

活动断裂带中地震分布时空结构的信息维 D_1 特征初探

徐叶邦

(中国成都 610041 四川省地震局)

摘 要

活动断裂带中地震时空分布的信息维 D_1 避免了容量维 D_0 的缺陷, 考虑了每一地震事件对信息所作的贡献, 从新的角度反映了地震分布时空结构特征. 计算表明, 炉霍大震前鲜水河断裂带地震分布时间结构信息维 $D_1=0.1051$, 这是该区大震活动的一个参考性判据. 安宁河断裂带十七年现今地震分布时间结构信息维: 北段, $D_1(t_N)=0.1363$; 南段, $D_1(t_S)=0.06710$. 地震空间分布信息维: 北段, $D_1(K_N)=1.053$; 南段, $D_1(K_S)=0.7758$. 南北两段分属信息维维数不同的两个自相似系统. 南段地震活动自组织程度较高, 这有助于强震重点监测区内主要危险段的判定. 地震时空分布 D_1 特征探索对于活断层研究以及地震预报都有一定的意义.

关键词 活动断裂; 地震时空分布; 信息维

一、引 言

分形理论加深了人们对自然界不规则几何体的认识^[1,2]. 近年来, 分形理论在地震学领域开始得到应用. 它不仅成为地震前兆的动力学特征探索的新的工具(比如地震前兆混沌吸引子的分维描述^[3]), 而且成为地震分布时空结构研究的新方法.

在地震分布时空结构研究领域内, 目前人们主要应用柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)容量维概念. 国外学者利用双点相关函数, 最初发现地震空间分布的自相似性质^[4], 他们还求出了全球目录某些分维特征^[5], 证实了地震时间域分维性质^[6,7], 采用非标准随机康托尔集合模型计算了 New Hebrides 地区地震分布时间结构的 D_0 值^[8] 等. 与国内学者的研究同时, 我们就地震分布时空结构的分形自组织特征、地震时间组织结构的无标度区与大震前期征兆^[1,2]进行了初步的探索.

1989 年 3 月 23 日收到本文初稿, 1990 年 2 月 3 日决定采用.

1) 徐叶邦、韩渭宾、罗久里, 地震活动时空分布序列的分形自组织特征, 大自然探索 (待发表).

2) 徐叶邦、韩渭宾、康晋山、罗久里, 中小地震时间组织结构的无标度区与大震前期征兆, 大自然探索 (待发表).

然而,容量维 D_0 有其局限性,我们知道:

$$D_0 = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\lg N(\tau)}{\lg(1/\tau)} \quad (1)$$

其中, τ 为标度, $N(\tau)$ 为在该标度下所得的量度值, 定义中只考虑了所需 τ 球(或方格、线段等)的数目, 而一个球内点数多少则不加区别. 照此定义, 一个病态的事例是, 全体有理数构成集合之维数为 1, 实数集之维数也是 1, 这与实变函数理论相悖^[2]. 地震时空分布的容量维 D_0 显然也未区别 τ 方格(或线段等)内有震事件多少, 这是一个缺陷.

信息维 D_1 则考虑了 τ 球(或方格、线段等)所覆盖点数多少. 换句话说, 考虑了每个点对信息所作贡献. 研究地震分布时空结构信息维 D_1 特征可避免 D_0 的缺陷, 考虑每一有震事件对信息的贡献, 从新的角度分析问题, 这是值得探索的.

二、地震分布时空结构的信息维研究方法

信息维 D_1 定义^[9,11,12] 为:

$$D_1 = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{-[\sum_{i=1}^N P_i \lg(1/P_i)]}{\lg \tau} \quad (2)$$

其中, τ 为标度, $N(\tau)$ 为该标度下所得的量度值, P_i 是分形中一个点落在第 i 个球(或方格、线段等)中的概率.

$$\text{令 } X(\tau) = -[\sum_{i=1}^N P_i \lg(1/P_i)] \quad (3)$$

在实际计算时, 我们考虑: 当 τ 较小时, 如果 $X(\tau)$ 与 $\lg \tau$ 之间存在线性关系:

$$X(\tau) = D_1 \lg \tau + X_0 \quad (4)$$

则可求出信息维 D_1 . D_1 计算的困难在于 P_i 的确定.

首先, 我们将时间序列中离散分布的各个地震事件当作时间轴上离散分布各个有震点. 对于估算地震分布时间结构信息维 D_1 , 我们以 $\tau_n = 2^n$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 天为时间标尺去覆盖时间轴. 对于第 i 个含有有震点的时间段, 将

$$f_i = n_i/n \quad (5)$$

近似当作 P_i . 其中, f_i 视为一个地震点落在第 i 个时间段频率, n_i 为第 i 个时间段内地震点的数目, n 为研究范围内全部地震点数目. P_i 确定后, 再按(3)式确定 $X(\tau)$. 继后作图: 在 τ 较小时, 如果 $X(\tau)$ 和 $\lg \tau$ 呈线性关系, 则可按(4)式求出 D_1 . D_1 即为地震分布时间结构的信息维维数.

同理, 对于估算地震分布空间结构的信息维 D_1 , 我们以 $\tau_n = 2^n$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 分为边长的正方形(亦即以 τ_n 分别为经度间隔与纬度间隔标尺)去覆盖所研究的地域范围. 对于第 i 个含有有震点的正方形, 将

$$f_i = n_i'/n' \quad (6)$$

近似当作 P_i , 其中, f_i ' 视为一个有震点落在第 i 个正方形内的频率, n_i ' 为第 i 个正方形内的地震点的数目, n ' 为研究范围内全部地震点数目. P_i 确定后, 按上一段所叙相同方式求出地震分布空间结构的信息维维数 D_i .

总之, 对于地震时间分布来说, D_i 计算中的 P_i 是一个地震事件点落在第 i 个时段(以 τ_n 天为标尺)的概率; 对于地震空间分布来说, D_i 计算中的 P_i 是一个地震事件点落在第 i 个正方形(以 τ_n 分为边长)的概率. 根据概率的统计定义, 本文姑且以频率 f_i 近似代替概率 P_i . 这在地震事件数目较大的情况下是比较合理的. 例如本文第四节中所研究的安宁河活动断裂带, 位于我国地震重点监测区内, 积累了十七年丰富的地震资料. 因而, 在计算该带 D_i 值时, 以 f_i 近似地代替 P_i 是不无道理的. 此外, 应当指出: 由于地震事件并非完全随机发生, 这可能对上述计算的近似程度带来影响.

三、炉霍大震前鲜水河断裂地震分布时间结构的信息维 D_i 特征

1973 年 2 月 6 日炉霍 7.6 级强震发生具有高度现代活动性的鲜水河断裂带上. 研究炉霍大震前地震分布的时间结构的信息维 D_i 特征对于地震预报和活断层研究都具有重要意义.

这里所研究的鲜水河断裂带空间范围如图 1 中 BACEGHFD 区所示. 此区的选取既有一定宽度, 能反映炉霍强震前后断裂带地震活动状况, 又可大致避免其它断裂的影响. 时间范围为 1970 年 8 月 1 日—1973 年 2 月 5 日. 由于 1970 年 7 月以后四川地震台网才基本建成, 此后中小地震时间序列比以前完善些, 所以时间上限选至 1970 年 8 月 1 日.

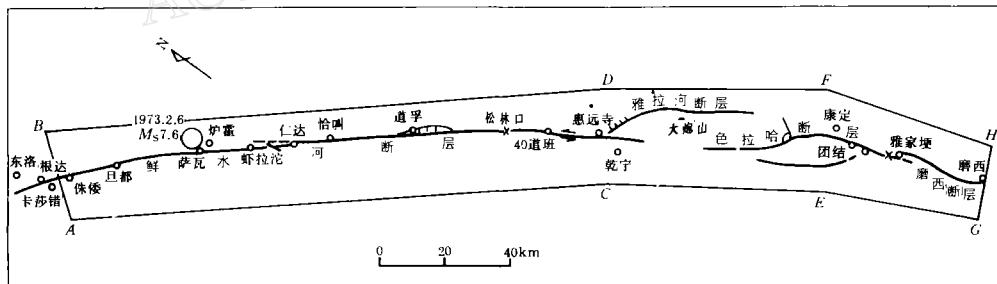


图 1 鲜水河地震活动断裂带及炉霍大震震中位置图

按照第二部分中关于估算地震分布时间结构信息维方法, 对于炉霍大震前 $M_L \geq 2.0$ 地震随时间分布的信息维 $D_i(t_1)$ 计算结果(图 2)如下:

$$X_n = 0.1051 \lg \tau - 1.273 \quad D_i(t_1) = 0.1051$$

同理, 炉霍大震后(1973.2.7—1975.7.31 时段约长 2 年半, 与大震前资料选取时段基本等长) $M_L \geq 2.0$ 地震随时间分布的信息维 $D_i(t_2)$ 计算结果如下:

$$X_n = 0.1740 \lg \tau - 1.589 \quad D_i(t_2) = 0.1740$$

相关系数 $\gamma = 0.9482$. 从 $D_i(t_1)$ 到 $D_i(t_2)$, 其对应的无标度区跨度由宽变窄.

根据笔者研究^[10], 炉霍大震前鲜水河断裂带 $M_L \geq 2.0$ 地震随时间分布(1970.8.1—1973.2.5)的容量维 $D_0(t_1) = 0.1487$ 。炉霍大震后鲜水河断裂带 $M_L \geq 2.0$ 地震随时间分布(1973.2.7—1975.7.31)的容量维 $D_0(t_2) = 0.1896$ 。 $D_0(t_1) < D_0(t_2)$, 似可看出炉霍大震前 D_0 呈相对低值状态。然而, 大震前后 D_0 值变化差值($\Delta D_0 = D_0(t_2) - D_0(t_1)$)不大, 仅占 $D_0(t_1)$ 值的 27.5%。特别是在考虑误差影响条件下, 这种变化是不显著的。相比之下, 炉霍大震前后信息维变化较大。 $\Delta D_1 = D_1(t_2) - D_1(t_1)$ 。 ΔD_1 占 $D_1(t_1)$ 值 65.6%。大震前信息维是呈低值的。特别值得指出的是, 对比大震前后变化, 大震前 $D_1(t_1)$ 所对应的无标度区跨度宽阔显著。可见, D_1 似乎比 D_0 更能反映炉霍大震前后中小地震分布分形结构的变化。

根据分形理论,(2)式中 $P_i = 1/N$ 时, $D_1 = D_0$, 亦即分形中每一个点对信息贡献相同。然而, 以上研究表明: $D_1(t_1) < D_0(t_1)$, $D_1(t_2) < D_0(t_2)$ 。这意味着, 地震事件点对信息贡献各不相同。 D_1 避免了 D_0 的缺陷, 考虑了 τ_n 时段内地震事件点的数目, 亦即考虑了各个地震事件点对信息的贡献, 这一新的应用是有意义的。此外, $D_1 \neq D_0$ 还意味所研究的时间结构不属均匀的线性分形, 而是复杂分形。对于复杂分形, 应采用多种维数来描述, 从而找出对系统物理性质起主导作用的 D_q (D_q 为 Renyi 维, $q = 0, 1, 2, \dots, n$, $q = 0$, 即容量维 D_0 ; $q = 1$, 即信息维 D_1 等等)。本文用 D_1, D_0 两种分维来描述大震前后中小地震分布时间结构复杂分形, 初步认为 D_1 比 D_0 更能反映炉霍大震前低维到大震后高维的变化。但是, 或许不能笼统地说, D_1 比 D_0 更能反映各种变化异常。对具体的地震分布时空结构应具体分析, 以找出最能反映结构本质的 D_q 。

四、安宁河断裂带地震分布时空结构的信息维 D_1 特征

安宁河断裂带是我国西部一条重要的活动性的深大断裂。历史上有多次中强地震发生, 现今中小地震活动频繁。自四川地震台网基本建成后(1970.8.1—1987.12.31)在断裂带上记录到 $M_L \geq 2.0$ 地震近五百次。

本文所研究的安宁河活动断裂带空间范围为东经 $102^{\circ}00' - 102^{\circ}30'$ 北纬 $27^{\circ}50' - 29^{\circ}25'$, 即西昌至石棉西北一带; 时间范围为1970年8月1日—1987年12月31日。由于1970年7月以后, 四川地震台网才基本建成, 此后中小地震序列比以前完整些。所以时间上限选至1970年8月1日。由于安宁河活动断裂南、北两段无论从地质构造、断层活动方式、地震活动特点与地震分布图象上都有很大的不同^[1], 因而分别加以研究。以北纬 $28^{\circ}40'$ 为界, 分为南、北两段(图3)。

按照第二部分中关于估算地震分布时间结构信息维方法, 北段断裂带 $M_L \geq 2.0$ 地震

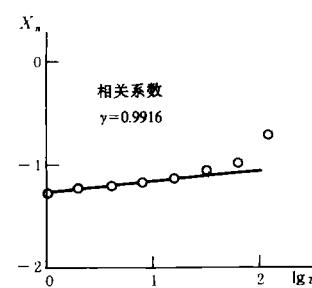


图2 鲜水河断裂带地震随时间分布信息维特征图。炉霍大震前

1) 徐叶邦、韩渭宾、罗久里, 地震活动时空分布序列的分形自组织特征, 大自然探索(待发表)。

随时间分布的信息维 $D_1(t_N)$ 计算结果如图 4a 所示, 由图 4a 可得:

$$X_n = 0.1363 \lg \tau - 2.537$$

$$D_1(t_N) = 0.1363$$

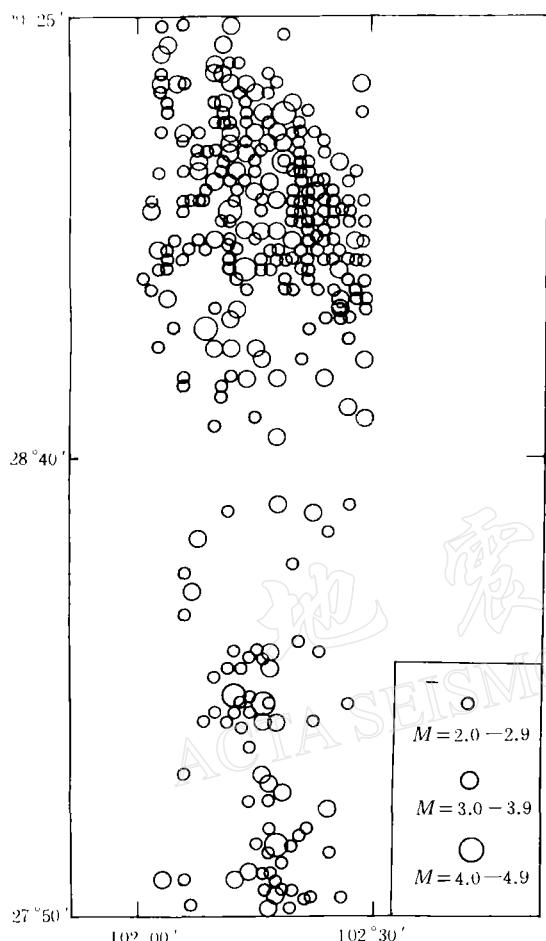


图3 安宁河活动断裂带震中分布图

同理, 对于南段断裂带 $M_L \geq 2.0$ 地震随时间分布信息维 $D_1(t_S)$ 计算结果 (图 4b):

$$X_n = 0.06710 \lg \tau - 1.866$$

$$D_1(t_S) = 0.06710$$

$D_1(t_S)$ 所对应的无标度区的跨度比 $D_1(t_N)$ 所对应的要宽.

与之相似, 按照第二部分中关于估算地震分布空间结构信息维方法, 北段断裂带 $M_L \geq 2.0$ 地震空间分布信息维 $D_1(K_N)$ 计算结果 (图 5a) 如下:

$$X_n = 1.053 \lg \tau - 2.323$$

$$D_1(K_N) = 1.053$$

同理, 南段 $M_L \geq 2.0$ 地震空间分布信息维 $D_1(K_S)$ 计算结果 (图 5b) 如下:

$$X_n = 0.7758 \lg \tau - 1.830$$

$$D_1(K_S) = 0.7758$$

$D_1(K_S)$ 所对应的无标度区的跨度比 $D_1(K_N)$ 所对应的要宽.

根据笔者研究¹⁾, 安宁河活动断裂带北段地震分布的时空结构的容量维分别为: $D_0(t_N) = 0.2134$, $D_0(K_N) = 1.3799$; 南段的相应容量维 $D_0(t_S) = 0.07194$; $D_0(K_S) = 1.0549$; 安宁河

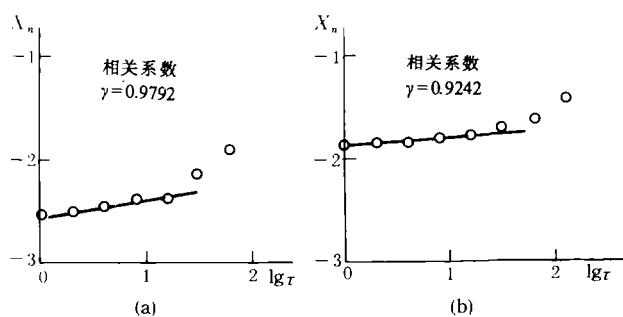


图4 安宁河活动断裂带地震随时间分布信息维特征图. (a) 北段; (b) 南段

¹⁾ 徐叶邦, 韩渭宾, 罗久里, 地震活动时空分布序列的分形自组织特征. 大自然探索(待发表).

断裂南、北两段时空的信息维与相

对应的容量维都在数值上相差较大, $D_1 < D_0$, 这表明地震分布的时空结构是不均匀的, 每一地震事件对信息所作贡献并不相同, 从理论上讲, 这种结构不属于一致(或均匀)线性分形, 而是复杂分形, 需要多种维数来描述. D_1 、 D_0 从不同侧面反映了近十七年来安宁河断裂现今地震分布时空复杂结构的特征.

上述研究还表明, 南、北两段分属信息维维数不同的两个自相似系统. 北段时空结构信息维与南段相对应的信息维相比较大, 北段信息维所对应无标度区的跨度比南段相应跨度小, 这或许与下述事实有关: 历史上有证可查的中强地震(如1536年3月19日西昌 7 1/2 级强震, 1913年8月冕宁小盐井6.0级地震, 1952年9月30日冕宁石龙 6 3/4 级地震等)均发生在安宁河活动断裂南段; 本次研究时空范围内, 78.5% 中小地震发生在北段, 21.5% 发生在南段; 从地质构造上看, 北段次一级分枝断裂多, 结构复杂, 地壳挤压抬升现象显著; 南段断裂展布有序, 以走滑运动为主; 断层破碎物的电子扫描与阴极发光微区实验分析表明: 北段为挤压研磨与断层粘滑等多种运动的混合产物, 而南段多见强烈断层地震活动的破碎物. 结合南北两段容量维特征以及相应无标度区宽度变化资料, 本文认为, 安宁河活动断裂现今地震活动已进入时空自组织状态, 其南北两段自组织程度不同. 地震时空分形结构 D_1 、 D_0 值较低, 且所对应的无标度区宽度较大的南段活动断裂, 其自组织程度较高. 这反映了南段孕震地块各单元的运动协调有序^{1)、2)}. 或许可以这样推论, 对于安宁河活动断裂带未来强震的危险性, 南段尤值警惕. 安宁河活动断裂正置我国乾宁—东川强震重点监测区内. 上述认识对于监测区内主要危险段的判定和强震预测工作都具有一定意义.

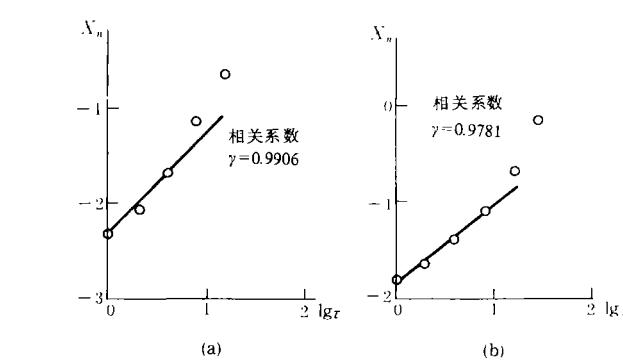


图 5 安宁河活动断裂地震空间分布信息维特征图
(a) 北段; (b) 南段

五、结论与讨论

(1) 活动断裂带中地震分布时空结构的信息维 D_1 是地震时空分布信息量随观察的细致程度增加的量度, 信息维 D_1 考虑了每一地震事件点对信息所作的贡献, 避免了容量维 D_0 的缺陷, 从新的角度反映了这一时空结构的特征. 实际计算表明 $D_1 < D_0$, 这意味着所研究的时空结构不属于均匀(或一致)线性分形, 而是复杂分形. D_0 、 D_1 是这个复杂分形两个不同侧面特征. 对于具体的时空结构复杂分形, 应具体分析, 以找出最能反映结构本质的 Renyi 维 D_q , 继而进行多分形(multifractals)分析.

(2) 炉霍 7.6 级强震前鲜水河断裂带中小地震分布时间结构信息维 $D_1 = 0.1051$, 这是

1) 徐叶邦、韩渭宾、罗久里, 地震活动时空分布序列的分形自组织特征, 大自然探索(待发表).

2) 徐叶邦、韩渭宾、康晋山、罗久里, 中小地震时间组织结构的无标度区与大震前期征兆, 大自然探索(待发表).

该区大震活动的一个参考性判据. 对比大震前后 D_1 值的变化, 并结合计算相应的 D_0 值, 初步认为 D_1 比 D_0 更能反映炉霍强震前时间分维低值异常特点.

(3) 十七余年安宁河活动断裂(西昌至石棉西北)中小地震分布时间结构信息维: 北段, $D_1(t_N) = 0.1363$; 南段, $D_1(t_S) = 0.06710$. 地震空间分布信息维: 北段, $D_1(K_N) = 1.053$; 南段, $D_1(K_S) = 0.7758$. 对比南北两段 D_1 值变化以及相应无标度区差异, 并结合 D_0 值讨论, 初步认为: 南北两段分属信息维维数不同的两个自相似系统. 这两个系统地震活动自组织程度不同. 南段的自组织程度较高, 反映了其孕震地块各单元的运动协调有序. 这与南北两段活动断裂地质构造特点与活动方式、历史地震资料和现今地震活动图象特征, 以及断层破碎物电子扫描和阴极发光微区分析结果均不相悖. 或许可以推论, 对安宁河活动断裂未来强震的危险性, 南段尤值警惕. 这一认识对于我国乾宁—东川强震重点监测区内主要危险段的判定和大震预测工作都有一定的意义.

(4) 本文以频率 f_i 近似代替(2), (3)式中概率 P_i . 这在地震事件数目较大的情况下是比较合理的, 也是大致符合概率的统计定义的. 此外, 由于地震事件并非完全随机发生, 也可能影响上述 P_i 计算的近似程度. 这只是初步的尝试. 再者, 本文计算还未及地震能量差异这一重要问题, 这是一个局限, 有待今后的工作.

本文承蒙韩渭宾研究员、四川大学罗久里教授指教, 李后强、闻学泽、康晋山同志多有帮助, 一并致谢.

本研究系地震科学联合基金会资助课题.

参考文献

- [1] Mandelbrot, B. B., 1982. *The Fractal Geometry of Nature*, 1—376. W. H. Freeman, New York.
- [2] 姚勇, 1987. 熵、分维、李雅普诺夫指数与混沌. 自然杂志, **10**, 5, 359—365.
- [3] 罗久里、韩渭宾、徐叶邦、刘冬燕、彭涛, 1989. 地震前兆的动力学特征—是否存在地震前兆吸引子? 大自然探索, **8**, 29, 21—27.
- [4] Kagan, Y. Y. and Knopoff, L., 1980. Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **62**, 303—320.
- [5] Sadovskiy, M. A., Golubeva, T. V., Pisarenko, V. F. and Shnirman, M. G., 1984. Characteristic dimensions of rock and hierarchical properties of seismicity. *Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid. Earth. Engl. Trans.*, **20**, 87—96.
- [6] Kagan, Y. Y. and Knopoff, L., 1978. Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes. *J. Roy. astr. Soc.*, **55**, 67—86.
- [7] Kagan, Y. Y. and Knopoff, L., 1981. Stochastic synthesis of earthquake catalog. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2853—2862.
- [8] Smalley, Jr., R. F., Chatelain, J. L., Turcotte, D. L. and Prevot, R., 1987. A fractal approach to the clustering of earthquakes: applications to the seismicity of the New Hebrides. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **77**, 1368—1381.
- [9] 郝柏林, 1985. 分形与分维. 科学杂志, **38**, 1, 9—17.

- [10] 程光锐主编, 1989. 分形理论及其应用. 全国分形理论及应用学术讨论会文集, 94. 四川大学出版社, 成都.
- [11] Jens Feder, 1988. *Fractals*. 88. Plenum Press, New York.
- [12] Tamas, V., 1989. *Fractal Growth Phenomena*, 55. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF THE INFORMATION DIMENSION D_i OF THE TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTIONS OF EARTHQUAKES IN AN ACTIVE FAULT ZONE

Yebang Xu

(Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu, 610041 China)

Abstract

The research of the information dimension (D_i) in an active fault zone considers the contribution of each seismic event to information and reflects the characteristics of the temporal and spatial distributions of earthquakes from a new point of view, avoiding the shortcomings of the research about the fractal dimension of capacity (D_0). The results of calculation show that the information dimension of the temporal distribution in the Xianshuihe active fault zone before the great Luhuo earthquake is $D_i = 0.1051$. It is a consult criterion of large earthquakes in future in the fault zone. The information dimensions of the temporal distribution of earthquakes about 17 years in the Anninghe active fault zone are respectively $D_i(t_N) = 0.1363$ (for the north section) and $D_i(t_S) = 0.06710$ (for the south section). The information dimensions of the spatial distribution are respectively $D_i(K_N) = 1.053$ (for the north section) and $D_i(K_S) = 0.7758$ (for the south section). The north section and the south section belong respectively to two self-similar systems with different information dimensions. The extent of the self-organization of seismic activity in the south section is higher than that in the north section. This is helpful for judging the major dangerous section in the key region of the seismic monitoring. The research about the information dimension of the temporal and spatial distributions of earthquakes is significant for the exploration of active fault zones and seismic prediction.