

华北地区地震分布多标度分形特征的初步研究

蒋海昆 魏光兴

(山东省地震局)

摘要

依据“固定质量法”的定义及原理,本文给出了一种判断地震空间分布分形结构及计算 D_0 的方法。利用该方法对华北地区地震的空间分布特征进行了初步研究。结果表明,在满足一定的统计条件下,不同区域范围内、不同时间段的地震分布均具有分形结构。围绕海城、唐山大震区分别选择4个大小不同的区域,分不同时段计算其 D_0 - q 谱。结果表明,强震前后其形态无显著变化。强震前在较大的区域范围内, D_0 值有降低的趋势,震后回升;在震源区周围较小区域内, D_0 的变化相反;而有的区域强震前后 D_0 值没有变化。

关键词:华北;多标度分形;震中分布;

一、引言

近年来,由 B. B. Mandelbrot 创立的分形理论在地震界受到广泛重视,但一般都是将地震现象作为简单分形来进行研究的。事实上,如同自然界中的大多数事物一样,地震活动具有复杂的分形结构,并不存在一个普适的分形维数,必须用一个多标度分形谱来描述。

多标度分形(multifractal)主要用来讨论某个参量的几率分布,这一概念是在1968年由Mandelbrot首先提出的。1983年Grassberger及Procaccia等在研究奇异吸引子时发展了这一概念并给出通常所使用的数学公式。此后,国内外许多学者也相继进行了这方面的研究^[1-5]。

本文基于“固定质量法”的原始定义^[4,5],进一步给出一种 D_0 值的计算方法,运用该方法初步研究了华北地区地震空间分布的多标度分形特征,同时对有关问题进行了讨论。

二、方法简介

固定质量法(fixed mass method)的定义式是^(4,5):

$$\log \langle R(m)^{-(q-1)D_q} \rangle \doteq - (q-1) \log m \quad (1)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示按圆心(基准点)平均, m 为质量, $R(m)$ 为质量为 m 时的最小半径, q 为阶数, $q \in (-\infty, +\infty)$, D_q 即多标度分形的 q 阶广义维数。文献[4]介绍了由(1)式计算 D_q 的一种方法,但由于地震空间分布无标度区相当窄,并且一般线性规律亦不甚明显⁽⁶⁾,因而与通常的方法一样,用该方法计算不但操作繁琐而且普遍地带有人为误差的积累,特别是“无标度区”不易准确确定,从而引起一系列测算误差。

本文采用的方法是:确定研究区域,为尽可能地消除边缘效应的影响,在比研究区域略小的区域内布设 N 个基准点,基准点可随机布设亦可均匀布设,当 N 足够大时二者是一致的。取定质量 m_j ,对第 i 个基准点统计得到 $R_i(m_j)$,对一系列基准点,由(1)式有:

$$\log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(m_j)^{-(q-1)D_q} \right] \doteq - (q-1) \log m_j \quad (2)$$

由(2)式定义差值形式的目标函数 $\Delta(x)$:

$$\Delta(x) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(m_j)^{-(q-1)x} - m_j^{-(q-1)} \right| \quad (3)$$

固定 q 值,将 x 取极小值,即当质量为 m_j 时,由(3)式计算得到 D_{qj} 。变换“质量” m_j ($j=1, 2, \dots$),相应地得到一系列 D_{qj} 。以 m_j 为横坐标, D_{qj} 为纵坐标绘图。当 m_j 较小($m_j < m_u$)时,由于样本数较少等许多原因, D_{qj} 的分布可能是紊乱的;当 m_j 无限制地增大时,由于研究区域有限(因而 $R_i(m_j)$ 有限),由(2)式可知,此时 D_{qj} 将随 m_j 增大而增大,其数值亦不是广义维数;若地震分布具有分形特征,则在一定的 m_j 分布范围 $[m_u, m_d]$ 内, D_{qj} 将呈水平状排列,其均值即为广义维数 D_q ,相应地这一范围即“无标度区”, m_u 、 m_d 分别为“无标度区”的上、下限。

在 $D_{qj}-m_j$ 图上初步确认呈水平状排列的数值起止点,假设起止点为 n_1 至 n_2 ,分别取下列范围内的点: n_1-1 至 n_2-1 ; n_1+1 至 n_2+1 ; n_1 至 n_2 ; n_1-1 至 n_2 ; n_1 至 n_2+1 ; n_1-1 至 n_2+1 。以

$$D_{qj} = a + bm_j \quad (4)$$

作最小二乘拟合,这相当于找寻 $D_{qj}-m_j$ 图上水平分布最佳点集的过程。(4)式中 b 为衡量点集水平程度的量, δb 则可用来判断点集的离散程度。在理想情况下应有 $b \rightarrow 0$ 、 $\delta b \rightarrow 0$ 及 $a \rightarrow D_q$ 。由此可确认最佳的“无标度区”,其间所有 D_{qj} 的均值即为广义维数 D_q 。

变换 q 值,由上述步骤即可构造 D_q-q 谱系。应指出的是,“质量” m_j 是广义的,在实际研究中可以是能量、应变或频数等等。本文仅研究地震频数的空间分布,即取质量 m_j 为地震数。

三、华北地区地震空间分布的多标度分形特征

选取 1970—1981 年华北地区 $2.3 \leq M_L \leq 6.8$ 的地震资料,删除中强以上地震的余震序列,分析华北地区不同研究区域、不同时段的地震分布的分形结构及其特征。视海

城、唐山大地震为一组相关的事件,取研究时段为1970—1976年6月及1977—1981年,在两个大时段内又采用等地震数滑动的方式分几个小时段进行计算。围绕海城、唐山大地震区选择4个研究区域。基准点布设区域及有关参数见表1。4个研究区从a→d其范围是逐渐缩小的。采用沿经纬度方向以 0.5° 为间隔均匀布设基准点,对 m_i 分别取50,100,150, ..., m_0 。 m_0 为每次参加计算的样本数,一般取为1000。为了节省篇幅,对于计算结果,本文仅给出a区地震分布的有关曲线图。

表1 研究区域及基准点布设区域简表

区域代号	研究区域	基准点布设区域	样本数 m_0
a	$30^\circ-42^\circ\text{N}, 110^\circ-123^\circ\text{E}$	$32^\circ-40^\circ\text{N}, 112^\circ-121^\circ\text{E}$	1000
b	$32^\circ-42^\circ\text{N}, 112^\circ-123^\circ\text{E}$	$34^\circ-40^\circ\text{N}, 114^\circ-121^\circ\text{E}$	1000
c	$34^\circ-42^\circ\text{N}, 114^\circ-123^\circ\text{E}$	$36^\circ-40^\circ\text{N}, 116^\circ-121^\circ\text{E}$	1000
d	$36^\circ-42^\circ\text{N}, 116^\circ-123^\circ\text{E}$	$37^\circ-41^\circ\text{N}, 117^\circ-122^\circ\text{E}$	500

1. 地震分布多标度分形结构特征

根据计算结果作出各区不同时段 $D_{q_i}-m_i$ 图。多数图均显示,当 m_i 较小时, D_{q_i} 随 m_i 增大而增大,是标度相关的;在少数情况下,当 m_i 较小时, D_{q_i} 分布紊乱。一般地当 $m_i \geq m_a$ 时, D_{q_i} 分布与 m_i 无关,其呈水平状排列,表明地震空间分布是自相似的,具有分形结构。这一共性普遍地存在而与区域或时段等无关。表现分形结构的“尺度”分布范围与区域大小有关而与时间关系不大,a、b、c三个区域的“无标度区”下限 m_a 介于550—600之间,而对范围较小的d区则 m_a 约为400,表明地震分布的分形结构具有一种层次性特征,即较大范围内的地震分布其无标度区较大,而较小范围内的地震分布的无标度区则较小。由于受最大计算样本数的限制,“标度” m_i 无法取得更大,本文未能确定出无标度区上限 m_b 。

取 $q=-3-3$,计算 D_q 谱。结果表明,尽管 D_q 变化量值极小,但 D_q 随 q 增大略有降低, D_q/D_0 大多介于0.99—1.02之间,表明地震的空间分布不存在普适的标度指数,仅具有弱的多标度分形特征(图2)。强震前后不同时段、不同区域的地震分布的 D_q-q 谱形态基本一致,表明对应于不同 q 值的 D_q 对大地震的敏感程度是相当的,这意味着采用研究强震前后 D_0 、 D_1 或 D_2 随时间变化来进行地震预报的方法^(7,8,9),可能是有效并且是简便易行的。

任意选择a区的几个时段,计算 $q=-6-6$ 时的 D_q-q 谱,没有发现 D_q 随 q 的畸变,即在本文的研究范围内,在 $q \geq -6$ 时无多标度分形的“相变”现象⁽¹⁻³⁾出现。

2. 地震分布多标度分形的数值特征

(1)对 $D_{q_i}-m_i$ 图上已确定出“无标度区”的一部分点用(4)式进行拟合,得出系数 b 一般分布于 $\pm 10^{-5}-\pm 10^{-7}$ 范围内, δb 一般介于 $10^{-6}-10^{-7}$ 之间,说明这一部分点分布确是水平的($b \rightarrow 0$),并且波动极小,其一致性较好($\delta b \rightarrow 0$),因而无标度区内 D_{q_i} 的均值即可近似作为 D_q 。

(2)图3为 $q=-2, 0, 2$ 时,a区地震分布的 D_q 随时间的变化曲线。由图3可见,虽然 D_q

数值略有差异,但三条曲线总的变化趋势是相同的,并且都显示了强震前维数降低,震后略有回升的特点。

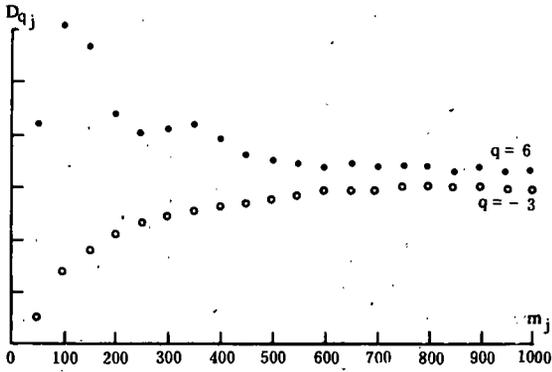


图1 a区地震分布的 $D_{qj}-m_j$ 示意图
(1970年1月1日—1972年6月4日)

Fig. 1 $D_{qj}-m_j$ diagram of earthquake distribution in a' area (from Jan. 1, 1970 to June 4, 1972)

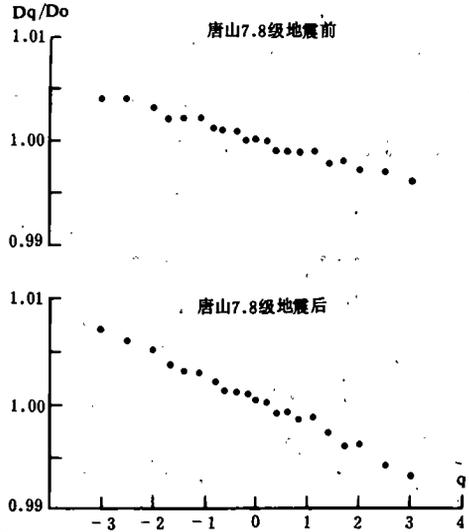


图2 a区地震分布的 D_q/D_0-q 谱曲线

Fig. 2 D_q/D_0-q curve of earthquake distribution in a area

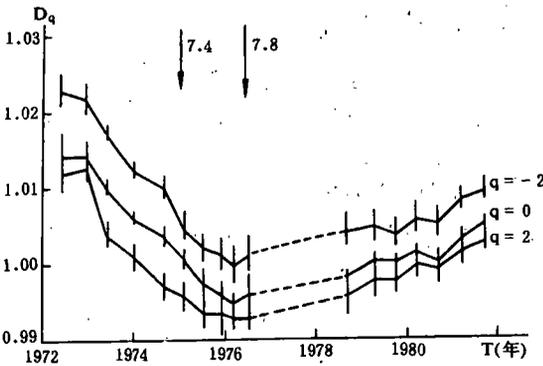


图3 a区地震分布的 D_q 随时间变化图
($q=-2, 0, 2$)

Fig. 3 $D_q (q=-2, 0, 2)$ versus time diagram of earthquake distribution in a area

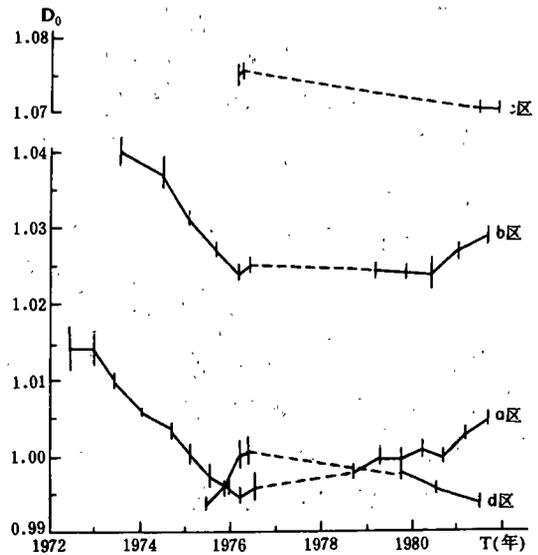


图4 不同区域 D_0 值随时间变化图

Fig. 4 D_0 versus time diagram in different areas

(3)图4为 $q=0$ 时,4个区域 D_0 值随时间的变化曲线。由该图可以看出,对于a、b、c 3个区域,随着其范围的逐渐缩小,总体上 D_0 值是依次略增的。但当区域进一步缩小时,即d区的 D_0 值却是4个区域中最小的。反映出分形维数对研究区域大小有一种复杂的依赖关系。在进行不同区域之间分形维数的横向对比时,应保证在相同的条件(测算方法、样本数目及区域大小等)下进行。

由图4还可以看出,上述两次强震前,a、b两区的 D_0 值持续降低,但幅度不大,震后逐步回升。c区的 D_0 值在地震前后变化不明显。d区的 D_0 值在地震前略有增大,震后却稍有减小。这表明降维并不是震前唯一的现象,能否观察到降维现象至少与区域大小是有一定关系的。

四、小结

1. 本文给出了一种依据“固定质量法”测算广义维数 D_q 的方法。利用该方法计算 D_q 不依赖于完整的“无标度区”的划分,由于“质量”标度 m_i 可取至极小并以较小的步距变化,因而也更加有利于对“无标度区”上、下限的精确确定。该方法的原理同样适用于“固定半径法”。

2. 本文的研究表明,地震在空间分布上具有分形结构是普遍的,其“无标度区”分布范围与研究区域有关而与时间关系不明显,区域缩小则“无标度区”下限相应略为变小。由于样本数的限制,本文未能确定出“无标度区”上限,没有得到完整的“无标度区”范围,但这却不影响对 D_q 的计算,这也是本文数值方法的特点之一。

3. 本文结果还表明,不同情况下地震分布均表现出多标度分形特征。但在 $q \geq -6$ 区间内未发现有“分形相变”现象,并且不同 q 值所对应的 $D_q - q$ 谱形态基本一致,这意味着对于不同的 q 值, D_q 随时间变化趋势是一致的。

4. 在震中周围较大的区域范围内,强震前 D_0 值有降低的趋势,震后略有回升。当研究区域缩小时, D_0 的变化似乎相反。有的区域 D_0 值在强震前后变化不明显。这可能表明,在临近强震前,震中周围大范围内地震分布结构趋向有序性,其复杂性进一步增强,而震源附近小范围地区地震的分布结构却是相对随机、紊乱的,这种随机性是由非线性系统的内在浑沌特性引起的。这一现象也表明,虽然地震的空间分布广泛地存在着分形结构,但并不是任何条件下都可观察到“震前降维”的现象。其分形维数不变或是略有增加,也不一定意味着地震不会发生。

洪时中同志对本文第一作者给予了热情指导,并对本文初稿提出重大修改意见,谨致谢意。

(本文1991年4月10日收到)

参考文献

- (1)黄立基等,多标度分形理论及进展,物理学进展,Vol. 11, No. 3, 1991.
- (2)李后强等,多重分形:热力学类比,相变和子波变换,大自然探索,Vol. 10, No. 2, 1991.
- (3)李后强等,多分形的若干理论进展,自然杂志,Vol. 14, No. 4, 1991.
- (4)洪时中等,多重分形与地震,四川地震, No. 2, 1991.

- [5] 朱传镇, 对地震分形特征的几点认识, 地震研究, Vol. 14, No. 2, 1991.
[6] 洪时中等, 对地震分形特征的几点认识, 国际地震动态, No. 3, 1991.
[7] 李海华等, 门源 6.4 级强震前地震活动时间的分维结构, 西北地震学报, Vol. 9, No. 4, 1987.
[8] 安镇文等, 大震前后地震活动的时空分维特征, 地震学报, Vol. 11, No. 3, 1989.
[9] 朱令人等, 地震活动信息熵与分数维研究, 国际地震动态, No. 3, 1991.

A PRELIMINARY STUDY ON THE MULTI-FRACTAL OF EARTHQUAKE DISTRIBUTION IN NORTH CHINA

Jiang Haikun, Wei Guangxing

(*Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan, 250021*)

Abstract

According to the definition and principle of "fixed mass method", a numerical method is given in this paper, which can be used to judge the earthquake space-distribution fractal and calculate its dimension. Using this method, the features of earthquake distribution in North China is studied. The results show that satisfying certain statistic conditions, the earthquake distribution belongs fractal in different areas and periods. Selecting different areas and periods in the epicentral areas of the Tangshan and Haicheng earthquakes, the $D_q - q$ spectra are calculated. The results show that there is no marked change for the D_q versus q curves before and after the strong earthquakes. The results also show that for large areas, the D_0 value has reducing trend before strong earthquakes, and increase after the events; it is opposite for small areas; and for some areas, the D_0 seldom changes before and after strong events.

(上接95页)

Earthquake Tendency Consideration since 1976, we get that earthquakes with magnitude over 5 happened in a quarter of the prediction areas. The prediction accuracy in seismically active regions is greater than that in seismically inactive regions. About 17% earthquakes with magnitude over 5 in the Chinese continent happened in the predicted regions in the same year. The low level predictions is a blind prediction.

Having passed the practical calculation, we think that; the Individual Evaluation Method and the Hedike Evaluation Method are suitable to appraise the prediction accuracy and the binomial distribution test and the Fisher test are the suitable statistical test methods.