

基于 SOC 的活断层系与地震活动性关系的探讨*

高召宁^{1,2}, 姚令侃², 杨庆华², 齐 颖²

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 西南交通大学 土木
工程学院道路与铁道工程系, 成都 610031)

摘要:通过对中国大陆及青藏高原、新疆、华北和东北各构造区的地震活动性的分析, 论证了区域地震活动是一种自组织临界现象。利用分形理论中的粗视化网格法, 研究了中国大陆以及各构造区断层系的分形特点和分形结构的跨尺度特征。开展了组构具有分形特点的沙堆模型实验。结合断裂力学理论, 认为地震的自组织临界现象源于分形几何断层系的自组织临界性动力学过程, 地震分维数和断层系分维数之间存在着一种正相关关系, 明确了断层系分形和地震活动性分形之间的因果关系。在此基础上, 提出了系统组构的分形是系统输出能量的分形的根源的观点, 并进一步利用已有的观测资料进行了分析。最后, 基于这个观点和区域断层分布可以通过常规的航卫片分析、地面调查和地质勘探等手段确定的事实, 提出了利用断层的分维数与地震的分维数的相关关系, 对区域地震的概率分布特征进行估计的观点, 可为地震的预测预报提供参考。

关键词: 断层系; 特征地震; 分形; 沙堆模型; 自组织临界性

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)02-0119-06

0 前言

Bak 和 Tang (1989) 首先将自组织临界性 (Self-organized Criticality, 简称 SOC) 概念引用到地震学中, 运用 SOC 模型第一次对 Gutenberg-Richter (G-R) 定律的物理意义作出了清晰的理论说明, 它指出从 SOC 模型和 G-R 定律的角度看, 地震可以看成是一种特殊的 $1/f$ 噪声。安镇文 (1995) 研究了华北地区、唐山、海城和北部湾地区的地震活动性, 发现在时间、空间和能量分布上, 地震活动整体行为都具有幂律特征, 从实践上论证了地震活动是一种自组织临界现象。目前, 国内外的研究工作主要集中于论证地震是一种 SOC 现象, 而对产生这种现象的系统组构特征未进行研究。本文在对中国大陆构造区内地震的 SOC 现象分析的基础上, 着重研究中国大陆构造区内断层系的分形特征。为了进一步揭示断层系分形结构的跨尺度特征, 我们在邓起东等 (1994) 的研究的基础上, 选择青藏高原、新疆、华北和东北各构造区为研究区, 开展分形沙堆模型实验, 探讨地震活动分形与断层分形的关系。本文所涉及的断层系为第四纪晚期的断层。

1 地震活动性的自组织临界现象

自组织临界性是指一个开放的耗散系统由于组成系统的各个组元之间的相互作用, 而自然地无需由外部加以调整地从随机状态演化到一种有组织的临界状态。在这个状态下, 由外部流入系统的能量, 按系统组元的内在规律相互作用 (即自组织) 而被系统吸收和耗散掉, 系统能量的平均值在某一个临界值附近呈非周期变化。负幂律分布是自组织临界性的证据 (苏凤环等, 2006)。以下通过分析地震资料来寻找这类观测证据。

对公元前 200 年至公元 1969 年中国大陆及各构造区内的地震分别统计 (顾功叙等, 1983), 其样本量分别为: 中国大陆 2 709、青藏高原 1 262、华北 757、新疆 489、东北 152。以震级 M 和频度 $N(M)$ 的对数为横、纵坐标, 把统计结果绘于图 1 的坐标系中。根据最小二乘法对图 1 中各散点进行线性拟合, 得中国大陆及各构造区的 b 值 (表 1)。

图 1 中横坐标 M 是地震所释放出来的能量的对数而不是能量本身, 所以中国大陆及各构造区的地震在标度 $M = 4 \sim 8.5$ 间存在着很好的线性关系, 具有统计上的自相似性, 这表明在较长时间

* 收稿日期: 2007-11-08.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2008CB425802) 和国家自然科学基金 (50478085) 联合资助.

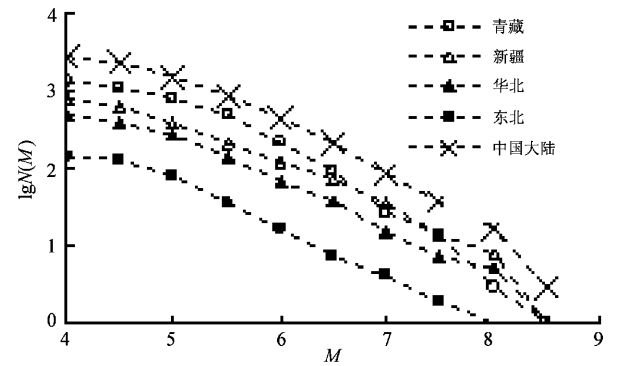


图 1 M 和 $N(M)$ 的关系曲线图

Fig. 1 Relationship between fractal M and $N(M)$

表 1 中国大陆地震分维数

项目名称	中国大陆	青藏高原	新疆	华北	东北
b 值	0.639 6	0.709 5	0.591 2	0.586 2	0.575 7
相关系数 R^2	0.958 4	0.954 9	0.947 1	0.973 4	0.987 6

段内大于某一震级的地震数目与能量之间存在着负幂律关系。负幂律分布是 SOC 的证据,因此,中国大陆及各构造区的地震活动具有 SOC 现象。

2 断层系分形特征的研究

地震的发生和发展不仅受应力场控制,还受介质性质影响。在一个区域内分布着各种尺度的断层,这些断层形成错综复杂的断层系统(王博等,2008)。为了探讨断层系的活动对地震的响应,我们在分析中国大陆及各构造区地震的 SOC 现象的基础上,运用分形理论对产生地震的断层系进行深入研究。断层系资料来自于国家地震局地质研究所和地震研究所(1980)。

由于中国大陆及各区的断层特别复杂,为了使求得的分维可靠性高,我们采用粗视化网格法(图 2)。相对于长度-频度统计法,用该方法求出的分维数较小,但可靠性较大,统计关系的线性较好;相对于圆覆盖法,该方法不但适合于对一条主干断层或少量的分支分叉断层作统计,尤其适合于对区域内的多条断层系的统计(丁国瑜,1993;陈运平等,2002)。具体处理过程是:用边长为 $r_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的正方形网格覆盖被测断层系,当网格长度变化时,则覆盖有被测断层系的网格总数 $N(r_i)(i=1,2,\cdots,n)$ 必然会出现相应变化,以 r_i 和 $N(r_i)$ 分别为横、纵坐标轴,将

$(r_i,N(r_i))$ 点绘制在双对数坐标中,用最小二乘法可拟合出一条直线:

$$\lg N(r_i) = A - D \lg(r_i).$$
 (1)

式中, D 为断层系的分维数,它是直线斜率值,反映了断层系结构的复杂程度, A 为拟合常数。

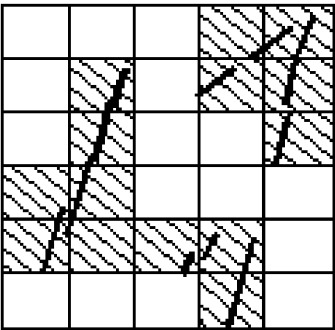


图 2 粗视化网格法

Fig. 2 Macroscopic grid method

运用上述资料和方法,我们分别计算了中国大陆和各构造区断层系几何结构的分维数。图 3 为中国大陆及各构造区断层系的粗视化网格法统计结果双对数坐标关系曲线图。

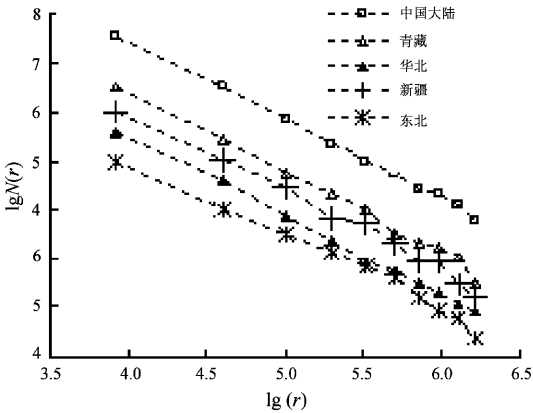


图 3 r_i 和 $N(r_i)$ 关系曲线图

Fig. 3 Relationship between fractal r_i and $N(r_i)$

依据式(1)对图 3 中各散点进行线性回归,得到中国大陆及各构造区断层系的分维数 D (表 2)。

表 2 中国大陆断层系分维数

项目名称	中国大陆	青藏高原	新疆	华北	东北
分维数 D	1.591 9	1.666 1	1.611 3	1.611 0	1.497 4
相关系数 R^2	0.996 6	0.991 0	0.986 3	0.998 2	0.984 6

从图3不难看出,在标度 $r_i = 50 \sim 500 \text{ km}$ 范围内,中国大陆和各构造区断层系的网格数目 $N(r_i)$ 的对数与网格尺寸 r_i 的对数这两组数据存在很好的线性关系,说明在中国大陆及各构造区,形成地震的断层系具有自相似的层次性。对比中国卫星影像地震构造判读图(国家地震局地质研究所,1980)中的断层系分布和表2可以看出,分维数的差异是由构造的分布特点、活动性以及发育程度的差异造成的。分维数的大小表征了区域断层系分布的复杂程度,即分维数愈大,相应区域的断层分布愈密集、结构愈复杂、构造活动性愈强、构造发育。反之,分维数愈小,相应区域的断层分布愈简单、构造活动性愈弱、构造发育处于成熟阶段。因此,断层系分维数可以作为各构造区复杂程度的量化标准。

3 基于 SOC 的地震分维与断层系分维的关系探讨

3.1 具有分形特征的沙堆模型实验

国外开展的形形色色的沙堆模型实验(Bak *et al*, 1989; Held *et al*, 1990),模拟了地震现象,并很好地解释了地震中的G-R现象,但是对于系统的组构特征对SOC现象影响的研究还是空白,因此,也就不能正确回答地震的分形分布与断层系分形结构的关系。为此我们设计了一种组构特征类似于断层系分形结构的沙堆模型实验(高召宁等,2007),用于研究地震分形与断层系分形的关系。

3.1.1 实验方法

我们在长 \times 宽 \times 高 $=0.7 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的矩形沙箱中用干燥沙石建造实验模型(图4)。在沙箱上部安装一个与沙箱同宽的传送带作为坡顶加沙装置,加沙位置靠近坡顶,以减少加沙带来的动力冲击。缓慢而均匀地添加与坡体相同的沙石扰动,收集坍塌到平台上的沙粒并称重,最后统计坍塌重量。实验中采用的沙石级配如表3所示。

3.1.2 实验结论

$I_1 \sim I_4$ 组(I_1 : $0.5 \sim 1.0$; I_2 : 3.0 ; I_3 : $2.5 \sim 5.0$; I_4 : $5.0 \sim 10.0$)沙石粒径均匀,实验现象为准周期分布;IX \sim XII组的沙石粒径不均匀且不具有分形结构,落沙量服从正态分布;I \sim

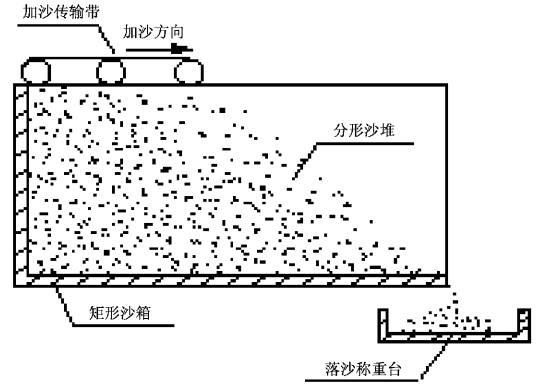


图4 沙堆实验示意图

Fig. 4 Sketch of the sand-pile model experiment

VIII组的沙石粒径分维为 $2.16 \sim 2.71$,实验现象具有SOC现象。

若令 x 为每次实验的落沙量(单位:kg), $N(x)$ 为落沙量大于 x 的落沙数目,对I \sim VIII组实验的落沙量分别统计,得 x 与 $N(x)$ 之间的关系:

$$\ln N(x) = a - b \ln x. \quad (2)$$

式中, $a = 2.10 \sim 4.94$, $b = 0.39 \sim 1.46$ 。

幂律是SOC的证据,从而证明了这类系统具有自组织临界性。因此,我们认为系统内部组构的分形特征是系统以分形形式输出能量的根源(高召宁等,2007)。

3.2 地震分维与断层系分维的关系探讨

沙堆系统的SOC现象的发生受沙堆系统内部组构的控制。基于沙堆模型实验的结论,我们提出了系统组构的分形特征是系统以分形形式输出能量的根源的假说。由于地震断层的分形结构可以看成是沙堆系统中沙石粒径的分形结构,而且一个活动构造区的地震频度—能量大小的分布与沙堆自组织临界性联系在一起,因此,我们可以把沙堆模型引入到地震研究中,这些都表明地震系统的组构特征即断层系的分形分布在确定该地区性状时起着重大作用。

由上述分析可知,中国大陆构造区的断层系具有式(1)的分形特征。本文中我们把 r 看成是Griffth裂纹半长,则由式(1)可得断层尺寸的密度函数:

$$f(r) = (D/r_0)(r/r_0)^{-(1+D)}. \quad (3)$$

其中 r_0 为裂纹核的尺寸。

表 3 实验沙粒级配表
Tab. 3 Particle size distribution of sand-pile

	粒径/mm															分维数	相关系数 R^2 (检验水平 $\alpha=0.05$)
	0.4	0.6	0.9	1.25	2	2.5	3	4	5	7	10	15	20	30	40		
I	2	4	6	10	30	44	56	72	80	85	89	93	95	98	100	2.16	0.892 0
II	4	8	16	23	37	46	52	62	70	80	85	91	94	97	100	2.37	0.907 8
III	7.7	15.4	23.1	30.8	38.5	46.2	53.9	61.6	69.3	77	85	90	93	96	100	2.50	0.928 7
IV	11	20	27	34	43	48	52	58	66	75	84	89	92	96	100	2.57	0.946 0
V	11	22	30	35	44	49	51	60	65	71	79	90	96	99	100	2.58	0.944 9
VI	11	22	31	39	46	48	51	55	60	66	73	81	88	97	100	2.61	0.935 9
VII	11	23	32	40	46	48	52	55	58	64	70	78	85	96	100	2.61	0.923 6
VIII	23	27	29.2	31	36.4	39.8	43.6	49.6	54	60	67	74.9	79.5	86	100	2.68	0.992 8
IX	10	25	27.6	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	33.7	60.2	80.5	86	100	2.63	0.793 1
X	10	25	28.6	30	30	30	30	30	30	30	37	53	74	84.6	100	2.64	0.804 5
XI	10	25	30.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	41.3	51.4	71	78.9	100	2.66	0.806 8
XII	10	25	31	34	34	34	34	34	34	34	35.2	44.1	65.7	75.8	100	2.68	0.758 9

地壳浅部岩层的断裂属于脆性破裂，而断裂力学作为研究脆性材料断裂的有力工具，应用于震源物理研究中就是一个很自然的事实。断裂力学的一个关键假设是 G 超过临界应变能释放率 G_c 时裂缝将开始扩展（ G 是给定几何和加载条件下对断层端部能量场的一个量度）。

由地震学可知，地壳在变形过程中分配在每一个断层上的滑移速度会不断地改变断层的状态，在断层的端部产生应力集中，考虑断层之间的相互作用，则断层扩展时的应变能释放率 G 应为（任光耀，王光瑞，1994）

$$G = \frac{[(1 + \alpha)\sigma\sqrt{\pi}]^2}{E} r. \tag{4}$$

式中 r 是断层的半长， α 是一个无量纲的断层相互作用系数，现有的地震模型研究表明， α 是介于 0 ~ 0.25 之间的正数（李炜，2001），在我们所讨论的问题中，认为它是一个常数，则由式（3）和（4）可得

$$F(G) = 1 - \left[\frac{E}{(1 - \alpha)^2 \sigma^2 \pi r_0} G \right]^{-D}. \tag{5}$$

由式（5）可以看出，断层在失稳时应变能释放率的分布函数具有分形特征。因此可以认为，区域内断层系的分形分布，在确定该地区地震性态时起着重大作用。观测事实也支持这一说法。我国的郯庐断裂和海原断裂上均存在特征地震

现象（沈军，汪一鹏，1999）；美国加州圣安德烈斯 Parfield 附近有一处断层，分别于 1881、1901、1924、1934 和 1966 年发生过错动，每次均产生 5.5 级左右的地震。但在这些断层上没有发现地震分形分布的证据。

从我们得出的结论来看，由于地震的分形分布源于断层系的分形分布，使得地震活动分维 b 和断层系的分维 D 可能存在相关性。以 b 和 D 为纵、横坐标，将 (D, b) 点绘制在坐标系中。从图 5 可以看出，区域断层系的分维数 D 与该区域地震活动分维数 b 之间存在着正相关关系，即：区域断层系的分维 D 越大，那么该区域地震活动性 b 值越大，反之 D 越小， b 值边越小。

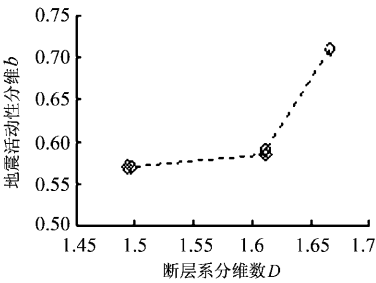


图 5 b 与 D 的关系曲线图
Fig. 5 Relationship between fractal b and D

基于以上分析，我们认为，地震的分形现象是分形几何断层系的自组织临界性动力学过程的产物。因此，在地震研究中，必须考虑地震发生和断层分布的关系，否则就难以对地震的活动性作出正确的判断。长期以来，地震界关于地震的

可预测性一直存在争议,事实上由于地震是一个小概率事件,要预测区域地震发生的概率分布在有限的时间段内是不可能的,然而断层却是客观存在的,可以通过常规的航卫片分析、地面调查和地质勘探等手段确定区域断层分布,然后利用断层的分维数 D 与地震活动分维数 b 的关系,来对地震的概率分布特征进行估计,从而为地震的预测预报提供参考。

4 结论

(1) 依据 G-R 定律计算了中国大陆以及各构造区的地震活动性的 b 值 (中国大陆: 0.639 6; 青藏高原: 0.709 5; 新疆: 0.591 2; 华北: 0.586 2; 东北: 0.575 7), 证明了中国大陆以及各构造区的地震活动在能量分布上, 当考虑其整体行为时都具有幂律特征, 据此得出了中国大陆以及各构造区的地震活动是一种自组织临界现象。

(2) 根据分形理论的粗视化网络法, 分析了中国大陆及青藏高原、新疆、华北和东北各构造区断层系的分形特点, 并计算了各构造区断层系的分维值 D (中国大陆: 1.591 9; 青藏高原: 1.666 1; 新疆: 1.611 3; 华北: 1.611 0; 东北: 1.497 4)。

(3) 开展了组构具有分形特点的沙堆模型实验, 并结合断裂力学理论, 得出了地震的自组织临界现象源于分形几何断层系的自组织临界性动力学过程, 以及地震活动分维数 b 和断层系分维数 D 之间的存在着正相关关系, 在此基础上, 提出了系统组构的分形是系统以分形形式输出能量的根源的假说。

参考文献:

- 安镇文. 1995. 地震孕育过程的物理学研究展望 [J]. 国际地震动态, (5): 12-15.
- 陈运平, 席道瑛, 樊星. 2002. 用分形理论研究海南岛的活动断裂 [J]. 地震研究, 25 (4): 351-355.
- 邓超东, 徐锡伟, 于贵华. 1994. 中国大陆活动断裂的分区特征及其成因 [C] //中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社: 1-15.
- 丁国瑜. 1993. 活断层分段——原则、方法及应用 [M]. 北京: 地震出版社.
- 高召宁, 姚令侃, 苏凤环, 等. 2007. 大尺度散体组构分维和 SOC 判据研究 [J]. 水土保持通报, 27 (1): 86-91.
- 顾功叙, 林庭煌, 时振梁, 等. 1983. 中国地震目录 (公元前 1831 年~公元 1969 年) [M]. 北京: 科学出版社.
- 国家地震局地质研究所, 国家地震局地震研究所. 1980. 中国卫星影像地震构造判读图 [M]. 北京: 中国地图出版社.
- 李炜. 2001. 演化中的标度行为和雪崩动力学 [D]. 武汉: 华中师范大学.
- 任光耀, 王光瑞. 1994. 前震预报与蠕变破裂的多体相互作用 [J]. 中国地震, 10 (3): 270-276.
- 沈军, 汪一鹏. 1999. 用断裂滑动速率估计小江断裂带的地震危险性 [J]. 地震研究, 22 (3): 251-259.
- 苏凤环, 姚令侃, 高召宁. 2006. 分形元胞自动机在自组织临界性中的应用 [J]. 西南交通大学学报, 41 (6): 675-679.
- 特科特 D L 著. 1993. 分形与混沌——在地质学和地球物理学中的运用 [M]. 陈颢, 郑捷, 季颖 译. 北京: 地震出版社.
- 王博, 刘耀炜, 孙小龙. 2008. 地下流体与断裂活动关系的研究综述 [J]. 地震研究, 31 (3): 296-302.
- Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. 1987. Self-organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise [J]. Physical Review Letters, 59 (4): 381-384.
- Bak P, Tang C. 1989. Earthquakes as a Self-organized Critical Phenomenon [J]. JGR, 94 (B11): 15635-15637.
- Held G A, Solina II D H, Keane D T, et al. 1990. Experimental Study of Criticality Mass Fluctuation in an Evolving Sandpile [J]. Physical Review Letters, 65 (9): 1120-1123.

Study on the Relationship between Active Faults and Seismicity Based on the SOC Theory

GAO Zhao-ning^{1,2}, YAO Ling-kan², YANG Qing-hua², QI Ying²

(1. School of Mining and Safety Anhui University of Science & Technology, huainan 232001, Anhui, China)

(2. Civil Engineering College of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract

By analyzing the earthquake activities in the tectonic regions of the Chinese mainland, Qinghai Tibet plateau, Xinjiang, north China, and northeast China, it was demonstrated that the regional earthquake is a kind of SOC phenomena. The fractal characteristics and trans-scale features of fractal structural of faults in Chinese mainland and tectonic regions were researched comprehensively with the macroscopic grid method in fractal theory. According to the experiments result of sand pile model with fractal features and the fracture mechanics, it was suggested that the SOC phenomena of earthquake is associated with the SOC dynamic process of fractal geometry faults. There is a positive correlation between the fractal dimension of faults and earthquake. The causal relation between faults fractal and earthquake fractal was clarified. Base on the preceding conclusions, a hypothesis was proposed that the system output energy fractal is based on the fractal structure of system. Further analysis was carried on with existing observation data. Finally, based on this hypothesis, and also the fact that the region faults distribution can be determined by aerial and satellite shot, ground survey and geologic exploration, it was proposed that the probability distribution of regional earthquake can be estimate with the positive correlation of the fractal dimension between faults and earthquake. The results can be helpful for earthquake prediction.

Key words: faults; characteristic earthquake; fractal; sand pile model; SOC