

遥感数据的分形测量*

徐 青

(冶金工业部遥感技术应用中心 北京 100029)

潭光国

(冶金工业部天津地质研究院 天津 300061)

李翠华 穆丽云

(冶金部遥感技术应用中心 北京 100029)

摘 要 用分形几何学方法对遥感数据进行了分析,从而定量解释遥感影像。共编制了3种分数维测量方法,它们是分线方法(或等值线方法),方差方法和三角棱柱方法。用分线方法计算了腾冲地区陆地卫星TM数据的分数维。图像数据的等值线长度分别按行,按列和按行-列方法处理记取以便能发现图像的模式变化。当图像有明显的定向模式时,按行方法所测量的 D 值与按列方法测得的 D 值是不同的。按行-列方法测量的 D 值几乎不受定向模式的影响。当 R (相关系数) > 0.9 时,按3种方式记取等值线所得到的 D 值的变化趋势是一致的,都能给出图像数据中的空间相互关系。通过分维测量,不但能描述图像数据的整体特征而且能描述图像数据中的每个值的特征,揭示遥感数据表现的无序性和内在的规律性,更重要的是可把这些 D 值与地面物体之间建立联系来探讨各种自然现象中的有用信息。

关键词 遥感数据,分数维,分形测量;图像,分线方法,腾冲

1 引 言

分数维概念的起源可以追溯到本世纪初,分形理论是70年代初由Mandelbrot提出的^[1],它能揭示自然界规律中许多未被认识的东西,目前已被证实它在研究过去常以为无规律形体如地质体的内在规律方面行之有效,作为对欧几里德概念的一个补充,分形便于对自然边界和表面中复杂性作出更精确的表述。分形是由部分组成的形状以某种方式与整体相似。分维定量地测量物体的粗糙度。至今,推导出大量计算分数维的方法,并用它们去解决各种空间问题。然而,分形在遥感资料的分析上仅见有有限的报导^[2,3]。应当注意分形对空间和光谱都复杂的遥感图像的测量和分析的巨大潜力。遥感资料的分数维分析能定量洞悉包含在这些资料中的空间复杂性和信息量。这样,由不同传感器且以不同空间和光谱分辨率获得的遥感资料能根据分形的测量来比较和评价。由遥感资料导出的分数维也能与其它对空间复杂信息的测量结果(如:克里格法)相比较^[4],以便更好理解存在于图像数据中的空间相互关系的意义。

本文为了分析遥感资料,对已被成功应用于计算数字地形数据分数维的3种方法进行改进和计算机实现。这些方法是等值线或分线方法^[3,5],三角棱柱方法^[6]和方差图方法^[7]。根据这些方法,参考Jaggi的源程序^[4],在PC机上,用C语言和VB实现了这3种方法。在Window环境下,首先把图像数据读入并显示,可读入各种图像格式,如:PCX, BMP, TIFF, 陆地卫星数据可先转换为上述其中一种格式,把图像显示出来,选取要进行分形测量的图像区域,然后选取上述3种分形测量算法,进行分形计算。由于篇幅所限,本文仅介绍等值线方法或叫分线方法,其它2种方法将另文介绍。

2 分线方法

这种测量图像分数维的方法是 n -维的名为分线方法的外推^[3,5],分线方法的基本原理是用不同“步长尺寸”测量一条曲线的分数维。这里步长尺寸代表测量一条曲线所必须的线段。这样对一条不规则曲线,随着曲线的复杂性增加,用来测量曲线的步长大小就变得越来越小,即:要测量一条复杂曲线,就需

* 冶金部地质总局新技术推广项目基金,国家自然科学基金(编号:49572154)资助。

收稿日期:1997-08-18,收到修改稿日期:1997-10-23

要一个较小的步长尺寸。分数维的大小 D 为

$$D = \text{Log } N / \text{Log } r \quad (1)$$

$$N(G) = G^{-D}$$

式中 r 是相似比(或步长尺寸 G 的倒数), N 是用来测量曲线的步长数。这表明一个物体可以细分成 N 个部分, 其中的每一部分已从原形按系数 $G < 1$ 成比例缩小。公式(1)对自相似的物体是有效的, 意味着这种物体的结构是比例不变的, 物体的一部分放大后与原来的物体图像一样, 数学上的分形物体, 是利用刚性的和迭代规则推导的, 具有真实的比例不变的特性。自然物体如果有完全的自相似也很少见。自然界发现的许多形状仅仅是自相似的。物体的一小部分看起来相似, 但它决不是与物体的成比例的形体完全相同, 因而自然物体只是统计上的自相似。对(1)式变换得下式:

$$\log L = C + B \log G \quad (2)$$

$$D = 1 - B \quad (3)$$

式中, L 是曲线的长度, G 是步长尺寸, B 是回归的斜率, C 是常数^[3]。用来计算曲线长度的步长尺寸越大, 曲线的长度越小, 这导致曲线的斜率是一负值。对一条直线, 斜率总是零。对一条无限复杂的曲线, 斜率是-1。方程(3)限定了一条曲线的分数维在 1 与 2 之间。利用相似逻辑, 可以证明面的分数维在 2 与 3 之间。对遥感图像数据, 分线算法利用图像的等值线(即相同数值的等值线或等高线)作为测量的目标, 计算其分数维。这些数字化值可以代表通过遥感测量来自地面的光谱反射比, 这个面的维数是得到的线的分维数加 1, 就是

$$D = 2 - B \quad (4)$$

图像的等高线或等值线通过分割图像像元值区间成大量等空间间距生成, 事先设定间距或 Z 间隔, 并被用来定义每条 Z 间隔的边界或等值线。对每条等值线, 图像被分成两个区, 它们是位于等值线之上和之下的两个区。每条等值线的长度, 由边界线数表示, 然后, 以各种步长尺寸来测量每条等值线的长度。把边界线数的对数与步长的对数进行回归。回归的斜率 B 用来计算分数维。这样, 对每一条等值线, 可以获得分数维的唯一一个值。平均每条等值线的分数维可计算出整幅图像的分数维。分线法按行, 列或行-列 3 种方法计算图像的分数维。

3 分线方法按行处理计算分数维

图 1 表示按行计算图像等值线分数维方法的流

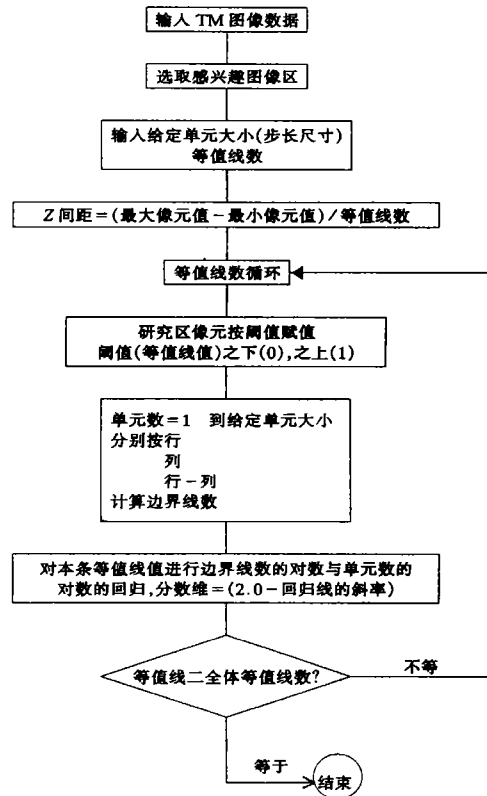
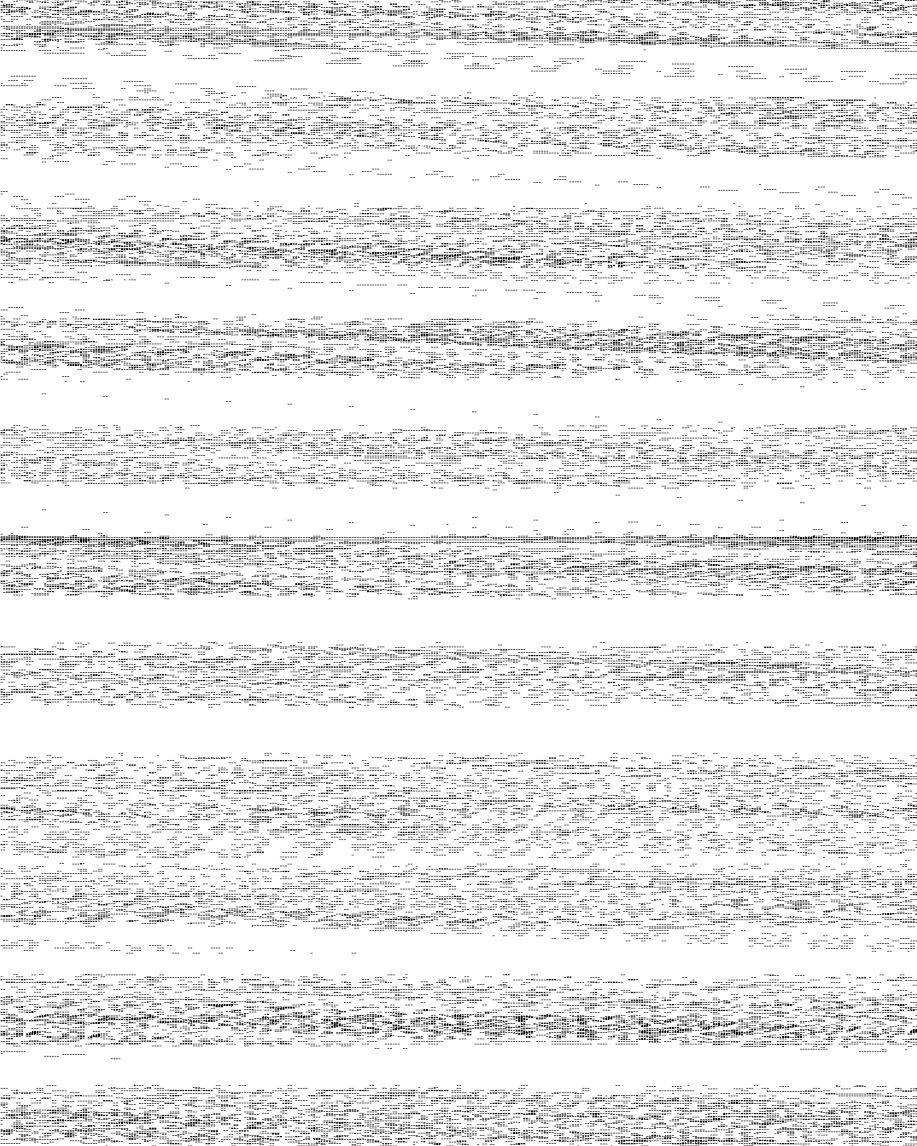


图 1 分线方法计算图像分数维流程图

Fig.1 Diagram of calculation of image fractal dimension by line-divider method.

程图。首先选取一块图像区进行处理。为了对比研究的方便, 本研究的资料为陆地卫星 1991 年 4 月 13 日获取的 TM7(Path / Row 132 / 43) 波段数据, 像元空间分辨率为 30m, 选取 300 行 × 300 列的研究区(图 2), 等值线间距用下式确定。Z 间距 = (最大像元值-最小像元值) / 等值线数。程序找出最大、最小像元值分别为 255, 6, 当等值线数为 10 时, 整个子区图像由 9 条等值线值所划分(排除为 0 的一条), 对应每一个等值线值就生成一幅等值线图。整个图像区以这个等值线值作阈值, 在阈值以下的像元都赋值为“0”, 等于或高于阈值的赋值为“1”。每条等值线的分数维通过利用阈值处理所形成的边界数目计算等值线的长度所决定。如果相临像元有不同值, 一条位于相临像元之间等值线的边界线或边界就能被检测出来。步长大小或单元(方格)数等于用来计算边界线数的像元分辨率的增量。单元数被预置成单位大小, 这表明在图像区中的每个像元都要计数边界线。依赖于分形计算处理方向的类型(即行, 列或两者)实现边界线的计算。对行处理, 图像从左上角开始按行方向切割。如果当前像元不等于同一行中的下一个像元, 那么就检测出一条边界线, 边界线



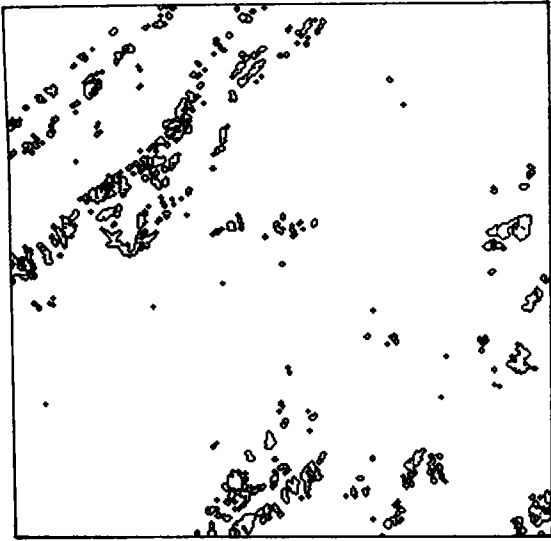


图4 阈值为30.9时的等值线分布
Fig.4. Contours at threshold value 30.9

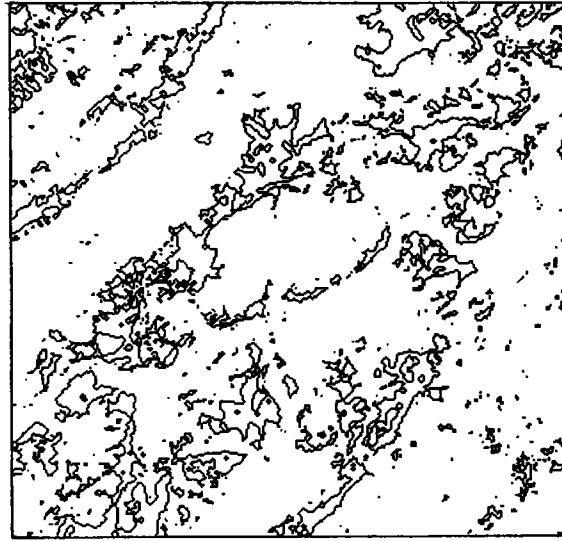


图5 阈值为130.5时的等值线分布
Fig.5 Contours at threshold value 130.5

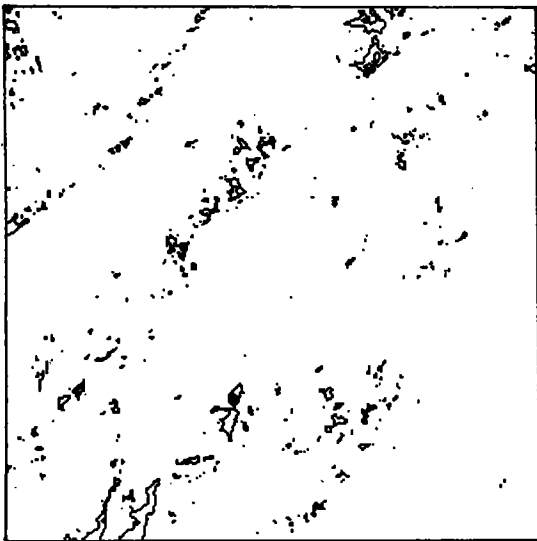


图6 阈值为180.3时的等值线分布
Fig.6 Contours at threshold value 180.3

数据从55.8到180之间具明显的自相似特征。

4 按列处理计算分数维

处理方法与按行处理方法类似,不再重复。得到的结果见图3及表1,除等值线值大于230时,得到的 D 值为3.033, R 小于0.594。其余 D 值都小于3。平均 $D = 2.813$, $R = 0.911$ 。单独按行和列方法,定向模式将影响 D 值。比较行和列方法,说明用行方法时,图像有明显的方向性,将在利用不同等值线值时测量影响 D 值。按列处理计算分数维,拟合程度 R 变好,在

研究区图像数据的低值区仍表现较好的自相似特征。在高值区与按行处理的结果是一致的。

5 按行-列处理计算分数维

按行-列方法测量 D 值,结果见图3和表1, D 平均为2.852, R 平均为0.866,在等值线值小于30和大于205时,拟合程度 R 变差。这再次说明自然界中的物体,不可能是完全自相似的。它一定有一个近似自相似存在的上限和下限。即在一特定的观测尺度范围内,自相似性才成立。按行-列处理测得的 D 和 R 都介于上述单独按行或按列处理得到的 D 和 R 之间,参见研究区的TM图像和阈值等值线图,它们都有较明显的方向性,从而影响了单独按行或按列测量的结果。

上述按行、列,和行-列方法测量计算出的分数维结果,还有一点值得注意:当等值线值小于30,大于205时, D 值变大接近3,并很快大于3, R 也同样快速变小。这一方面说明自然界物体的自相似性存在一定的观测尺度范围。同时也说明观察物体时,能把它看成几维是有赖于观测的尺度^[8]。Mandelbrot的例子(转引自文献[8])生动形象说明了这一点:首先来考虑一下把线揉成一个球,这个球从远处看上去是零维的(点),但到了近处就成了三维的(球),如再用放大镜看这个球,就成为一维的(线),如把球再进一步放大,看上去就像圆柱状的三维构造。从小于30和大于205的阈值等值线图来看,短

而孤立的曲线,用逐渐增大的步长尺寸去量,由于是短而孤立的曲线,检测出来的边界线少,边界线数小(也等价曲线长度小),导致曲线的斜率是一负值,按(4)式, D 值变大。

6 测量参数变化对 D 影响

为了检验 D 与测量尺度的关系,对同一幅图像分别取步长 50, 100, 取等值线条数为 10 和 15, 进行了计算比较。最大步长取 50(图 3)和 100(图 7, 表 2), 等值线取 10 条时, 测量结果 D 值和 R 变化规律是一致的。最大步长取 50, 分别给 10 条(图 3)和 15 条(图 8, 表 3)等值线时, D 与 R 的变化规律仍不变。

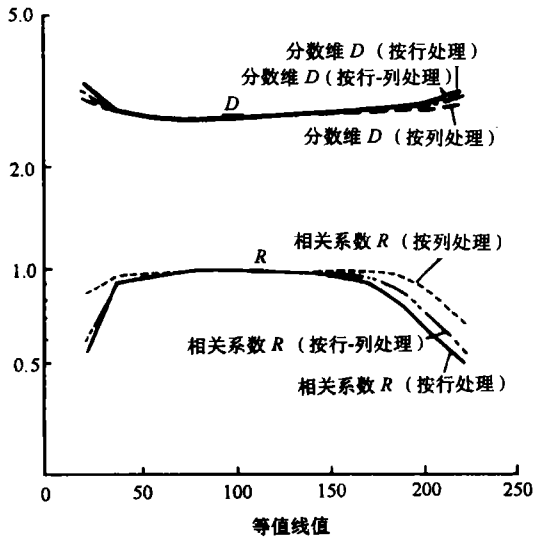


图 7 步长取 100, 等值线取 10 条时的分数维 D 与相关系数 R 图

Fig.7 Fractal dimension D and goodness-of-fit R at step size 100 and 10 contours

表 2 步长取 100, 等值线取 10 条时的分数维 D 与相关系数 R 数据表

Table 2 Data of fractal dimension D and goodness-of-fit R at step size 100 and 10 contours

等值线值	按行处理		按列处理		按行-列处理	
	D	R	D	R	D	R
30.9	2.993	0.787	2.972	0.916	2.974	0.852
55.8	2.838	0.936	2.836	0.952	2.836	0.949
80.7	2.803	0.962	2.802	0.965	2.802	0.968
105.6	2.842	0.956	2.843	0.96	2.841	0.963
130.5	2.886	0.945	2.888	0.956	2.885	0.957
155.4	2.938	0.901	2.935	0.944	2.933	0.93
180.3	2.938	0.804	2.909	0.934	2.918	0.868
205.2	2.977	0.599	2.866	0.795	2.921	0.663
230.1	3.347	0.42	3.03	0.56	3.241	0.435
平均值	2.951	0.812	2.898	0.887	2.928	0.843

等值线条数增多时,只是提供了更多等值线值下的 D 值,遇到的零边界单元的机率更大。

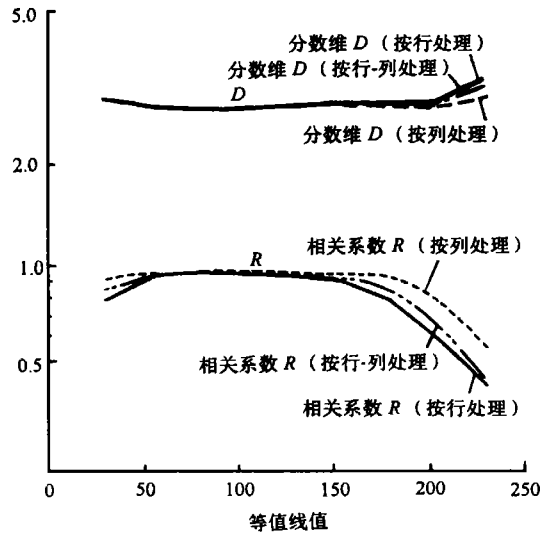


图 8 步长取 50, 等值线取 15 条时的分数维 D 与相关系数 R 图

Fig.8 Fractal dimension D and goodness-of-fit R at step size 50 and 15 contours

表 3 步长取 50, 等值线取 15 条时的分数维 D 与相关系数 R 数据表

Table 3 Data of fractal dimension D and goodness-of-fit R at step size 50 and 15 contours

等值线值	按行处理		按列处理		按行-列处理	
	D	R	D	R	D	R
22.6	3.32	0.545	3.059	0.844	3.209	0.603
39.2	2.858	0.915	2.847	0.961	2.851	0.945
55.8	2.731	0.949	2.723	0.963	2.727	0.96
72.4	2.69	0.972	2.683	0.981	2.686	0.979
89	2.682	0.98	2.677	0.984	2.679	0.985
105.6	2.705	0.973	2.701	0.976	2.703	0.977
122.2	2.734	0.968	2.73	0.973	2.731	0.974
138.8	2.762	0.96	2.757	0.971	2.759	0.97
155.4	2.812	0.934	2.803	0.969	2.806	0.959
172	2.85	0.888	2.831	0.969	2.837	0.94
188.6	2.884	0.761	2.831	0.938	2.851	0.851
205.2	2.954	0.61	2.832	0.835	2.888	0.693
221.8	3.164	0.5	2.926	0.689	3.059	0.543
平均值	2.857	0.843	2.8	0.927	2.83	0.875

7 小 结

遥感数据的分形测量有助于对遥感数据进行定量分析,确定重要的目视分析难以察觉的模式。这些数字化值的测量可以定量描述来自地面的光谱反射比,确定探测对象的空间分布规律。众所周知各种地物的光谱反射值是不同的,分数维的测量就可

以区分不同的地物,如在找与蚀变闪长岩有关的金矿时,由于蚀变闪长岩的光谱反射特征已知,就可以把与它相关的来自地面的图像数据的分数维测量出来,勾划出这些数据的空间分维分布规律,描述图像数据中的每个值的特征。本文的这一重要结论进一步说明如下:

当步长尺寸小时,由于等值线分布呈短而孤立的曲线,变化大,所量得的边界数就多(N 值大)。而当步长尺寸大时,也正由于等值线短而孤立,它跨过了一些边界线,而使获得的边界数减少(N 值小)。因而当边界数与步长尺寸进行回归时所得直线斜率变陡, D 值增大。所以这个 D 值正好反映了等值线的变化特征(也即是光谱变化特征),这个特征可以用来解释图像的空间变化规律。

参 考 文 献

- 1 Mandelbrot, B. B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, **156** (3775):636—638.
- 2 De Cola, L. fractal analysis of a classified Landsat scene. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, **55** (5): 601—610.
- 3 Lam, N. S-N. Description and measurement of Landsat TM images using fractals. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, **56** (2):187—195.
- 4 Jaggi, S., Quattroch, D. A., Lam, N. S-N. Implementation

and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote-sensing data. *Computers & Geosciences*, 1993, **19** (6):745—767.

- 5 Shelberg, M. C. Lam, N. S-N, Moellering, H. Measuring the fractal dimensions of empirical cartographic curves. Proc. Sixth International Symp. Computer-Assisted Cartography (Auto-Carto 6), Ottawa, Ontario, Canada, 1983, 319—328.
- 6 Clarke, K. C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers & Geosciences*, 1986, **12** (5):713—722.
- 7 Mark, D. M., Aronson, P. B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. *Jour. Math. Geology*, 1984, **16** (7):671—683.
- 8 高安秀树原著,沈步明,长子文译. 分数维. 1988, 地震地质出版社.

作 者 简 介

徐青,男,1959年9月生。1982年合肥工业大学地质工程系地质学专业毕业,1987年获成都地质学院(现改名为成都理工学院)构造地质学硕士学位,1990年获中国科学院地质研究所地热学博士学位,1990年—1992年在中南工业大学从事博士后科研工作,1993年至今在冶金部遥感技术应用中心从事遥感技术与地理信息系统应用研究,高级工程师,已发表论文30篇。

Fractal Measurement of Remote Sensing Data

Xu Qing

(*Applied Center of Remote Sensing Technology, Ministry of Metallurgical Industry, Beijing 100029*)

Tan Guangguo

(*Tianjin Geological Academy, Ministry of Metallurgical Industry, Tianjin 300061*)

Li Cuihua Mu Liyun

(*Applied Center of Remote Sensing Technology, Ministry of Metallurgical Industry Beijing 100029*)

Abstract Remote sensing data was analyzed by fractal geometry method to quantitatively explain remote sensing images. Three fractal dimension measurement methods, the line-divider (or contour) method, the variogram method and the triangular prism method, were programmed. The Landsat TM data of Tengchong area were used to compute the fractal dimensions by the line-divider method. That the contour length was computed by the row method, the column method and the row-column method can find oriented image patterns. When the patterns of images are obviously oriented, measured D values from the row method are different from the column method. Measured D values from the row-column method are hardly influenced by oriented patterns. When R (the coefficient of determination) > 0.9 , all D values from them can present the spatial interrelationships within image data. By fractal measurement, both the characteristics of the whole image data-base and each value of the image data-base can be described, the disorder in appearance and the rule in inherence in remote-sensing data can be brought to light, and it will be possible to relate D values to ground objects to explore useful information of various natural phenomena.

Key words Remote-sensing data, Fractal dimension, Fractal measurement, Image, Line-divider method, Tengchong