

文章编号: 1007 4619(2006) 04 0463 06

基于分形的海岸线遥感信息空间尺度研究

张华国^{1, 2, 3}, 黄韦良¹

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 260003 2. 国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012
3. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 空间尺度是地学研究的基础性问题, 遥感信息的空间尺度及其转换随着遥感应用发展而日益受到重视, 同时遥感与地理信息系统技术的发展也为空间尺度研究提供了有力的工具。本文以系列空间分辨率遥感图像为数据源, 采用分形几何方法研究海岸线遥感信息的空间尺度, 提出了基于分形尺度依赖性的遥感信息空间尺度转换模型和基于比例尺的遥感信息空间尺度转换模型, 并以海岸线为例验证了模型的有效性和实用性。

关键词: 遥感信息; 尺度依赖; 分形; 海岸线

中图分类号: TP79/P71 **文献标识码:** A

Study on Spatial Scale of Shoreline Remote Sensing Information Based on Fractal Theory

ZHANG Hua guo^{1, 2, 3}, HUANG Wei gen¹

(1. Ocean University of China, Shandong Qingdao 260003, China)

(2. Laboratory of Ocean Dynamic Processes & Satellite Oceanography, State Oceanic Administration, Zhejiang Hangzhou 310012, China)

(3. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Zhejiang Hangzhou 310012, China)

Abstract Spatial scale is one of the fundamental problems in geosciences. The spatial scale of remote sensing information and the spatial scale transformation have become the object of many scientific studies with the applications of remote sensing data. In this paper, the spatial scale of shoreline information extracted from satellite images with different resolutions has been studied based on fractal geometry. Two spatial scale transform models based on scale and fractal scale dependence have been developed. The models have been used to transfer shoreline spatial scale extracted from KONOS, IRS, SPOT and ETM+ images to 1:10000 and 1:50000 scales. The results have been compared with the map scale. It shows that the models work well.

Key words remote sensing information; scale dependence; fractal; shoreline

1 引 言

尺度问题是地学研究的基础问题, 尺度、比例尺、分辨率等都是地学中经常出现的有关尺度的概念。自 20 世纪 70 年代遥感应用技术的发展起, 遥感信息的空间尺度问题即成为尺度研究中的重要内容, 同时遥感和地理信息系统也成为空间尺度研究的有力工具^[1, 2]。在遥感信息空间尺度的研究中,

空间尺度通常指遥感图像的空间分辨率^[3, 4]。遥感信息空间尺度研究集中于回答三个方面的问题^[5]: 一是研究空间尺度在遥感信息处理和应用中的影响; 二是研究针对特定的应用如何选择一种合适的空间分辨率的遥感数据; 三是研究遥感信息空间尺度的变换和多尺度遥感信息协同应用。

遥感信息空间尺度效应是指遥感信息的空间尺度依赖性 (Scale dependence), 即遥感监测的结果依赖于所用遥感图像的空间分辨率, 也就是说采用不

收稿日期: 2005-06-30 修订日期: 2005-10-31

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项 (908-01-WY05); 国家海洋局科技计划项目: “中国万里海塘安全遥感监测技术示范研究”。

作者简介: 张华国 (1977—), 男, 副研究员, 2002 年毕业于国家海洋局第二海洋研究所, 获理学硕士学位, 现为中国海洋大学在读博士生。主要从事海洋海岸带遥感与 GIS 研究, 已发表论文 25 篇。E-mail: zhanghg@163.com。

同空间分辨率的遥感图像,对同一地物的监测结果是有差异的。例如,遥感监测得到的海岸线长度是与遥感图像的空间分辨率密切相关的,采用空间分辨率越高的遥感图像,得到的海岸线长度将越长。系列空间分辨率的遥感资料是进行遥感信息空间尺度研究的基础。粗视化高分辨率遥感图像是得到系列分辨率图像的基本方法^[6]。当前遥感数据十分丰富,空间分辨率覆盖了几十厘米到上千米的广大范围,为研究遥感信息尺度依赖性提供了数据条件。

遥感信息空间尺度效应研究的目的是寻找遥感信息与空间分辨率的关系,进而寻求空间尺度效应的应用。分形学方法可非常有效地描述地物现象随观测尺度变化的宏观结构动态变化^[7,8],已经被广泛应用于地图制图和空间分析等地理研究。分形方法通过分数维来描述地理空间信息的结构特点,并据此进行空间尺度转换^[9,10]。可见,分形几何方法能够很好地描述遥感信息的空间尺度特征,为建立尺度转换模型提供依据。

随着遥感技术应用日益广泛深入,在多源遥感信息综合应用和进行遥感信息精确测量中,都需要考虑遥感信息的空间尺度,只有在统一其空间尺度的情况下才能进行进一步的分析和应用,因此遥感信息空间尺度转换是遥感信息尺度效应的最直接应用。

本文选用 KONOS IRS SPOT 和 ETM+ 等多种遥感资料,采用分形几何学方法,研究海岸线对遥感信息空间尺度依赖性和遥感图像空间分辨率与海岸线长度的定量关系,建立并验证适用于多源遥感信息空间尺度转换和基于指定比例尺的遥感信息空间尺度转换的模型。

2 尺度依赖的分形模型

2.1 基本模型

Mandelbrot 发表在 1967 年《科学》杂志上的一篇题为“英国的海岸线有多长?”的论文^[11],对海岸线的本质作了独特的分析,震惊了学术界。正是这篇文章促使分形概念开始萌芽,并最终于 1975 年由 Mandelbrot 提出了分形这个全新的名词^[12],并形成了一门新兴的分形几何学。分形几何学提出了尺度变化下的不变量,即分形维数,由此为定量描述自然地理对象的特征属性与空间尺度之间的关系提供了理论依据。求解复杂曲线的分形维数的基本模型是:

$$L = KS^{1-D} \quad (1)$$

式中, L 为在观测尺度 S 下的曲线长度, K 为常数, D 为曲线的分形维数。对其两边取对数得到

$$\ln L = (1-D) \ln S + \ln K \quad (2)$$

(2) 式给出了描述曲线长度特征随观测尺度变化的规律,是一种对数函数关系。因此,针对遥感信息,只要符合分形几何体特征的线状信息,其长度与遥感的空间分辨率的关系也可以用 (2) 式进行描述。

现设线状遥感信息的分形维数为 D , 因为 D 是尺度变化的不变量,在不同空间分辨率情况下,根据 (1) 式可得到以下两式:

$$L_{S1} = KS_1^{1-D} \quad (3)$$

$$L_{S2} = KS_2^{1-D} \quad (4)$$

两式相除可得:

$$\frac{L_{S2}}{L_{S1}} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1-D} \quad (5)$$

因为通常分形曲线都满足 $D > 1$, 因此 (5) 式可转换为

$$\frac{L_{S2}}{L_{S1}} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{D-1} \quad (6)$$

该式可以用来定量地描述曲线的长度随空间分辨率变化的关系。据此, (6) 式作为遥感信息空间尺度转换模型,在多源遥感信息综合应用中,可以进行多源遥感信息的空间尺度同化,统一遥感信息的空间尺度。

2.2 基于比例尺的空间尺度转换模型

在实际的遥感监测调查应用中,通常涉及遥感信息的空间尺度问题者主要有三种情况: (1) 将遥感信息制作成指定比例尺的图件; (2) 需要将遥感信息与指定比例尺的地图信息进行比较分析; (3) 需要按特定比例尺统计遥感信息中的长度和面积等信息。为此,研究基于比例尺的遥感信息空间尺度转换模型显得尤为重要。

在地形图数字化过程中,分辨率通常为 0.3mm 的地图单位^[13],该值可以看作在进行数字化海岸线时采用的尺度就是 0.3mm 的地图距离,由此,可以估算出 1:10000 和 1:50000 地形图数字化中的空间尺度分别为 3.0m 和 15.0m。因此一般地,根据 (6) 式,可以得到以下的基于比例尺的遥感信息空间尺度转换模型:

$$\begin{cases} \frac{L_M}{L_R} = \left(\frac{S_R}{S_M} \right)^{D-1} \\ S_M = 0.3 \times M / 1000 \end{cases} \quad (7)$$

式中, L_M 是转换后对应比例尺的地理曲线的长度, L_R 是原始的遥感信息的曲线的长度。 S_R 为遥感图像的空间分辨率, M 为目标地图的比例尺的分母。该模型体现了地理曲线长度与遥感图像空间分辨率和目标图件比例尺之间的定量关系, 可以用于基于比例尺的遥感信息空间尺度转换。

3 多分辨率遥感信息空间尺度转换

3.1 多分辨率遥感信息提取

为研究遥感信息的空间尺度特征, 本研究选取以自然海岸为主的岛屿岸线作为研究对象。选取了 KONOS IRS SPOT 和 ETM+ 等传感器的卫星遥感资料, 包括全色和多光谱数据, 共有 7 种空间分辨率

的遥感图像, 空间分辨率分别为 1.0 4.0 5.8 10.0 15.0 20.0 和 30.0m。

采用二次多项式法进行遥感图像的几何精校正, 全部 7 幅遥感图像被统一到高斯-克里格投影下的北京 54 坐标系中。然后采用密度分割法分离水域和陆地, 并经矢量化处理得到海岸线及其长度信息。图 1 显示了研究区岛屿的不同空间分辨率遥感图像及相应的海岸线, 表 1 列出了由不同空间分辨率遥感图像得到的海岸线的长度。

3.2 海岸线长度与空间分辨率的关系

根据表 1 的数据, 海岸线长度与空间分辨率的关系如图 2 所示。图 2 显示为对数函数关系, 符合 (2) 式的形式, 且相关性很高 ($R^2=0.9893$), 可见该

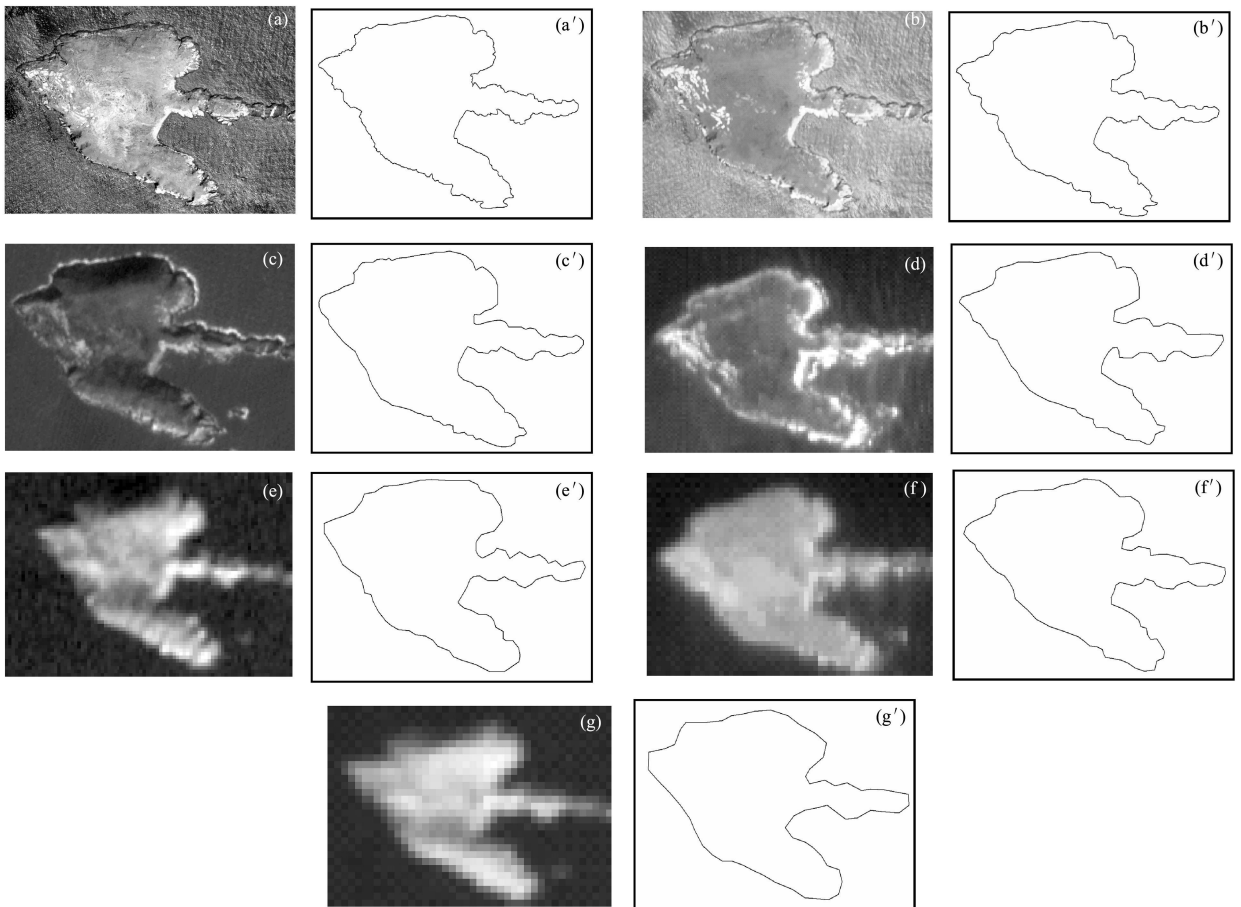


图 1 系列空间分辨率遥感图像和海岸线

(a) KONOS 全色, 分辨率为 1.0m; (b) KONOS 多光谱, 分辨率为 4.0m; (c) IRS 全色, 分辨率为 5.8m; (d) SPOT 全色, 分辨率为 10.0m; (e) ETM+ 全色, 分辨率为 15.0m; (f) SPOT 多光谱, 分辨率为 20.0m; (g) ETM+ 多光谱, 分辨率为 30.0m; (a')-(g') 分别是由图像 (a)-(g) 提取得到的海岸线

Fig. 1 Images with different resolutions and shorelines

(a) KONOS Pan image $r=1.0m$; (b) KONOS MS image $r=4.0m$; (c) IRS Pan image $r=5.8m$; (d) SPOT Pan image $r=10.0m$; (e) ETM+ Pan $r=15.0m$; (f) SPOT MS image $r=20.0m$; (g) ETM+ MS image $r=30.0m$; (a')-(g') are the shorelines from images (a)-(g) respectively

表 1 由系列分辨率遥感图像得到的海岸线长度

Table 1 Shoreline lengths extracted from remote sensing images with different resolutions

卫星名称	波段	分辨率 /m	海岸线长度 /m
KONOS	全色	1.0	4381.2
KONOS	多光谱	4.0	4116.4
IRS	全色	5.8	4000.2
SPOT	全色	10.0	3900.5
Land sat 7 ETM+	全色	15.0	3889.6
SPOT	多光谱	20.0	3710.6
Land sat 7 ETM+	多光谱	30.0	3701.8

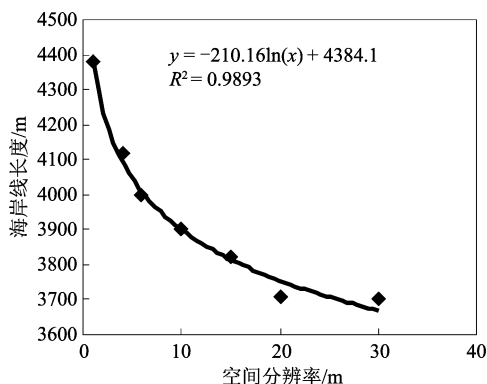


图 2 海岸线长度与空间分辨率的关系

Fig 2 Relationship between length of shoreline and resolution of remote sensing images

关系相当稳定。因此,利用分形几何方法研究海岸线长度与遥感图像空间分辨率的关系是合适的,采用尺度依赖分形几何模型可以解决遥感信息的空间尺度转换问题。

3.3 海岸线分形维数计算方法

步长行走法是最常用的分形几何体分形维数的估算方法之一。该方法的基本原理是:采用一系列不同长度的步长,由曲线的起点开始顺着曲线开始量测,从而得到一系列的曲线长度,再在对数坐标上绘制步长和长度的相关关系图,从而得到曲线的分形维数值。本研究中,按照步长行走法的原理,采用不同空间分辨率的遥感图像得到的海岸线长度,相当于采用了不同步长量测得到的海岸线长度。因此直接利用遥感图像的空间分辨率及其相应的海岸线的长度作为步长和海岸线的长度,在其对数坐标上得到如图 3 所示。经过线性模拟得到其斜率为

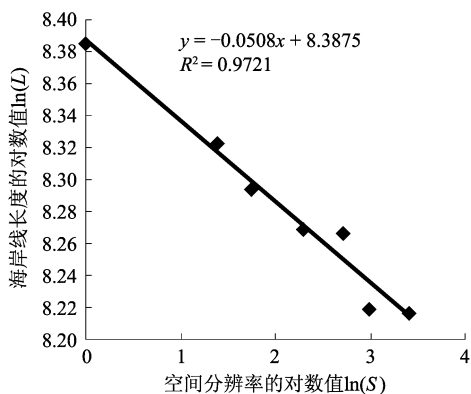


图 3 海岸线长度与空间分辨率在对数坐标上的关系

Fig 3 Relationship between logarithmic length of shoreline and resolution of remote sensing images

“-0.0508”,由此可以得到本研究的海岸线的分形维数为 1.0508。

3.4 海岸线遥感信息空间尺度转换

利用得到的分形维数和(6)式,以一个空间分辨率得到的海岸线为基础可以估算其他任意空间分辨率的海岸线长度。本文以 1m 分辨率的海岸线长度为基础,估算了其他空间分辨率的长度,表 2 列出了估算结果。

表 2 实际遥感信息的海岸线长度与理论转换长度的比较

Table 2 Comparison of shoreline lengths from remote sensing images with estimated shoreline

空间分辨率 /m	实际长度 /m	理论长度 /m	绝对误差 /m	相对误差 /%
1.0	4381.2			
4.0	4116.4	4083.2	33.2	0.81
5.8	4000.2	4039.5	-39.3	-0.98
10.0	3900.5	3891.0	9.5	0.24
15.0	3889.6	3820.9	68.7	1.77
20.0	3710.6	3833.2	-122.6	-3.30
30.0	3701.8	3634.9	66.9	1.81

由表 2 可知,(6)式能较好地反映海岸线长度与遥感图像空间分辨率的关系。采用此式开展的试验表明,遥感信息的空间尺度转换是可行的。表 2 同时表明,遥感信息的空间尺度转换的尺度跨度是有限制的,随着尺度跨度的扩大,其转换误差将增大。

4 基于比例尺的遥感信息空间尺度转换

4.1 标准比例尺海岸线获取

本研究选取了 1:10000 和 1:50000 纸质地形图。然后采用手动跟踪数字化方式数字化了岛屿的岸线, 得到两条 1:10000 和 1:50000 的标准海岸线矢量数据, 其长度分别为 4186.89m 和 3871.26m, 将其作为 1:10000 和 1:50000 比例尺的标准长度。

4.2 遥感信息空间尺度转换

根据 2.2 节的分析, 1:10000 和 1:50000 的图

件的空间分辨率分别为 3.0m 和 15.0m, 而本文中选取的遥感图像空间分辨率分别为 1.0 4.0 5.8 10.0 15.0 20.0 和 30.0m, 因此需要进行遥感信息的空间尺度转换, 满足制作 1:10000 和 1:50000 比例尺图件的条件, 其海岸线的长度信息才能与由 1:10000 和 1:50000 地形图中得到的标准长度进行比较。

试验中, 将由分辨率 1.0 4.0 和 5.0m 的遥感图像获取的海岸线长度转换到 1:10000 比例尺的尺度下, 将由分辨率 10.0 15.0 和 20.0m 的遥感图像获取的海岸线长度转换到 1:50000 比例尺的尺度下。表 3 列出了海岸线空间尺度转换前后的长度以及与标准海岸线长度的误差情况。

表 3 海岸线空间尺度转换结果分析

Table 3 The results of scale transform of shorelines from remote sensing images

地形图比例尺	标准海岸线长度 /m	遥感图像分辨率 /m	遥感提取的海岸线长度 /m	误差 /m	尺度转换后海岸线长度 /m	尺度转换后误差 /m
1:10000	4186.9	1.0	4381.2	194.3	4143.3	-43.6
		4.0	4116.4	-70.5	4177.0	-9.9
		5.8	4000.2	-186.7	4136.4	-50.5
1:50000	3871.3	10.0	3900.5	29.2	3820.9	-50.4
		15.0	3889.6	18.3	3889.6	18.3
		20.0	3710.6	-160.7	3765.2	-106.1

通过对表 3 中各项数据的分析可以得出以下两个结论。

(1) 海岸线的空间尺度效应得到进一步验证。1:10000 地形图的空间尺度为 3.0m, 1:50000 地形图的空间尺度为 15.0m, 由空间分辨率分别为 4.0m 和 15.0m 的遥感图像提取的海岸线与标准长度最接近, 且误差较小。这表明, 虽然地形图数据和遥感信息来自完全不同的数据源, 但是只要空间尺度一致, 其海岸线也是基本一致的。可见, 海岸线的空间尺度效益是普遍存在的。

(2) 本研究提出的基于比例尺的遥感信息空间尺度转换模型是有效的。通过空间尺度转换后, 由不同空间分辨率的遥感图像提取的海岸线长度与海岸线标准长度的差距大多有非常明显的缩小。特别是对于 1:10000 地形图的海岸线, 三种遥感数据得到的海岸线经过空间尺度转换, 误差都缩小为不到原先的 1/4。可见, 利用本研究提出的转换模型进行遥感信息的空间尺度转换是有效的。

5 结 论

本文利用系列空间分辨率的遥感数据, 采用分形几何方法的尺度依赖模型, 研究了遥感信息的空间尺度效应, 提出了遥感信息空间尺度转换模型, 并进行了初步的应用。通过本研究可得到以下几个结论:

(1) 遥感信息的空间尺度效应是客观存在的普遍的地质现象, 是遥感理论和应用技术中一个重要的基础性问题。

(2) 分形几何方法可以用来描述遥感信息的空间尺度效应, 由此建立的空间尺度模型可以用于尺度分析和尺度转换等工作。

(3) 在实际的遥感应用中, 由于遥感信息的空间尺度效应的影响, 不同空间分辨率遥感资料提取的信息的面积和长度等属性信息是不同的, 没有可比性, 需要统一到特定比例尺的条件下才能进行比

较分析。因此空间尺度转换是必不可少的工作。

(4)本文提出了多源遥感信息空间尺度同化模型和基于比例尺的遥感信息空间尺度转换模型,可以分别用于多源遥感数据综合应用和基于特定比例尺的遥感信息综合应用,通过实例验证了模型的有效性和实用性。

当然,遥感信息空间尺度效应研究需要针对不同的应用领域和目标,具体探讨其合适的描述模型,探讨可业务化应用的遥感信息空间尺度转换技术和自动化处理是下一步的研究重点。

参 考 文 献 (References)

- [1] Cao G, Lam N S N. Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS [A]. Quattrochi D A, Goodchild M F. Scale in Remote Sensing and GIS [C]. 1997.
- [2] Marceau D J, Geoffrey J H. Remote Sensing Contribution to the Scale Issue [J]. *Canada Journal of Remote Sensing* 1999, 25 (4): 357—366.
- [3] Woodcock C E, Strahler A H. The Factor of Scale in Remote Sensing [J]. *Remote Sensing of Environment* 1987, 21: 311—322.
- [4] Atkinson Peter M, Curran Paul J. Defining an Optimal Size of Support for Remote Sensing Investigation [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 1995, 33(3): 768—776.
- [5] Goodchild M F, Quattrochi D A. Scale, Multiscaling, Remote Sensing and GIS [A]. Quattrochi D A, Goodchild M F. Scale in Remote Sensing and GIS [C]. 1997.
- [6] Woodcock C E, Strahler A H, Jupp D L B. The Use of Variograms in Remote Sensing: I. Scene Model and Simulated Images [J]. *Remote Sensing of Environment* 1988, 25: 323—348.
- [7] Wu H H. Research on Fundamental Theory and Technical Approaches of Automated Map Generalization [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping* 2000, 25 (5): 377—386 [毋河海. 地图信息自动综合基本问题研究 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 377—386]
- [8] Pentland M. Fractal Based Description of Natural Scenes *EEE Transon PAMI* 1984, 6(6): 661—673.
- [9] Wang Q, Wu H H. Study on Fractal Description of Geographic Information and Automatic Generalization [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1998. [王桥, 毋河海. 地图信息的分形描述与自动综合研究 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998.]
- [10] Zhang H G, Huang W G, Zhou C B. A New Fractal Interpolation Approach for Geographic Curve [J]. *Acta Geodactica et Cartography Sinica* 2002, 31(3): 255—261. [张华国, 黄伟良, 周长宝. 一种新的地理线要素分形插值方法 [J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 255—261.]
- [11] Mandelbrot B B. How Long is Coastline of Britain? [J]. *Science* 1967, 156: 636—638.
- [12] Mandelbrot B B. *Fractals Form, Chance and Dimension* [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1977.
- [13] Administration of Quality and Technical Supervision, China Specification for 1:500 1:1000 1:2000 Topographic Maps Digitization (GB/T17160-1997) [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997. [国家质量技术监督局. 1:500 1:1000 1:2000 地形图数字化规范 (GB/T17160-1997) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.]