

广东省主要活动断裂的分形特征及其 与区域历史地震活动的关系*

陈国辉, 陈国能, 娄峰

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘要: 以分形理论为基础, 采用网格覆盖法, 对广东省主要活动断裂进行分形研究。研究表明, 广东省内主要活动断裂在分形标度区间 12.5 ~ 100 km 具有较好的统计自相似性, 断裂分布的分形维数有效地描述了断裂的空间展布特征, 全部断裂分形维数为 1.582 3, 北东向断裂为 1.434 2, 北西向断裂为 1.115 7 和近东西向断裂 1.039 4, 并且北东向断裂与北西向断裂的分布呈现一定的互补性。结合断裂分形维数等值线与历史地震活动, 初步探讨了断裂分形维数与地震活动的耦合关系。

关键词: 活动断裂; 分形; 网格覆盖法; 历史地震活动; 广东省

中图分类号: P315.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2014) 01-0148-07

Fractal Analysis of the Main Active Faults and Its Relationship with Regional Historical Seismic Activities in Guangdong Province

CHEN Guohui, CHEN Guoneng, LOU Feng

(Department of Earth Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the fractal theory, the fractal geometry is applied to studying the active faults system in Guangdong Province. Results indicate that the spatial distribution of all faults in Guangdong Province is a distinct fractal set with self-similarity in the non-scale range of 12.5 – 100 km, and the fractal dimension, obtained by the box-counting method, interprets well the characteristics of the spatial distribution of faults. The fractal dimension of all faults in the study area is 1.582 3, that of the NE faults 1.434 2 and that of the NW faults 1.115 7 and EW faults 1.039 4. The densities of spatial distribution of the NE and the NW faults supplement to each other, indicating the inter-restraint properties of these two groups of faults. Eventually, correlating the isoline maps of fractal dimensions and historical earthquake distribution, it is tried to find out the relationship between the fractal characteristics and seismic activities.

Key words: active faults; fractal; box-counting; historical seismic activities; Guangdong Province

分形理论^[1]是定量描述自然界不规则的形态和事件的有效工具, 形态和事件不论其尺度、大小如何, 都具有尺度不变性和统计自相似的分形现象。目前, 分形理论, 已被广泛应用于物理学、生物学、地理学、材料学、计算机图形学等领域^[2-5]。

前人已经对断裂的展布进行了研究并应用到了地质灾害评价^[6-8]、油气矿产资源分布中^[9-12]。而断裂、特别是活动断裂分形方面^[13-16], 细至断层泥分形的研究^[17-18], 是工程稳定性和地震活动性评价的重要手段之一。断裂的时空展布、活动特征及形成机制等, 对认识一个地区地壳结构、地壳

* 收稿日期: 2013-08-14

基金项目: 广东省重点基金资助项目 (10251027501000019); 国家 (729) 专项基金资助项目 (GZH201100205)

作者简介: 陈国辉 (1988年生), 男; 研究方向: 新构造运动; 通讯作者: 陈国能; E-mail: chengn@mail.sysu.edu.cn

稳定性和区域大地构造演化等有着重要的意义。

近年来广东沿海城市开展的城市地质调查成果表明^[19-20]，珠江三角洲的诸多基底断裂，并非如过去部分学者所认为的“蠕虫型断裂”，而是在晚更新世中期以来，发生过多次大规模突发性活动，并导致珠江三角洲地表环境的多次重大变迁^[19]。以往的区域地质调查和近年来城市地质调查所获得的详实地质资料，为本项研究奠定了基础。本文拟将分形理论应用于广东省区域内的主要活动断裂展布和历史地震活动研究中，基于网格覆盖法，重点探究广东省区域内主要活动断裂平面展布的分形维数，并将其与省内历史地震活动相关联，进而从构造的角度来初步探讨断裂分形维数与地震活动的关系。

1 研究方法

如图 1 所示，广东省内的断裂^[21-23]表现为由规模巨大、延伸较远的北东向断裂（如滨海断裂、汕头-惠来断裂、莲花山断裂、恩平-新丰断裂、吴川-四会断裂等）和规模较小且断续分布的北西向断裂（如韩江断裂、榕江断裂、练江断裂、

珠江口断裂、白坭-沙湾断裂、西江断裂等）组成正交网络格架，近东西向断裂（如九峰断裂、高要-惠来断裂、琼州海峡断裂等）穿插其中。通过断裂分形研究，得出区内断裂总体以及北东、北西和东西向 3 组断裂的分形特征，并做出相应的分形维数等值线图。计算分形维数的网格覆盖法（也称数盒子法）^[16]的原理为：以边长为 r 的正方形格子去覆盖分形，有分形落入非空的格子数为 $N(r)$ ，即累计频数，不断改变 r 得到 $N(r)$ ， r 越小则 $N(r)$ 越大，若 r 与 $N(r)$ 满足以下幂定律关系： $N(r) = Cr^{-D}$ (C 为常数)，则 D 就是分形值，分形维数 (D_0) 称为容量维。具体做法是先以断裂总体，包括北东向、北西或东西向，为对象，用 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 的正方形格子从图 1 左上角开始覆盖研究区，对于不足一个格子的和研究对象外的区域不做统计；然后改变正方形格子的边长，用 50, 25 和 12.5 的正方形去覆盖同一范围，并且得到各边长正方形的非空格子数 $N(r)$ 。后以 r 为横坐标， $N(r)$ 为纵坐标，作双对数图，用最小二乘法进行线性拟合，所获得的直线的斜率即为研究区相对应断裂的分形维数。

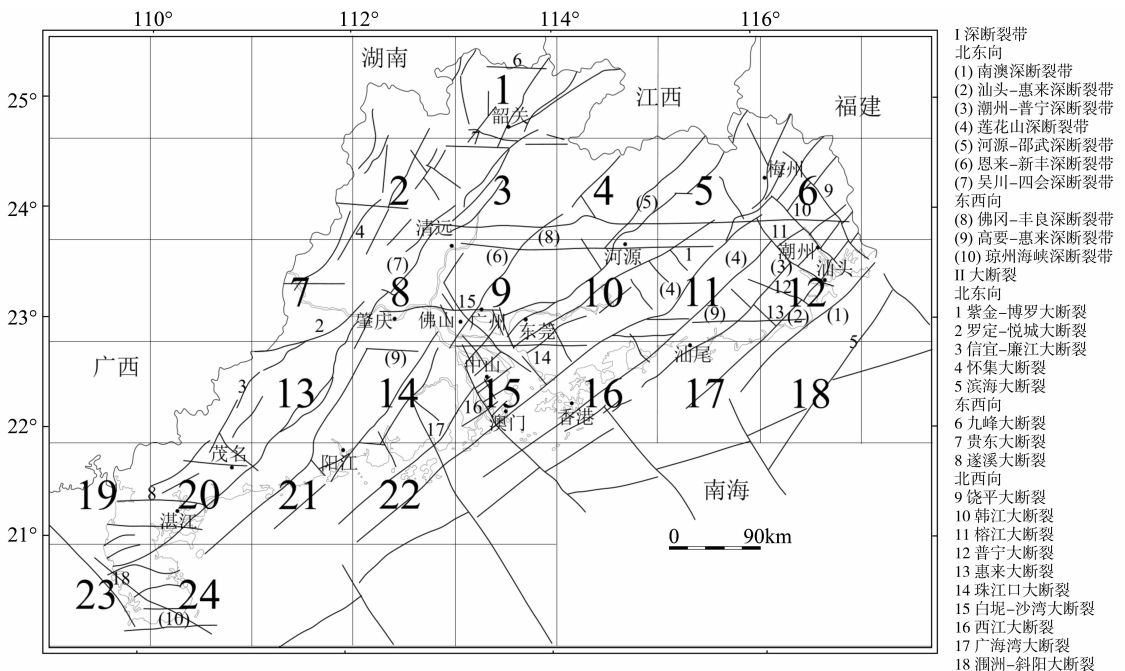


图 1 广东省断裂展布^[21-23]及 100 km x 100 km 网格分布图

Fig. 1 Fracture distribution of Guangdong Province (Modified after [21-23]) and the 100 km x 100 km grid-coverage model

2 分形维数计算结果与分析

2.1 断裂分形特征

表 1 给出了研究区不同组别 (北东、北西和东西向) 断裂在各个边长正方形格子的统计数据, 可见其相关系数均大于 0.99, 表明各组断裂均具有较高的统计自相似性, 其分形维数分别为 1.582 3 (总体), 1.434 2 (北东向组), 1.115 7 (北西向组) 和 1.039 4 (东西向组)。经过拟合得到如图 2 所示的拟合直线。

表 1 总体断裂、北东向和北西向、东西向断裂的分形统计资料

Table 1 The fractal dimensions of the orientation faults

r/km	$N(r)$			
	总体	北东	北西	东西
100	33	33	24	19
50	105	100	55	41
25	345	297	121	89
12.5	859	631	243	162
相关系数	0.996 7	0.992 7	0.998 5	0.996 6
D_0	1.582 3	1.434 2	1.115 7	1.039 4

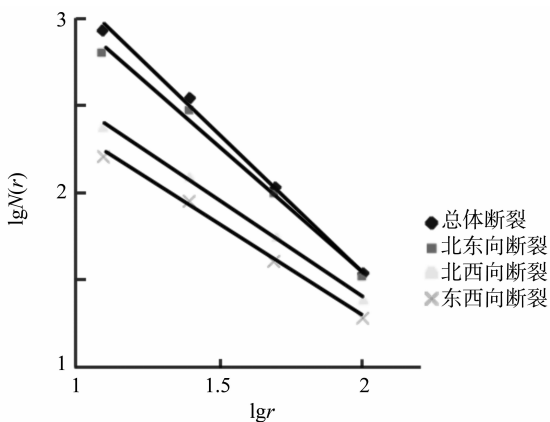


图 2 断裂分形双对数图

Fig. 2 The results of the fractal dimensions of faults with four different orientations

在不同的标度下的分形维数所反映的断裂特征是不同的, 或者说, 分形维数的含义是不同的。本文所分析的断裂多属区域断裂, 分形维数反映了断裂系的空间分布特征, 也可能在不同程度上反映了断裂系的几何形状特征。具体来说, 断裂 (包括北东、北西和东西向 3 组断裂) 的总数量必大于

3 组断裂各自的数量, 故其分形维数必然较大, 这在统计结果中很好得到体现; 而北东向断裂的分形维数大于北西向分形维数则说明了北东向断裂是区域内的主导断裂, 其展布情况及复杂程度远大于北西向断裂; 而东西向断裂在区域内并不如北东、北西向断裂发育, 故其分形维数最小。产生这种现象的原因主要为, ① 北东向断裂是华南大陆构造演化历史形成的主要的断裂构造; ② 北西向断裂形成时代较新, 切割了北东向断裂, 加剧了其展布复杂性。东西向断裂发育历史最长, 经后期断裂改造, 较难辨认^[21, 24]。所以, 影响区域断裂在空间分布的分形维数因素包括断裂展布均匀程度、断裂数量、断裂弯折程度等等^[16, 18, 25]。

当然, 在本区的东南区域断裂分布并没纳入分形维数统计之中, 势必影响整体分形维数结果, 因此, 表中统计的分形维数比实际偏小。此外需要指出的是, 除了断裂展布均匀程度、断裂数量等对区域断裂的分形维数造成影响外, 断裂的方向和形成时期之间关系复杂, 因此在对活动断裂进行分形研究时区分其断裂时代, 有必要时还要对断裂进行分段, 这些都有待今后的研究。

为了进一步研究断裂和分区相关性, 本文对总体、北东向和北西向、东西向断裂在各个分区的分形维数及相关系数进行了统计, 如表 2 所示。

2.2 断裂总体

24 个小区块的断裂在标度区间内展现出了很高的统计自相似性, 相关系数均大于 0.99。据分形维数运用 Surfer 软件做出的断裂总体分形维数等值线图 (图 3(a)) 具 2 点特征: ① 区域内的总体分形维数等值线图大体上呈北东条带状展布, 应与北东向断裂构造发育强烈有关; ② 高值区出现在中山 - 东莞 - 梅州 - 潮州一带, 因受北东向断裂带影响, 发育了大量的北东向次一级断裂; 低值区主要分布在肇庆以西, 韶关 - 河源及沿海一带, 应与区内断裂发育并不强烈或者断裂资料较少有关。

2.3 北东向断裂

北东向断裂 (图 4(a)) 与总体的分形维数等值线图较为相似, 高值区都出现在中山 - 东莞 - 梅州 - 潮州一带, 低值区亦主要分布在肇庆以西, 韶关 - 河源及沿海一带, 也从侧面体现了北东向断裂对区域内的控制影响作用。

表 2 各分区断裂分形维数及相关系数

Table 2 The fractal dimensions of faults with four different orientations in different grids

区号	总体		北东向断裂		北西向断裂		东西向断裂	
	相关系数	D_0	相关系数	D_0	相关系数	D_0	相关系数	D_0
1	0.997 3	1.604 7	0.988 5	1.229 7	0.998 0	1.085 0	0.977 7	0.792 5
2	0.990 7	1.713 1	0.994 7	1.604 7	0.880 3	1.207 5	0.750 0	0.292 5
3	0.992 5	1.377 4	0.998 2	1.261 8	0.984 3	1.085 0	0.964 3	1.500 0
4	0.990 0	1.350 2	0.984 1	1.196 2	0.957 4	1.161 0	0.966 8	0.611 2
5	0.994 7	1.604 7	0.994 5	1.403 7	0.966 6	1.007 1	0.957 4	1.161 0
6	0.999 6	1.745 9	0.998 9	1.500 0	0.972 9	1.229 7	0.996 2	0.903 7
7	0.998 7	1.331 5	0.996 7	1.111 2	0.000 0	0.000 0	0.977 7	0.792 5
8	0.996 0	1.429 0	0.993 6	1.161 0	0.959 4	0.500 0	0.977 7	0.792 5
9	0.994 7	1.604 7	0.992 5	1.377 4	0.984 3	1.161 0	0.996 2	0.907 3
10	0.995 6	1.792 5	0.988 4	1.522 2	0.955 0	0.850 2	0.999 0	1.057 7
11	0.991 9	1.729 7	0.968 6	1.453 4	0.992 4	0.868 5	0.992 2	0.953 4
12	0.991 5	1.642 7	0.958 9	1.403 7	0.962 1	1.292 5	0.997 6	1.006 2
13	0.994 1	1.500 0	0.994 1	1.500 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
14	0.990 0	1.624 0	0.982 0	1.377 4	0.984 3	1.085 0	0.995 6	0.661 0
15	0.994 8	1.777 3	0.991 5	1.642 7	0.984 1	1.196 2	0.999 2	0.953 4
16	0.996 6	1.543 7	0.985 3	1.403 7	0.905 7	0.729 7	0.977 7	0.792 5
17	0.994 5	1.292 5	0.996 3	1.196 2	0.993 6	1.161 0	0.000 0	0.000 0
18	0.999 4	1.043 7	0.999 4	1.043 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
19	0.999 9	1.350 2	0.977 7	0.792 5	0.750 0	0.792 5	0.990 3	1.207 5
20	0.990 0	1.624 0	0.992 5	1.377 4	0.990 5	0.500 0	0.999 2	0.953 4
21	0.990 5	1.453 4	0.973 4	1.321 9	0.987 9	0.723 7	0.000 0	0.000 0
22	0.990 4	1.543 7	0.973 2	1.403 7	0.960 2	0.903 7	0.000 0	0.000 0
23	0.991 7	1.500 0	0.993 6	1.161 0	0.976 8	1.251 3	0.998 0	1.085 0
24	0.991 7	1.368 5	0.990 5	0.500 0	0.977 7	0.792 5	0.999 1	1.161 0

2.4 北西向断裂

北西向断裂在标度区间内的统计特征也比较明显, 除分块 2、19 及 7、13、18 (这 3 个区块不存在北西向断裂) 外, 其它分块的相关系数都在 0.9 以上, 因北西向断裂发育及分布不及北东向断裂, 因此其分形维数大小及相关系数都较小, 但是还是表现了一定的特征。图 4(b) 的北西向分形维数等值线图小于 1 的分形维数等值线并未标出, 所以等值线较少。其主要特征是:

1) 高值区集中在北西向断裂较为发育的地带, 主要为汕尾 - 梅州以东及广州 - 东莞 - 佛山, 中山 - 澳门一带, 低值区主要分布在河源 - 汕尾 - 香港及粤西一带, 这些区域的北西向断裂发育并不强烈;

2) 如图 3(b) 所示, 不考虑分形维数为 0 的情况下, 北西向断裂分形维数较低值和较高值区基本对应着北东向断裂分形维数的较高值和较低值区, 在空间上呈现一定的互补性, 反映了两者之间相互制约。

而对于东西向断裂, 由于区域内的东西向断裂整体发育并不强烈, 仅在清远 - 河源 - 潮州, 肇庆

- 佛山 - 广州几处发育, 且经过统计得到的分形维数也仅有 3、5、10、12、19、23 和 24 分块大于 1, 得到的分形维数等值线图对分析广东省区域的分形特征意义不大, 故略去。

3 断裂分形特征与历史地震活动关系

文献 [26] 曾系统对华北、东南及华南地区的线性构造进行统计并与地震活动特点进行综合, 认为 D 值 (分形维数) 愈大, 结构越复杂, 构造活动性越强; D 值小, 结构简单, 构造活动性弱。谢焱石等^[16] 总结断裂构造的分形维数与地震活动及地壳活动性有着密切的关系, 分形维数的大小是断裂构造复杂程度、构造活动性强弱、地震活动水平高低的反应。

具体地, 对于研究区域内第四纪断裂和地震活动最活跃的潮汕地区 (文中的第 12 区块), 用网格覆盖法得到的总体, 北东向和北西向断裂的分形维数分别为 1.642 7, 1.403 7 和 1.292 5。与整体区域的 D_0 相比 (1.582 3, 1.434 2 和 1.115 7), 除北东向断裂分形维数略低于区域北东向分形维数

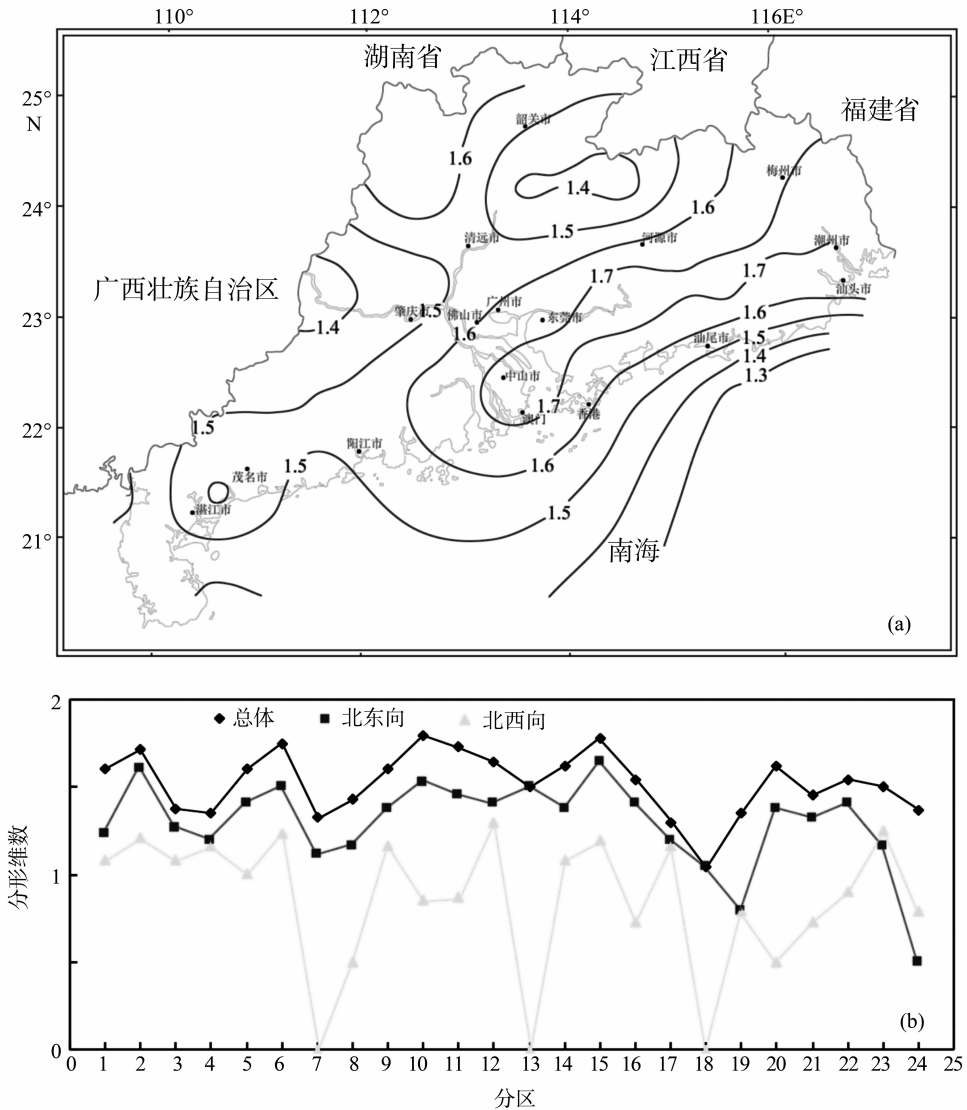


图 3 (a) 总体分形维数等值线图; (b) 分区分形维数对比图

Fig. 3 (a) The fractal dimensions isogram of total fracture; (b) Comparison of fractal dimensions of the divided section

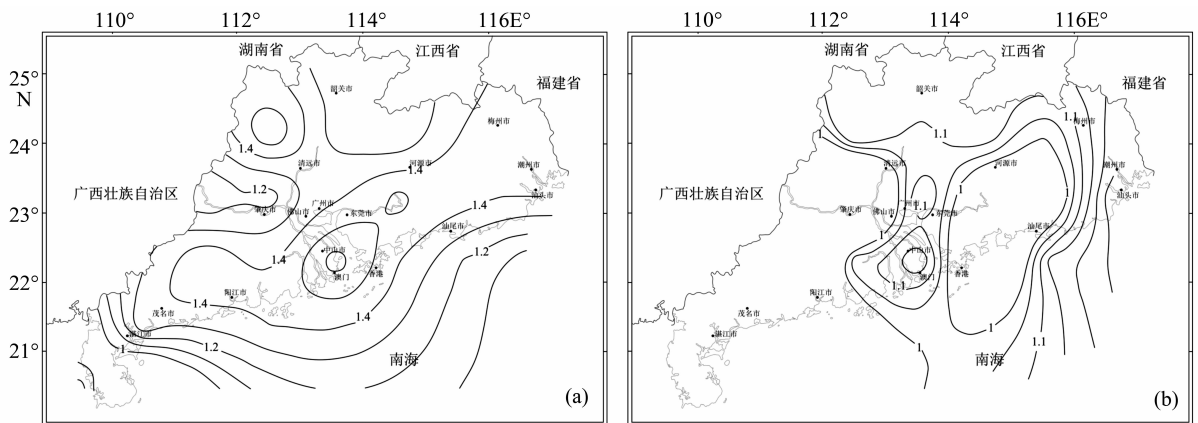


图 4 (a) 北东向断裂分形维数等值线图; (b) 北西向断裂分形维数等值线图

Fig. 4 (a) The fractal dimensions isogram of NE faults; (b) The fractal dimensions isogram of NW faults

外，总体和北西向断裂分形维数均高于区域分形维数，尤其其北西向断裂分形维数 (1.292 5) 是 24 个分块中的极值。这也从一定程度上反映了断裂分形维数与地震活动的相关性，该区域内历史地震活动沿北西向断裂呈带状分布^[21]，如 1538 年潮州北东方向的 4 级地震和澄海 1962 年 4 级地震，与韩江断裂主干断裂关系密切；而 1067 年潮州 6 级地震和 1886 年汕头的 4 级地震则发生在韩江断裂支断裂，潮州 - 古巷口断裂附近。但是，其北东向分形维数略低，这从另一角度印证了前面述及的整体区域北东向断裂展布情况及复杂程度受后期北西向断裂影响，但该区域 (12 区块) 内的北东向断裂依旧是其主导断裂，如南澳断裂带，汕头 - 惠来断裂带和莲花山断裂带，这些断裂带上也发生过多次地震^[21]，活动性质亦非常明显。

对于整体研究区域，将区域内历史地震活动和总体分形维数联系起来 (图 5)，可以清楚的看到，地震活动频繁的区域与分形维数较大的区域大致相同。1970 年前的地震活动主要集中在广州 - 肇庆 - 中山区域内及汕头 - 潮州区域，其他地方零星分布；而 1970 年后的地震活动主要集中河源、南澳

岛、阳江三地，其他地方地震活动零星分布。总体上看，统计得到的地震活动 95% 发生在分形维数 1.5 以上的地域。空间上，地震分布与主要活动断裂构造的分形维数 (高值区) 存在一定正相关关系。

地震活动在时间、空间和强度方面均存在统计自相似性，具有分形特征^[27-28]。震级大于 m 的地震数目 N 满足古登堡 - 里克特经验公式： $\lg N = a - bm$ ，式中 a, b 均为常数。 b 值反映了该地区大小地震之间的比例关系，人们常用 b 值来测量地震的活动性。

因此，对本区的地震活动性参数 b 值进行计算， $b = 0.68$ 。事实上，前人已经论及分形维数 D 与地震 b 值存在关系 $D \approx 2b$ ^[27-28]，但是并非所有震级范围都符合上式，低震级段和高震级段都有所偏离。这说明了古登堡 - 里克特公式适用于一定震级范围内，其地震破裂尺度才存在着自相似性，因此，本文所得的 b 值尚未能很好反映上述关系。当然， b 值的计算与时间的长短有关，在短时间段内是有变化的。但从长期来看它则是稳定的，并且可能和该地区的活动断裂的空间分布有关，反映了该区域活动断裂空间分布的复杂程度。

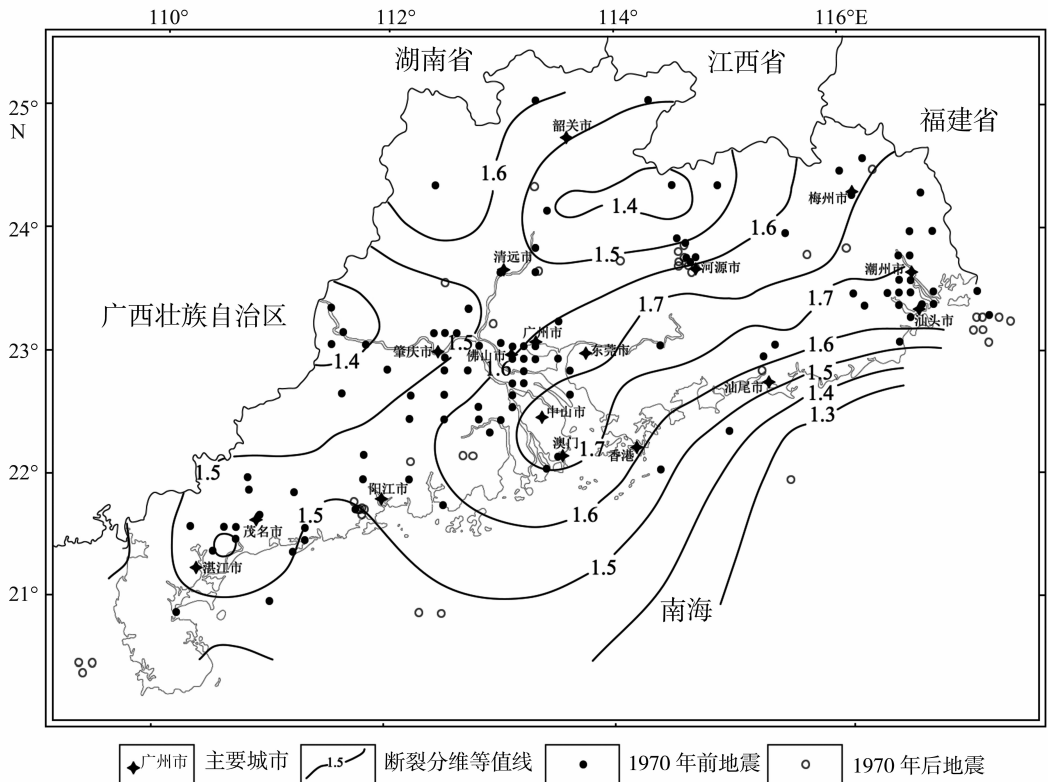


图 5 总体断裂分形维数等值线与区域历史地震活动分布

Fig. 5 The fractal dimension isogram and historical earthquake distribution

4 结 论

运用数盒子法对广东省主要活动断裂进行分形维数统计,进而绘制分形维数等值线图,断裂分布的分形维数有效地描述了断裂的空间展布特征。最后将主要活动断裂分形维数和历史地震活动结合起来进行分析,得到如下结论:

1) 北东向断裂较为发育,分形维数为 1.434 2;北西向及东西向断裂较小,发育并不强烈,总体断裂相关系数都大于 0.99,说明本区的断裂具有很好的统计自相似性。

2) 分区总体断裂分形维数数、北东向和北西向断裂分形维数等值线图的分形结果显示,北东向断裂对区域内的分形维数贡献较大,北西向断裂切割北东向断裂加剧了北东向断裂的整体复杂程度,断裂展布均匀程度、断裂数量、断裂弯折程度等对区域断裂在空间分布的分形维数造成了较大影响。

3) 区域内的总体断裂分形维数等值线图大体上呈北东条带状展布,应与北东向断裂构造发育有关。区域内历史地震活动与断裂构造关系密切,空间上,地震分布与主要活动断裂构造的分形维数存在一定的相关关系。

参考文献:

[1] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New York: W H Freeman and Company, 1982: 468.

[2] 盛建龙,刘新波,朱瑞赓. 分形理论及岩石破碎的分形特征 [J]. 武汉冶金科技大学学报:自然科学版, 1999, 22(1): 6-8.

[3] ZHENG Q, YU B M, WANG S F, et al. A diffusivity model for gas diffusion through fractal porous media [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 68(1): 650-655.

[4] SANCHEZ-MOLINA D, VELAZQUEZ-AMELJIDE J, QUINTANA V, et al. Fractal dimension and mechanical properties of human cortical bone [J]. Medical Engineering & Physics, 2012, 35(5): 576-582.

[5] BASKIN E, IOMIN A. Fractional electrostatic equations in fractal composite structures [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(10): 3302-3309.

[6] 谢和平. 分形最新进展与力学中的分形 [J]. 力学与实践, 1993, 15(2): 9-18.

[7] 谢和平,陈至达. 分形几何与岩石断裂 [J]. 力学学报, 1988, 20(3): 264-272.

[8] 谢和平,高峰,周宏伟,等. 岩石断裂和破碎的分形研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1-9.

[9] 沈超,潘懋,赵增玉,等. 杭州西湖区域断裂分形研究

及其对岩溶塌陷分布的影响 [J]. 高校地质学报, 2011, 17(4): 552-561.

[10] 李社,管太阳,潘家永,等. 下庄矿田控矿断裂的分形特征 [J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(4): 286-290.

[11] 金章东,卢新卫,张传林. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究 [J]. 地质论评, 1998, 44(1): 57-62.

[12] 姚衍桃,詹文欢. 南海南部断裂的分形研究 [J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 59-66.

[13] 韩玉英. 构造断裂的分形分析 [J]. 地质科技情报, 1992, 11(3): 79-84.

[14] SUKMONO S, ZEN M T, KADIR W G A, et al. Fractal geometry of the sumatra active fault system and its geodynamical implications [J]. Journal of Geodynamics, 1996, 22(1/2): 1-9.

[15] SUKMONO S. New evidence on the fractal pattern of Sumatra Fault Seismicity and its possible application to earthquake prediction [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(4): 870-874.

[16] 谢焱石,谭凯旋. 断裂构造的分形研究及其地质应用 [J]. 地质地球化学, 2002, 30(1): 71-77.

[17] 易顺民,唐辉明. 活动断裂的分形结构特征 [J]. 地球科学, 1995, 20(1): 58-62.

[18] 张拴宏,周显强. 断裂系统分形研究新进展 [J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(1): 84-88.

[19] 陈国能. 广州地区主要断裂活动性研究和区域稳定性评价 [R]. 广州:中山大学地球科学系, 2009.

[20] 陈国能. 佛山主要断裂活动性研究与区域稳定性评价 [R]. 广州:中山大学地球科学系, 2011.

[21] 张虎男,陈伟光,黄坤荣,等. 华南沿海新构造运动与地质环境 [M]. 北京:地质出版社, 1990: 1-295.

[22] 魏柏林. 广东省地震构造概论 [M]. 北京:地震出版社, 2000: 1-226.

[23] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1988: 721-795.

[24] 张虎男,吴玺虹. 华南沿海主要活动断裂带的比较构造研究 [J]. 地震地质, 1994, 16(1): 43-52.

[25] 卢春生. 断面分形研究中的几个问题 [J]. 力学进展, 1996, 26(3): 353-361.

[26] 孔凡臣,丁国瑜. 线性构造分数维值的含义 [J]. 地震, 1991(5): 33-37.

[27] KANAMORI H, ANDERSON D L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1073-1095.

[28] AKI K. A probabilistic synthesis of precursory phenomena [C] // Earthquake Prediction: An international review. SIMPSON D W, et al, eds. Washington D C: AGU, 1988: 566-574.