

南京市城市景观的特征尺度

郁 文 ,刘茂松* ,徐 驰 ,陈奋飞 ,安树青

(南京大学生命科学学院 ,南京 210093)

摘要 在 RS 技术支持下 ,采用分辨率为 10 m 的 SPOT-5 遥感影像为数据源 ,分别应用 Haar、Morlet、Mexican Hat 3 种基小波 ,对南京市江北城郊、主城区和东南城郊 3 种不同景观类型进行了特征尺度研究。结果表明 ,Morlet 基小波最适于进行城市景观的特征尺度检测 ,Mexican Hat 基小波对粒级嵌套结构检测效果稍差 ,而 Haar 基小波不适于对连续型数据源的景观进行特征尺度检测。Morlet 基小波的一维小波分析结果表明 ,南京市江北城郊和东南城郊都存在 1 个对应于各自农田斑块平均粒径的特征尺度 ,分别为 362 m 和 446 m ,而主城区则检测出存在 3 个特征尺度 ,即 292、835m 和 2200m ,分别对应于建筑小区、小型街区和大型街区的平均粒径 ,显示主城区存在具有等级结构特征的“建筑小区-小型街区-大型街区”的粒级嵌套结构 ,揭示了城区具有比城郊复杂得多的粒级结构特征。

关键词 景观格局 ,特征尺度 ,小波分析 ,粒级嵌套结构

文章编号 :1000-0933 (2007)04-1480-09 中图分类号 :Q149 文献标识码 :A

The characteristic scales of the urban landscape in the Nanjing metropolitan region

YU Wen ,LIU Mao-Song* ,XU Chi ,CHEN Fen-Fei ,AN Shu-Qing

School of Life Sciences ,Nanjing University ,Nanjing 210093 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1480 ~ 1488.

Abstract :The purpose of this scale-related study is to find the underlying mechanisms of ecological phenomena by using appropriate spatial-temporal scales. Scale holds the key to understand pattern-process interactions ,but due to limitations of existing theories and methods ,in-depth studies on scales in landscape ecology have been limited ,especially in urban ecosystems with complex structures. Recently ,many new methods were developed and applied in landscape ecology dealing with spatial-temporal processes ,e. g. , semivariogram analysis , point pattern analysis , and wavelet analysis. Wavelet analysis can associate a spatial or temporal pattern with different scales and locations and is effective in characteristic scale detection. With one scene of SPOT-5 imagery ,one dimensional wavelet analysis was conducted to study the structural features of the urban landscape in the Nanjing metropolitan region. One transect traversed the metropolitan in the main diagonal direction of the city ,and three sections named A ,B and C were distinguished which corresponded to the northern suburban ,urban and southeast suburban area , respectively. To check the validity of main diagonal sampling ,three short transects from each of the three areas were randomly placed near the main diagonal line. The results were then compared with the corresponding results along the main diagonal direction ,and no remarkable differences were found ,suggesting that we could use the results derived from the main diagonal line to represent features of the landscape. Three common mother wavelets ,Haar ,Morlet and Mexican Hat , were used. The results indicated that the Morlet wavelet was most suitable for

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (39670364)

收稿日期 2006-03-13 ;修订日期 2006-12-13

作者简介 :郁文 (1984 ~) ,男 ,江苏姜堰人 ,硕士生 ,主要从事景观生态学研究。E-mail yudingo@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :msliu@nju.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 39670364)

Received date 2006-03-13 ; **Accepted date** 2006-12-13

Biography :YU Wen , Master candidate , mainly engaged in landscape ecology. E-mail yudingo@gmail.com

detecting characteristic scales of the urban landscape. The Mexican Hat wavelet could be used for the same purpose but it lacks the ability to reveal some details of scales, while Haar wavelet was not capable of detecting characteristic scales with continuous imagery data. The one-dimensional Morlet wavelet transform showed that the landscape of both northern and southeastern suburban areas had one characteristic scale corresponding to the average grain size of cropland patches, 362 m and 446 m, respectively. While for the urban area, multiple characteristic scales (about 292, 835 m and 2200 m) were distinguished, which corresponded to architectural clumps, small blocks and large blocks, respectively. The results revealed that a grain-nesting structure existed in the urban area, in the order of architectural clumps, small blocks, and large blocks. This nesting structure is significantly more complicated than that in suburban areas.

Key Words: landscape pattern; characteristic scale; wavelet analysis; grain-nesting structure

尺度通常是指研究某一物体或现象时所采用的空间或时间量度^[1]。在景观生态学中,尺度常以粒度和幅度来表达,前者指空间最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积(空间粒度)或某一现象或事件发生的频率(时间粒度);后者指研究对象在空间或时间上的持续范围或长度^[2,3]。尺度是景观空间异质性的一个重要方面^[4],许多生态系统的空间异质性格局随着测量尺度的变化而变化^[5-7],多尺度问题已经成为景观地理建模的理论核心^[8]。特征尺度表征了系统的固有性质或功能^[9],对景观特征尺度的研究有助于选择合适的测量尺度来揭示景观格局的规律性^[10,11]。

地统计学方法被大量应用于景观尺度研究^[12,13],如半方差分析(semivariogram analysis)^[14]、点格局分析(Point pattern analysis)^[15-17]、空间自相关分析(Spatial autocorrelation analysis)^[18,19]、谱分析(Spectral analysis)^[20]、分形分析(Fractals)^[21]、尺度方差分析(Scale variance analysis)^[22]、小波分析(Wavelet analysis)^[23-26]等。其中小波分析源于傅立叶分析,它不要求数据具有恒定的均值或方差,能够将时间或空间上的格局与不同尺度及具体时空位置相互联系起来^[27]。作为进行特征尺度研究的一种新方法,小波分析被有效应用于林窗结构^[23,25]、径流变化^[28]、生态交错区景观结构^[29]等方面的研究。

城市景观在结构和功能上比一般系统要复杂得多^[30]。研究城市特征尺度有助于更好地理解 and 揭示景观格局空间异质性的成因,以及对不同观测尺度上的异质性大小进行有效度量^[31]。此外,随着全球城市化进程的不断推进,对于特征尺度的研究还有助于解释城市发展的模式和动力学机制^[32]。伴随着高分辨率影像的出现和应用,关于城市景观尺度的研究日益增多,如应用半方差分析、半变异函数分析、小波分析等方法对城市景观系统的功能和格局、景观多样性的尺度效应、景观多尺度结构等进行了研究^[26,33]。小波分析技术被证明是一种潜力巨大的尺度分析工具^[26],但迄今针对包含不同地物类型的城市景观进行特征尺度检测的研究还比较少。

基于遥感数据,本文应用小波分析方法对南京市城市景观的特征尺度进行了研究,同时对比分析了不同类型的小波在城市景观特征尺度检测中的有效性。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及相关数据

南京位于北纬 $31^{\circ}14' \sim 32^{\circ}36'$,东经 $118^{\circ}22' \sim 119^{\circ}14'$,地处长江下游的宁镇山区,低山丘陵占全市面积的64.5%,是华东低山丘陵集中的主要区域之一。南京属北亚热带季风气候区,四季分明,雨水充沛,年平均温度为 15.7°C ,最高气温可达 38°C ,最低气温达 -8°C ,年平均降雨量为1106.5 mm。南京目前辖11区2县,面积约 6597 km^2 ,市区面积为 975.82 km^2 ,人口约443.5万。

本研究所用数据主要包括南京地区2002年11月9日成像的轨道号为290/286的SPOT-5多光谱遥感影像(分辨率为10 m)、相应的SPOT-5全色波段影像(分辨率为2.5 m)以及研究区1:50 000地形图。

1.2 遥感影像处理

以南京地区1:50 000地形图数据为基准,对SPOT-5多光谱影像进行几何纠正。对纠正后的影像进行

PCA 变换, 变换后第一主分量 (PC1) 的信息量占总信息量的 94.44%, 包含了原多光谱影像几乎全部的信息。在 PC1 图像上截取 2200 行 × 2200 列的子区, 子区内包含了南京市主城区和周边城郊 (图 1)。在子区图像主对角线方向选取一条样线, 并对线上 DN 值 (图像灰度值) 数据进行一维连续小波分析。有关数据的处理及操作在 ENVI 4.1 支持下完成。

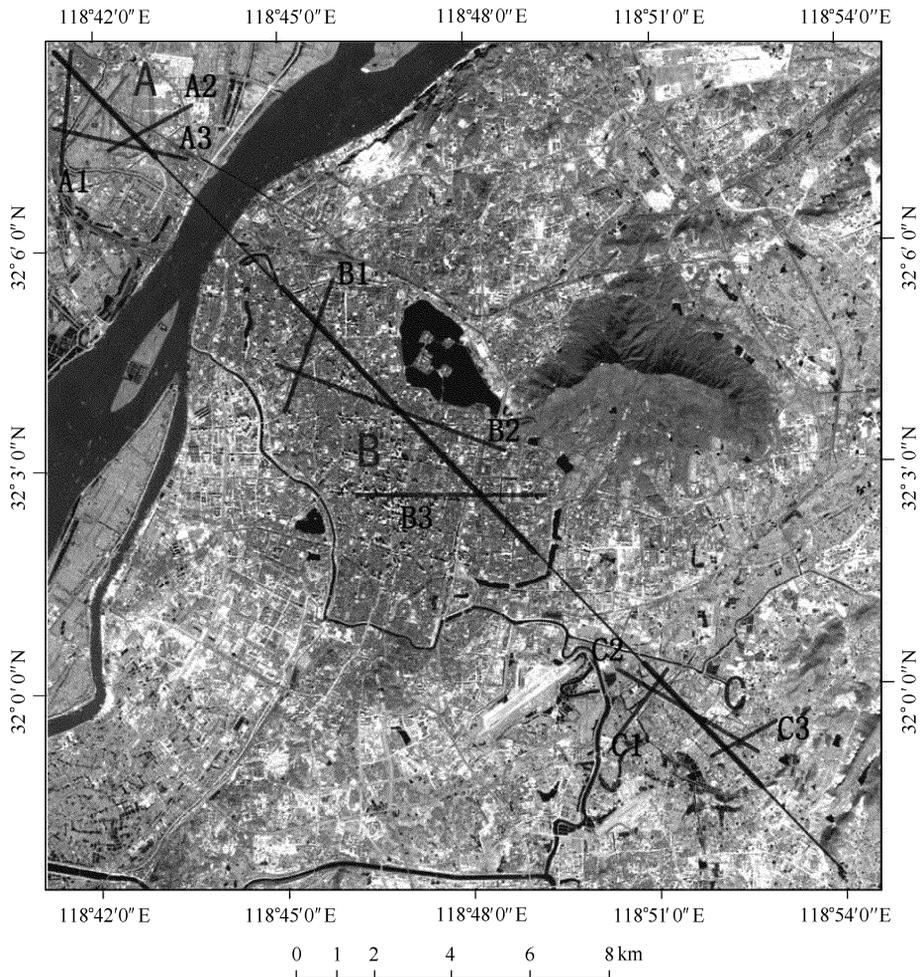


图1 研究区位置及样线设定

Fig. 1 The location of study area and the setting of transects

1.3 小波分析

设 $\varphi(t) \in L^2(R)$ 其傅立叶变换为 $\hat{\varphi}(\omega)$, 当 $\hat{\varphi}(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_{\varphi} = \int_R \frac{|\hat{\varphi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

$\varphi(t)$ 即被称为基小波或母小波 (Mother wavelet) 函数。将其伸缩和平移可得到函数族:

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a,b) \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

其中 a 为尺度因子 b 为平移因子。对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的一维连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

$W_f(a,b)$ 称为小波变换系数。当 a 取值较小时, 可得到用于分析高频信号的高而窄的窗口; 反之, 当 a 取值较大时, 可得到用于分析低频信号的低而宽的窗口。经过小波变换后的结果是尺度 (移动窗口的大小) 和具体时间 (空间) 位置的函数, 尺度特征可通过计算小波方差 (Wavelet variance) 加以识别。小波方差的计

算公式为：

$$V_{(a)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_j^2 (a, b_j) \tag{4}$$

其中 n 为数据向量长度。某一尺度 a 所对应的小波方差的大小反映了该尺度下研究数据的小波变换是否典型。尺度定得过大,则会由于波形过于简单而滤去一些有用的信息;定得过小,则又由于波形过于致密而不易区别干扰信号与目标信息。

和傅立叶分析不同,小波分析的基小波不是惟一的,所有满足小波条件的函数都可以作为基小波函数。结合信号数据的复杂性,本研究选择 Haar、Morlet、Mexican Hat 这 3 种最常用的基小波,其解析式分别为：

Haar 基小波
$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq x < 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

Morlet 基小波
$$\varphi(x) = Ce^{\frac{i2}{3}x} \cos 5x$$

Mexican Hat 基小波：
$$\varphi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{\frac{1}{4}} (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}}$$

一维小波变换有关计算在 MATLAB 6.5 (小波分析工具箱)软件支持下完成。

2 结果与分析

2.1 PC1 图像 DN 值的变化特征

PC1 图像 DN 值在整条样线上的分布有较高的异质性(图 2)。样线坐标大约从 1 到 320 段位于江北城郊,其 DN 值绝大部分大于 0,平均值约 65;从 340 至 428 的 DN 值变化极小(-15 左右),对应于长江水体; [460, 1 160]段位于南京主城区, DN 值振幅较大,其均值小于 [1, 320]段;样线坐标大约从 1 200 到 2081, DN 值平均值相对于 [460, 1 160]段有明显提高,比 [1, 320]段略高,该段对应于东南城郊。

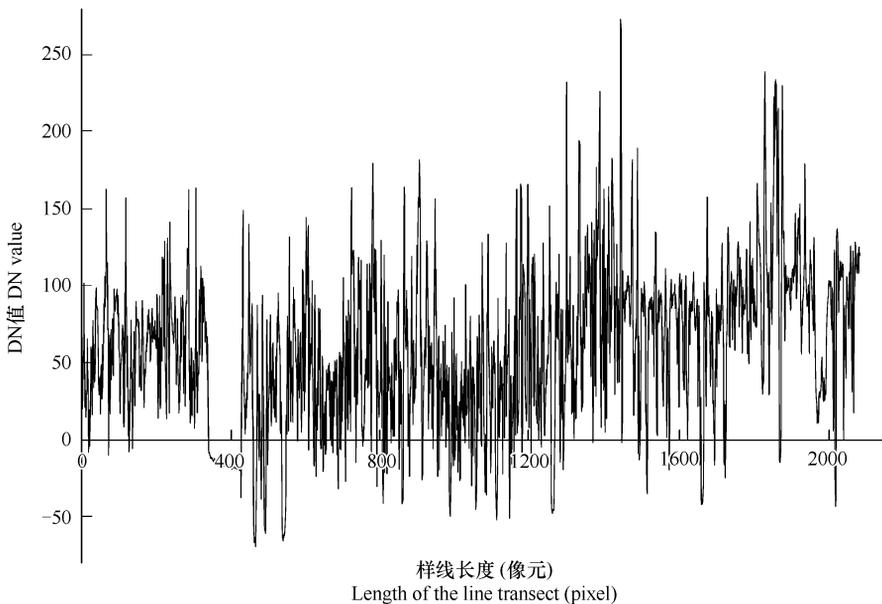


图 2 样线 PC1 图像的 DN 值变化曲线

Fig. 2 Variation of DN value on the line transect of PC1 image

总体上看,整条样线的 DN 值变化表现出明显的分段特性,江北城郊、主城区、东南城郊在 DN 值的波动性上存在差异,有必要分段进行小波变换分析。根据 PC1 图像 DN 值波动的特点和地物类型,在样线上截出 3 段,分别代表江北城郊(A 段)、主城区(B 段)和东南城郊(C 段)(图 1)。

2.2 小波变换分析

对于 A、B、C 3 段样线提取出的 DN 值 ,分别选用 Haar、Morlet、Mexican Hat 3 种基小波进行一维连续小波变换 ,得到各自的小波方差图 (图 3)。

图中每个小波方差峰值代表一个特定的变换尺度 ,分别在这些尺度上绘制小波变换系数—样线坐标图 ,检测景观的特征尺度。

2.2.1 Haar 小波变换分析

从图 3 可以看出 ,对于 A、B、C 3 条样线 ,由 Haar 小波变换得到的方差曲线都随着尺度的增大而缓慢上升 ,不存在明显的峰值。根据 Haar 小波的定义 ,其最明显的特征是不连续性和跳跃性 ,而影像 DN 值变化在空间上相对连续 ,这导致 Haar 小波相应的尺度响应能力较差 ,不适于进行景观特征尺度的检测。

2.2.2 Morlet 小波变换分析

3 条样线经过 Morlet 小波变换后 ,样线 A 小波方差曲线的波峰中心在 $a = 23$ 处 ,样线 B 曲线具有 3 个波峰中心 ,分别在 $a = 17$ 、 $a = 48$ 和 $a = 131$ 处 ;样线 C 曲线的波峰中心在 $a = 26$ 和 $a = 167$ 处。这些变换尺度对应的小波系数如图 4 所示。

A 段小波系数曲线总体上具有较明显的周期性 ,周期长度为 26 像元 ;但样线坐标为 [155 ,199]段波幅较小 ,数据点集中 ,说明这一段对应的景观格局较其前后两段更为均质。总体上 ,小波系数图表明 A 段存在约为 26 像元 (362 m)的特征尺度 ,并存在一个局部粗粒区域。

对于同样位于城郊的 C 段 (代表东南城郊) ,观察发现 ,当变换尺度为 167 时 ,小波变换的波形过于简单 ,再加上边界效应的存在 ,几乎检测不出有价值的信息。当变换尺度为 26 时 ,其小波变换曲线存在约 32 像元 (446 m)的特征尺度 ,大于 A 段检出的结果 ,且没有明显的异质性区域。

B 段 3 个特异的小波变换曲线表明该段存在 3 个不同的特征尺度 ,分别为 21 像元 (292 m)、60 像元 (835 m)和 160 像元 (2200 m)。

2.2.3 Mexican Hat 小波变换分析

样线 A、B、C 上的 DN 值经过 Mexican Hat 小波变换后 ,分别得到各自的小波方差曲线 (图 3)。其中 ,样线 A 曲线的波峰中心在 $a = 7$ 处 ,样线 B 曲线存在两个波峰 ,分别为 $a = 6$ 和 $a = 40$,样线 C 曲线的波峰中心在 $a = 8$ 处。抽取这些变换尺度 ,得到各自的小波系数—样线坐标曲线 (图 5)。

对于 A、C 两段 ,Mexican Hat 小波检测出了和 Morlet 小波一样的特征尺度 ,分别是 26 像元 (362 m)和 32 像元 (446 m)。

对于 B 段 (主城区) ,Mexican Hat 小波可以检测出 21 像元 (292 m)和 160 像元 (2200 m)两个特征尺度 (分别在 $a = 6$ 和 $a = 40$ 处)。

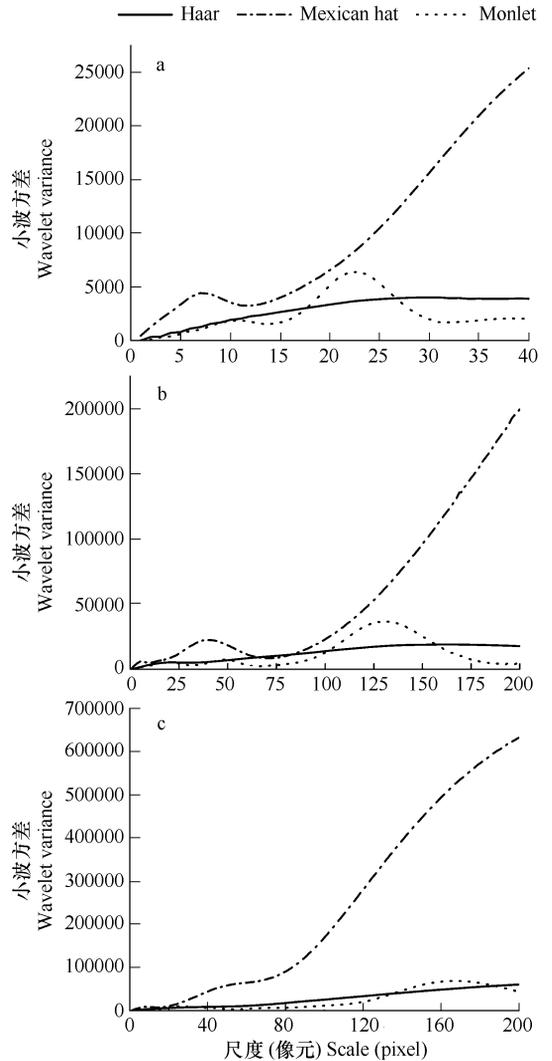


图 3 A、B、C 各样线小波变换方差曲线

Fig. 3 Curves of wavelet variance of line transect A、B、C (a) 样线 A Line transect A ; (b) 样线 B Line transect B ; (c) 样线 C Line transect C

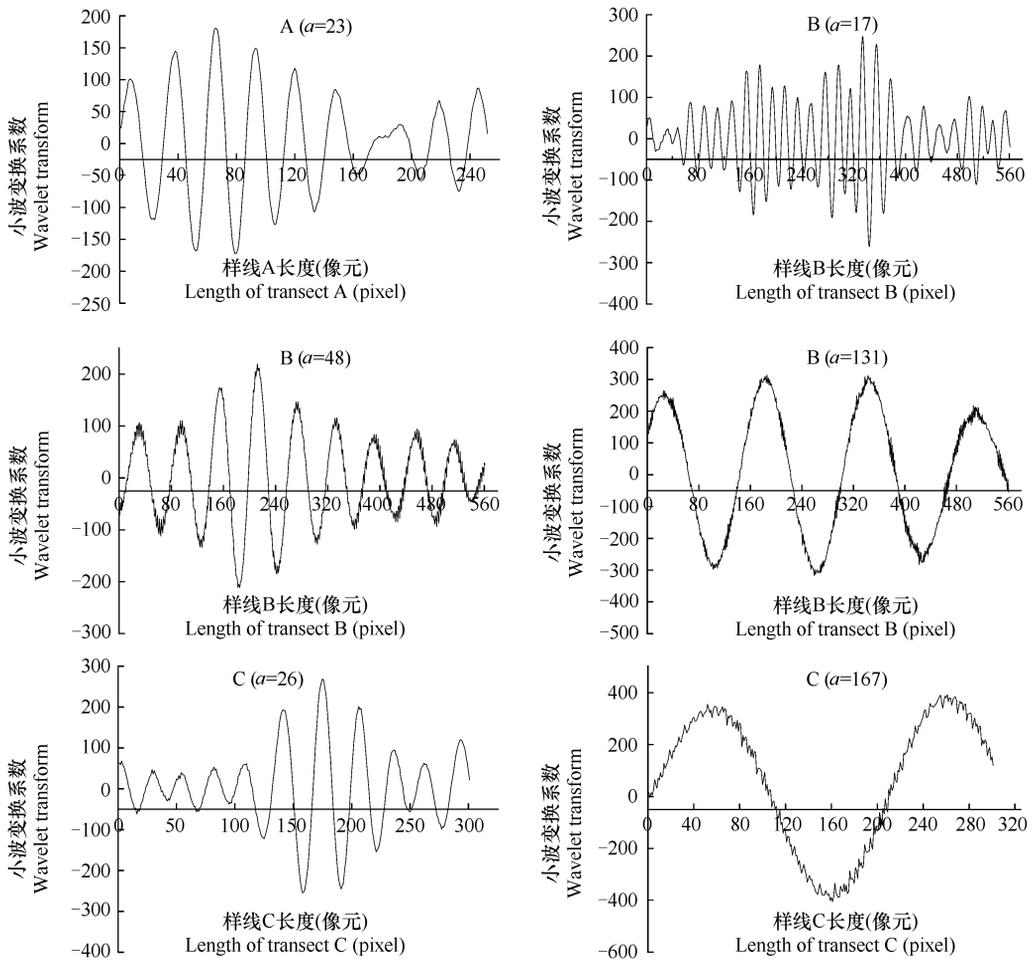


图4 Morlet 小波系数—样线坐标曲线图

Fig. 4 Curves of wavelet transform using Morlet wavelet

3 种小波变换分析结果表明 ,Morlet 基小波能检测到最多的城市结构细节 ,Mexican Hat 基小波检测结果相当于 Morlet 基小波检测结果的一个子集 ,而 Haar 基小波的适用性则相对较差。

2.2.4 主对角线取样有效性验证

为了检验主对角线取样检出的特征尺度的有效性 ,在江北城郊、主城区和东南城郊另外各随机选取三条样线 ,分别标为 A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3 (图 1) ,应用 Morlet 基小波进行一维连续小波分析 ,绘制各自小波方差图并进而检测特征尺度 (表 1)。

表 1 中 29 m 和 33 m 在 B 样线中未检测出 ,从下面表 2 可看出 ,这可能表征了主城区单个建筑物的特征尺度 ;C3 中 214 m 同样未能在 C 样线中检出 ,但类似尺度 C1 和 C2 样线均未检出 ,可认为不能代表东南城郊整体特征尺度。以主对角线检测尺度为数学期望 ,经 *t* 检验 ,相应检出尺度在 0.05 水平上不存在显著差异。可以认为 ,主对角线检测出的特征尺度能够在一定程度上代表整个区域的格局特征 ,因此 ,下面以主对角线 Morlet 小波变换的结果来分析城市景观的结构特征。

2.2.5 城乡粒级结构的比较分析

根据 A、B、C 3 段的检出尺度 ,结合实地观测和土地利用类型 ,确定 3 段共有 8 个主要斑块类型 ,分别为 : A 段 :大块农田、居民区 ,B 段 :单个建筑物、建筑小区、小型街区和大型街区 ,C 段 :大块农田、居民区。在 2.5 m 全色波段影像图上对每个类型分别随机选取了 10 个测量对象 ,统计各样段相应斑块类型的平均粒径 (表 2)。

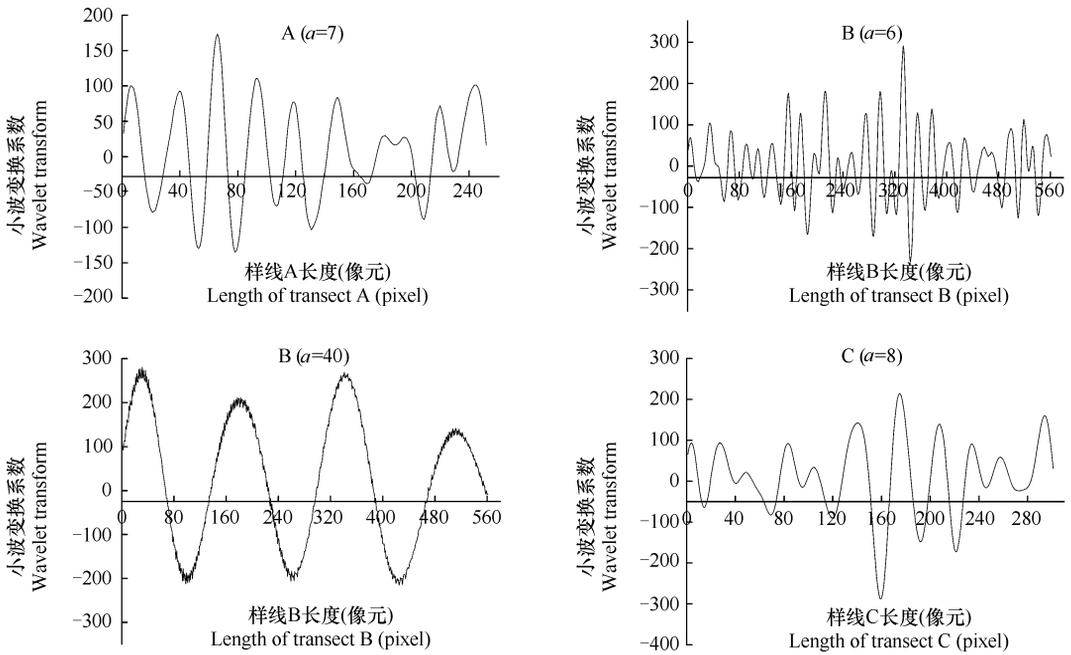


图5 Mexican Hat 小波系数-样线坐标曲线图

Fig. 5 Curves of wavelet transform using Mexican Hat wavelet

表1 各样线小波分析检测出的特征尺度

Table 1 Characteristic scales detected from different transects by using Morlet wavelet analysis

| 样线 Transect | 特征尺度 (m) Detected characteristic scales | | | | 标准差 (m) Standard deviation |
|---|---|------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| | 主对角线 Main diagonal | 随机 1 Random 1 | 随机 2 Random 2 | 随机 3 Random 3 | |
| 江北城郊 Northern suburban (A/A1/A2/A3) | 362 | 376 | 341 | 348 | 18 |
| | - | 29 | 33 | - | - |
| 主城区 Urban area (B/B1/B2/B3) | 292 | 310 | 302 | 325 | 14 |
| | 835 | 843 | 794 | 822 | 21 |
| | 2200 | 2310 | 2115 | 2104 | 95 |
| 东南城郊 Southeast suburban (C/C1/C2/C3) | - | - | - | 214 | - |
| | 446 | 460 | 451 | 431 | 12 |

结果表明,应用 Morlet 小波变换在 A 段检测出的特征尺度对应了南京市江北城郊农田斑块的粒径;C 段检测出的特征尺度对应了东南城郊粒径较大的农田斑块,而 B 段检出的 3 个特征尺度则分别对应于主城区由小巷围成的建筑小区的粒径、次级街道围成的小型街区的粒径以及由一级主要干道切割而成的大型街区的粒径。经 *t*-检验,小波变换得到的特征尺度与相对应的粒径大小间不存在显著差异。

对比表 1、表 2,发现 A、C 段居民区斑块相应的特征尺度未能检出,B 段未能有效检测出单个建筑物水平的特征尺度。分析主要由于多光谱影像分辨率的限制,同时地物个体间变异较大,相应的特征尺度不明显。

有研究指出,生态系统及其空间格局可能存在多尺度等级结构特征^[3,34]。计算结果表明,南京市主城区相对于城郊农业景观而言,具有完全不同的尺度特征。位于城郊的 A、C 段粒径结构相对简单,而主城区则同时存在多个特征尺度。研究发现,城区 3 个主要特征尺度间存在近似 1:3:9 的倍数关系,结合相应特征尺度所代表的地物特征,可以认为城区存在与城郊景观完全不同的具等级结构特征的、由“建筑小区-小型街区-大型街区”构成的粒径嵌套结构,其复杂性远高于城郊景观。

表 2 各样段不同的斑块类型及平均粒径

Table 2 Patch types in transect A, B, C and corresponding average grain sizes

| 样段 Transect | 平均粒径 (m) Average grain size | 对应主要斑块类型 Corresponding main patch type | 描述 Description |
|----------------|--------------------------------|---|---------------------------|
| A | 358 m (SD = 9.5 m) | 大块农田 Large cropland patches | 城郊的主要斑块类型 |
| | 147 m (SD = 31 m) | 居民区 Residential patches | 次要斑块类型, 散布且分布不均匀, 粒径变异程度大 |
| B | 24 m (SD = 4 m) | 单个建筑物 Single buildings | 城区的基本斑块类型 |
| | 288 m (SD = 7.3 m) | 建筑小区 Architectural clumps | 由小巷或小型街道围成的建筑物组合 |
| | 829 m (SD = 11 m) | 小型街区 Small blocks | 由次级街道围成的建筑小区的组合 |
| | 2189 m (SD = 26.8 m) | 大型街区 Large blocks | 由城区主要干道切割形成, 反映了主城区的功能布局 |
| C | 451 m (SD = 10.5 m) | 大块农田 Large cropland patches | 城郊的主要斑块类型 |
| | 175 m (SD = 35.4 m) | 居民区 Residential patches | 次要斑块类型, 散布且分布不均匀, 粒径变化大 |

* SD 为标准差 the standard deviation

3 结论

对于代表江北城郊、主城区和东南城郊的 3 段样线上截取的 DN 值, 分别应用 3 种最常用的基小波进行一维连续小波分析, 结果发现:

(1) 在选用的 3 种基小波中, Morlet 基小波对特征尺度的检测效果最好, Haar 基小波不适合对源于连续型影像数据的景观进行特征尺度检测, 而 Mexican Hat 基小波虽然在进行城郊特征尺度检测时表现出良好的适用性, 但由于其函数和波形相对比较简单, 对于具有复杂粒级结构的景观 (如主城区), 其检测效果不如 Morlet 基小波。

(2) 从小波分析的结果可看出, 南京市江北城郊和东南城郊都存在 1 个特征尺度, 分别为 362 m 和 446 m, 对应于各自农田斑块的平均粒径; 尽管东南城郊土地斑块的粒径稍大, 但两者在景观结构上有较大相似性。而主城区则检测出存在多个特征尺度, 分别是 292 m (对应于建筑小区粒径)、835 m (对应于小型街区粒径) 和 2200 m (对应于大型街区的粒径), 揭示主城区存在比城郊复杂得多的“建筑小区-小型街区-大型街区”的粒级嵌套结构。

References:

- [1] Wu J G. Landscape ecology—concept and theory. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19 (1): 42–52.
- [2] Schneider D C. The rise of the concept of scale in ecology. Bioscience, 2001, 51: 545–553.
- [3] Wu J G. Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [4] Chen Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (2): 346–352.
- [5] Turner M G, O'Neil R V, Gardner R H, et al. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. Landscape Ecology, 1989, 3: 153–162.
- [6] O'Neil R V, Gardner R H, Milne B T, et al. Heterogeneity and spatial hierarchies. In: Kolasa J and Pickett S T A eds. Ecological Heterogeneity. New York: Springer-Verlag, 1991. 85–96.
- [7] Qi Y, Wu J G. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. Landscape Ecology, 1996, 11 (1): 39–50.
- [8] Yue T X, Liu J Y. Issues on multi-scales in ecogeographical modeling. Quaternary Sciences, 2003, 23 (3): 256–261.
- [9] Zhao W W, Fu B J, Chen L X. Some fundamental issues in scaling. Advance in Earth Sciences, 2002, 17 (6): 905–911.
- [10] Liu M S, Zhang M J. Landscape ecology—principle and method. Beijing: Chemical Engineering Press, 2004.
- [11] Wu J G, Jelinski E. J, Luck M, et al. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: Scale variance and pattern metrics. Geographic Information Sciences, 2002, 6: 6–16.

- [12] Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology. Beijing :Scientific & Technological Press ,1999. 65 – 100.
- [13] L Y H ,Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica* ,2001 ,21 (12) :2096 – 2105.
- [14] Rossi R E ,Mulla D J ,Journel A G ,*et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* ,1992 ,62 (2) :277 – 314.
- [15] Ripley B D. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability* ,1976 ,13 (2) :255 – 266.
- [16] Diggle P J. Statistical analysis of spatial point patterns. London :Academic Press ,1983.
- [17] Zhang J T. Quantity ecology. Beijing :Scientific & Technological Press ,2004.
- [18] Pierre Durilleul. Incorporating Scale in Ecological Experiment : Data Analysis. In : David Peterson , V. Thomas Parker eds. *Ecological scale : Theory and Application*. Columbia :Columbia University Press ,1998. 387 – 425.
- [19] Fortin M J. Effects of sampling unit resolution on the estimation of spatial autocorrelation. *Ecoscience* ,1999 ,6 (4) :636 – 641.
- [20] Renshaw E ,Ford E D. The description of spatial pattern using two-dimensional spectral analysis. *Vegetation* ,1984 ,56 :75 – 85.
- [21] Sugihara G ,May R M. Applications of fractals in ecology. *Trends in Ecology & Evolution* ,1990 ,5 :79 – 86.
- [22] Cullinan V I ,Simmons M A ,Thomas J M. A Bayesian test of hierarchy theory :Scaling up variability in plant cover from field to remotely sensed data. *Landscape Ecology* ,1997 ,12 (5) :273 – 285.
- [23] Bradshaw G A ,Thomas A Spies. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology* ,1992 ,80 :205 – 215.
- [24] Monica G. Turner. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology* ,1999 ,4 (1) :21 – 30.
- [25] Zu Y G ,Zhao Z H ,Cong P T ,*et al.* An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19 (6) :927 – 931.
- [26] Sun D F. Identifying multi-scale spatial patterns of landscape from wavelet and semivariogram analysis of IKONOS PAN remote sensing data. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 (3) :405 – 413.
- [27] Chui C K ,Cheng Z X ,Trans. *An Introduction to Wavelets*. Xi'an :Xi'an Jiao Tong University Press ,1995. 80 – 86.
- [28] Liu J P ,Tian F W ,Huang Q. A multiple time scales analysis of the runoff variation along the upper reaches of the yellow river. *Journal of Applied Sciences* ,2003 ,21 (2) :117 – 121.
- [29] Zhang D G ,Hao X C ,Gao G L ,*et al.* Analysis of sand landscape pattern using wavelet transform. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* ,2001 ,22 (1) :25 – 28.
- [30] Xu J H ,Fang C L ,Yue W Z. An analysis of the mosaic structure of regional landscape using GIS and remote sensing. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,32 (2) :365 – 375.
- [31] Li T S ,Heterogeneity and its maintenance of urban landscape. *Chinese Journal of Ecology* ,1998 ,17 (1) :70 – 72.
- [32] Wu J G ,Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology :An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology* ,2002 ,17 (4) :355 – 365.
- [33] Yue W Z ,Xu J H ,Tan W Q ,*et al.* Spatial scale analysis of the diversities of urban landscape :A case study within the external circle highway of Shanghai City. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (1) :122 – 128.
- [34] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* ,1992 ,73 :1943 – 1967.

参考文献 :

- [1] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志* 2000 ,19 (1) :42 ~ 52.
- [3] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京 :高等教育出版社 2000.
- [4] 陈玉福 ,董鸣. 生态学系统的空间异质性. *生态学报* 2003 ,23 (2) :346 ~ 352.
- [8] 岳天祥 ,刘纪远. 生态地理建模中的多尺度问题. *第四纪研究* 2003 ,23 (3) :256 ~ 261.
- [9] 赵文武 ,傅伯杰 ,陈利项. 尺度推绎研究中的几点基本问题. *地球科学进展* 2002 ,17 (6) :905 ~ 911.
- [10] 刘茂松 ,张明娟. 景观生态学——原理与方法. 北京 :化学工业出版社 2004.
- [12] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京 :科学出版社 ,1999. 65 ~ 100.
- [13] 吕一河 ,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转移方法. *生态学报* 2001 ,21 (12) :2096 ~ 2105.
- [17] 张金屯. 数量生态学. 北京 :科学出版社 2004.
- [25] 祖元刚 ,赵则海 ,丛沛桐 ,等. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林窗分布规律的小波分析研究. *生态学报* ,1999 ,19 (6) :927 ~ 931.
- [26] 孙丹峰. IKONOS 影像景观格局特征尺度的小波与半方差分析. *生态学报* 2003 ,23 (3) :405 – 413.
- [27] 崔锦泰著. 程正兴译. 小波分析导论. 西安 :西安交通大学出版社 ,1995. 80 ~ 86.
- [28] 刘俊萍 ,田峰巍 ,黄强. 黄河上游河川径流变化多时间尺度分析. *应用科学学报* 2003 ,21 (2) :117 ~ 121.
- [29] 张德干 ,郝先臣 ,高光来 ,等. 小波变换用于沙漠化土地景观格局的分析. *东北大学学报 (自然科学版)* 2001 ,22 (1) :25 ~ 28.
- [30] 徐建华 ,方创琳. 基于 RS 与 GIS 的区域景观镶嵌结构研究. *生态学报* 2003 ,23 (2) :365 – 375.
- [31] 李团胜. 城市景观异质性及其维持. *生态学杂志* ,1998 ,17 (1) :69 ~ 72.
- [33] 岳文泽 ,徐建华 ,谈文琦. 城市景观多样性的空间尺度分析——以上海市外环线以内区域为例. *生态学报* 2005 ,25 (1) :122 ~ 128.