地震活动在空间分布上有自相似性即分形结构。我们可以用空间分布信息分维来描述它的特征。信息分维

$$D_2 = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum P_i \ln(1/P_i)}{\ln \epsilon} \quad (10)$$

其中 ϵ 为标度值即覆盖分形体的小矩形的尺寸, P_i 为分形结构落入第*i*个小矩形的概率,求和对所有非空小矩形进行。要研究空间跨度为 $m \times n$ 的矩形区域, $\epsilon \rightarrow 0$ 相当于 $m, n \rightarrow \infty$,取 $i = 1, 2 \dots m, j = 1, 2 \dots n$,此时(10)式变为

$$D_2 = \lim_{m, n \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(1/P_{ij})}{\ln(m, n)} \quad (11)$$

在双对数坐标纸上作 $\ln \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(1/P_{ij}) \sim \ln(m, n)$ 曲线,有三个直线段,中间一段的斜率为空间分布信息分维 D_2 的值,上下限对应的范围即是无标度域。实际选取小矩形边长最小不能使 ϵ_{min} 小于0.04平方度即边长不能小于0.2度,约为22km。为操作方便,可取空间标度 ϵ 分别为 $L_0/2^1, L_0/2^2, L_0/2^3, \dots, L_0/2^n (n = 1, 2 \dots)$,相应的空间广义信息分维为 $D_{21}(L_0/2^1), D_{22}(L_0/2^2), \dots, D_{2n}(L_0/2^n)$,按统计规律

$$D_2 = \frac{D_{21}(L_0/2^1) + D_{22}(L_0/2^2) + \dots + D_{2n}(L_0/2^n)}{n} \quad (12)$$

研究表明,地震空间分布有分形结构,利用不同时段中的 D_2 可以较好的描述地震空间分布不均匀和随时间变化特征,可作为地震预报的单项参考指标。

图1表示唐山地区1970~1987年6月地震空间分布信息维 D_2 随时间变化情况^[5]。其中 $\bar{D}_2 = 0.177 \pm 0.009$,从1974年开始下降到主震来临(1976.7.28)时达到最低 $D_2 = 0.148 \pm 0.009$,震后再回升,回升速度有快有慢。显然反映出地震空间分布的分形性。这里 D_2 与*b*值有关系,有时正相关(D_2 降低),有时负相关(D_2 上升)。谢永认为 D_2 与*b*值

的关系为^[6]

$$D_2 \approx 2.3 - 0.73b \quad (13)$$

对包头西 6.4 级强震的余震计算结果是 $D_2 \approx 1.6503$, ($b=0.89$), 有负相关的趋势。

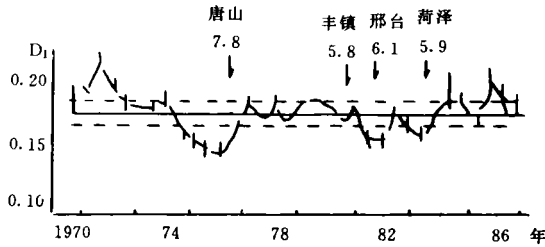


图 1 唐山地震信息维数随时间变化

3 结束语

我国已处于第 5 个地震活跃期。过去世界上公认,希腊、意大利、伊朗、土耳其和中国是少震或存在多处无震区的国家^[7]。在国内有人曾认为,华北及其中西部(内蒙古)地区是少震(相对而言)或存在多处无震区的地带。可是近几年地震的不速之客确实来访这些“无震区”。比如 1995 年 5 月 13 日希腊北部马塞陶尼亚(Macedonia)西的一个被认为是无震区的格烈维纳(Greveva)瞬间发生了 6.6 级强震,1996 年 5 月 3 日内蒙古包头西突然发生 6.4 级强震,1998 年 1 月 10 日河北张北地区的破坏性地震等都说明过去研究的地震活动带内的大地构造理论和地震烈度区划图需要重新修订,多采用些分形学(分形维)、混沌理论等新的非线性科学思路去分析地震,认为一些地方无震区而“高枕无忧”的思想不可再有,对一些被认为少震或无震区有必要提出警告,要准备“接待”地震不速之客的来访。作者愿与广大地震学同行专家商榷。

(1997 年 10 月 20 日收到初稿)

参 考 文 献

- 1 陈颀,等.分形与混沌在地球科学中的应用.学术期刊出版社,1989,67~84
- 2 敖力布.分形学导论.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1996,465~468
- 3 肯尼思,法尔科内著,曾文曲等译,分形几何—数学基础及其应用,沈阳:东北大学出版社,1993,340~353
- 4 林鸿溢,李映雪.分形论——奇异性探索.北京理工大学出版社,1993,272~282
- 5 张建中,孙加林.大华北 10 次中强震前后广义时间分维的变化及其在中短期预报中的应用.中国地震,1994,9.
- 6 谢永.地震分布空间分维数 D_s 与 b 值之间关系探讨.中国地震,1997,(2):186~188
- 7 王妙月.地震不速之客访问“无震区”.物理,1997,26(12):753~754

THREE KINDS OF GENERALIZED FRACTAL DIMENSIONS OF THE PRECURSORS OF EARTHQUAKE ACTIVITY

Ao Libu

(Department of Physics of Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022)

Abstract

The study of earthquake and its forecast is a multi-discipline overlapping. Some new enlightenment is given by non-linear science such as fractals and chaos. In this paper, the generalized energy fractal dimension, the generalized time fractal dimension, and the generalized space fractal dimension for describing earthquake are presented. The varying pattern of these three generalized fractal dimension in aftershocks of an earthquake is also discussed. In this way it is pointed out that there is a phenomenon in which three generalized fractal dimensions change from decreasing anomaly before earthquake to increasing repeatedly after earthquake. As the characteristics of the 5th earthquake active period, some opinions are put forward.

Subject words: fractal dimension; non-linearly; earthquake