



北京城市下垫面的非均匀性度量研究

摘要

城市下垫面非均匀性度量研究对于改进中尺度数值模式、提高城市气象预报准确率具有重要意义。基于分形布朗运动理论和 Landsat-TM 卫星遥感图像,估算了 2011 年北京典型下垫面类型个例和整个空间区域的分数维,由此来度量北京城市下垫面的非均匀性特征。研究结果显示:分数维能有效度量北京城市下垫面的非均匀程度,典型下垫面类型的分数维高低顺序为商业区>大型居民区>城市绿地>农田>林地>水体;北京六环内区域及郊区城镇地表非均匀特征明显,分数维一般在 2.50 以上,北京城市中心(二环内)存在一个分数维相对低值区,二环—四环之间区域分数维普遍较高,在 2.70 以上,五环以外分数维则不断降低,反映出北京城市下垫面非均匀性从中心向外呈低—高—低的空间分布;下垫面类型中建筑用地、绿地、未利用地、农田、林地和水体的平均分数维分别为 2.71、2.62、2.55、2.38、2.30 和 2.28,分数维值的高低反映了城市下垫面类型的非均匀程度大小,对定量描述城市边界层参数的复杂特征具有参考意义。

关键词

城市下垫面;非均匀;分形布朗运动;分数维;北京

中图分类号 P237

文献标志码 A

收稿日期 2014-03-27

资助项目 国家自然科学基金(41175015);城市气象科学基金(IUMKY&UMRF201102);北京市气象局“城市边界层观测分析与精细模式”创新团队

作者简介

刘勇洪,男,硕士,正研级高级工程师,主要从事遥感应用与应用气象方面的研究工作。
lyh7414@163.com

0 引言

目前城市精细气象预报远不能满足城市防灾减灾工作的需要,近地面气象要素预报的准确率亟待提高,加强城市地-气耦合过程研究,对于改进和提高气象预报和服务能力无疑是十分必要的。城市下垫面非均匀性研究是开展此类研究的基础,特别是城市下垫面非均匀性的度量对于改进中尺度数值预报模式、提高城市气象预报准确率具有重要意义。城市作为一种不规则形状的复杂系统,不仅仅是一种人造物体,同时也可以视为人类对自然界适应、加工和改建的一种人工生态系统,具有自然属性^[1]。Mandlebrot^[2]创立的分形几何理论能够描述具有复杂和不规则形状的对象,Pentland^[3]证明了自然界中的大部分表面是具有各向同性的分形。而“城市地表”是由道路、建筑物表面、草地、树木、水面等组成的复杂几何体,具有分形特征,因此其复杂程度可以用分数维来描述^[4]。遥感图像是地物表面映射形成的灰度强度分布场,同样具有分形特性,因此利用遥感图像来研究城市下垫面不均匀性特征已成为城市分形研究的重要研究手段。作为分形理论定量描述的最基本参数,分数维(Fractal Dimension, FD)反映了对象的复杂程度和非均匀性,具有相对的尺度不变性、旋转不变性等优良特性,已在图像分割/分类中广泛应用^[5-6]。

城市化进程中形成的下垫面结构的非均匀性在遥感图像上可以表征为图像纹理的不规整度或破碎度,可以用图像分数维来描述。分数维存在着不同的定义(豪斯道夫维数、盒维数、相似维数、关联维数等),且使用不同的定义得到的计算结果通常不同,这给分形理论的应用带来了很大困难。在众多图像分数维计算方法中,分形布朗运动(Fractional Brownian Motion, FBM)法以其计算简单、适用范围广等优点而得到广泛应用^[7],基于该法的用于图像的常见方法有面积-周长法、盒子计数法及面积-半径法 3 种。面积-周长法多用于分析土地利用景观格局的复杂性和稳定性^[8-9],盒子计数法多用于计算城市形态的边界维数^[10-11],面积-半径法多用于计算城市形态的半径维数^[12-13]。于子凡等^[14-15]基于遥感图像分别利用表面积法和改进的灰度统计法求取了典型土地利用类型的分数维,通过分数维的差异区分出不同土地利用类型的复杂和非均匀程度,何文斌等^[16]提出一种基于面积加权的快速插值算法来模拟不同尺度下的遥感图像,进而计算图像的分数维。

1 中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

2 北京市气候中心,北京,100089

3 东莞理工学院 计算机学院,东莞,523808

4 南京信息工程大学 遥感学院,南京,210044

但基于空间区域内获取整个城市地表来反映空间差异的网格分数维还很少报道.本文引入分数维作为描述“城市地表”这一复杂曲面的定量指标,研究城市下垫面非均匀性的度量.同时,将研究基于更容易获取的卫星遥感图像计算“城市地表”分数维的方法,以便建立适用于城市冠层模式应用的特征参数表,为改善城市精细化气象数值预报模式提供科学依据和研究基础.

1 研究区与数据

北京市位于华北平原北端,115°25′~117°30′E,39°28′~41°05′N之间.北京的西、北和东北群山环绕,海拔一般在1000~1500m之间,东南是海拔在20~60m之间的北京小平原.北京属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,春秋短而冬夏长,常年平均气温10~12℃,年降水量在470~600mm之间.

研究使用的遥感数据为2011年7月26日的Landsat5/TM数据(成像时间为北京时间10:42),轨道号为119-38.根据地形图对该影像作了几何精校正,转换为UTM投影,校正的整体误差控制在0.5个像元以内.根据北京市行政界线进行掩膜处理,得到北京市范围内的TM影像.为了消除大气对于遥感影像造成的影响,利用6S辐射传输模型对TM数据的Band1~5、7进行了大气校正,得到6个多光谱波段的地表真实反射率数据.此外,还使用了同一天的TERRA/MODIS水汽产品数据MOD05_L2(成像时间10:20).由于MODIS与TM的成像时间非常接近,因此可以用MODIS产品提供的水汽含量作为TM成像时的水汽数据.对Swath轨道格式的MODIS水汽数据进行地理重定位操作转换为UTM投影,裁切掩膜处理后,通过重采样将其转换为与TM一致的空间分辨率.

2 研究方法

2.1 图像分数维计算

本文分数维的计算方法采用于子凡等^[14]提出的分形布朗运动法中的改进灰度统计算法.根据分形布朗运动理论,设 $X \in E^n$ (E^n 是 n 维欧氏空间), $F(X)$ 是关于点 X 的实值随机函数,若存在常数 H ,使得函数

$$B(t) = P\left(\frac{F(X+R) - F(X)}{|R|^H} < t\right) \quad (1)$$

是一个与 X 及 R 无关的随机分布函数,则 $F(X)$ 称为

分形布朗函数.式中 H 称为自相似参数,它与分数维 D 的关系为 $D = n + 1 - H$.对于图像 $X = (x, y) \in E^2$, $Z = F(X) = f(x, y)$,其中 (x, y) 是像素的位置, $f(x, y)$ 是像素的灰度值, $D = 3 - H$.式(1)经过变化可以得到

$$\log E^{|F(X+r) - F(X)|} - H \cdot \log \|R\| = \log C. \quad (2)$$

由于 H 和 C 均是常数,式(2)表示 $\log \|R\|$ 与 $\log E^{|F(X+r) - F(X)|}$ 满足线性关系,将它看成直线方程时, H 表示直线的斜率, $\log C$ 表示直线的截距, R 是尺度参数.通过改变 R 求出若干组数据对 $(\log \|R\|, \log E^{|F(X+r) - F(X)|})$,用线性回归法求出斜率 H ,也就可以得到该图像的分数维 $D = 3 - H$,即

$$D = 3 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log \|r_i\| - \bar{X})(\log E^{|F_{r_i}(X+r_i) - F_{r_i}(X)|} - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (\log \|r_i\| - \bar{X})^2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |F_{r_i}(X+r_i) - F_{r_i}(X)| &= \frac{1}{3} \{ |f_{r_i}(x+1, y) - f_{r_i}(x, y)| + |f_{r_i}(x, y+1) - f_{r_i}(x, y)| + \\ &|f_{r_i}(x+1, y+1) - f_{r_i}(x, y)| \}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $r_i (i = 1, \dots, n)$ 是图像第 i 次变化的尺度参数, $F_{r_i}(X)$ 是当前像素灰度值, $F_{r_i}(X+r_i)$ 是当前像素相距 r_i (即一个尺度)的像素灰度值, $F_{r_i}(X+r_i) - F_{r_i}(X)$ 表示任意两个相距一个尺度 r_i 的像素值的差异值, $f_{r_i}(x, y)$ 表示在尺度 r_i 下像素 (x, y) 位置的灰度值. \bar{X}, \bar{Y} 分别是 $\log \|r_i\|$ 与 $\log E^{|F_{r_i}(X+r_i) - F_{r_i}(X)|}$ 的均值, $\|r_i\|$ 是第 i 次使用的尺度的模.由于图像 $f_{r_i}(x, y)$ 的像素尺度为 r ,即一个像素的大小为 $r \times r$,因此在水平相邻像素 $f_{r_i}(x+1, y)$ 与 $f_{r_i}(x, y)$ 以及垂直相邻像素 $f_{r_i}(x, y+1)$ 与 $f_{r_i}(x, y)$ 之间的距离都是 r ,则 $\|r_i\| = \sqrt{2}r$.

为了考虑尺度变化后原始周边像元对重采样后像元的贡献值,从原始像元尺度 r 变为 r' ($r < r'$)后的像素灰度值 f' 可以用下式表示:

$$f' = (r/r')^2 \sum_j f_j p(j), \quad (5)$$

其中 $f_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 表示包含在面积 $r' \times r'$ 内 m 个原始像素中第 j 个像素灰度值, $p(j)$ 为该像素被围在 $r' \times r'$ 范围内的面积百分比.

基于前述算法,北京空间区域的图像分数维计算步骤如下:

- 1) 选定一景高分辨率单波段图像;
- 2) 确定计算窗口区域大小,以计算该窗口区域内的分数维(单个值);

3) 确定分数维计算方法中变换尺度 $r_i (i=1, \dots, n)$ 要大于原始相对分辨率 1, 一般取 i 为 4~9 个尺度, 本文选定 $r_i = [1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0]$;

4) 根据式(4)计算窗口区域内不同尺度下的灰度变化均值, 其中需要根据式(3)求取尺度变换后的新灰度值;

5) 利用式(3)求取窗口图像的分数维.

6) 根据窗口大小, 依次计算下个窗口分数维, 即循环步骤 1)~5). 例如在遥感图像上选择窗口大小为 20×20 , 则第 1 个窗口从左上角开始取第 1 行到第 20 行和第 1 列到第 20 列, 第 2 个窗口取第 1 行到第 20 行和第 21 列到第 40 列, 依次选取, 因此生成的分数维分辨率是图像原始分辨率 \times 窗口大小, 分数维图像大小是原始遥感大小 / 窗口大小.

本文选定北京 2011 年 7 月 26 日的 Landsat-TM 遥感影像中对植被、建筑用地区别较为明显的第 4 波段(近红外波段)反射率影像, 影像空间分辨率为 25 m, 大小为 7 500 列 \times 7 500 行. 下面分别计算典型地物类型和北京整个空间区域内的分数维.

1) 典型地物类型分数维计算. 在该影像上目视解译选择 6 块典型地物类型, 每种类型影像大小为

400 列 \times 400 行 (10 km \times 10 km), 如图 1 所示, 朝阳 CBD(图 1a, 商业建筑较多)、昌平回龙观小区(图 1b, 居民建筑较多)、朝阳城市绿地(图 1c, 含大型公园, 混有众多建筑)、怀柔山区林地(图 1d)、大兴郊区农田(图 1e, 混有大量村镇)和密云水库(图 1f, 含有周边林地), 分别按上述计算步骤中的 3)~5) 计算北京 6 种典型下垫面类型单一图像的分数维.

2) 空间区域分数维计算. 计算整幅影像(7 500 列 \times 7 500 行)的分数维, 需要确定合适的影像窗口大小. 已有研究指出对 TM 图像研究显示 20×20 窗口计算分形特征较为适宜^[6], 本文确定窗口大小为 20×20 , 则最后生成的分数维图像分辨率为 25 m \times 20 = 500 m, 图像大小为 (7 500/20) 列 \times (7 500/20) 行 = 375 列 \times 375 行.

2.2 图像分类

为开展分数维与下垫面土地利用类型关系研究, 需要利用遥感图像提取北京地区主要土地利用类型. 本研究采用最大似然法和阈值法进行土地利用分类, 主要开展耕地、林地、水域、城镇用地、绿地和未利用地等 6 个类别.

首先对 2011 年 7 月 26 日遥感图像进行最大似

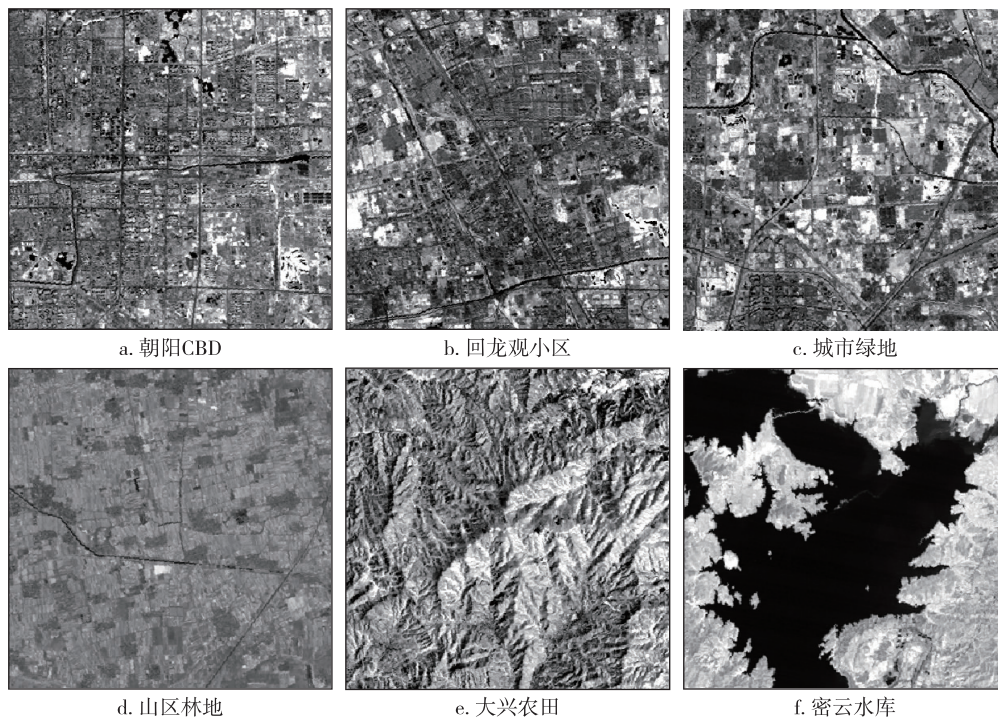


图 1 北京地区遥感图像上的典型地物

Fig. 1 Typical ground objects of Beijing in remote sensing images, Chaoyang CBD business district, Huilongguan residential district, urban green land, woodland in mountain area, Daxing cropland and Miyun reservoir

然监督分类,训练样本来自 2010 年北京 1:10 000 土地利用信息和 2005—2010 年北京市气候中心农业气象野外不同类型(林地、农田、绿地、城镇用地、未利用地和水体)等 GPS 调查资料,每类至少 100 个样本以上,分类波段包括了 TM 6 个可见光反射率波段、高程 DEM 和坡度等 8 个波段资料,根据图像划分成 2 种林地类型、1 种山区裸地、2 种平原裸地、2 种农田、1 种绿地、水体、山区阴影等类别,分完后进行归并,再对一些误分明显的类别主要是建筑、农田、绿地等进行目视人工解译修正.监督分类结果常常有细碎图斑,需要对获得的分类结果进行一些后处理,本研究使用 ENVI 软件中的聚类统计、过滤分析、去除分析功能突出这些图斑并进行了小图斑的合并.最后,得到较为理想的分类结果,精度检验表明各期的总体分类精度均在 90% 以上,图 2 为 2011 年土地利用类型分布.从图 2 可知,林地主要分布于山区,城镇用地主要分布于城区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山)和各郊县城,农田主要集中于郊区县大兴、通州、顺义、平谷、房山、昌平平原地区和延庆盆地等,绿地主要集中于五环周围及城区各大公园,未利用地主要集中于五环到六环之间的中心城市向郊区农村的过渡地带.

3 结果与分析

3.1 北京典型地物类型分数维

对北京 6 种典型地物类型朝阳 CBD、回龙观小区、城市绿地、大兴农田、山区林地和密云水库等计算的分数维如表 1 所示.

由表 1 可知,各种典型地物类型在 400 列×400 行(10 km×10 km)范围内,分数维都超过了 2.50,都存在较高的不均匀性.其中朝阳 CBD 分数维最大(2.984 7),这是由于存在参差不齐的大面积商业写字楼,下垫面复杂程度最高;其次回龙观小区(2.905 4),存在大量密集的居民建筑和少部分绿地,不均匀程度也较高;第三是城市绿地(2.819 6),由于存在较大面积的绿地公园和部分建筑,不均匀程度居中;第四是大兴农田(2.818 4),第五是山区林地分数维(2.743 5),最小的是密云水库(2.576 4).

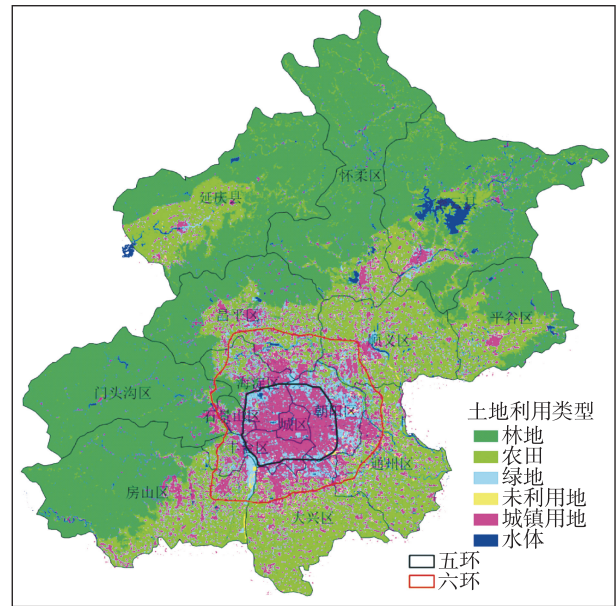


图 2 北京 2011 年土地利用类型
Fig. 2 Land use types of Beijing in 2011

大兴郊区农田由于村镇分布较多,农田小而分散,估算的分数维较高,高于山区林地,而密云水库主要以水体为主,地物类型相对单一、均匀,分数维最低.分数维值高低反映了该类型的复杂性与不均匀性.分数维值越大,该类型越复杂,不均匀性程度越高.按不均匀性程度高低顺序排列,北京各种典型地物类型为:商业区>居民区>城市绿地>农田>林地>水体.

3.2 北京空间区域内的图像分数维

图 3 给出了北京地区及主要城区空间区域的图像分数维.结合图 2 和图 3a 可以看出,北京六环区域内及各郊区县城下垫面的分数维大都在 2.50 以上,明显高于周边郊区农村和山区县.北京空间区域内分数维高值区域(>2.7)主要集中分布在五环内,五环之外的通州新城、昌平回龙观及天通苑地区、海淀北部新区、大兴亦庄、顺义新城、昌平城区的分数维也比较高,这些地区普遍是建筑用地集中区.山区由于分布着大面积的林地类型,大部分结构比较稳定均一,分数维在 2.50 以下.而在远郊区县大兴、通州、昌平、顺义、平谷和延庆中心城区等远离六环之外的许多农田,分数维也在 2.50 以下,表明这些农

表 1 北京市 2011 年夏季遥感图像上典型地物类型的分数维

Table 1 Fractal dimensions of typical ground objects of Beijing in remote sensing images in 2011 summer

类型	朝阳 CBD	回龙观小区	城市绿地	大兴农田	山区林地	密云水库
分数维	2.984 7	2.905 4	2.819 6	2.818 4	2.743 5	2.576 4

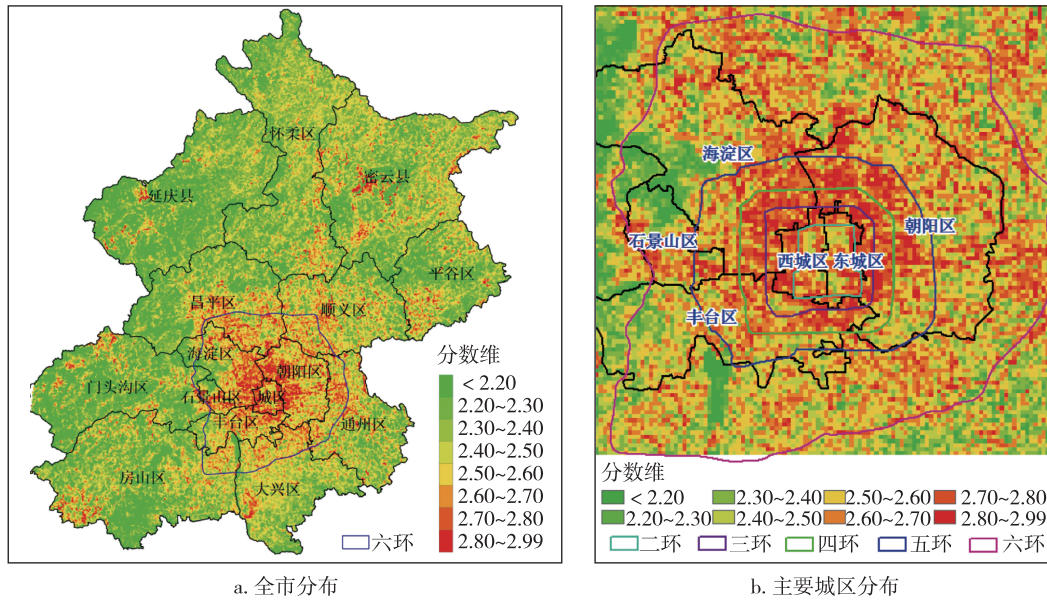


图3 北京地区2011年分数维空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of fractal dimension of Beijing area in 2011, with a for whole city, and b for districts

田相对比较均匀,破碎程度明显较靠近六环的近郊区农田偏低。

从六环内主要城区分数维图(图3b)可知,二环线以内的分数维值明显低于周边二环到四环之间地区,大部分在2.70以下,这是由于该区域为北京的老城区和旧城保护区,建筑样式和高度受限严格,旧式平房和旧的历史保护建筑多而集中,水域面积也相对较多,少有高楼,下垫面相对集中均一,其不均匀性程度明显低于周边二环外高楼林立的商业城区和居民小区。二环—四环,分数维普遍较高,大部分在2.70以上,四环之外分数维高值区(>2.7)更多分布于北部和东部,其中北三环—五环之间的分数维高值区明显多于南三环—南五环,反映出北三环—北五环之间下垫面非均匀性程度明显高于南三环—南五环,这也从侧面反映出北京北部经济发展长期快于南部的结果。对北京平原地区二环内—六环外区域的平均分数维计算结果如图4所示,二环—三环的分数维最高(2.74),表明该区域复杂性和不均匀程度最高,其次是三环—四环(2.71),二环内的分数维为2.65,复杂性和不均匀程度低于二环—四环,但高于四环—五环(2.64)和五环—六环(2.54),六环外平原分数维降至2.39,反映出北京城市下垫面不均匀性程度从中心向外是一个低—高—低的空间分布状态。另外北京平原地区六环内分数维普遍较高,这些地区也是北京的主要城市区域,下垫面不均匀程度较高。六环外以农村农田为

主,分数维明显降低,复杂性和不均匀程度也明显不如城市区域。

结合图2和图3可以估算出北京不同土地利用类型分数维(图5)。可以看出,土地利用类型以建筑用地分数维最高(2.71),其次为绿地(2.62),第三为未利用地(2.55),第四为农田(2.38),第五为林地(2.30),最低为水体(2.28)。即不均匀性程度高低顺序为:建筑>绿地>未利用地>农田>林地>水体,这与前面典型地物小区分析结果的趋势一致。

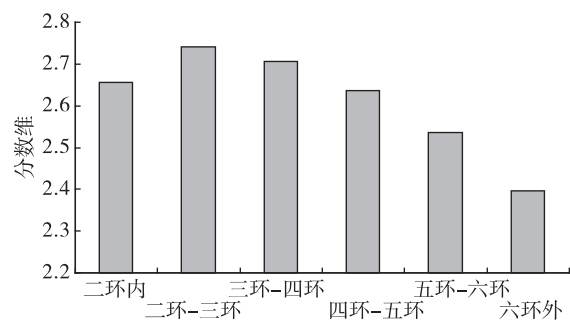


图4 北京平原2011年不同区域分数维

Fig. 4 Fractal dimensions of different regions of Beijing plain in 2011

4 结论与讨论

本文利用分形布朗运动理论,基于卫星遥感图像估算了北京城市地表典型下垫面类型个例和整个地区空间区域内的分数维,并分析了北京不同空间

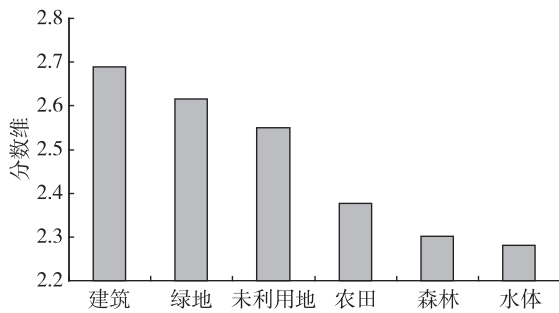


图5 北京地区2011年不同土地利用类型分数维

Fig. 5 Fractal dimensions of various land use types in Beijing urban area in 2011

区域和下垫面土地利用类型的分数维,主要结论有:

1)北京六环区域及郊区县城地表非均匀特征明显,分数维一般在2.50以上,典型地物类型的分数维高低顺序为商业区>大型居民区>城市绿地>农田>林地>水体;

2)北京城市中心(二环内)存在一个分数维相对低值区,二环—四环之间区域分数维普遍较高,在2.70以上,五环以外分数维则不断降低,远郊农田及山区林地非均匀程度明显较低,反映出北京城市下垫面不均匀性程度从中心向外是一个低—高一低的空间分布状态;

3)北三环—北五环之间的分数维明显高于南三环—南五环之间区域,反映出北京城市的北部与南部发展的不均衡性;

4)就各种下垫面类型平均分数维分布来看,建筑用地、绿地、未利用地、农田、林地和水体的分数维分别为2.71、2.62、2.55、2.38、2.30和2.28,分数维值的高低反映了各种下垫面类型的非均匀程度。

本文主要从遥感图像的二维数值来表达城市下垫面的不均匀性特征,如何利用城市建筑的三维特性(如城市高度、容积率)来更好地表达城市下垫面不均匀程度或粗糙度是城市分形中值得研究的方向,这是由于城市大气动力、热力结构及其变化特征很大程度上受不同形体、高度的非均匀性建筑物影响,使得城市气象条件与自然、均匀下垫面之上的大气条件有很大的差别,而这种不均匀性特征体现在发展精细化气象预报中的城市冠层模式和边界层参数化方案中,这对于改进城市气象预报模式进而提高城市气象预报准确率具有重要意义。

参考文献

References

- [1] 陈彦光.分形城市系统:标度、对称、空间复杂性[M].北京:科学出版社,2008:1-3
CHEN Yanguang. Fractal urban systems: Scaling, symmetry, spatial complexity[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-3
- [2] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman and Company, 1983
- [3] Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 661-674
- [4] 刘式达,刘式适.分形和分维引论[M].北京:气象出版社,1993:50-52
LIU Shida, LIU Shishi. Introduction to fractal and fractal dimension[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 50-52
- [5] 李厚强,刘政凯,林峰.基于分形理论的航空图像分类方法[J].遥感学报,2001,5(5):353-357
LI Houqiang, LIU Zhengkai, LIN Feng. Aerial image classification method based on fractal theory[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(5): 353-357
- [6] 陈启浩,高伟,刘修国.辅以纹理特征的高分辨率遥感影像分类[J].测绘科学,2008,33(1):88-90
CHEN Qihao, GAO Wei, LIU Xiuguo. Application of texture feature to classification of high resolution remote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(1): 88-90
- [7] 李旭涛,曹汉强,赵鸿燕.分形布朗运动模型及其在地形分析中的应用[J].华中科技大学学报:自然科学版,2003,31(5):50-52
LI Xutao, CAO Hanqiang, ZHAO Hongyan. The analysis of the model of fractal Brownian motion and its applications to terrain[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2003, 31(5): 50-52
- [8] 杨国安,甘国辉.基于分形理论的北京市土地利用空间格局变化研究[J].系统工程理论与实践,2004,24(10):131-137
YANG Guoan, GAN Guohui. Landscape pattern change research of land use in Beijing based on fractal theory[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(10): 131-137
- [9] 李茂刚,陈松林.基于分形理论的福州市土地利用空间格局变化研究[J].聊城大学学报:自然科学版,2006,19(4):60-70
LI Maogang, CHEN Songlin. Landscape pattern change research of land use in Fuzhou city based on fractal theory[J]. Journal of Liaocheng University: Natural Science Edition, 2006, 19(4): 60-70
- [10] 葛美玲,蔺启忠.基于遥感图像的城市形态分维计算网格法的实现[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(4):517-522

- GE Meiling, LIN Qizhong. Realization of the box-counting method for calculating the fractal dimension of the urban form based on the remote sensing image[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(4):517-522
- [11] 张乐珊,陈戈,韩勇,等.基于三维盒维数算法的城市分维计算[J].*计算机应用*,2010,30(8):2070-2072
ZHANG Leshan, CHEN Ge, HAN Yong, et al. 3D box-counting algorithm for calculating fractal dimension of cities[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(8):2070-2072
- [12] 姜世国,周一星.北京城市形态的分形集聚特征及其实践意义[J].*地理研究*,2006,25(2):204-212
JIANG Shiguo, ZHOU Yixing. The fractal urban form of Beijing and its practical significance [J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2):204-212
- [13] 肖汉,李志鹏.基于分形理论的北京城市形态结构遥感分析[J].*科技导报*,2010,28(16):57-62
XIAO Han, LI Zhipeng. Remote sensing analyses of the urban morphology of Beijing based on fractal theory[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(16):57-62
- [14] 于子凡,胡丽红.图像分数维计算模型的改进[J].*测绘科学*,2011,36(6):22-24
YU Zifan, HU Lihong. An improved method for calculating fractal dimension of image[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(6):22-24
- [15] 于子凡,林宗坚.基于图像表面积的分形布朗运动分数维算法研究[J].*武汉大学学报:信息科学版*,2005,30(2):161-165
YU Zifan, LIN Zongjian. Arithmetic research of fractal dimension with image face based on fractional Brownian motion[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(2):161-165
- [16] 何文斌,梁利姣,刘勇洪.基于重采样的遥感图像分数维计算[J].*激光与光电子学进展*,2013,9(9):56-62
HE Wenbin, LIANG Lijiao, LIU Yonghong. Computation of fractal dimension of remote sensing image based on re-sampling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 9(9):56-62

Measure of Beijing urban underlying surface heterogeneity characteristic

LIU Yonghong^{1,2} HE Wenbin³ XU Yongming⁴

1 Institute of Beijing Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089

3 College of Computer Science and Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808

4 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Measure of the heterogeneity of urban underlying surface is important to improve meso-scale numerical model and increase accuracy of urban weather forecast. Based on fractional Brownian motion theory and Landsat-TM satellite images, fractal dimensions of Beijing's typical underlying surface types and the entire urban region are estimated for 2011, which is used to measure the heterogeneity of Beijing's underlying surface structure. The results indicate that the fractal dimension can effectively measure the heterogeneity characteristics of Beijing's surface. The heterogeneity values for different typical ground object samples are ranked in descending order as business district, residential district, green field, crop, woodland, and water body. The regions inside 6th-ring road and suburban towns have significant heterogeneity, with fractional dimensions generally higher than 2.50. There is a low fractional dimension region in Beijing's center area within 2nd-ring road region. Fractional dimension of region between 2nd-ring road and 4th-ring road is highest and above 2.70, and it decreases outside of 5th-ring road. In a whole, the heterogeneity of urban underlying surface is distributed as firstly increase then decrease from city center to surrounding areas in Beijing. The exurb crop and woodland have low heterogeneity. For different underlying surface types, average fractional dimension of building, green land, unutilized land, crop, forest and water are 2.71, 2.62, 2.55, 2.38, 2.30 and 2.28, respectively. And the values of fractal dimensions show the quantitative measure of heterogeneity of various underlying surface types, which bears reference for quantitative description of complexities of urban boundary layer.

Key words urban underlying surface; heterogeneity; fractional Brownian motion; fractal dimension; Beijing