

# 分形定量选择遥感影像最佳空间分辨率的方法与实验

冯桂香, 明冬萍\*

(中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083)

**摘要** 遥感影像观测尺度是遥感信息提取研究的重要内容之一,也是遥感信息提取的焦点。以往,遥感影像尺度特征的分析大多基于地统计学,其主要体现遥感影像中的线性特征,而实质上遥感影像中既存在线性特征,又存在非线性特征。因此,在深入剖析遥感影像尺度效应及分形特征机理的基础上,本文探讨了分形理论定量选择遥感影像最佳空间分辨率(也称最佳像元观测尺度)的方法。以 IKONOS 全色影像的建筑用地、耕地、林地为研究对象,分别使用 FBM、DBM、TPM 3 种分形维数计算模型,实现了 3 种地物在不同空间分辨率下分形维数的计算。实验结果表明,每种地物的分形维数是随空间分辨率的增大,总体呈下降趋势,且在某些特征空间分辨率上会出现拐点。从遥感影像尺度效应分析可知,遥感影像空间格局随尺度的不同,其内部结构也不同。且随着尺度的增大,很多细节将会被忽略,影像的粗糙度也随着降低。而分形维数是迄今为止描述对象自相似性和不规则度的唯一基本量化值,其直观上与物体表面的粗糙程度相吻合。因此,这些拐点对应的分形维数对地物的最佳空间分辨率的选择具有一定指示意义。通过本文研究可知,使用分形理论方法研究遥感影像最佳空间分辨率(或最佳像元观测尺度),打破以往观测尺度方法研究范畴,从不同角度去分析遥感影像观测尺度问题对 GIS 研究与地学应用具有一定的理论和指导意义。

**关键词** 最佳空间分辨率;像元观测尺度;分形;分形维数计算模型;分形维数

DOI:10.3724/SP.J.1047.2015.00478

## 1 引言

在遥感影像中,尺度和分辨率具有一定内在联系<sup>[2]</sup>,两者之间最大差异是定义视角不同。尺度是从地学现象大视角定义,而分辨率是从具体数据小视角定义,针对某特定研究来说,分辨率实质体现着观测尺度。从地学现象的尺度本身出发,探索特定空间要素与遥感影像空间分辨率之间的定量对应关系具有很好的现实意义<sup>[1]</sup>。以地统计学研究遥感影像最佳空间分辨率已取得一定成果,如 Ming<sup>[3]</sup>等人利用平均局部方差改进方法研究遥感影像不同地物最佳空间分辨率,Chen<sup>[4]</sup>等人利用计算窗口大小的局部方差改进方法进行地震后不同破损目标物的最佳空间分辨率分析,Tran<sup>[5]</sup>等人利用局部方

差方法研究城区内部结构检测的最佳空间分辨率,并结合分形理论进行结果验证。以上研究均基于地学统计方法,即利用欧式几何学解析遥感影像中的线性特征。实质上,遥感影像中既存在线性特征,又存在非线性特征。影像中地物的空间格局是尺度大小的函数,随尺度的增大,线性特征增强,非线性特征降低。因此,地学统计方法对非线性结构的尺度特征的描述有一定的局限性;而分形理论方法利用分形维数分析遥感影像空间格局中的非线性特征,打破了以往研究观测尺度的范畴。因此,从不同角度去分析遥感影像观测尺度,定量选择遥感影像最佳空间分辨率(也称最佳像元观测尺度),探讨分形维数在影像最佳空间分辨率选择中的应用,具有重要意义。

收稿日期 2014-10-16;修回日期:2014-11-15.

基金项目 国家自然科学基金项目(41371347);中央高校基本科研业务费专项资金(2652013084)。

作者简介 冯桂香(1990-),女,江西人,硕士生,主要从事遥感图像处理及 GIS 应用研究。E-mail: 983738303@qq.com

\*通讯作者:明冬萍(1976-),女,黑龙江人,博士,副教授,主要从事遥感信息提取及地学尺度研究。

E-mail: mingdp@cugb.edu.cn

## 2 遥感影像尺度效应及分形机理

### 2.1 遥感影像尺度的内涵

尺度是一个广泛使用的术语,其涵义随着应用领域的不同而不同。尺度一般包括时间尺度和空间尺度2种<sup>[6]</sup>。时间尺度是指研究对象的细节在时间跨度上的变化,空间尺度是指研究对象的细节在空间跨度上的变化。本文主要研究遥感影像空间尺度,是指所研究对象中各要素的面积大小或最小信息单元(如像元)的空间分辨率水平<sup>[6]</sup>。从数据的角度来说,本文所研究的尺度体现为观测尺度,即研究中能被区分的最小单元的大小<sup>[3]</sup>。遥感影像空间格局随尺度的不同,其形成的原因和机制往往也不同,相同地理要素在表征过程具有不同的影响范围。一般而言,变化速率快的地理要素(如窄的道路、小面积的建筑物等),随着研究尺度的增大将会被抹除;而变化缓慢的地理要素(如宽阔的道路、大面积的农田等),随着研究尺度的增大将会得到保留<sup>[6]</sup>,这是研究遥感影像最佳观测尺度的基础。

### 2.2 遥感影像分形特征机理分析

长期以来,分形理论能有效揭示自然界现象和过程的内在规律特征<sup>[7]</sup>。从地学研究领域讲,大量的地质活动在地球形成演化过程中具有混沌动力学机制<sup>[8]</sup>,因此,在不同程度上,这些地质活动所形成的地质、地理现象具有自相似性<sup>[7]</sup>。例如,海岸线的形状、地貌地形的形态、断裂的构造等,都呈现出分形特征。遥感影像真实地记录了遥感技术所观测的自然界中各种现象和过程<sup>[7]</sup>,其基本原理是将大地三维空间表面投影到二维灰度表面上。其中,灰度值是地物目标辐射经过传播介质(大气)<sup>[9]</sup>,最终到达传感器,形成输出影像上的点(或线、面)的一种量度值。地物目标在影像上的分布完全是其实际分布的反映,该反映主要由目标地物辐射规律所决定。由此可知,遥感影像完全符合分形布朗特征。在计算影像分形维数时,可将灰度值作为第三维空间三维表面的法向量,计算得到的分形维数反映了真实表面的粗糙程度<sup>[7]</sup>。

因此,分形理论结合自然界中各种现象和过程的特征,遥感影像成像机制及遥感影像理解的分析可得出:

(1)自然界中许多复杂地物和现象都具有统计自相似性,即研究对象的局部只是整体的放大或缩小,整体是局部的无限镶嵌,且不随尺度(空间尺度

或时间尺度)变化而变化<sup>[7]</sup>。基于文献[10]结合分形的投影定理可得出,影像的分形维数与所对应的景观的形状分形维数完全相等。

(2)遥感影像中不同地物内部结构、纹理、粗糙度具有一定差异,分形维数是迄今为止描述对象自相似性和不规则度的唯一基本量化值。分形维数直观上与物体表面的粗糙程度相吻合,且同种类别纹理,观测尺度不同,纹理粗糙度不同,分形维数也不同。

(3)遥感影像中既存在线性特征,又存在非线性特征。基于混沌理论的分形理论方法,可有效地反映遥感影像的非线性特征。

## 3 基于分形的遥感影像最佳空间分辨率选择方法与实验

根据文献[11],分形性质存在于一定的标度域之间,在标度域内可通过研究对象的相似性由局部认识整体,所以,标度域的存在指示着尺度转换点的存在。由分形理论可知,分形维数可定量确定一些尺度转折点。同时,从改变观测尺度计算分形维数的计算原理分析(图1),如果观测尺度(空间分辨率单元)比地物目标小( $d1$ ),影像中的大多数像元与邻域具有很强的相关性,计算得到的影像表面积较小,则分形维数小;如果观测尺度(空间分辨率单元)与地物目标大小相当( $d2$ ),遥感影像中大多数像元与邻域的相似性降低,计算得到的影像表面积较大,则分形维数大;当观测尺度(空间分辨率单元)内包含多个地物(混合像元)目标( $d3$ ),计算得到的影像面积变小,则分形维数也变小<sup>[1,6]</sup>。因此,以上分形维数拐点(转折点)为遥感影像地物最佳观测尺度(空间分辨率)范围上限值具有一定理论

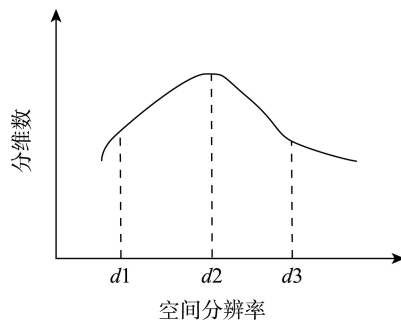


图1 遥感影像空间分辨率与分形维数关系图

Fig. 1 Sketch map of the relation between spatial resolution and fractal dimension

依据。

### 3.1 遥感影像最佳空间分辨率选择方法

为了有效地描述地物空间自相似性,分形维数被提出,并作为描述对象自相似性和不规则度的唯一基本量化值。然而,伴随不同应用领域,分形维数的定义不同(如相似维数、豪斯道夫维数等<sup>[12]</sup>);研究对象的不同,测定分形维数的方法不同(如改变观测尺度求维数、根据频谱求维数等<sup>[7]</sup>);实现分形维数的算法也不同,如Jaggi等<sup>[13]</sup>提出并实现了分线法、三角棱柱法遥感图像分形维数计算方法。除此之外,还有分形布朗运动<sup>[14]</sup>、盒维数<sup>[15]</sup>、差分盒维数<sup>[16]</sup>等计算方法。本文采用加窗分形布朗运动法<sup>[17]</sup>、加窗双层地毯法<sup>[18]</sup>以及加窗三棱柱法<sup>[19-21]</sup>计算遥感影像像元分形维数。

(1)表面积加窗分形布朗运动法(Fractal Brown Motion, FBM),是将遥感影像分成若干个小区域进行分形维数计算,即在一幅遥感影像上添加一个大小固定的滑动窗口,将窗口内的影像区域作为一幅影像计算范围<sup>[7]</sup>,然后利用表面积分形布朗运动法进行分形维数计算,将此分形维数计为窗口中心像元的分形维数并输出,移动滑动窗口,直至完成对整幅影像中的像元计算。

窗口移动的顺序为:先按行逐个像元计算,后按列逐个像元计算,直到影像上的每一个像元都得到计算<sup>[7]</sup>,如图2所示。

在遥感影像上添加大小为  $2R \times 2R$  ( $R$  为 1, 2, 3, …) 的滑动窗口,对窗口内的影像利用 FBM 法进行影像分形维数计算,将计算结果作为窗口中心像元(目标像元)分形维数输出。计算像元分形维数,只需计算在不同尺度(以下简称为计算尺度)下

滑动窗口的面积,再通过线性回归方法得到分形维数<sup>[17]</sup>。其中,计算尺度的选择范围:  $1 \times 1, 2 \times 2, 4 \times 4, 8 \times 8 \cdots$ ; FBM 法计算像元面积过程为:中心像元面积  $A_H$  加前侧面邻域像元对中心像元的贡献面积  $A_{v1}$  再加上左侧面邻域像元对中心像元的贡献面积  $A_{v2}$ , 即  $A_H + A_{v1} + A_{v2}$ , 窗口的面积为所有像元面积之和。

(2)加窗双层地毯法(Double Blanket Method, DBM),是通过影像灰度表面形成的夹围体积来计算分形维数,类似于盒子法。其原理是将遥感影像分成若干个小区域进行分形维数计算,即在一幅遥感影像上添加一个大小固定的滑动窗口,将窗口内的影像区域作为一幅影像计算范围<sup>[7]</sup>,然后利用双层地毯法进行分形维数计算,将此分形维数计为窗口中心像元的分形维数并输出,移动滑动窗口,直至完成对整幅影像中的像元计算。

窗口移动的顺序为:先按行逐个像元计算,后按列逐个像元计算,直到影像上的每一个像元都得到计算<sup>[7]</sup>,如图3所示。

在遥感影像上添加大小为  $2R \times 2R$  ( $R$  为 1, 2, 3, …) 的滑动窗口,对窗口内的影像利用 DBM 法进行影像分形维数计算,将计算结果作为窗口中心像元(目标像元)分形维数输出。DBM 法计算像元分形维数过程与 FBM 法类似,不同的是计算像元面积的方法使用 DBM 法,对像元面积,先计算双层地毯之间的体积  $V_s$ ,再利用面积=体积/高,计算出单层地毯的面积。体积  $V_s$  的计算:上毯值减去下毯值;上毯值:中心像元值加上尺度(观测尺度或空间分辨率)与四邻域像元值进行比较,取最大的值作为上毯值;下毯值:中心像元值减去尺度(观测尺度

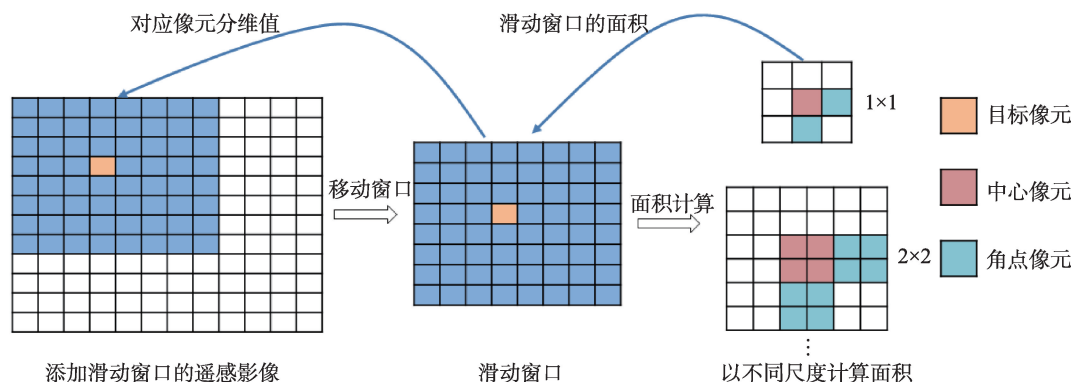


图2 表面积加窗分形布朗运动法计算示意图

Fig. 2 Calculation diagram of window FBM method based on surface area



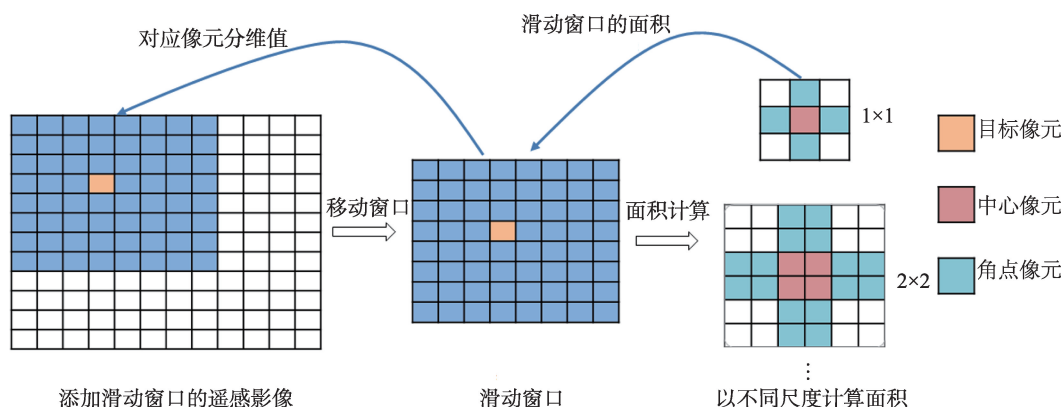


图3 加窗双层地毯法计算示意图

Fig. 3 Calculation diagram of window DBM method

或空间分辨率)与四邻域像元值进行比较,取最小值作为下毯值。窗口的面积为所有像元面积之和。

(3)加窗三棱柱法(Triangular Prism Method, TPM)是通过比较在采用不同尺度观测图像“表面”时表面积的大小的变化来计算曲面的分形维数的一种方法<sup>[19]</sup>。加窗三棱柱法和表面积的加窗分形布朗运动法、加窗双层地毯法计算像元分形维数原理类似,只是计算分形维数方法发生变化。其计算方法是利用三棱柱法进行分形维数计算,将此分形维数计为窗口中心像元的分形维数并输出,移动滑动窗口,直至完成对整幅影像中的像元计算。

窗口移动的顺序为:先按行逐个像元计算,后按列逐个像元计算,直到影像上的每一个像元都得到计算<sup>[7]</sup>,如图4所示。

在遥感影像上添加大小为 $2R \times 2R$  ( $R$ 为1,2,3,……)的滑动窗口,对窗口内影像利用TPM法进行影像分形维数计算,将计算结果作为窗口中心像元(目标像元)分形维数输出。TPM法计算像元分

形维数过程与FBM法类似,不同的是计算像元面积的方法使用TPM法,像元面积计算过程为:将中心像元看成上表面不规则的四棱柱,将不规则的上表面划分成4个三角形,像元面积为4个三角形面积之和。三角形面积计算:先计算出三角形的3条边,再利用海伦公式计算三角形面积,窗口的面积为所有像元面积之和。

### 3.2 基于分形的最佳空间分辨率选取实验

本实验采用IKONOS全色波段数据,选择建筑用地、林地和耕地作为研究区地物类型,针对每种地物类型从分辨率为1 m的IKONOS数据中裁剪出像元范围大小为 $800 \times 800$ 像元的各研究区(A、B和C)进行实验。将裁剪好的数据以1 m的间隔进行重采样得到1~15 m影像数据。图5为原始1 m分辨率的IKONOS研究区实验影像。

实验平台创建于VS 2010环境下,使用C++语言实现3种分形维数计算方法,将以上准备的数据

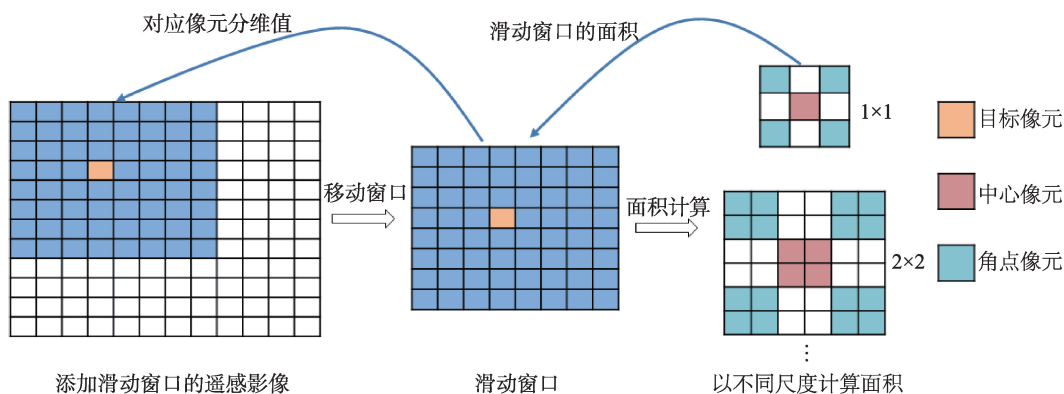


图4 加窗三棱柱法示意图

Fig. 4 Diagram of window TPM method



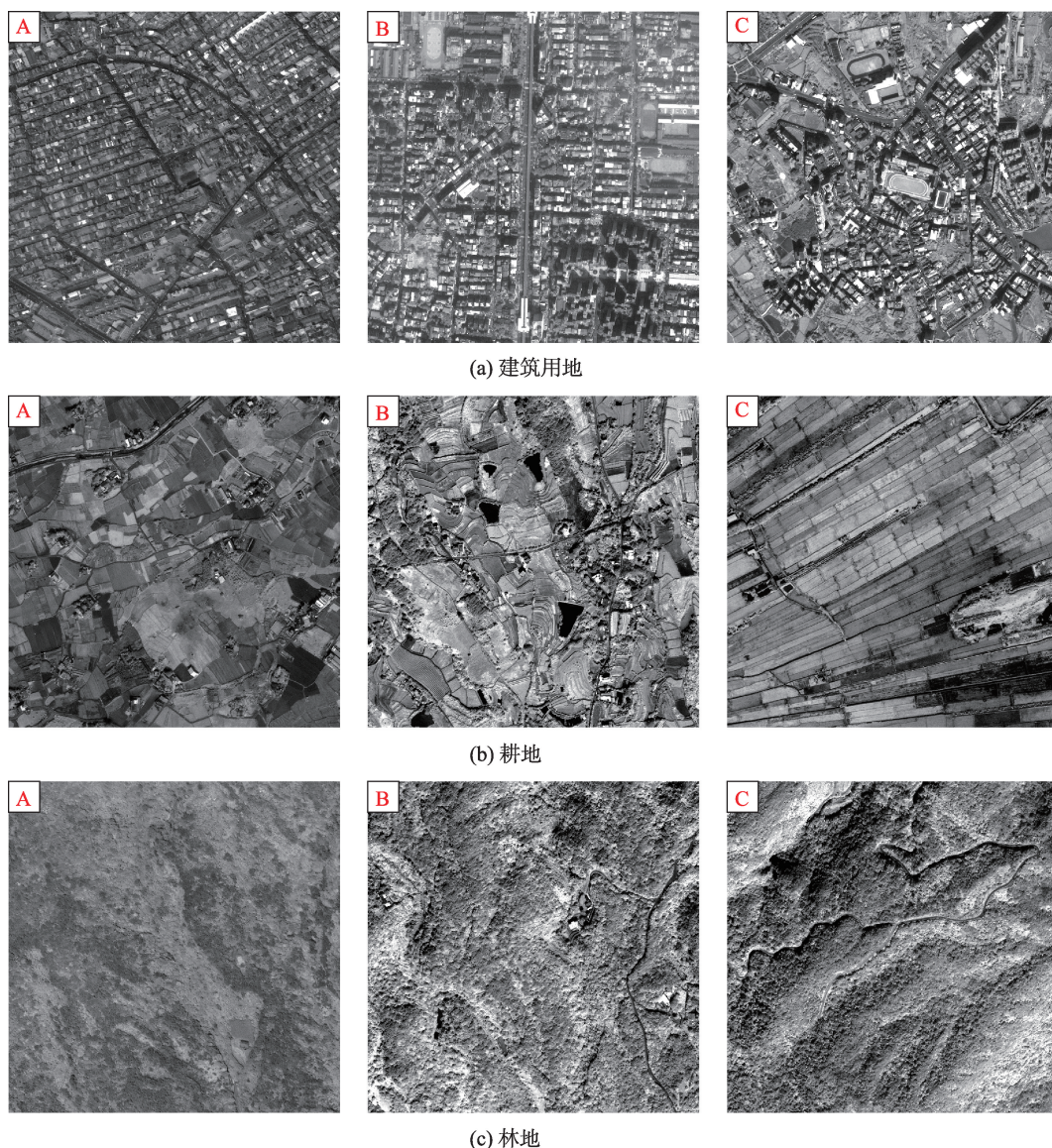


图5 实验影像图(1 m分辨率)

Fig. 5 Experimental image with 1 m spatial resolution

加载到实验平台中,选择分形维数计算窗口(本实验使用了 $16 \times 16$ 像元的窗口),同时选择分形维数计算方法,运行得到分形维数计算结果,该结果包含每个像元分形维数。对整幅影像的3种分形维数(FBM、DBM、TPM)进行均值统计,得到整幅图像的平均分形维数,统计结果如图6所示。

对以上实验结果进行分析:

(1)空间分辨率从1~15 m的尺度范围内,3种方法计算的像元平均分形维数随观测尺度变化曲线走势基本一致,即在一定空间尺度内,随观测尺度增大,平均分形维数总体上呈逐渐减少的趋势,并最终趋于某一个值。

分形理论在一定研究范围内,遥感影像非线性

特征随尺度的增大而下降,线性特征随尺度的增大而增强,即遥感影像的空间异质性随尺度的增大而降低。主要原因是尺度增大过程中,影像中的很多细节将被忽略,影像复杂度将降低<sup>[6]</sup>。而分形维数是测定地物复杂度的一个指数,影像复杂度降低,分形维数也会降低。因此,本实验统计的分形维数结果基本可靠。

(2)同种地物3种不同方法计算得到的分形维数统计结果存在一定差异。表面积加窗分形布朗运动法和加窗双层地毯法曲线走势变化基本一致,在一定尺度范围内,都出现拐点。加窗三棱柱法曲线在下降过程中未出现任何拐点。

随着应用的不同,分形维数测定方法不同,算

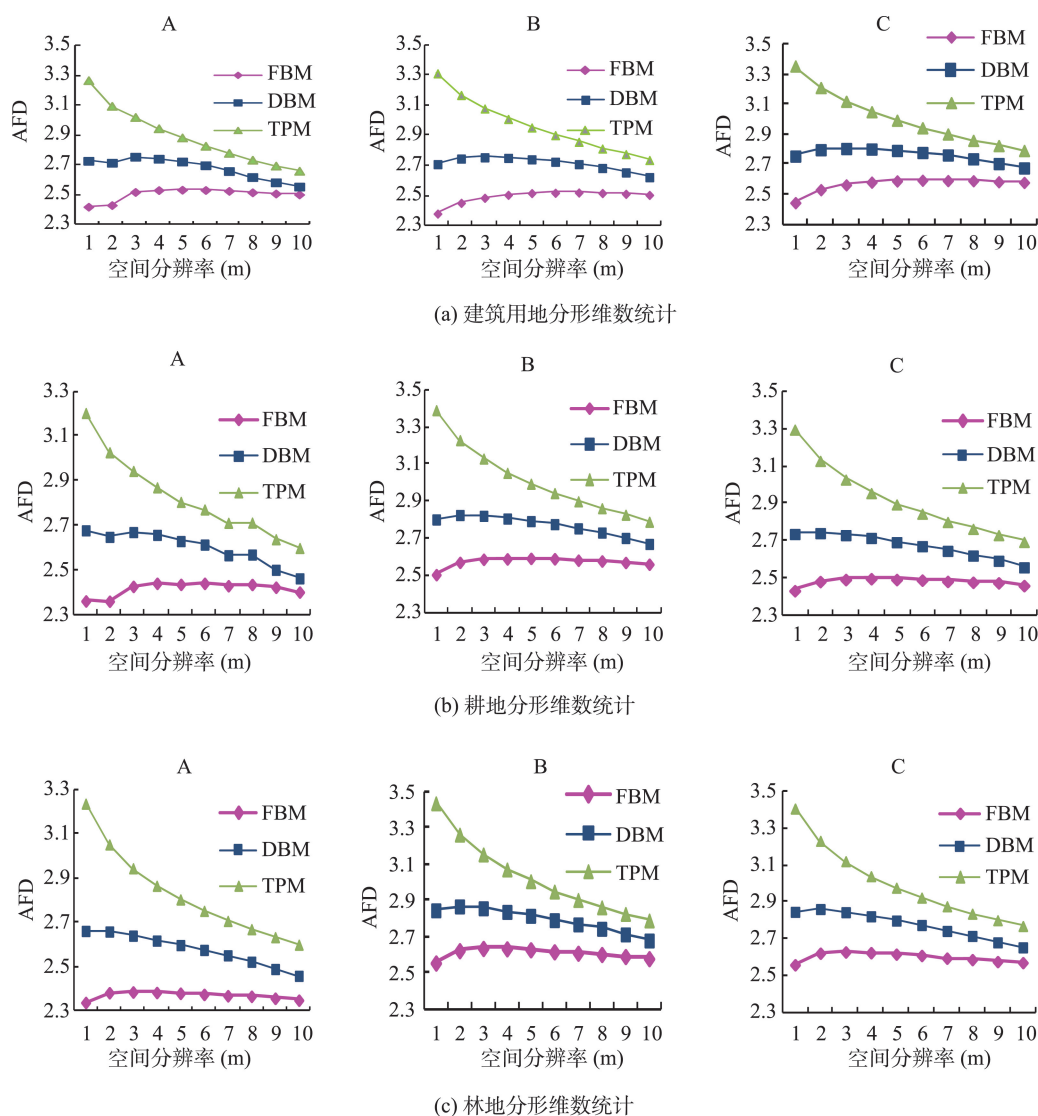


图6 各地物分形维数统计图

Fig. 6 Statistical charts of the fractal dimension for different ground features

法研究的对象及范围也不同,产生以上3种算法结果差异是可能存在的。Pentland<sup>[10]</sup>通过实验指出,不同分形维数测定手段适用范围不同,超出了适用范围计算所得到的结果就会不理想。谢和平<sup>[22]</sup>指出,相似分形维数的定义可能存在十分不同的性质,在实验中即使使用“好”的集合,计算出来的分形维数值也不会完全相同。因此,以上实验统计3种方法计算同种地物分形维数存在较大差距不足为奇。其计算的分形维数具有一定可靠性,在某些研究中具有一定的应用价值。

(3) 不同地物分形维数随尺度变化会产生拐点,建筑用地的拐点是3 m,耕地的拐点是4 m,林地的拐点是3 m,这些拐点从某种意义上来说是遥感影像地物的最佳空间分辨率范围上限值。

以上统计分析得出地物的最佳空间分辨率,与Ming<sup>[3]</sup>等人使用改进的局部方差方法分析遥感影像最佳空间分辨率的实验结论基本一致。

## 4 结论

本文以分形理论定量选择遥感影像最佳空间分辨率的方法,实现了表面积加窗分形布朗运动、加窗双层地毯、加窗三棱柱3种计算分形维数算法,通过以上方法计算出不同空间分辨率下遥感影像的分形维数,对分形维数随空间分辨率的变化进行分析,通过分形维数变化曲线上的特殊标度点可以辅助进行最佳空间分辨率的定量选择。由实验结果可知,分形理论和方法在一定程度上对定量选择



遥感影像最佳像元观测尺度具有一定理论和指导意义。但需要特别指出的是:

(1)本研究结果对遥感影像最佳观测尺度选择虽具有一定理论指导意义,但不能用来计算绝对的最佳观测尺度。与地统计方法选择最佳空间分辨率一样,分形理论方法选择最佳空间分辨率也具有数据依赖性,每一个分形维数结果只对该数据区域有指导意义。

(2)本文的实验结果再次证明没有单一绝对的最佳空间分辨率,能正确地反映并描述复杂景观的形状和尺寸。不同景观或者同种地物不同空间结构(如建筑区中的不同类型的房子构造),其实际分形维数计算结果和对应的最佳空间分辨率也可能存在一定差异。

(3)通过对不同地物类型进行分类,分析不同分辨率下的系列分类精度,随着空间分辨率变化的尺度效应,进一步验证了以上实验获得的最佳空间分辨率的有效性,是本研究要进一步加强方向。

(4)今后,对于不同的分形维数计算方法,需深入总结其适用性,加强应用研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡国彪.基于结构套合分析的遥感影像尺度效应研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [2] Cao C, Lam N S N. Understanding the scale and resolution effects in remote sensing and GIS[C]. In: Quattrochi D A, Goodchild M F (eds). *Scale in Remote Sensing and GIS*. Florida: CRC/Lewis Publishers, 1997.
- [3] Ming D P, Yang J Y. Modified ALV for selecting the optimal spatial resolution and its scale effect on image classification accuracy[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2010,54:1061-1069.
- [4] Chen W K, He S L, Pei H J, *et al.* Analysis and optimal selection of spatial scale for remote sensing images before and after earthquakes[J]. *Earthquake*, 2013,33(2):19-28.
- [5] Tran T D B, Puissant A, Badariotti D, *et al.* Optimizing spatial resolution of imagery for urban form detection - The cases of France and Vietnam[J]. *Remote Sensing Article*, 2011,3(10):2128-2147.
- [6] 明冬萍,王群,杨建宇.遥感影像空间尺度特征与最佳空间分辨率选择[J].*遥感学报*,2008,12(4):529-537.
- [7] 郭建明.分形理论在遥感影像空间尺度转换中的应用研究[D].西安:西北大学,2008.
- [8] 薛重生,何国金.遥感地质学中若干问题的分形探讨[J].*国土资源遥感*,1993,17(3):46-54.
- [9] 江东,王建华.遥感信息科学中的分形思维[J].*甘肃科学学报*,2000,12(1):53-58.
- [10] Pentland M. Fractal based description of natural sciences [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984,6(6):661-674.
- [11] 朱晓华.地理空间信息的分形与分维[M].北京:测绘出版社,2006.
- [12] 刘莹,胡敏,余桂英,等.分形理论及其应用[J].*江西科学*, 2006,24(2):205-209.
- [13] Jaggi S, Quattrochi D A, Lam N S N. Implementation and operation of 3 fractal measurement algorithms for analysis of remote-sensing data[J]. *Computers & Geosciences*, 1993,19(6):745-767.
- [14] 孙金玮,王华,王祁.基于自相关函数的自然纹理图像分形维数的估计[J].*北京航空航天大学学报*,2004,30(8):718-722.
- [15] Chen Y H, Li X B, Dou W, *et al.* Research on urban spatial thermal environment using remotely sensed data fractal measurement of structure and changes of thermal field [C]. *IGARSS:International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004,5:3150-3153.
- [16] Ge M L, Lin Q Z, Lu W. Realizing the box-counting method for calculating fractal dimension of urban form based on remote sensing image[C]. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006:1423-1426.
- [17] 陈新.分形理论及其在机械工程中的应用[J].*机械科学与技术*,2000,19(5):692-697.
- [18] 舒宁.卫星遥感影像纹理分析与分形分维方法[J].*武汉测绘科技大学学报*,1998,23(4):370-374.
- [19] 张华国,黄韦良,周长宝,等.关于IKONOS卫星遥感图像的分形特征研究[J].*测绘通报*,2005(5):15-19.
- [20] 周成虎,骆剑承,杨晓梅,等.遥感影像的地学理解与分析[M].北京:科学出版社,1999.
- [21] Mandelbort B B. *The Fractal Geometry of Nature*[M]. New York: Freeman,1983.
- [22] 谢和平,张永年,宋晓秋,等.分形几何——数学基础与应用[M].重庆:重庆大学出版社,1991.



## Fractal Based Method on Selecting the Optimal Spatial Resolution for Remote Sensing Image

FENG Guixiang and MING Dongping\*

*(School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)*

**Abstract:** Observation scale research is one of the important subjects of scale research in remote sensing, and it is also one of the research focuses of information extraction from remote sensing images. Analysis of the scale properties in remote sensing image is normally based on geo-statistics, which mainly highlights the linear features of the remote sensing image. However, remote sensing image generally consists of both linear and non-linear features, it is insufficient and to use analysis that based on only geo-statistics. This paper discusses a fractal based method on selecting the optimal spatial resolution for remote sensing image (also known as optimal pixel-based observation scale) by analyzing the remote sensing image scale effect and study the mechanism of fractal characteristics. Three categories of study regions, covered by building, farmland and forest respectively, were cut from IKONOS panchromatic image and used as the experimental data. Then, a series of fractal dimensions based on Fractal Brown Motion, Double Blanket Method and Triangular Prism Method respectively were calculated along with the change of spatial resolution. The statistical analyses of the experimental results demonstrate that the fractal dimensions generally show a decreasing trend with the increase of spatial resolution, and some turning points emerged at certain spatial resolutions. According to the analysis, the spatial patterns or internal structures in remote sensing image vary among different scales. And with the decreasing of spatial resolution, the roughness of image will also decrease since many details are ignored. Nevertheless, the fractal dimension is the only basic quantitative value to describe the self-similarity and irregular degree of object, and it is intuitively consistent with the roughness. Therefore, the turning points at certain spatial resolutions indicate the significance for choosing the optimal spatial resolution. The experimental results show that the fractal based method on selecting the optimal observation scale is theoretically and practically significant to geo-applications, and it extends the research categories by analyzing remote sensing observation scales from different perspectives.

**Key words:** optimal spatial resolution; pixel-based observation scale; fractal; fractal dimension calculation model; fractal dimension

\*Corresponding author: MING Dongping, E-mail: mingdp@cugb.edu.cn