

宁夏灵武、吴忠地区4次地震序列的时间分维特征

刁守中 蒋海昆
(山东地震局)

任庆维 李孟銮
(宁夏地震局)

摘 要

本文采用标度变换法分析了宁夏灵武、吴忠地区1971年以来发生的、有较完整的仪器记录的4次中强地震序列的时间分维 D_0 ，发现前震序列或双震序列的第2次主震前的地震时间分维低于余震序列，序列的P值及b值亦具同步变化。初步认为，研究地震序列的时间分维结构可能有助于对其短期趋势的估计。本文还对有关问题进行了讨论。

一、引 言

近几年来，分数维理论开始引入我国地震学研究领域中，成为分析非线性地震问题的新的定量方法，并已取得初步成果。洪时中等提出测定地震时间与空间分维的基本方法^[1]，陈颀指出，复杂的地震前兆可能具有降维特点^[2]；李海华等发现，1986年青海门源6.4级地震前区域地震的时间分维系统减小^[3]；安镇文等求得华北地区强震前区域地震的时间与空间分维亦有类似特征^[4]；笔者等研究了华北某些地震序列的时间分维特征，结果表明前震（或前期）序列的时间分维较低，且强余震活动期间的的时间分维低于其后^[5、6]的余震序列。这些初步结果及其它一些探索，展现了地震学的分维研究具有广阔的发展前景。

位于银川断陷盆地南部边缘的宁夏灵武、吴忠地区为中强地震多发地区。1962年以来该区已发生5次重复性中强地震序列，其类型既有双震型，也有主余震型，且地震重复时间间隔逐渐缩短，表现出复杂性。因此，分析这一地区重复性地震序列及周围区域地震活动的时间分维结构演变特点，对于地震分维研究的深入及其在地震预报中的应用，无疑是十分有益的。

二、方法和资料

1. 方法

在时间轴上将地震看作为处处间断的点过程，地震时间序列构造成不均衡的康托尔

(Cantor)点集, 则利用标度变换法可测定其时间分维。即把所研究的时间段作为一个单位时间, 依次用越来越小的无量纲时间标度 r ($r = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \dots, (\frac{1}{2})^{n-1}, \dots$) 分别量取有震时间段数 $N(r)$, 绘制 $\text{Lg}N(r) - \text{Lg}(\frac{1}{r})$ 曲线, 其中间一段线性部分的斜率就是地震时间结构的分维 D_0 。详细方法文献〔1〕、〔3〕、〔5〕已进行了讨论, 本文不再赘述。这里应着重指出的是: 只有在一定的时间标度范围内, 地震时间结构才显示与尺度无关的分维特征, 这一尺度范围称为“无标度区”。低于“无标度区”下限或超过其上限, 地震时间结构的自相似性消失。因而, 约定地震时间结构的“无标度区”至少必须跨越一个以上数量级。另外, 对地震时间分维的测算, 实际是对具有自相似分布特征的随机对象以统计方法求得。因而, 约定线性回归须通过显著性水平 $\alpha \leq 0.01$ 的相关系数检验。此外, 测算分维时变换震级下限, 其中间线性部分的斜率相近者, 则认为存在分维结构, 取其平均值作为 D_0 。

2. 资料

1962年以来, 在灵武、吴忠地区发生的5次中强地震序列中, 仅有1971年以来的4次地震序列有较完整的仪器记录资料。各次地震序列的有关参数见表1。本文所用资料取自宁夏地震台网(含临时台)测定的地震目录及国家地震局分析预报中心编辑的地震目录。其中对1971年吴忠5.1级地震序列取 $M_L \geq 2.0$ 级地震, 其余3个地震序列取 $M_L \geq 1.0$ 级地震。为了同时考察灵武、吴忠周围区域地震活动的时间分布特征, 我们取北纬 $36.5^\circ - 39.5^\circ$ 、东经 $105^\circ - 107^\circ$ 范围, 分不同时段研究了该区域1970年1月—1987年12月 $M_L \geq 2.0$ 级地震(已剔除灵武、吴忠4次地震序列)的时间分维特征。

表1 灵武、吴忠地震序列概况表

编号	主震						地震序列		
	时间	纬度	经度	震级 M_s	地点	Δ (km)	起止时间	M_L	地震次数
1	1971年6月28日	37°45'	106°12'	5.1	吴忠	38	1971年6月10日—7月13日	≥ 2.0	77
2	1984年11月23日	38°03'	106°12'	5.3	灵武	38	1984年11月16日—12月31日	≥ 1.0	260
3	1987年8月10日	38°03'	106°17'	5.5	灵武	8	1987年8月10日—12月31日	≥ 1.0	300
4	1988年1月4日	38°06'	106°19'	5.5	灵武	7	1988年1月4日—6月30日	≥ 1.0	630
		38°03'	106°19'	5.0	灵武	8			

三、灵武、吴忠地震序列及其周围区域的地震时间分维结构

1. 1971年6月28日吴忠5.1级地震序列

这次地震序列为有前震的主余震型序列。自1971年6月10日开始有前震序列活动, 最大前震为4.2级(M_s)。主震后其余震序列截止于7月13日。从6月10日至7月13日共记录到 $M_L \geq 2.0$ 级地震77次。本文对整个地震序列(6月10日至7月13日)、前震序列(6月10日至6月28日)及余震序列(6月28日至7月13日)分别以2.0和2.5(M_L)为震级下限, 测算其地震时间分维(图1)特征。从图1可以看出, 各时段地震时间分维结构都存在, 且全

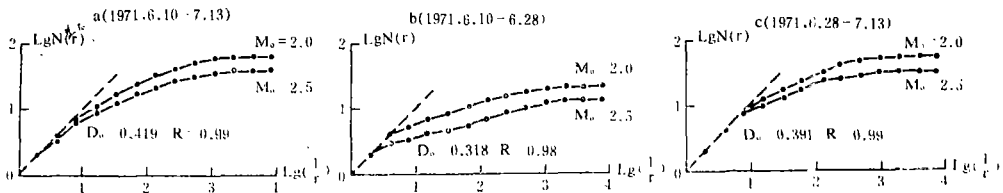


图1 1971年6月28日吴忠5.1级地震序列的时间分维

Fig.1 The time fractals of Wuzhong earthquake sequence (M₀5.1, occurred on Jun. 28, 1971)

序列和余震序列的时间分维D₀值较高,分别为0.419±0.28和0.391±0.026,前震序列时间分维D₀值则偏低,为0.318±0.025,相对变化幅度约20%。

2.1984年11月23日灵武5.3级地震序列

这次地震序列也属于有前震的主余震型序列。但前震较少,自1984年11月16日至主震前1分钟内发生4.3级(M_L)最大前震为止,仅记录到前震10次,因而其前震序列的时间分维难以测算。主震后余震活动持续约40余天,至12月31日,共记录到M_L≥1.0级地震260余次。分别以1.0、1.5和2.0为震级下限,对11月23日至12月31日余震序列时间分维进行测算。结果表明,其时间分维(D₀=0.360±0.019)略偏高(图2)。

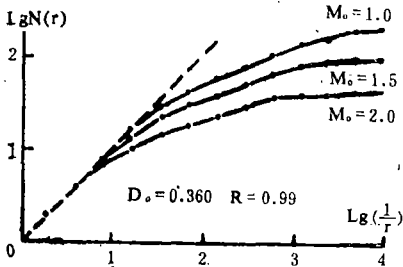


图2 1984年11月23日灵武5.3级地震序列的时间分维

Fig.2 The time fractals of Lingwu earthquake sequence (M₀5.3, occurred on Nov. 23, 1984)

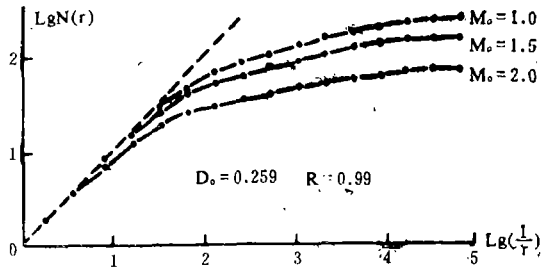


图3 1987年8月10日灵武5.5级地震序列时间分维

Fig.3 The time fractals of Lingwu earthquake sequence (M₀5.5, occurred on Aug. 10, 1987)

3.1987年8月10日灵武5.5级地震序列

这次地震序列为主余震型序列。其前震更为稀少,而余震较为丰富,一直延续至1988年1月4日又一次5.5级地震序列发生为止。8月10日至12月31日,共记录到M_L≥1.0级地震约300次。计算结果表明,这次地震的余震序列的时间分维相对较低,平均D₀=0.259±0.025,较前2次余震序列的时间分维平均下降达30%左右(图3)。

4.1988年1月4日灵武5.5级地震序列

1988年1月4日及10日,在灵武地区分别发生了5.5和5.0级地震,构成由2个主余震型序列组合的双震型地震序列。1月4日第一次主震后至1月10日第二次主震前,共记录到M_L≥1.0级地震约200余次。而第二次主震之后,余震活动仍很频繁,持续时间约半年左右,至6月30日,共记录到M_L≥1.0级地震约400余次。其中,4月12日发生最大余震(M_L=4.3)。

分别以 1.0、1.5 和 2.0 为震级下限，对这次地震序列分四个时段求其时间分维（图 4）。计算表明，全序列（1 月 4 日至 6 月 30 日）时间分维相对较高（ $D_0 = 0.324 \pm 0.014$ ）；第二次主震前（1 月 4 日至 10 日）时间分维较低（ $D_0 = 0.222 \pm 0.028$ ），相对全序列偏低约 32%；第二次主震后（1 月 10 日至 4 月 12 日）时间分维相对升高（ $D_0 = 0.361 \pm 0.025$ ），与全序列时间分维接近；而最大余震后（4 月 12 日至 6 月 30 日）地震时间分维结构已不明显，说明其时间结构已处于随机无序状态（图 4）。

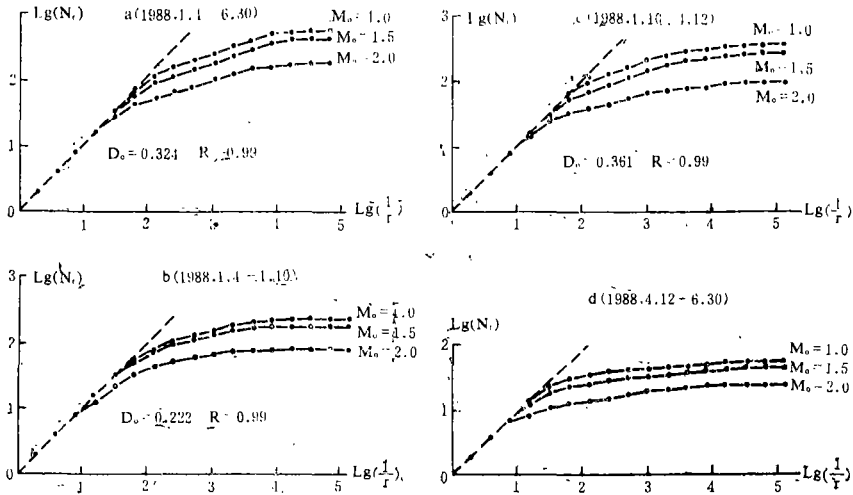


图 4 1988 年 1 月 4 日灵武 5.5 级地震序列的时间分维

Fig. 4 The time fractals of Lingwu earthquake sequence ($M_0 \geq 5.5$, occurred on Jan. 4, 1988)

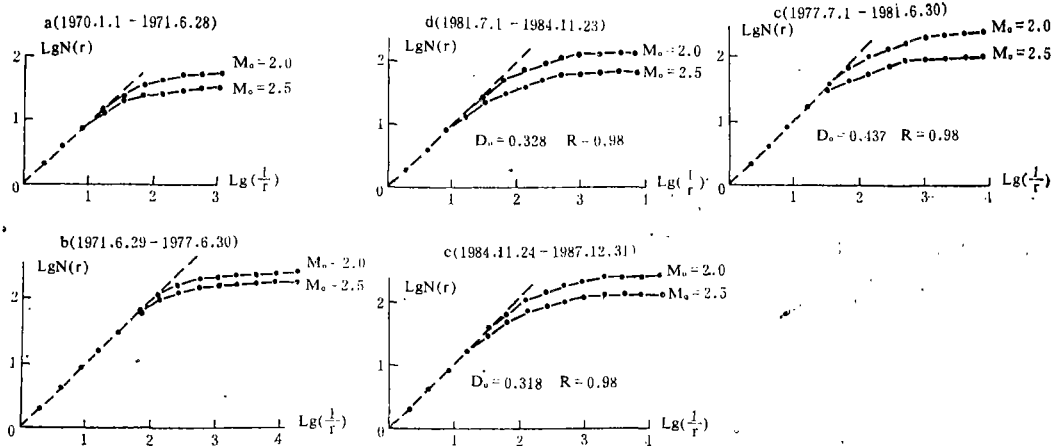


图 5 灵武、吴忠周围地区地震时间分维

Fig. 5 The time fractals of earthquakes occurred in Lingwu - Wuzhong area

5. 灵武、吴忠周围地区的地震时间分维结构

对前述灵武、吴忠周围地区 1970 年 1 月至 1987 年 12 月 $M_L \geq 2.0$ 级地震，分不同时段测算

其地震时间分维(图5)。1970年1月1日至1971年6月28日及1971年6月29日至1977年6月30日两个时段,灵武、吴忠周围区域地震时间分维结构不明显,显示地震随时间呈随机分布;1977年7月1日至1981年6月30日,区域地震活动的时间分维结构已出现,但分维数略偏高($D_0 = 0.437 \pm 0.034$);随后,1981年7月1日至1984年11月23日和1984年11月24日至1987年12月31日,区域地震时间分维略有降低, D_0 分别为 0.328 ± 0.028 及 0.318 ± 0.029 ,相对前期下降约25%左右。

有的图中(如图2、图3等)的曲线似显示有“无标度区”存在,这表明地震时间分布仅具一种准自相似性。究其原因可能是,地震是有一定数量限制的点集,地震时间间隔不是无穷小,因而数学模型与实际存在差异。更重要的是,地震在“无标度区”内可能兼具自相似性和随机性(泊松分布),因此其分维值是有变化的。但作为一级近似,仍可按线性统计。本文取图中曲线上“无标度区”更宽而且线性也更好的一段进行统计,测算 D_0 值。

四、讨 论

1. 灵武、吴忠地区地震序列时间分维特征

综上所述,1971年以来宁夏灵武、吴忠地区发生的4次中强地震序列的分维结构既有共性也有差异。主余震型序列或双震型序列的第二次主震后的余震序列的时间分维相对较高;而前震序列及双震型序列的第二次主震前的时间分维相对较低,与前者相比,约下降20—30%。1987年8月10日灵武5.5级地震的余震序列分维也较低,但间隔不足5个月,紧接着便发生1988年1月4日5.5级地震,若将前者的余震序列视为后者的广义前震序列,则其具有较低的时间分维即不难理解了。这种前震序列分维较低的现象在其它震例也有显示,如1975年海城7.3级地震前震序列及1985年山东胜利油田角07井注水诱发地震的前期地震(最大地震前)的时间分维均较低[5、6]。

此外,灵武、吴忠周围区域地震时间分布由无分维结构,到出现分维结构且维数降低的现象也是值得注意的。1986年青海门源6.4级地震前区域地震时间分维结构表现出类似的特征[3]。

由此可以认为,地震时间分维愈低,亦即地震时间结构的有序性愈强,可能意味着应力分布的非均匀性愈高,发生较强地震的危险性亦愈大。

2. 灵武、吴忠地震序列的时间分维 D_0 与P值及b值的关系

为了进一步分析地震序列的时间分维 D_0 的变化特征,按公式

$$N(t) = \Lambda t^{-P} \quad (1)$$

和

$$D = 2b \quad (2)$$

计算了灵武、吴忠地震序列的P、b值。(1)式中的 $N(t)$ 为单位时间的地震频度,t为时间, Λ 为第一个单位时间内的频度,P为衰减系数。与分维的定义对比,P为另一种形式的地震时间分维[2]。计算时以日为时间单位。公式(2)表示了地震能量分维D与地震b值的关系[2、5]。计算结果列于表2中。由表2可见,1971年吴忠5.1级地震前震序列和1988年灵武5.5级地震序列的第二次主震前的地震P值及b值均低于余震序列;1984年灵武5.3级地震序列的P值和b值均较高;1987年灵武5.5级地震序列的P值较高而b值偏低。上述事实表明,灵武、吴忠地震序列的时间分维 D_0 与P值及b值变化大体同步。

表2

灵武、吴忠地震序列有关参数对比表

主 时间	震		地震序列参数			
	震级 M_s	地点	起迄时间	D_0	P	b
1971年6月28日	5.1	吴忠	1971年6月10日—7月13日	0.419		
			6月10日—6月28日	0.318	0.852	0.679
			6月28日—7月13日	0.391	1.139	0.897
1984年11月23日	5.3	灵武	1984年11月23日—12月31日	0.360	1.495	0.853
1987年8月10日	5.5	灵武	1987年8月10日—12月31日	0.259	1.285	0.621
1988年1月4日	5.5	灵武	1988年1月4日—6月31日	0.324		
	5.0	灵武	1988年1月4日—1月10日	0.222	0.905	0.668
1月13日			1988年1月10日—4月12日	0.361	1.092	0.867
			1988年4月12日—6月30日	不存在		

3. 灵武、吴忠重复性中强地震的有序性

前已述及, 灵武、吴忠地区地震序列发生的时间间隔逐渐减小。进一步分析发现, 其累计频度随时间呈指数函数分布, 经拟合大体可用下式表述(图6):

$$N(t) = 1.0661e^{0.06448t} \quad (3)$$

式中 $N(t)$ 为累计频度, t 为时间(年)。这与我国大陆地区 $M_s \geq 7$ 级强震活动的时间分布十分一致〔7〕、〔1〕。

灵武、吴忠地区展布有灵武东山等近南北向—北北东向断裂, 贺兰山东麓弧形断裂带在其附近转折为北西向。同时, 近东西向断裂发育, 并分割前两组断裂, 使该区形成多组断裂交错发育、断裂规模较小且断续延伸的构造格局, 成为5—6级中强地震的密集区。近期连续发生的中强地震, 是该区多个闭锁段相继解锁过程。据岩石流变模型, 地震时间间隔理应逐渐缩短, 亦即累计地震频度将随时间呈指数增长〔7〕。

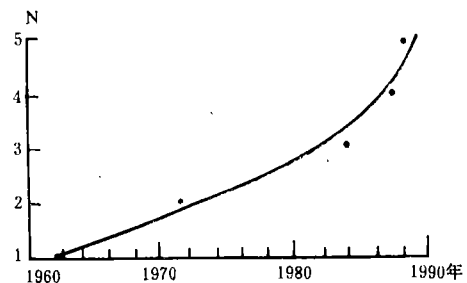


图6 灵武、吴忠中强地震 $N-t$ 曲线

Fig. 6 The $N-t$ curve of moderately strong earthquakes in Lingwu—Wuzhong area

五、结 论

本文对灵武、吴忠地区4次地震序列时间分维的研究表明, 地震序列的时间分布具有自相似性或有序性。在正常情况下地震时间分布为随机无序状态, 并不总是具有分维结构。前震序列或双震型序列的第二次主震前的地震时间分维较低, 且与P值和b值具有大体同步的变化, 这可能有助于对地震序列的短期趋势判定, 然而, 尚须更多的震例验证。

(本文于1989年5月15日收到)

参 考 文 献

- [1] 洪时中、洪时明, 分数维及其在地震科学中的应用前景, 四川地震, No. 1, 1987.
 [2] 陈颀等, 分形与分维在地球科学中的应用, 学术期刊出版社, 1988.
 [3] 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.
 [4] 洪时中、洪时明, 分维及其在地震科学中应用的若干最新进展, 国际地震动态, No. 12, 1988.
 [5] 刁守中、蒋海昆, 胜利油田角07井注水地震的分维特征, 华北地震科学(待刊).
 [6] 蒋海昆、刁守中, 海城、唐山地震序列时间分布的分维特征, 中国地震(待刊).
 [7] 张国民、傅征祥, 华北强震的时间分布及物理解释, 地球物理学报, Vol. 28, No. 6, 1985.
 [8] 隗福鹏, 宁夏新生代构造运动的若干表现和动力学过程, 地震地质论文集, 1986.
 [9] 李孟奎、赵知军, 宁夏地区现代构造应力场及其与地震活动的关系, 地震研究, Vol. 9, No. 3, 1986.

THE TIME FRACTAL CHARACTERISTICS OF FOUR
 EARTHQUAKE SEQUENCES OCCURRED IN LINGWU-
 WUZHONG AREA OF NINGXIA

Diao Shouzhong, Jiang Haikun

(*Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan*)

Ren Qingwei, Li Mengluan

(*Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan*)

Abstract

In this paper, the time fractals (D) for four moderately strong earthquake sequences are analysed using box counting algorithm. The four sequences have taken place in Lingwu-Wuzhong area of Ningxia since 1971 and have been recorded accurately. The results show that the time fractals are low ($D < 0.5$) in this area. For the double main shock sequence or foreshock sequence, the fractal obtained before the second main shock occurrence is lower than that obtained from aftershock sequence. We have also analysed the frequency attenuation features of four earthquake sequences. It shows that the attenuation coefficient P and b value have synchronous variation. Therefore, we think that the earthquake sequence time fractal may be helpful for judging earthquake tendency in a short period.