

文章编号: 0253-3782(2007)01-0038-10

# 板内与板间地震活动时空分布的 多重分形特征研究<sup>\*</sup>

陈时军<sup>1)</sup>, <sup>\*</sup> 孙龙梅<sup>2)</sup> 马丽<sup>3)</sup>

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国济南 250002 山东中华女子学院计算机系

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 利用多重分形分析方法, 考察了中国大陆和台湾地区以及新西兰的地震活动广义应变释放时间和空间分布的多重分形特征。结果表明, 地震活动时空分布的多重分形特征与不同地球动力学环境关系密切。强震活动时间分布在板间地区具有比板内地区更明显的从集性, 对中小地震这种从集性差异较小; 强震活动空间分布在板内地区具有比板间地区更强的从集性, 但对中小地震则相反。

**关键词** 广义地震应变释放 多重分形 板内地震 板间地震

**中图分类号:** P315.5    **文献标识码:** A

## 引言

一定时、空范围内地震活动的强度分布为人们了解该时空域内地壳应力变化, 研究构造活动特征, 以及进行地震危险性预测提供了重要信息。关于地震活动强度在时空域分布特征的研究一直受到地震工作者的重视。已有的研究结果一致显示, 地震活动强度在时间域具有非平稳、非线性, 在空间域具有非均匀性等特征。地震活动强度分布表现出复杂动力过程所具有的性质。

地震活动强度复杂分布特征可以用多重分形方法进行定量刻画。人们曾利用多重分形方法研究过地震活动事件的时空分布以及地震能量释放等时空分布的多重分形特征(朱令人, 周仕勇, 1992; Hooge *et al*, 1994; Godano *et al*, 1997; 安镇文等, 2000; Harte, 2001; 陈时军等, 2003a, b), 取得了有意义的结果。本文将进一步分析以中国大陆为例的板内地震活动以及以新西兰、中国台湾地区为例的板间地震活动强度时空分布的多重分形特征, 分析多重分形谱在不同地球动力学环境地区的变化特征。

## 1 计算公式

一般而言, 多重分形维数谱可用 Rényi 维  $D_q$  定义(Harte, 2001):

\* 山东省自然科学基金(Y2002E01)、中国地震局地震科学联合基金(106085)资助。

2006-03-06 收到初稿, 2006-07-17 决定采用修改稿。

◆ 通讯作者. e-mail: c.shijun@163.com

$$D_q = \begin{cases} \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg [\int \mu^{q-1} [S_\delta(x) \mu(dx)]]}{\lg \delta} & q \neq 1 \\ \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\int \lg \mu [S_\delta(x) \mu(dx)]}{\lg \delta} & q = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $S_\delta(x)$  是关于点集  $x \in R^d$  的半径为  $\delta$  的球体, 积分区域为 Borel 集  $R^d$  上关于概率测度  $\mu$  的全体.

若将公式(1)的积分域离散为  $N$  个尺度为  $s$  的盒子, 记第  $i$  个盒子范围内的测度积分为  $p_i$ ,  $p_i(s) = \int d\mu(x)$ , 并顾及  $\int f(\mu(x)) \mu(dx)$  为  $f$  关于测度  $\mu$  的期望值, 则公式(1)可重写为 (Heinz-Ottto et al, 1997)

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\lg \sum_{i=1}^{N(s)} p_i^q(s)}{\lg s} \quad (2)$$

从公式(2)可见, 当  $q$  取较大值时,  $D_q$  主要表示具有较高测度观测的自相似特征; 而当  $q$  取较小值时,  $D_q$  则主要表示具有较低测度观测的自相似特征. 因此不同的  $q$  取值  $D_q$  将分别表示观测的密集和稀疏部分的特征.

若记式(2)第一式右端极限项为  $\tau(q)$ , 则尺度  $s$  与  $\sum_{i=1}^{N(s)} p_i^q(s)$  存在关系

$$z(q, s) = \sum_{i=1}^{N(s)} p_i^q(s) \sim s^{\tau(q)} \quad (3)$$

称  $z$  为配分函数. 覆盖测度  $\mu$  的盒子数  $N(s)$  与盒子尺度  $s$  的关系为

$$N(s) \sim s^{-f(\alpha)} \quad (4)$$

称  $f(\alpha)$  为多重分形奇异谱, 它可由  $\tau(q)$  经 Legendre 变换

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad (5)$$

得到.  $\alpha$  为 Hölder 奇异指数, 是  $q$  的函数, 可写作  $\alpha(q)$ . 其与  $\tau(q)$  的关系为

$$\alpha(q) = \frac{\partial}{\partial q} \tau(q) \quad (6)$$

分维谱  $D_q$  可表示为

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} \quad (7)$$

当  $q=0$  时, 得到盒子维或容量维,  $D_0 = f(\alpha(0)) = -\tau(0)$ ; 当  $q=1$  时,  $D_1 = f(\alpha(1)) = \alpha(1)$  即为熟知的信息维.

由于直接计算多重分形谱比较繁杂且需进行 Legendre 变换, Chhabra 等(1989)提出了一种简单且精确的估算多重分形谱的方法. 根据该方法, Hölder 奇异指数  $\alpha(q)$ 、多重分形奇异谱  $f(\alpha)$  可写为

$$\alpha(q) = \lim_{s \rightarrow 0} (\ln s)^{-1} \sum_i \mu_i(q, s) \ln p_i(s) \quad (8)$$

$$f(\alpha(q)) = \lim_{s \rightarrow 0} (\ln s)^{-1} \sum_i \mu_i(q, s) \ln \mu_i(q, s) \quad (9)$$

这里,  $p_i$  定义如前述.  $\mu_i(q, s)$  定义如下:

$$\mu_i(q, s) = \frac{[p_i(s)]^q}{\sum_j [p_j(s)]^q} \quad (10)$$

利用公式(8)、(9)、(10)及公式(5)、(7)可得 Hölder 奇异指数  $\alpha(q)$ 、多重分形奇异谱  $f(\alpha)$  以及多重分形维数谱.

## 2 资料选取与处理

本文选取以中国大陆为例的板内地区, 以及以中国台湾地区、新西兰为例的板间地区地震活动时空分布为研究对象. 研究中使用的地震资料取自于 SSLib 软件包<sup>①</sup>收录的中国大陆地区、中国台湾地区和新西兰及其附近地区的地震目录.

一般认为, 中国大陆东西部地区构造应力场存在明显的差异(谢富仁等, 2004). 本研究中大体以东经 105°(基本为南北地震带的位置)为界, 将中国大陆分为东部和西部两部分, 分别构建中国大陆东部和西部地震目录.

研究中对选用的地震目录进行了震级的平稳性分析和可靠性检验. 同时, 考察了起算震级对多重分形谱估计结果的影响. 试算结果表明, 各地区在表 1 所列起止时间段内, 起算震级取 2.0 或更大时可得到稳定的多重分形谱估算结果. 为充分利用资料, 并保证地震事件在时间轴上的密度, 本文采用 2.0 级作为起算震级, 尽管各地的监测能力不同以及采用此起算震级时中国西部地区与新西兰及其附近地区可能存在地震记载遗漏的情况. 选取的地震目录情况及地震事件时间间隔等见表 1.

表 1 各研究区资料情况

研究区	起止时间	地震时间间隔最大值/d	采样时间长度/d	采样段数	$M_0$
中国东部	1970-01-01—2001-08-31	3.82	5.65	2 048	2.0
中国西部	1970-01-01—2001-08-31	2.93	5.65	2 048	2.0
中国台湾	1970-01-01—2001-12-31	3.09	4.10	2 048	2.0
新西兰	1987-01-01—2000-08-31	1.84	2.32	2 048	2.0

## 3 计算结果与分析

### 3.1 各研究区广义地震应变释放时间分布的多重分形特征

在研究地震活动时间分布从集性特征时, 依据每时段至少包含一个大于等于起算震级  $M_0$  的地震的原则, 将所研究地震目录的总时间跨度分割为若干等长时段, 并以分割的各时段区间右端时刻为时间标记, 利用公式(陈时军等, 2003a)

$$\epsilon_k = \sum_{i=1}^{n_k} \Omega_i^\eta \quad (11)$$

计算各时段区间内的广义应变能释放, 形成新的时间序列. 上式中,  $n_k$  为第  $k$  时段内的地震数目,  $\Omega_i^\eta = 10^{1.5M_i+c}$ ,  $\eta$  和  $c$  为常数,  $M_i$  为第  $k$  时段内第  $i$  次地震的震级. 当  $\eta=0$  时,  $\epsilon_k$  为地震事件数目; 当  $\eta=\frac{1}{3}$  时,  $\epsilon_k$  为地震震源的线性尺度; 当  $\eta=0.5$  时,  $\epsilon_k$  为 Benioff 应变; 当  $\eta=\frac{2}{3}$  时,  $\epsilon_k$  为地震震源的面积; 当  $\eta=1$  时,  $\epsilon_k$  为地震释放的能量或地震矩(张国民

<sup>①</sup> Harte D. 2004. Document for the statistical seismology library. School of Mathematics and Computing Sciences, Research Report. Victoria University of Wellington Press, 1~162.

等, 2001). 为了探索不同构造区广义地震应变能释放的丛集特征, 研究中规定  $\eta$  的取值将不局限于取上述具有明确物理意义的值。但考虑到震级精度以及  $\epsilon_k$  的量级等因素,  $\eta$  的取值范围将限制在  $[0, 2]$  范围内。此外,  $\eta$  取较小值时, 相当于赋予低震级地震较大的权重;  $\eta$  取较大值时, 相当于赋予高震级地震较大的权重(Ben-Zion, Lyakhovsky, 2002)。

研究中, 首先对表 1 的资料计算了  $\eta$  取不同值时的广义地震应变序列, 然后计算多重分形维数谱及多重分形奇异谱。各研究区部分多重分形维数谱  $D_0$  和  $D_1$  的估算结果列于表 2, 部分多重分形奇异谱  $f(\alpha)-\alpha$  曲线如图 1 所示, 表 3 列出了 Hölder 奇异指数  $\alpha$  的存在范围。

结果表明, 同一研究区内, 当  $\eta$  取不同的值时, 除  $D_0$  外其多重分形维数谱  $D_q$  的估算值明显不同(表 2): 总体上当  $\eta$  增加时,  $D_q (q>0)$  的估算值将随之减小, 而  $D_q (q<0)$  的估算值将有所增加; 对于不同的研究区, 当  $\eta$  取相同的值时(特别当  $\eta$  取较大值时), 其多重

表 2 各研究区广义应变释放多重分形谱维数

研究区	$\eta=0$		$\eta=1/3$		$\eta=2/3$		$\eta=1.33$	
	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$
中国东部	0.99	0.95	0.99	0.92	0.99	0.80	0.99	0.52
中国西部	0.99	0.96	0.99	0.94	0.99	0.85	0.99	0.58
中国台湾	0.99	0.97	0.99	0.95	0.99	0.80	0.99	0.38
新西兰	0.99	0.94	0.99	0.89	0.99	0.80	0.99	0.26

表 3 Hölder 奇异指数  $\alpha$  存在范围( $\alpha_{\min} \sim \alpha_{\max}$ )

研究区	$\eta=0$	$\eta=1/3$	$\eta=2/3$	$\eta=1.33$
中国东部	0.65~1.28	0.47~1.38	0.27~1.88	0.15~3.35
中国西部	0.57~1.20	0.66~1.26	0.41~1.60	0.23~2.83
中国台湾	0.59~1.38	0.54~1.35	0.24~1.50	0.09~2.50
新西兰	0.52~1.35	0.52~1.37	0.32~1.48	0.05~2.72

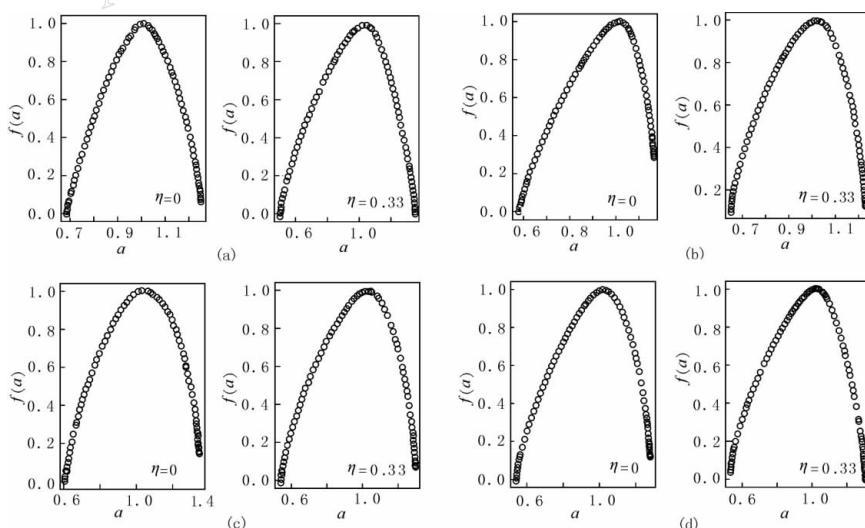


图 1 各区域  $\eta$  取不同值时  $f(\alpha)-\alpha$  曲线

(a) 中国东部地区; (b) 中国西部地区; (c) 中国台湾地区; (d) 新西兰地区

分形维数谱  $D_q$  估算值也有一定的差别. 表明各研究区地震活动时间分布结构的从集性存在差异, 板间地区与板内地区的这种从集性差异明显(特别是当  $\eta$  较大值时).

在 Hölder 奇异指数  $\alpha$  的存在范围内, 多重分形奇异谱  $f(\alpha)$  一般为一条非对称光滑连续曲线. 这种非对称性可以由  $\bar{\alpha} = (\alpha_{\min} + \alpha_{\max})/2$  与  $\alpha(D_0)$  的差别加以描述. 由图 1 可见, 多数情况下  $\bar{\alpha} - \alpha(D_0) < 0$ , 即  $f(\alpha)$  曲线在  $\alpha_{\text{range}} = (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$  范围内偏向于右侧. 表明“稀疏”集合的测度范围小于“从集”集合的测度范围, 或者说具有“稀疏”性质的观测(广义地震应变释放)出现的频度小于具有“从集”性质的“观测”出现的频度, “从集”表现为地震活动时间分布的主要特色. 随着  $\eta$  取值的从小到大,  $\alpha$  的存在范围逐步变大(表 3), 地震活动时间分布的从集和稀疏性质可以得到更好地描述. 从概率测度的角度讲,  $\eta$  的增加使得地震活动时间分布最密集部分(具有大的权重)“成丛”出现的概率增加, 减小了最稀疏部分(具有小的权重)“成丛”出现的概率.

$\eta$  的增大使得  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线形态的歪斜程度有一定的变化. 对比中国大陆地区与中国台湾地区和新西兰地区可以看出, 当  $\eta$  取较大值时中国大陆(板内地区)地区的  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线逐步接近于对称分布, 而新西兰和中国台湾地区的  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线则变化不很明显. 表明板间强震活动具有比板内强震活动更显著的从集性.

Hölder 奇异指数  $\alpha$  的存在范围总体上随着  $\eta$  的增加而增大(图 1、图 2 和表 3). 由图 2 可以看出, 当  $\eta$  小于 0.4 时  $\alpha$  随  $\eta$  的变化范围很小, 而大于 0.4 时则  $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  呈非线性增加. 这表明中小地震与强震的从集特征有显著区别.  $\eta$  取不同值时广义应变释放的多重分形特征及其不同变化情况可揭示地震构造环境的应力状态、构造条件以及震源破裂情况的

差别. 因此, 地震活动广义应变能释放的多重分形可以向人们提供更多的具体地区特定时间段地震活动的性质, 这对未来强震的预测具有明显的意义.

由图 1、图 2 和表 3 可见, 在  $\eta$  取较小值时板内地区和板间地区  $\alpha$  的存在范围差别不显著, 但当  $\eta$  取较大值时上述两类地区  $\alpha$  的存在范围则差别明显: 板内地区的  $\alpha_{\min}$  和  $\alpha_{\max}$  一般大于其在板间地区相应的数值, 差值  $\alpha_{\max}$

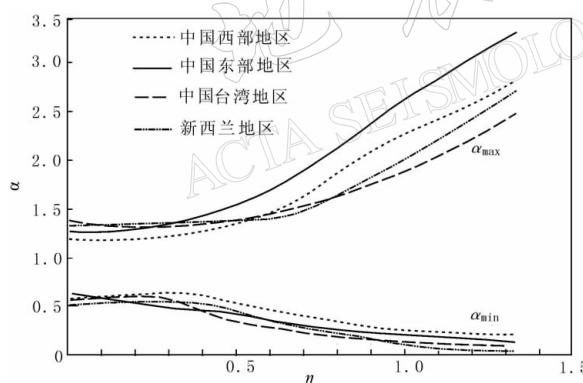


图 2 研究区  $\eta$ - $\alpha$  关系曲线

$-\alpha_{\min}$  在板间地区一般较小而在板内地区较大. 表明较高震级地震活动在板内地区从集-稀疏差异比在板间地区更明显. 考虑前面谈到的板间地区强震活动从集性更为显著的特点, 进而可推论出板间地区强震活动要比板内地区频繁.

分析表 3 可知, 当考虑地震活动频数时( $\eta=0$ ), 中国东部地区的  $\alpha_{\min}$  和  $\alpha_{\max}$  均大于中国西部地区的相应值. 表明中国东部地区地震活动频数的从集程度最高部分和从集程度最低部分的发生概率小于中国西部地区的情况. 但若考虑地震活动震源线度时( $\eta=1/3$ ), 中国西部地区的  $\alpha_{\min}$  则大于中国东部地区相应的结果, 而  $\alpha_{\max}$  仍为中国东部地区大于西部地区. 表明中国西部地区地震活动震源线度从集程度最高部分的发生概率小于中国东部地区, 而震源线度从集程度最低部分的发生概率仍为中国东部地区小于西部地区. 这种情况在  $\eta$  取

更大值时也成立.

或许以上揭示的各地区广义地震应变能释放的多重分形特征的差异与各地区特定的动力学条件、应力状态和构造条件有关, 如中国西部地区由于受欧亚板块和印度板块会聚的影响, 其应力状态、构造条件和地震活动性与中国东部相比要复杂得多, 板间和板内地震活动情况明显不同. 本研究所揭示的这种各研究区间多重分形特征的差异虽然仅定量地描述了广义地震应变能释放的差异, 但可揭示地区间构造以及地壳应力状态的不同.

### 3.2 各研究区广义地震应变释放空间分布的多重分形特征

#### 3.2.1 中国大陆地区

将中国大陆东部和西部研究区按以  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$  划分为若干矩形方块, 并计算各方块内所选地震目录的广义地震应变释放作为相应方块中心点的观测值, 然后计算其广义应变空间分布的多重分形谱维数和多重分形奇异谱.

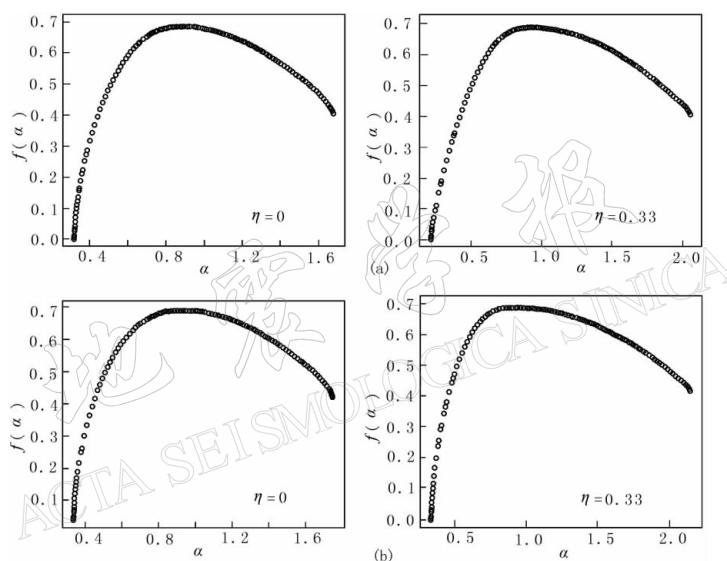


图 3 中国东(a)、西(b)部地区广义应变释放空间分布多重分形奇异谱特征曲线

通过计算得到了配分函数及其随尺度的变化,  $\tau(q)$  随  $q$  的变化, 以及多重分形奇异谱. 图 3 给出了  $\eta$  取不同值时多重分形奇异谱的情况. 部分多重分形维数谱  $D_0$  和  $D_1$  的估算值列入表 4. 由表中可见, 中国东、西部地区地震活动广义应变释放空间分布, 当  $\eta$  在  $0 \sim 1.0$  之间取值时其容量维( $D_0$ )均为 0.69. 表明中国大陆地区无论地震活动频度, 震源破裂线度, 震源破裂面积, 以及应变释放等在空间分布上具有相同的分形特征. 随着  $\eta$  的增大, 多重分形谱维数  $D_q (q > 0)$  分支有逐渐减小的趋势(如表 4 中  $D_1$ ), 而  $D_q (q < 0)$  则逐渐增大. 表明重视强震时地震活动在空间分布上的成丛性逐步减弱, 而地震活动稀疏特征随着  $\eta$  的增大而逐渐加剧. 这从图 3 中  $f(\alpha)$  曲线向左极度歪斜的形态, 以及 Hölder 奇异指数的存在范围也可看出.

当  $q$  取正值时, Hölder 奇异指数的存在范围很小(图 3 钟型曲线的左支), 表明丛集最高的地震活动空间分布存在的测度范围很小, 接近于不考虑丛集性的普通分形分布的测度, 即丛集性是十分有限的. 当  $q$  取负值时, Hölder 奇异指数的存在范围很大, 图 3 钟型曲线的右支在右侧无界, 表明地震活动强度空间分布具有无限稀疏性.

表 4 地震活动广义应变释放空间分布多重分形谱维数估算值

研究区	$\eta=0$		$\eta=2/9$		$\eta=1/3$		$\eta=4/9$		$\eta=0.5$		$\eta=1.0$	
	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$	$D_0$	$D_1$
中国东部	0.69	0.55	0.69	0.54	0.69	0.53	0.69	0.49	0.69	0.45	0.69	0.33
中国西部	0.69	0.54	0.69	0.56	0.69	0.56	0.69	0.56	0.69	0.55	0.69	0.49
中国台湾	0.78	0.59	0.78	0.60	0.78	0.61	0.78	0.61	0.78	0.61	0.78	0.59
新西兰	0.73	0.58	0.73	0.59	0.73	0.59	0.73	0.58	0.73	0.58	0.73	0.56

由于 Hölder 奇异指数  $\alpha$  右侧无界, 无法定量讨论  $\alpha$  的存在范围, 但可得到  $f(\alpha)$  曲线左支的存在范围  $\alpha_{\min} \sim \alpha(D_0)$ . 表 5 给出了中国大陆东、西部地区的  $\alpha_{\min}$ 、 $\alpha(D_0)$  (简记为  $\alpha_0$ ) 值随  $\eta$  的变化情况. 对于中国东部地区,  $\alpha_{\min}$  总体上随  $\eta$  增加逐渐变小, 而  $\alpha_0$  则逐步变大. 体现了地震活动频度、震源破裂线度、震源破裂面积等从集特征的不一致性, 进而体现地区构造和地震应力场的复杂性. 对于中国西部地区, 这种情况也存在, 但比东部地区弱. 表明该地区构造和应力场比东部地区更具有大尺度统一性. 中国东部地区  $\alpha_{\min} \sim \alpha(D_0)$  范围随  $\eta$  增加而加大, 表明随着地震强度的增强, 地震活动空间分布的从集性差异逐步变大, 体现出小震分布的随机性和大地震在某些地区的集中的特征.

表 5 地震活动广义应变释放空间分布  $q \geq 0$  时 Hölder 奇异指数存在范围

研究区	$\eta=0$		$\eta=2/9$		$\eta=1/3$		$\eta=4/9$		$\eta=0.5$		$\eta=1.0$	
	$\alpha_{\min}$	$\alpha_0$										
中国东部	0.31	0.88	0.25	0.89	0.21	0.91	0.17	0.95	0.15	0.98	0.11	1.13
中国西部	0.33	0.93	0.33	0.92	0.32	0.92	0.32	0.94	0.32	0.96	0.28	1.07
中国台湾	0.36	1.17	0.39	1.17	0.41	1.17	0.44	1.19	0.44	1.20	0.38	1.28
新西兰	0.38	1.06	0.41	1.08	0.41	1.10	0.41	1.13	0.41	1.15	0.40	1.22

对中国东部与西部地区  $q$  取相同值时(如取  $q=-20$ , 图 3 中  $f(\alpha)-\alpha$  曲线的右端)的 Hölder 奇异指数值, 可分析两地区地震活动稀疏特征的差异. 图 3 显示, 随着  $\eta$  的增加, 中国西部地区的  $f(\alpha)-\alpha$  曲线右侧分支的 Hölder 奇异指数始终比东部地区大. 表明中国西部地区强震活动稀疏性强于东部地区, 高震级地震空间分布的从集性比东部地区弱. 这与前面得到的结论是相同的. 这种现象与两地区的构造特征、应力场以及动力过程是密切相关的.

### 3.2.2 新西兰和中国台湾地区

研究中对新西兰地区使用  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ , 对中国台湾地区使用  $6.25 \text{ km} \times 6.25 \text{ km}$  的方格将研究区划分为若干网格, 分析计算广义应变空间分布的多重分形谱维数和多重分形奇异谱.

由于存在定位误差等因素, 研究中往往不宜使用过小的网格划分研究区. 但因中国台湾地区面积不大, 地震台站密集, 地震定位精度较高, 地震密集, 故以较小的尺度进行区域划分并研究地震活动空间分布的多重分形特征是可行的; 若使用  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$  的网格对该区域进行划分, 则计算样本较少, 不能满足计算要求.

计算得到的新西兰和中国台湾地区地震活动空间分布多重分形奇异谱在  $\eta$  取 0 和  $1/3$  时的情况见图 4. 部分多重分形维数谱估算值  $D_0$ ,  $D_1$  也列入了表 4.

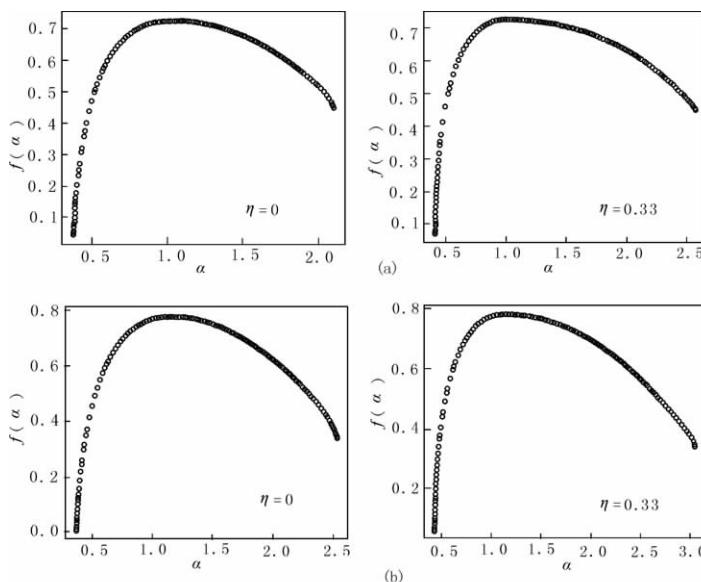


图 4 新西兰(a)和中国台湾(b)地区广义应变释放空间分布多重分形奇异谱特征曲线

由表 4 中可见, 当  $\eta$  在  $0 \sim 1.0$  之间取值时, 新西兰地区地震活动空间分布容量维 ( $D_0$ ) 均为 0.73, 大于中国大陆地区的情况. 表明该地区地震活动的空间分布较中国大陆地区密集. 计算得到的中国台湾地区地震活动空间分布容量维为 0.78, 大于中国大陆及新西兰地区的情况, 且计算时使用的网格尺度小于上述 3 个地区, 表明该地区地震活动空间分布更加密集.

在新西兰和中国台湾地区, 多重分形谱维数  $D_q$  ( $q > 0$ ) 随着  $\eta$  的增大没有显著变化, 这与中国大陆东、西部地区明显不同. 表明板间地区无论小震和强震在空间分布上的成丛性基本相同, 这或许是板间与板内地区地震活动空间分布的重要区别之一.

另一方面, 图 4 中  $f(\alpha)$  曲线向左极度歪斜的形态以及 Hölder 奇异指数的存在范围, 均与板内地区相似, 表明地震活动强度空间分布具有无限稀疏性是其一种共性.

$\eta$  取不同值时新西兰地区和中国台湾地区  $f(\alpha)$  曲线左支  $\alpha$  的存在范围  $\alpha_{\min} - \alpha(D_0)$  见表 5. 板间地区的  $\alpha_{\min}$  和  $\alpha_0$  在  $\eta$  变化时基本不变, 只是在  $\eta$  大于 0.5 时略有增加. 体现了地震活动广义应变释放等丛集特征的一致性. 这与中国大陆地区明显不同, 体现板间地区相对于板内地区构造和地震应力场的特征简单性. 此外, 在  $\eta$  较小时, 新西兰和中国台湾地区的  $\alpha_{\min} \sim \alpha(D_0)$  范围大于中国大陆地区的情况; 但在  $\eta$  较大时则相反. 表明板间地区小震丛集性测度范围比中国大陆地区更大, 而强震则相反.

对比板间地区与中国大陆地区  $q$  取相同值时(如取  $q = -15$ , 图 4 中  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线的右端)的 Hölder 奇异指数值, 可分析两类地区地震活动稀疏特征的差异. 由于图 3 中  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线右端为  $q = -20$  时的结果, 故在  $q = -15$  的  $\alpha$  值应小于曲线末端所指示数值. 但图 4 中  $f(\alpha)$ - $\alpha$  曲线右端的  $\alpha$  值在  $\eta$  取不同值时始终大于图 3 所示中国大陆地区的相应结果, 表明板间地区地震活动空间分布稀疏性测度存在范围大于中国大陆地区的情况. 结合前面的讨论, 对于强震的情况, 新西兰和中国台湾地区地震活动的空间分布的丛集程度比中国大陆地区低、稀疏程度比中国大陆地区更高. 这种现象很可能与两类地区的构造条件、应力

场分布以及动力过程的不同有关。

## 4 讨论和结论

依据多重分形分析方法, 考察了中国大陆(东、西部)和中国台湾地区及新西兰地区的地震活动广义应变释放时间和空间分布的多重分形特征。结果表明, 在时间分布方面, 同一研究地区总体上随着  $\eta$  增加,  $D_q (q>0)$  有所减小、 $D_q (q<0)$  有所增加; 对不同研究地区, 无论  $\eta$  取相同或不同的值, 多重分形谱的估算值均有明显差别, 特别当  $\eta$  取较大的值时。当  $\eta$  取不同的值时, 中国西部地区地震活动多重分形谱  $D_q (q>0)$  略大于东部地区的结果, 但差别不大; 新西兰地区地震活动多重分形谱  $D_q (q>0)$  总体上低于中国台湾地区的结果, 当  $\eta$  取较小值(如取 0, 1/3)和较大值时(如 1.33),  $D_q (q>0)$  差异明显, 取中等值时(如 2/3)基本相当; 新西兰和中国台湾地区的多重分形谱  $D_q (q>0)$ , 在  $\eta$  取 1 以上的值时明显低于中国大陆地区。多重分形奇异谱  $f(\alpha)-\alpha$  曲线一般向右侧歪斜, 表明任何地区  $\eta$  取任何值时地震活动时间分布从集性存在的测度范围总大于稀疏性存在的测度范围(多重分形奇异谱曲线的歪斜程度明显受  $\eta$  取值的影响), “从集”为地震活动时间分布的主要特色。从多重分形奇异谱  $f(\alpha)-\alpha$  的曲线形态分析可看出, Hölder 奇异指数的存在范围随  $\eta$  的增加而增大, 但板内地区地震活动时间分布最密集—最稀疏测度范围一般比板间地区大。总体上板间地区强震活动时间分布比板内地区具有更明显的从集性, 这种从集性差异对中小地震活动较小。

地震活动广义应变释放空间分布的多重分形特征表明, 在属于板内地区的中国大陆,  $\eta$  增大使得多重分形谱维数  $D_q (q>0)$  总体上有明显减小的趋势, 而  $D_q (q<0)$  则逐渐增大。但这种现象在属于板间地区的新西兰和中国台湾地区不明显。多重分形奇异谱曲线表明,  $\eta$  取任何值时地震活动空间分布的“从集”测度范围均有限, 而“稀疏”测度范围则是无限的, “稀疏”为地震活动空间分布的主要特色。中国大陆东、西部地区  $\eta$  取较小值时, 地震(中小)活动在空间分布上具有差别不大的从集测度范围; 但  $\eta$  取较大值(强震活动)时, 中国东部地区地震活动空间分布从集性比西部地区明显。新西兰和中国台湾地区在  $\eta$  取较小值时, 从集测度存在范围大于中国大陆地区, 但  $\eta$  取较大值时则相反。表明新西兰和中国台湾地区小震空间分布比中国大陆地区有更强的从集性, 而强震分布则相反。随着  $\eta$  的变化, 新西兰和中国台湾地区小震和强震空间分布的从集性测度范围变化不大, 中国大陆地区则有较大变化。体现了新西兰和中国台湾地区小震和强震空间分布复杂程度相当, 而中国大陆地区大小地震空间分布复杂程度则不同。

## 参 考 文 献

- 安镇文, 杨翠华, 王琳英, 等. 2000. 地震时空从集的多重分形研究[J]. 地球物理学报, 43(1): 74-80.
- 朱令人, 周仕勇. 1992. 地震多重分形标度指数谱  $f(\alpha)$  的研究[J]. 西北地震学报, 14(2): 30-35.
- 陈时军, David Harte, 王丽凤, 等. 2003a. 广义地震应变能释放的多重分形特征[J]. 地震学报, 25(2): 182-190.
- 陈时军, 马丽, 王丽凤, 等. 2003b. 强震前后广义地震应变释放过程的从集特征[J]. 地震, 23(2): 29-38.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654-662.
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 53-54.
- Ben-Zion Y, Lyakhovsky V. 2002. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns on earthquakes faults[J]. Pure Appl Geophys, 159, 2 385-2 412.

- Chhabra A B, Meneveau C, Jensen R V, et al. 1989. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum and its application to fully developed turbulence[J]. *Phys Rev A*, **40**: 5 284-5 294.
- Godano C, Alonso M L, Vilardo G. 1997. Multifractal approach to time clustering of earthquakes: Application to mount. Vesuvio seismicity[J]. *Pure Appl Geophys*, **149**: 375-390.
- Harte D. 2001. *Multifractals: Theory and Application*[M]. New York: Chapman & Hall/CRC Press: 29-46, 127-194.
- Heinz-Otto P, Hutmart J, Dietmar S. 1997. *Chaos and Fractal: New Frontiers of Science*[M]. New York: Springer Velay: 921-954.
- Hooge C, Schertzer D, Malouin J F, et al. 1994. Multifractal phase transition: The origin of self-organized criticality in earthquakes[J]. *Nonlin Proc Geophys*, **1**: 191-197.

## MULTIFRACTAL CHARACTERISTICS OF SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF EARTHQUAKES IN INTRAPLATE AND INTERPLATE REGIONS

Chen Shijun<sup>1)</sup> Sun Longmei<sup>2)</sup> Ma Li<sup>2)</sup>

1) *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China*

2) *Computer Department of China Women's College of Shandong, Jinan 250014, China*

3) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

**Abstract:** This paper analyze the multifractal characteristics of spatio-temporal distribution of generalized strain release of earthquakes (GSRE) occurred in the eastern and western Chinese mainland (as an instance of intraplate region), Taiwan region and New Zealand (as an instance of interplate region). The results show that the multifractal characteristics of GSRE are closely related to the geodynamic environment. For the temporal distribution of strong events, the clustering feature is more evident in the interplate region than that in the intraplate region, while for small and moderate events, this difference is ambiguous. For the spatial distribution of strong earthquakes, the clustering feature is usually clearer in the intraplate region than that in the interplate regions, while for small and moderate events, the case is just opposite.

**Key words:** generalized strain release of earthquakes; multifractal; intraplate earthquake; interplate earthquake