

中国大陆山系、断层系与水系的空间维数及其关系

朱晓华^{1,2}, 蔡运龙^{1,2}, 王建³

(1. 北京大学资源环境地理学系, 北京 100871; 2. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

3. 南京师范大学地理系, 江苏 南京 210097)

摘 要:根据分形理论,应用网格法系统地探讨了中国大陆山系、断层系与水系的空间分形结构,并计算出中国大陆以及三大自然区山系、断层系与水系的空间维数,在此基础上还探讨了山系、断层系与水系空间维数在三大自然区的变化情况。得出的基本结论为:(1)中国大陆山系、断层系与水系的空间分形结构是客观存在的;(2)中国大陆山系的空间维数值为 1.1513,中国大陆断层系的空间维数值为 1.2507,中国大陆水系的空间维数值为 1.4169;(3)在三大自然区中,山系、断层系空间维数值均以青藏高原区相对为最大,而以西北干旱区相对为最小,山系与断层系空间维数值的变化在空间上有着一致的对应关系,山系空间维数值较大,则断层系空间维数值亦较大,而水系空间维数值的大小依次为东部季风区水系、青藏高原区水系与西北干旱区水系;(4)中国大陆山系、断层系空间维数响应的关系为 $D_F = 0.6884D_M + 0.4446$ (式中: D_M 为山系的空间维数, D_F 为断层系的空间维数)。该式不仅为山系、断层系关系的定量研究提供了全新的手段,而且还为山系、断层系内在密切关系的证实提供了全新的分形理论的证据;(5)整个中国大陆山系、断层系与水系的空间维数值并不等于三大自然区相应要素空间维数值的简单加和平均值;(6)进行山系等地貌现象的分形研究,应遵循相同的分维计算方法,否则将失去进行分维数横纵向比较的意义。

关键词:分形;空间维数;山系、断层系、水系;中国大陆

中图分类号:P343.1

文献标识码:A

分形理论产生之后,已在许多领域里取得了较为广泛的应用,这一点对于进行地貌学研究来说也莫不如此。对于地貌现象的分形研究,一些学者在此方面已经进行了一定程度的工作^[1~4],但是总体而言,对于地貌现象的分形研究还不够深入,还缺乏对山系、断层系、水系分形结构的系统研究以及对它们空间维数的计算及其关系等的探讨,本文则是以中国大陆为例,在此方面进行了初步探索,以期对深化地貌学非线性研究有所裨益。

1 研究方法 with 资料来源

1.1 研究方法

文中应用分形研究中常常采用的网格法(Box

counting method)^[5]来进行中国大陆山系、断层系与水系空间分形结构的探讨和各自空间维数的计算。网格法的具体操作过程是使用不同长度的正方形网格去覆盖被测对象,当正方形网格长度 ϵ 出现变化时,则覆盖有被测对象的网格数目 $N(\epsilon)$ 也必然会出现相应地变化,根据分形理论有(1)式成立

$$N(\epsilon) \propto \epsilon^{-D} \quad (1)$$

当正方形网格长度为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_k$ 时,则覆盖有被测对象的正方形网格数目相应为 $N(\epsilon_1), N(\epsilon_2), N(\epsilon_3), \dots, N(\epsilon_k)$,两边同取双对数可得

$$\lg N(\epsilon) = -D \lg \epsilon + A \quad (2)$$

式中 A 为待定常数, D 为被测对象的空间维数,其值等于该式斜率值的绝对值。

另外,文中对于中国山系、断层系与水系图形的

收稿日期(Received date):2002-11-18;改回日期(Accepted):2003-03-18。

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金项目(40171004)。[Supported by the Natural Science Foundation of China(40171004).]

作者简介(Biography):朱晓华(1972-),男,安徽郎溪人,北京大学博士后,主要从事分形地学综合研究,已在核心期刊发表论 52 篇。
[ZHU Xiao-hua(1972-), male, a native of Anhui Province, Post-doctor of Peking University. His research interest includes fractal application in geography. E-mail: zhxh973@263.net.]

处理和对有关数据的提取与分析,都是借助于 GIS、Excel 等软件来完成的,这样既提高了工作效率也提高了研究精度。具体的技术路线如图 1 中所示。

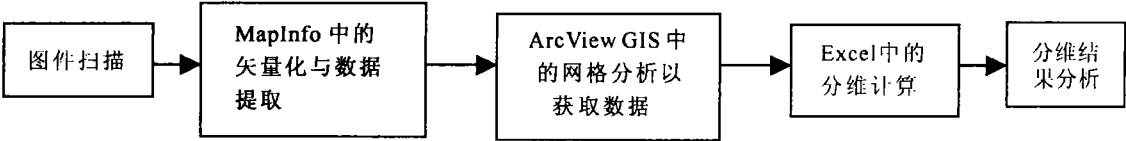


图 1 技术流程图
Fig. 1 Sketch map of technological flow

1.2 数据来源

文中使用的中国山系、断层系、水系数据分别来自于《中国主要活动断裂带卫星图像集》^[6]、《陆地卫星影像中国地学分析图集》^[7]。图 2 为中国山系、水系分布略图,图 3 为中国断层系分布略图。

为了深入研究以发现问题,文中还根据中国自然地理环境所具有的明显区域差异性,将中国大陆划分为三大自然区来进行探讨,即划分为东部季风区、西北干旱区与青藏高原区。根据传统的划分,东部季风区与西北干旱区之间以燥度 1.5 等值线作为分界线;青藏高原区则以 3 000 m 等高线与西北干旱区和东部季风区分界^[8]。

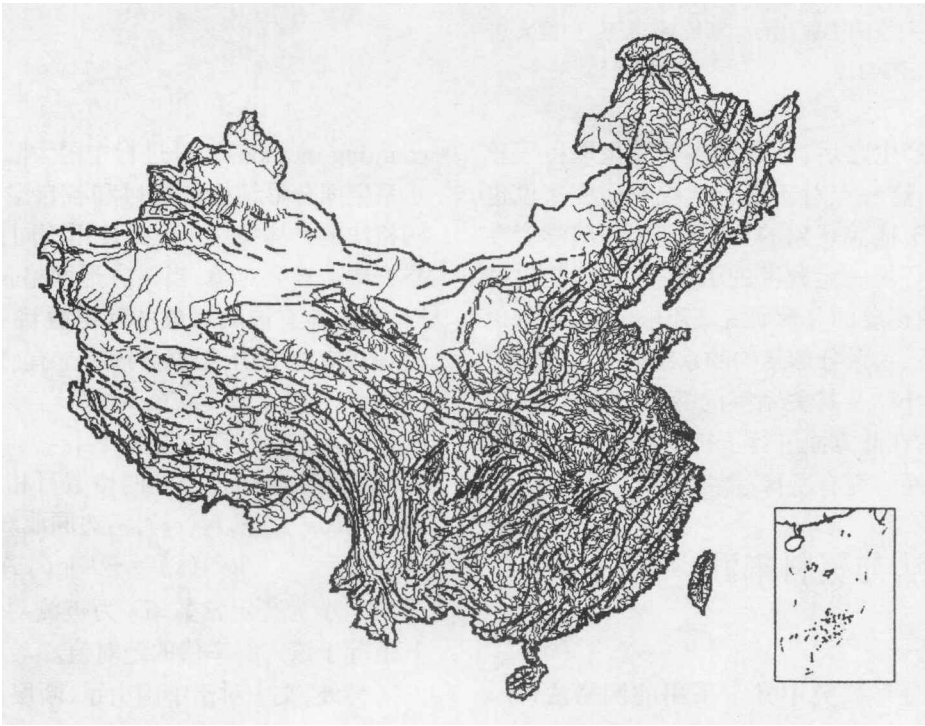


图 2 中国山系、水系略图
Fig. 2 Sketch map of mountains and river basins of China

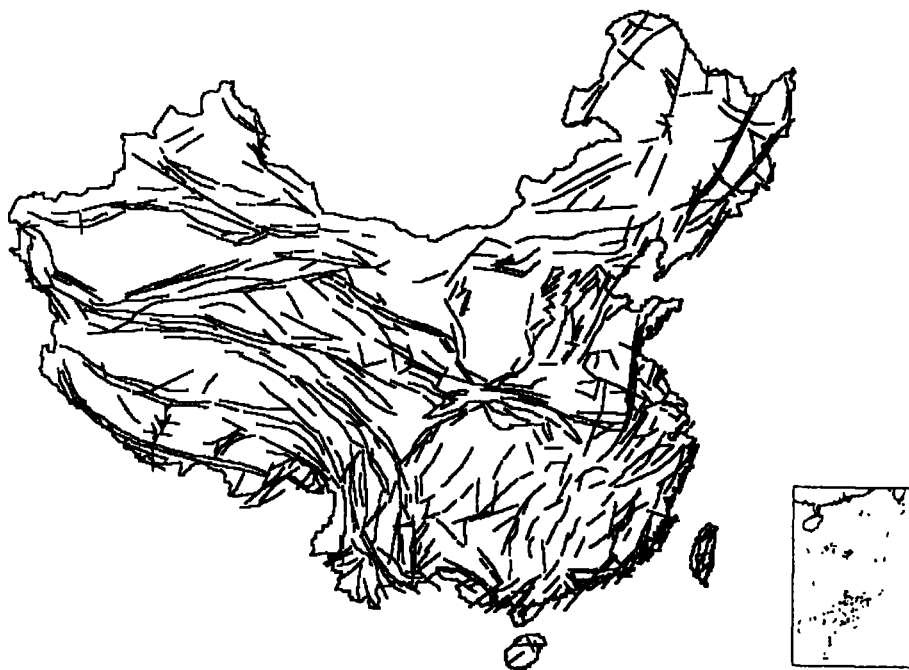


图3 中国断层系略图

Fig.3 Sketch map of faults of China

2 方法和结果

1. 根据网格法,文中计算出了中国大陆及其三大自然区山系、断层系与水系的空間維數。鉴于篇幅,文中仅给出了中国大陆山系应用网格法的计算图示,图4中散点为应用网格法计算中国大陆山系空間維數所得到的网格长度与网格数目的双对数散点,而图4中的直线则为对该图中散点进行线性回归分析所得到的直线。

根据图4,应用最小二乘法对图中散点进行线性回归分析可以得到

$$\lg N = 1.1513 \lg r + 8.4901 (R = 0.9928) \quad (3)$$

式中 r 为覆盖被测山系的正方形网格长度, N 则为相应地覆盖有被测山系的正方形网格数目, R 为相关系数。该式斜率值的绝对值即为中国山系的空間維數值。

采取与上述过程相同的方法,可计算得到中国大陆以及三大自然区山系、断层系与水系的空間維數值,具体见表1中所列。

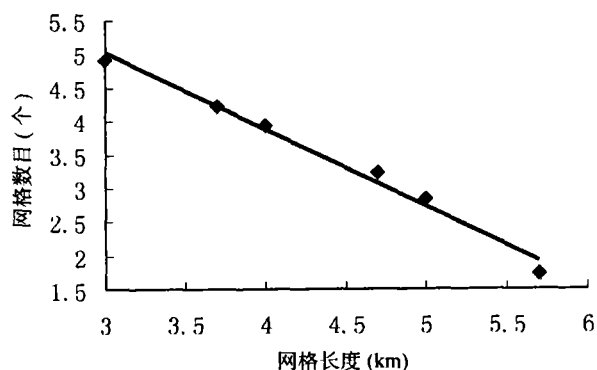


图4 中国大陆山系网格法计算图示

Fig.4 Plot showing of calculating based on the box-counting method for mountains of continental China

根据表1可见,表中中国大陆及其三大自然区的山系、断层系与水系的空間維數各值的相关系数均在0.99以上,可以通过 F 显著性检验,所以,中国大陆以及三大自然区山系、断层系、水系的空間统计分形结构是客观存在的,空間維數是表征各自不同标度下不变特征的良好参数。

表 1 中国大陆山系、断层系、水系空间维数

Table 1 Spatial self-similarity dimensions of mountains, faults and river basins of continental China

区域	山系		断层系		水系	
	空间维数	相关系数	空间维数	相关系数	空间维数	相关系数
中国大陆	1.1513	0.9928	1.2507	0.9922	1.4169	0.9931
东部季风区	1.1415	0.9945	1.2352	0.9930	1.4413	0.9934
西北干旱区	1.0186	0.9983	1.1455	0.9972	1.2459	0.9963
青藏高原区	1.1542	0.9929	1.2373	0.9940	1.3497	0.9933

2. 根据表 1,就山系空间维数的变化情况而言,中国大陆山系的空间维数值为 1.1513,而在中国三大自然区中,以青藏高原区山系的空间维数值相对最大,为 1.1542,而以西北干旱区山系的空间维数值相对最小,为 1.0186,前者与后者之间相差 0.1356;就断层系空间维数的变化情况而言,中国大陆断层系的空间维数值为 1.2507,而在中国三大自然区中,以青藏高原区断层系的空间维数值相对最大,为 1.2373,而以西北干旱区断层系的空间维数值相对最小,为 1.1455,前者与后者之间相差 0.0918;就水系空间维数的变化情况而言,中国大陆水系的空间维数值为 1.4169,而在中国三大自然区中,以东部季风区水系的空间维数值相对最大,为 1.4413,而以西北干旱区水系的空间维数值相对最小,为 1.2459,前者与后者之间相差 0.1954。就整个中国大陆山系、断层系与水系空间维数值的变化而言,以山系空间维数值为相对最小,而以水系空间维数值相对最大;在中国三大自然区中,山系、断层系空间维数值均以青藏高原区相对为最大,而以西北干旱区相对为最小;在中国三大自然区中,山系、断层系与水系的空间维数值均以西北干旱区相对为最小。

3. 中国大陆山系、断层系与水系是由东部季风区等三大自然区内相关要素所组成,那么它们的空间维数之间又存在有怎样的关系呢?文中对此问题进行了进一步的分析。从表 1 中可见,中国大陆山系空间维数值为 1.1513,是小于青藏高原区山系空间维数值的,对于中国大陆断层系与水系来说也莫不如此。表 2 为整个中国大陆山系、断层系与水系空间维数值与相应三大自然区山系、断层系与水系空间维数值均值的比较情况。

从表 2 可见,整个中国大陆山系的空间维数值为 1.1513,而三大自然区山系空间维数值均值则为 1.1047,二者之间并不相等,这一点对于断层系与水

系来说都是如此。所以,整个中国大陆山系、断层系与水系虽然都是由三大自然区内相应山系、断层系与水系组成,但是整个山系或是断层系或是水系的空间维数值并不等于三大自然区内相应要素空间维数值的简单加和平均值。

表 2 整个中国大陆山系、断层系、水系空间维数与三大自然区相应维值均值比较

Table 2 Comparison between the whole spatial dimensions of mountains, faults and river basins of continental China and the average values in three natural regions

区域	山系	断层系	水系
中国大陆	1.1513	1.2507	1.4169
三大自然区	1.1047	1.206	1.3456

4. 笔者曾经根据分形基本定义式,在建立中国大陆山系、断层系长度标度与数目之间关系的基础上(例如长度在 100 km 之上的山系数目为 251 条,长度在 100 km 之上的断层系数目为 441 条),计算出了中国大陆山系与断层系的分维值分别为 1.63 和 1.65^[9],此计算结果明显与本文的计算结果不同,所以,要进行山系等地貌现象的分形研究,应遵循相同的分维计算方法,否则将失去进行分维横向比较的意义。

3 讨 论

1. 在中国三大自然区中,山系、断层系空间维数值均以青藏高原区相对为最大,而以西北干旱区相对为最小,从山系、断层系空间维数值在三大自然区的变化中,可以发现山系、断层系空间维数值在空间上的变化有着一致的对应关系,即某区内山系空间维数值相对较大,则断层系空间维数值亦相对较大,反之亦反。所以,从山系、断层系空间维数值在

三大自然区一致的变化趋势中,就表明了山系与断层系在成因上有着内在的某种联系,即某区域内山系分布相对较为复杂、空间维数值相对较大,断层系分布亦相对较为复杂、空间维数值亦相对较大,反之亦反。另外,青藏高原区位于中国大陆西南隅,第四纪以来构造运动较其它区域更为强烈,故此该区内山系、断层系空间维数值也较其它两个区域相对为大。所以,山系、断层系的分维不仅可以从一个新的角度来表征各自的空间分布状况,并且还和区域间所受到的构造作用强度差异有着一定的内在关系。

既然山系、断层系都是构造活动的产物,且在中国三大自然区中有着一致的响应关系,所以,可以在山系空间维数与断层系空间维数之间建立一定的经验关系式。当然,表 1 中仅仅算出了三大自然区山系、断层系的空间维数值,还难以进行二者空间维数之间的线性回归分析,为此,文中还进一步计算出了三大自然区两两之间合并的相关空间维数值,具体结果见表 3 中所列。

表 3 中国三大自然区山系、断层系空间维数值
(据网格法,源图比例尺为 1:12 000 000)

Table 3 Spatial self-similarity dimensions of mountains, faults of continental China

区域	山系	断层系
东部季风区 + 西北干旱区	1.1256	1.2206
东部季风区 + 青藏高原区	1.1964	1.2679
西北干旱区 + 青藏高原区	1.1324	1.2214

图 5 为将表 1 与表 3 中的数据结合起来建立的中国三大自然区山系、断层系空间维数关系散点图,图中直线是应用最小二乘法对该图中散点进行线性回归分析所得到的直线。

对该图中散点进行线性回归分析后得到的经验关系式为

$$D_F = 0.6884 D_M + 0.4446$$

$$R = 0.9979 \quad (4)$$

式(4)中 D_M 为山系的空间维数, D_F 为断层系的空间维数 R 为相关系数。由(4)式可见,该式的相关系数为 0.9979,可以通过 F 显著性检验,即山系空间维数与断层系空间维数之间存在有很好的相关性,可以通过该式由区域山系、断层系的其中一者的空间维数而推知另外一者的空间维数。该式不仅为山系、断层系关系的定量化研究提供了全新的手段,

而且还为山系、断层系内在密切关系的证实提供了全新的分形理论的证据。

2. 在中国三大自然区中,东部季风区水系的空间维数值为 1.4413,其次依次为青藏高原区水系与西北干旱区水系,这与山系、断层系空间维数值在三大自然区的变化情况并不相同,因为水系空间维数在直接意义上就表征了水系空间分布复杂程度的差异,所以,从水系空间维数值在三大自然区的变化情况来看,表明了水系空间展布复杂程度的形成,与构造之间并没有很好的对应关系,或者是说构造对水系的影响并没有构造对山系、断层系所造成的影响那样地强烈,或者是说水系的形成往往会受到除构造之外的其它因素的重要影响。根据图 2,3,在三大自然区中(特别是青藏区),虽然许多水系的分布往往明显地受到了山系与断层系走向的影响,但是在东部季风区,不仅季风带来丰富的降水,而且有东北平原、华北平原、长江中下游平原等广大平原的分布,在降水相对充沛的条件下,再加之东部平原地区地层较为平展,岩性较为均一,土质较松,所以东部季风区水系也相对较为发育,所以东部季风区水系空间维数值也相对较其它两大自然区为大;而西北干旱区降水稀少,流水作用微弱,地表外营力以风的侵蚀、搬运和堆积作用占优势,所以河流并不发育,流域水系的维数值在三大自然区中也自然相对最小。

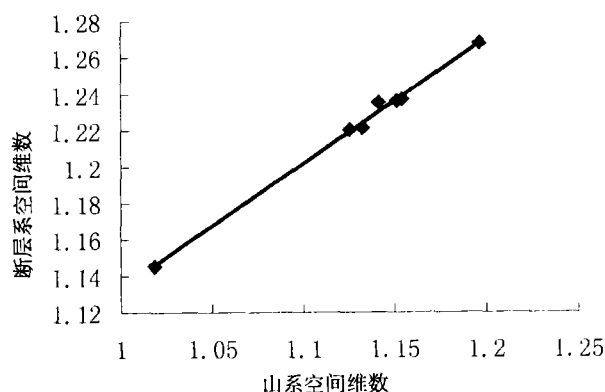


图 5 中国大陆山系、断层系空间维数关系示意图

Fig. 5 Plot showing of fractal dimensions between mountains and faults of continental China

3. 艾南山等曾经研究了东南沿海水系与新构造应力场之间的关系,研究结果表明水系的分布并不是杂乱无章的和随机的,而是与区域应力场的方向有着很好的对应关系,进一步而言,即水系的总体方向与区域构造的总体方向基本一致,这一点对于

西藏西部、东部来说也是如此的^[10]。通过图 2,3 可以发现,在青藏高原区,水系的总体走向是与山系、断层系的总体走向大体一致的,所以,该区水系必然是受到了构造的重要影响,但是青藏高原区水系空间分维值却较东部季风区为小。在东部季风区,虽然受到构造的影响较青藏高原区弱(东部季风区山系与断层系空间维数值均小于青藏高原区),但是该区有有利的地形条件(平原广布)和充足的水分条件(季风带来丰富的降水),这些条件的组合导致形成了该区复杂的水网空间结构,水系空间维数值也就相对较大。在青藏高原区,虽然其受到了构造相对较强烈的影响,但是该区水分条件有限,再加之高原地形的影响使得冰川、冰缘作用变的突出,这些条件的组合导致了该区水系空间结构相对较东部季风区简单,水系的空间维数值也就相对较小。而就青藏高原区与西北干旱区比较而言,前者水分条件又明显好于后者,水分与构造条件的组合导致青藏高原区水系空间分维值大于西北干旱区水系空间分维值。

4. 本研究的结论是,中国山系、断层系与水系的的空间结构具有客观的分形特征。结合系统自组织理论,既然分形是系统自组织的客观量度,那也就是说中国山系、断层系与水系的是一种自组织的结构。中国山系、断层系与水系分形结构和自组织结构的存在,表明在它们形成与发生、发展的过程中,自发地形成了一定的有序结构,这种过程的自发性和形成结构的有序性是不以人的意志为转移的,是客观存在的。沿着这个思路继续思考下去,下一个问题就无疑会是“究竟是什么因素导致了中国山系、断层系与水系分形与自组织结构的存在,有何重要意义?”,虽然这些问题就目前的研究水平而言还难以被系统揭示或是被完全回答,但是可以肯定的是,这些问题是客观存在的。可以相信,在此基础上,随着对地貌现象分形与自组织结构的深入研究,答案总有一天会浮出水面。

5. 本文虽然研究了中国大陆山系、断层系与水系的可能空间分形结构,并探讨了它们空间维数在空间上(三大自然区)的变化情况与对应关系,但是

相关研究仍是值得深入的。例如能否从分形的角度深入地探讨出构造对中国大陆山系、断层系与水系的具体影响模式?能否将通过对中国大陆山系、断层系与水系研究带来的思考引深到对世界其它区域相关地学要素的研究之中?空间维数是否可以衡量构造系统的自组织程度等等?

参考文献(References):

- [1] Xu T and Moore I D and Gallant J C. Fractals, fractal dimensions and landscapes——A review. *Geomorphology*, 1993, (8): 245 ~ 262.
- [2] Christopher C B and Paul R L. Fractals in earth science. New York: Plenum press, 1995, 1 ~ 265.
- [3] Turrctote D L. Fractals, chaos and self-organized criticality in geography. In: Proceedings of 1st international conference on geo-computation. 1996, 826 ~ 827.
- [4] Zhu X H and Yang X C et al. On spatial fractal character of coastline——A case study of Jiangsu province. *China Ocean Engineering*, 2000, 14(4): 533 ~ 540.
- [5] Grassberger P. On efficient box counting algorithms. *International Journal of Modern Physics C*, 1983, 4(3): 515 ~ 523.
- [6] Institute of Seismology of State Seismological Bureau. The Atlas of Landsat Imagery of Main Active Faults in China. Beijing: Science Press, 1989, 1 ~ 2. [国家地震局地震研究所. 中国主要活动断裂带卫星图像集[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 1 ~ 2.]
- [7] Department of Research and Development of National Remote Sensing Center, Institute of Remote sensing Application Academia Sinica. The Atlas of Geo-Science Analyses of Landsat Imagery in China. Beijing: Science Press, 1984, 184 ~ 187. [国家遥感中心研究发展部, 中国科学院遥感应用研究所编. 陆地卫星影像中国地学分析图集[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 184 ~ 187.]
- [8] Liu S J. China geography. Beijing: Higher education Press, 1996, p189. [刘盛佳. 中国地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 189.]
- [9] Zhu Xiaohua and Wang Jian. Fractal analysis applied to mountain ridges and faults——A case study of China. *Mountain Research*, 1998, 16(2): 94 ~ 98. [朱晓华, 王建. 山系的分维及山系与断层系的关系——以中国为例[J]. 山地学报, 1998, 16(2): 94 ~ 98.]
- [10] Ai Nan-shan, Liang Guo-zhao and Scheidegger A E. River basins and their tectonic stress field in Southeast China. *Journal of Geographical Science*, 1982, 37(2): 111 ~ 121. [艾南山, 梁国昭, Scheidegger A E. 东南沿海水系及新构造应力场[J]. 地理学报, 1982, 37(2): 111 ~ 121.]

Spatial Dimensions of Mountains, Faults and River Basins of Continental China

ZHU Xiao-hua^{1,2}, CAI Yun-long^{1,2}, and WANG Jian³

(1. *Department of Resource & Environment & Geography, Peking University, Beijing 100871 China;*

2. *Key Laboratory for Earth Surface Processes under the Ministry of Education, Beijing 100871 China;*

3. *Department of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097 China*)

Abstract: Mandelbrot enunciated the uncertainty of the length of a coastline in his paper "How long is the coastline of Britain?" published in "Science" in 1967. The fractal concept was presented for the first time in that paper and has been applied to many fields ever since. Although fractal dimensions of lots of phenomena were calculated, related studies on fractal character of mountains, faults and river basins of China continent are seldom seen. This issue is discussed in this paper. Some significant conclusions are drawn: (1) The fractal character objectively exists in mountains, faults and river basins of China continent. (2) The fractal dimensions of mountains and faults of China continent are 1.1513 and 1.2507 respectively by the box-counting method, that of river basins of China continent is 1.4169. (3) The change of fractal dimensions of mountains of China continent in three natural regions is accord with that of faults. (4) The relationship of fractal dimensions between mountains and faults of China continent may be expressed as $D_F = 0.6884D_M + 0.4446$ (Where D_M is the fractal dimension of mountains, D_F is the fractal dimension of faults), there is a good correlation between them. Thus, a new fractal proof may be offered to prove the internal relation between mountains and faults. (5) The fractal dimension of mountains of China continent is unequal to the average fractal dimension of all its parts, as well as faults and river basins of China continent. (6) The same fractal method should be adopted for comparison of geomorphologic phenomena.

Key words: fractal; spatial dimension; mountains; faults ; river basins; Continental China