

# 景观生态学中的尺度分析方法

蔡博峰<sup>1,2</sup>, 于 嵘<sup>3</sup>

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037;

3. 广西壮族自治区环境保护科学研究所, 南宁 530022)

**摘要:**多尺度空间分析法是发现和识别景观特征尺度的主要方法。当前这类方法很多, 缺乏归类 and 对比分析评价。基于空间类型变量和数值变量, 对多尺度空间分析方法进行了重新梳理。同时对当前常用的尺度分析方法: 半方差分析、尺度方差分析、小波分析和孔隙度指数分析, 以中国三北防护林为例, 对比了各种尺度分析方法的特点和优劣。结果表明, 在特征尺度的识别上: 小波方差方法清晰明了; 半方差分析法灵活简捷, 结果明显; 尺度方差分析法和孔隙度指数法在本研究中的判识结果不甚明显。在计算速度上: 半方差分析法计算量最大、耗时最长, 尺度方差次之, 小波方差速度最快, 孔隙度指数法计算速度快于前两种, 慢于小波方差分析方法。半方差分析方法简单灵活, 而且相关理论方法成熟, 但缺乏对大尺度格局的整体把握, 而小波分析恰恰能很好的弥补这一不足。最后提出, 半方差分析和小波变换相结合将会是最优的尺度分析方法。

**关键词:**尺度分析方法; 特征尺度

文章编号: 1000-0933(2008)05-2279-09 中图分类号: Q149 文献标识码: A

## Comparison on spatial scale analysis methods in landscape ecology

CAI Bo-Feng<sup>1,2</sup>, YU Rong<sup>3</sup>

1 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037, China

3 Environmental Protection Research Institute of Guangxi, Nanning 530022, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2279 ~ 2287.

**Abstract:** Multi-scale analysis is the main method in identifying landscape spatial characteristics, but lack of classification and comparison evaluation concerning so many different methods used in present ecological researches. These multi-scale analysis methods were categorized based on spatial numerical variable and type variable. In order to compare and evaluate these methods, taking Three-North shelter forest as a study case, the commonly used methods were implemented to identify the characteristic scale. The results showed that the wavelet had a reasonable and clear process, and its outcome measures were time saving. The semivariance was much flexible and its results were clear but consuming time. The outcome of scale variance and lacunarity for characteristic scale detecting were almost indiscernible. We concluded that the most optimal way of scale analysis lied in the combination of semivariance and wavelet. Since the former's theory and application is simple and robust but can not provide the holistic understanding which can be made up by the latter.

**Key Words:** scale analysis; spatial characteristic scale; methods comparison and evaluation

空间格局与过程是生态学的重要范式, 若要正确理解格局与过程的关系就必须认识到其所依赖的空间尺度特点<sup>[1~3]</sup>, 即把握这种关系或者现象发生的特征(characteristic)尺度(或本征(intrinsic)尺度)。多尺度空

收稿日期: 2007-05-25; 修订日期: 2008-02-28

作者简介: 蔡博峰(1977~), 男, 陕西岐山县人, 博士生, 主要从事生态遥感研究。E-mail: caibofeng@gmail.com

Received date: 2007-05-25; Accepted date: 2008-02-28

Biography: CAI Bo-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecological remote sensing. E-mail: caibofeng@gmail.com

间分析是进行尺度效应分析的基础,是发现和识别景观等级结构和特征尺度的主要方法。

当前景观格局多尺度分析已经成为特征尺度分析的关键环节,各研究者采用多尺度分析的方法差异很大。如果说景观特征尺度是由内在生态过程决定的<sup>[1~3]</sup>,其大小不随观测者的方法而改变,因而研究方法的准确性和可靠性就极为重要。同一研究对象,采用不同的多尺度分析方法,能否得到同一特征尺度。当前众多的方法缺乏较为全面的理论评价和实例对比研究。因而各类方法的优劣和可靠性难有定论,这种不足极大影响了特征尺度的判断和进一步应用,鉴于此,本文首先对各类方法进行理论上的讨论和梳理,之后选择研究案例对典型方法进行对比,基于此分析各种方法的可靠性和优缺点,最后提出最优景观格局多尺度分析方法。

## 1 多尺度分析方法评述

生态学中多尺度空间分析方法很多,学者张娜<sup>[2]</sup>总结为三大类:分维分析法、空间统计学方法和景观指数法。分维分析法本质上是景观指数法的一种,景观生态学计算的分维数(包括面积加权平均分维数(AWMPFD),双对数分维数等(DLFD)),都是单一尺度下的所有斑块面积周长的函数,因此斑块或景观类型在不同尺度下会有不同的分维数,这和传统的分维数在概念和计算方法上有很大差别<sup>[4]</sup>,因而结论也有很大差异。传统生态学中的分维数计算往往通过多尺度回归计算<sup>[5]</sup>,一般采用栅格法(grid method),对于线性要素多采用栅格大小和长度的双对数回归,对于面状要素,多采用不同栅格下面积和周长的双对数回归。计算方法如: $\ln N(r) = C + D \ln M(r)^{1/2}$  ( $D$  为分维数,  $N(r)$  为覆盖边界的栅格数目,  $M(r)$  为覆盖面积的栅格数目,  $C$  为常数),通过不同大小正方形栅格覆盖下获得一系列点对( $\ln N(r)$ ,  $\ln M(r)$ ),然后线性拟合这些点对,求得分维数。线性拟合为一条直线,表现为一个分维数,但如果景观有等级结构,则点对表现为阶梯形或者折线形式<sup>[5]</sup>,说明景观在不同的尺度区间出现不同分维数,转折点即为特征尺度。

由于上述差异,Kojima 等人<sup>[4]</sup>发现,采用景观生态学中的分维数(DLFD,MPFD 和 AWMPFD)计算结果要小于传统意义的分维数,并且和 Wu 等人<sup>[6]</sup>的结论一致,景观生态学中的分维数(Wu 等人采用的是 DLFD)在分辨率和研究范围大小有序变换的同时,出现无序变换,因而很难判断特征尺度。

景观指数法和空间统计学方法的本质区别在于其研究的空间变量的属性差异。景观指数法研究对象仅限于类型变量,即空间变量的属性只是区别于其他类型的代码,其值的大小没有意义,并且不参与计算,例如土地利用类型,而空间统计学方法则更主要的应用于数值变量,即空间变量的属性大小有明确的意义,例如 NDVI(植被指数)、NPP(净第一性生产力),生物量等的空间分布,其属性值参与计算。

因而多尺度空间分析方法可以概括为两大类:空间统计学方法和景观指数法。孔隙度指数法应归属于景观指数法而不是空间统计方法,因为该方法也只适用于类型变量,每个栅格只有状态属性(即某类型出现或者不出现),而没有数值属性(值的大小)。

空间统计学方法包括半方差分析、空间自相关性分析、尺度方差分析、聚块样方方差分析、趋势面分析、小波分析和谱分析等。这类方法本身就是多尺度的,根据相应指标随尺度变化的趋势和转折,检测景观的空间格局特征。空间统计学方法在景观多尺度分析中发挥着越来越重要的作用。

在过去 20a,景观指数在揭示格局的尺度效应和多尺度特征上发挥了巨大作用,其通过计算不同粒度下的一个或多个景观指数的变换,对其进行多尺度分析,从而探寻景观的尺度特征<sup>[6,7]</sup>。但是,Wu<sup>[8]</sup>指出,在景观指数的尺度图中突变和转折比较少见,即使有,也不能确定它暗示着等级结构的存在或等级层次水平。因此,景观指数法近些年在多尺度分析中使用较少,但孔隙度指数分析仍是较为常用的景观多尺度分析方法。

根据上述讨论,本文甄选出常用和主流的多尺度分析方法:半方差分析、尺度方差分析、小波分析和孔隙度指数分析法(其中前 3 个为空间统计学方法,后一个为景观指数法),以中国三北防护林为例,研究和检测其特征尺度,从而对比分析各种尺度分析方法特点和优劣。

## 2 多尺度分析方法对比研究

### 2.1 方法机理和特征

#### 2.1.1 半方差分析(semivariance)

半方差函数<sup>[7,9~12]</sup>已经成为生态学中分析变量空间结构的主要工具,它是方向和样点对间距的函数,反

映空间变量的自相关性。半方差函数详细计算过程见文献<sup>[10]</sup>,半方差函数的数学表达式为:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2$$

式中,  $\gamma(x, h)$  为半方差函数,  $Z(x+h)$  和  $Z(x)$  分别是在采样点  $x+h$  和  $x$  的测定值,  $h$  为每对数据采样点的间隔。半方差函数是了解区域化变量的相关性(相关程度, 相关范围), 空间场的各向异性, 空间场的尺度特征, 空间场的周期性特征的重要方法。

通过半方差图(实验半方差函数图)可以检测景观格局的特征尺度和等级结构特征。受空间自相关性的影响, 某一格局或过程变量的半方差在较小取样间距上的值较小; 随着取样间距的增大, 半方差值也增大, 并逐渐趋向平稳, 甚至呈现下降趋势, 此取样间距被称为自相关阈值<sup>[2, 10, 13]</sup>。在此自相关阈值范围内, 格局或过程变量之间具有较强的空间自相关性, 可近似认为格局或过程发生在同一尺度域内; 而超过该阈值, 格局或过程变量之间近似相互独立, 表现出较弱的空间自相关性和较强的随机性, 认为格局或过程发生在不同尺度域内。因此, 可用自相关阈值近似表示景观的特征尺度。

### 2.1.2 尺度方差分析法(scale variance)

尺度方差是将整个系统的方差按照尺度等级系统的水平逐渐分解。因此, 尺度方差发生突变的尺度也是空间变异性突出的尺度, 同时也指示不同等级水平上的特征尺度<sup>[7, 9]</sup>。不同尺度上尺度方差发生突变的相对大小指示不同尺度上格局或过程的变化对整个景观变异性贡献的相对大小。因此, 尺度方差分析的结果可用于来识别那些在功能上值得重点研究的等级水平或空间尺度。尺度方差统计模型详见文献<sup>[7, 9]</sup>, 公式为:

$$X_{ijk...z} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ijk} + \dots + \bar{\omega}_{ijk...z}$$

式中,  $X_{ijk...z}$  表示等级系统最低层次上某组成单元的取值,  $\mu$  表示在这一层次上系统的基本组成单元的总平均值, 其余各项分别表示来自各个层次上的影响( $\alpha, \beta, \gamma, \bar{\omega}$  表示等级系统的不同层次), 其中  $\alpha_i$  表示系统分解的最高层次的影响。

尺度方差分析法在生态学中的应用并不多, 20 世纪 80 年代末开始就有通过尺度方差方法来分析 NDVI 等尺度特征<sup>[14~16]</sup>, 但主要是辅助遥感分析。

### 2.1.3 小波分析(wavelet analysis)

小波分析是傅立叶分析的突破性进展。它同时具有时域和频域的良好局部化性质, 且随着信号不同频率成分在时空域取样的疏密自动调节。小波分析能多尺度对时、空格局进行分析, 也能将格局、尺度与具体空间位置明确地表示出来。借助小波分析理论, 可以检测和提取空间格局的多尺度特征, 并通过小波系数来表达。作为一种多尺度分析的数学工具, 近年来小波分析被较多地应用到地学和生态学研究, 试图揭示自然或生态因子的多尺度格局<sup>[7, 12, 17~22]</sup>。小波系数反映了信号与小波基在不同尺度下的相关程度<sup>[23, 24]</sup>, 小波系数是一定观测尺度下信号局部变异强度的度量, 变异越大, 小波系数的值越高。

小波方差可以看作信号序列在单一尺度下的平均能量。小波方差是尺度的函数, 与位置无关, 在识别特征尺度上直观、方便, 因而可以通过小波方差的峰值大小及峰值出现的尺度揭示景观的格局特征<sup>[2, 12]</sup>。

当前利用小波分析景观空间尺度特征大多是一维的<sup>[18, 20, 22, 25]</sup>, 因此小波函数也是一维。二维小波分析与一维小波分析方法类似。由于二维小波分析理论出现和成熟得较晚, 因此目前二维小波分析在生态学中的应用尚少<sup>[12]</sup>。本文进行的是二维小波变换, 二维小波分析的具体推导过程和公式见文献<sup>[23, 24]</sup>, 小波方差为:

$$V(b) = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n W^2(b, x_i, y_i)$$

式中,  $V(b)$  是小波方差,  $W(b, x, y)$  是小波系数。二维小波方差是在某个尺度上网格数据上所有小波系数平方的均值。

### 2.1.4 孔隙度指数(lacunarity index)

孔隙度指数<sup>[26, 27]</sup>的概念是 1983 年由 Mandelbrot 提出的。Allain 和 Cloritre 在 1991 年采用滑箱运算法则进行孔隙度指数的计算, 研究景观的空间格局。在一个给定的尺度下, 孔隙度指数能反映出同一景观区域内

不同采样点间相似性或差异性程度。景观的异质性受尺度影响,在小尺度下表现为高度异质性,在大尺度下可能表现为同质。

孔隙度指数的计算是通过滑箱运算法则实现的<sup>[26]</sup>,将所研究的区域划分为网格,记录网格中景观组分出现或缺失的情况。以不同边长的滑箱从采样区的左上角向右或向下滑动,保证采样点间有重叠的部分。记录每次采样时滑箱内景观组分出现的频数。滑箱滑过整个区域后,对采样数据进行统计,计算一定尺度下的孔隙度指数,计算公式为:

$$Z^{(1)} = \sum S(n(s,r)/N(r))$$

$$Z^{(2)} = \sum S^2(n(s,r)/N(r))$$

$$\Lambda(r) = Z^{(2)} / (Z^{(1)})^2$$

式中, $\Lambda(r)$ 为空隙度指数; $N(r)$ 为以 $r \times r$ 滑箱滑动整个区域采样的总次数,其计算公式为 $N(r) = (M - r + 1)^2$ , $M$ 为区域的边长; $S$ 为景观组分在滑箱中出现的频数; $n(s,r)$ 为出现 $s$ 个景观组分的滑箱个数。

## 2.2 研究区域和数据

三北防护林地区位于 $E73^{\circ}26' \sim E127^{\circ}50'$ , $N33^{\circ}30' \sim N50^{\circ}12'$ ,东西长4480km,南北宽560~1460km,总面积406.9万 $\text{km}^2$ <sup>[28]</sup>。本研究主要使用的数据为中国土地利用矢量数据和MODIS 1kmNDVI(归一化植被指数)栅格数据。土地利用矢量数据来自于中科院地理所编制的1:100万中国土地利用矢量数据。该数据是在大量实地考察的前提下建立分类系统,通过对1996年至2000年间多幅TM遥感影像(30m分辨率)解译判读而来。从土地利用矢量中提取三北防护林地区林地矢量边界,包括有林地(指郁闭度>30%的天然林和人工林,包括用材林、经济林、防护林等成片林地),灌木林地(指郁闭度>40%、高度在2m以下的矮林地和灌丛林地)和疏林地(指郁闭度为10%~30%的稀疏林地)。

除孔隙度指数是基于土地利用矢量数据转化得到的栅格数据(1km)外,其它空间分析算法都是基于MODIS的NDVI(1km)通过空间掩膜得到的数据。

NDVI能够有效地反映植被的覆盖程度、长势和光合作用强度等<sup>[29,30]</sup>。由于三北防护林地区植被生长旺盛期主要集中在7~9月份<sup>[31,32]</sup>,因此将7月、8月和9月份的MODIS NDVI(1km)8d合成数据,采用最大化处理MVC(Maximum value composites),使最终图像中每一像元代表7~9月份NDVI的最大值,该处理的目的是使研究使用的NDVI能最大限度的反映该地区的植被状况<sup>[33,34]</sup>。之后,利用三北防护林地区林地的矢量边界掩膜出林地的NDVI值作为本研究的分析数据。

## 2.3 结果

### 2.3.1 半方差分析结果

半方差函数的计算通过VB编程运算,结果见图1。为了确保半方差函数有意义,一般抽样间距不超过研究区域的 $1/2$ <sup>[7]</sup>。采用各向同性半方差函数分析,共分40组,间距取40km,距离容差取20km。计算完成后,利用球状模型模拟半方差函数,结果见图1。理论模拟最优结果为:块金常数0.05,变程510,拱高0.25。变程也叫独立间距,表示当变量观测值之间的距离大于该值时,说明它们之间是相互独立的;若小于该值时,则说明它们之间存在着一定的相关关系。因此,变程也称为自相关阈值,可用来表示景观的特征尺度。因此,根据半方差函数的分析,三北防护林地区的林地景观的特征尺度为510km。

### 2.3.2 尺度方差分析结果

尺度方差的计算通过VB编程完成,结果见图2。尺度方差分析在识别景观格局上的优势是对变量的多尺度格局非常敏感,因此,该法非常适用于多尺度格局表现不很明显的景观变量<sup>[2,7]</sup>。由于三北防护林地区近似矩形,为了能最大程度逼近其形状,又能使分析栅格的大小满足巢式等级结构,所以最大分析栅格选择 $1024\text{km} \times 2160\text{km}$ ,依次以2的幂次方降低。从图2中可以看出,尺度方差持续下降,在 $512\text{km} \times 540\text{km}$ 处出现平缓和上升,并在 $1024\text{km} \times 1080\text{km}$ 的尺度上出现小峰,暗示着景观格局的特征尺度位于510~1000km的区间内。

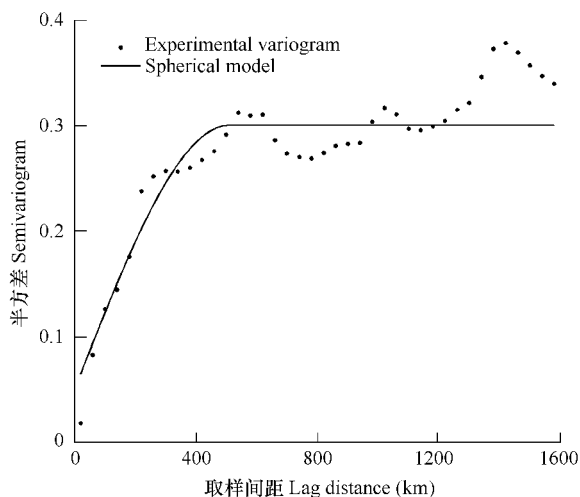


图1 半方差图

Fig. 1 Semivariogram

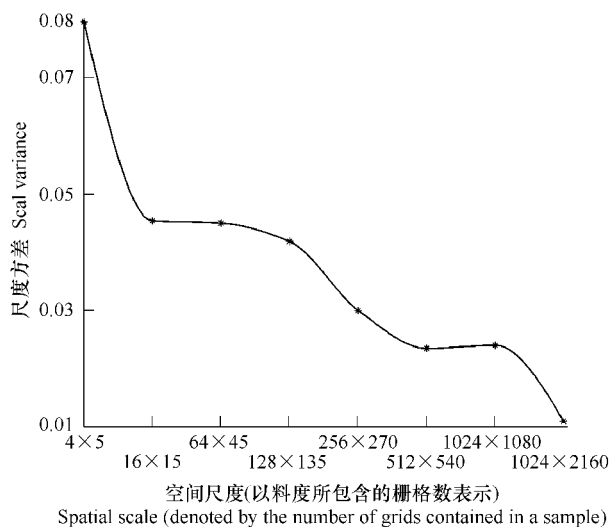


图2 尺度方差分析

Fig. 2 Scale variance

### 2.3.3 小波方差分析结果

小波方差分析是基于 MATLAB7.0 完成的。利用 Daubechies 小波对研究区域从 1 到 11 逐层分解,与一维小波变换不同的是,二维小波变换后的每个尺度上的系数是四维的,包括低频系数,水平、垂直和对角高频系数。低频系数一般称为尺度系数,后三者称为小波系数。计算结果小波方差—尺度图见图 3。小波方差在 512km 处出现高峰,表示林地景观结构信息主要集中在该特征尺度上。二维小波分析可以形象地解释为<sup>[35]</sup>:用一个格局规模为  $b$  的小波模板,沿研究区域移

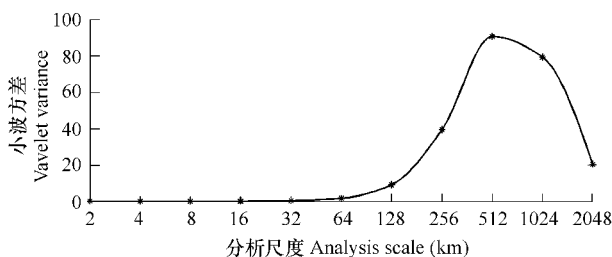


图3 小波方差分析

Fig. 3 Wavelet variance scalogram

动并与栅格数据进行比较,把规模大于和小于  $b$  的格局都过滤掉,分离出给定规模尺度  $b$  的格局。与小波分析类似,小波变换后的小波系数越高,则表示分析区域内的格局与模板吻合程度越高。小波变换是基于小波基函数在各尺度的精准展开,因此在选择适当小波基的前提下,小波变换对二维(或者多维)空间格局,尤其是空间数值变量,有很好的分解,能非常准确的把握景观格局中的特征尺度。

当然小波分析在生态学中的应用也存在不足,小波基的不同选择会对结果产生一定影响。由于二维小波变换在生态学中应用较少,因而还有待发展,同时二维变换要求尺度变换必须是 2 的整数次幂,这就存在着无法精准识别一些特征尺度的可能。

### 2.3.4 孔隙度指数分析结果

孔隙度指数法是基于类型变量的,因此需要将三北防护林地区林地的矢量数据转为 1km 栅格数据进行分析。根据 VB 编程,计算边长从 1 ~ 1600km 共 18 个滑动框大小的孔隙度指数,绘制孔隙度指数与滑动窗口大小的双对数曲线,见图 4。

孔隙度指数随尺度变化的对数曲线斜率有明显变化,表明景观格局存在特征尺度。由于对数曲线在尺度较小时下降得非常缓慢,只有当尺度增大到一定程度时才开始迅速下降,并且快速接近于零,表明:当尺度小于该尺度时,景观要素呈明显的聚集分布,该尺度为景观要素的特征尺度<sup>[2,26,27,36]</sup>。从图中,双对数曲线的转折并不十分明显,根据以往学者的研究文章<sup>[37~40]</sup>,孔隙度指数和滑窗大小的双对数曲线都没有表现出非常明显的转折,因此转折点很难判断。因而本文采用 5 次多项式拟和双对数曲线(拟和度为  $R^2 = 0.965$ ),拟和曲

线微分绝对值的最大点便为曲线的最大拐点。根据计算,得到最大拐点处为 6.26,对应的滑窗大小为 523km。即根据孔隙度判断的三北林地的特征尺度为 523km。

## 2.4 结果验证

通过分析三北防护林地区林地斑块的空间自相关 Moran's I 和 Geary's C,验证前述 4 类方法的结果<sup>[7]</sup>。Moran's I 降低平稳值和 Geary's C 升高平稳值都基本在 ~500km 左右,因此可以说明上述 4 类方法计算的特征尺度是合理准确的。

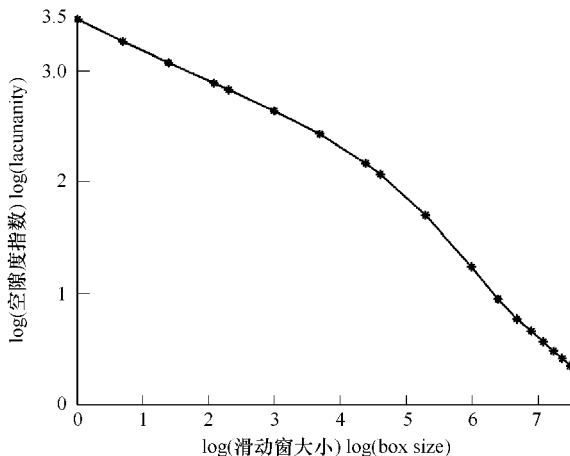


图 4 孔隙度指数与滑动框大小的双对数图

Fig. 4 Log-log plots of lacunarity versus gliding box size

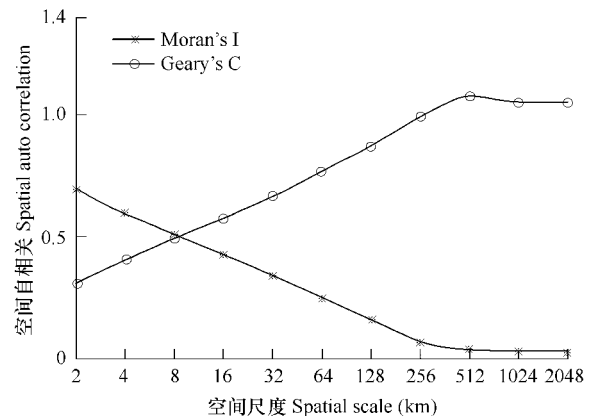


图 5 空间自相关系数

Fig. 5 Spatial autocorrelation index

## 3 结论与讨论

4 类景观特征尺度的分析方法中,孔隙度指数判断的效果最不明显,孔隙度指数是基于类型变量进行计算的,然而土地利用类型中林地是较为复杂的一种。同样的类型属性,其自然生态属性诸如覆盖度、生物量和叶面积指数等,可能差距很大,因此基于数值属性分析空间格局的特征就非常重要,而且也更加科学合理,完全基于类型数据的空间分析,很可能发现不了空间格局特征和特征尺度。

从 4 种方法的分析结果看,三北防护林地区的林地景观空间格局的特征尺度约在 510 ~ 530km 之间。以下是 4 种方法的比较:

### (1) 对特征尺度的识别

小波方差的方法清晰明了,而且数学逻辑严密。可以明显看出 510km 左右是林地主导的特征尺度。小波方差分析的中间过程,即小波变换后的高频、低频系数的空间分布依然有生态意义,通过在不同尺度上对其进行重构,可能会对空间格局有新的发现和认识。

二维甚至多维小波分析在生态学中的应用潜力很大,但同时二维小波分析也存在不足和难点,不同于二维小波分析可以任意选择小波尺度,二维小波尺度只能是 2 的整数次幂,因此很大程度上限制了小波变换判断特征尺度的灵活性。

半方差函数是当前判断景观格局特征尺度应用最为广泛的一种方法,该方法有很好的灵活性,对于数值属性分析有独到的优势。但该方法的不足之处在于计算量非常大,并且计算结果需要进一步理论模拟,才能较好地揭示生态参数。

尺度方差分析是采用将总方差逐尺度分解的方法,但其每层的空间尺度(栅格个数)的不同会影响分析结果,而这种空间尺度的确定明显受到研究区域形状的影响(本文研究区域为矩形),因而在本文研究中,该方法的判别结果不甚明显。这也许能解释该方法并不复杂,但却未得到广泛应用的原因。

### (2) 计算速度

半方差函数计算量最大、耗时最长,尺度方差次之,这两种算法需要在每个尺度上检索并计算每个像元的数值。小波方差是速度最快的,原因是小波变换是逐层计算的,因此每个尺度的分解不需从原始像元开始计算,而是基于上层分解。孔隙度指数也是需要逐像元检索,但由于其计算是基于类型属性的,在本研究中只是进行 0/1 判断,因此速度快于前两种,慢于小波方差分析方法。

遥感海量数据的指数积累速度已经远超过了计算机处理能力的提高速度,因此,算法的优劣已经成为数据挖掘和信息获取的决定性因素,所以小波变换方法在处理大量数据时的优势会更加明显。

### (3) 空间分析的最优方案

任何一种空间格局分析的方法都有其特点和不足,判断优劣的依据是这种方法的研究对象和分析思路是否更接近于我们研究的景观空间格局的特征和形成过程。

半方差分析方法在生态学中之所以广泛应用,在于它的分析思路能揭示生态影响随距离递减的事实,但不足在于很难对大尺度的整体格局有个明晰的认识,而小波分析恰恰能很好地弥补这一不足。因而,本文研究认为,半方差分析和小波变换的结合,对把握景观空间特征和分析景观特征尺度有明显的优势。

### Reference:

- [ 1 ] Levin Simon A. The Problem of Pattern and Scale in Ecology. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943 — 1967.
- [ 2 ] Zhang N. Scale issues in ecology: concepts of scale and scale analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2340 — 2355.
- [ 3 ] Turner Monica G, O'Neill Robert V, Gardner Robert H, *et al.* Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1989, 3: 153 — 162.
- [ 4 ] Kojima Naoko, Laba Magdeline, Liendo Ximena M Velez, *et al.* Causes of the apparent scale independence of fractal indices associated with forest fragmentation in Bolivia. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 61: 84 — 94.
- [ 5 ] Sugihara George, May Robert M. Applications of fractals in ecology. *Tree*, 1990, 5(3): 79 — 86.
- [ 6 ] Wu J G, Shen W J, Sun W Z, *et al.* Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landscape Ecology*, 2002, 17: 761 — 782.
- [ 7 ] Wu J G, *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [ 8 ] Wu Jianguo. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 125 — 138.
- [ 9 ] Gong J Z, Xia B C, Li N. Characteristics of Scale and Hierarchical Structure of Landscape System under Different Heterogeneities of Land Cover Patterns in Guangzhou City. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 873 — 881.
- [ 10 ] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [ 11 ] Chen J Q, Li B, Ma Z J, *et al.* *The Challenges Faced by Ecologist*. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [ 12 ] 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 — 403.
- [ 13 ] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651 — 657.
- [ 14 ] Townshend J R G, Justice C O. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9: 187 — 236.
- [ 15 ] Townshend J R G, Justice C O. The spatial variation of vegetation changes at very coarse scales. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11: 149 — 157.
- [ 16 ] Justice C O, Townshend J R G, Kalb V L. Representation of vegetation by continental data sets derived from NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12: 999 — 1021.
- [ 17 ] Cosh Michael H, Brutsaert Wilfried. Microscale structural aspects of vegetation density variability. *Journal of Hydrology*, 2003, 276: 128 — 136.
- [ 18 ] Li S C, Gao W M, Zhou Q F, *et al.* Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198 — 4203.
- [ 19 ] Zhao Z H, Zu Y G, Cong P T. Haar Wavelet Decomposition of Main Soil Factors in Liaotungensis Forest in Dongling Mountain Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198 — 4203.

- Sinica, 2002, 22(10): 1660 — 1665.
- [20] 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.
- [21] Zhou L Y, Zhou S Z, Wang F. Multi-time scales analysis of climate variation in leizhou peninsula during 1951 to 2003. *Journal of South China Normal University(Natural Science)*, 2005, (2): 43 — 51.
- [22] Keitt Timothy H, Urban dean L. Scale-specific inference using wavelets. *Ecology*, 2005, 86: 2497 — 2504.
- [23] Mix Dwight F, Olejniczak Kraig J. *Elements of Wavelets for Engineers and Scientists*. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [24] Feisike technology research center. *Wavelet theory and MATLAB7 application*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [25] Bradshaw G A, Spies Thomas A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1992, 80: 205 — 215.
- [26] Plotnick Roy E, Gardner Robert H, O'Neill Robert V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*, 1993, 8(3): 201 — 211.
- [27] Plotnick Roy E, Jr John Sepkoski. A multiplicative multifractal model for originations and extinctions. *Paleobiology*, 2001, 27(1): 126 — 139.
- [28] Three-North shelter forest development bureau of forest department. *The master plan of China Three-North shelter forest system development*. Yinchuan: Ningxia People Press, 1993.
- [29] Liang Shunlin. *Quantitative Remote sensing of Land Surfaces*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [30] Zhao Y S. *Principle and Methods for Remote Sensing Applications*. Beijing: Science Press, 2003.
- [31] Li X B, Chen Y H, Zhang Y X, *et al.* Impact of climate change on desert steppe in northern China. *Advance In Earth Sciences*, 2002, 17(2): 254 — 261.
- [32] Li Y C, Gong P, Liu C X, *et al.* Vegetation Cover Changes and Correlation with Climatic Factors in Northern China During 1982 — 1999. *Resources Science*, 2006, 28(2): 109 — 117.
- [33] Lu L, Li X, raete Frank Veroust. Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026 — 1033.
- [34] Zhun J F. *Natural resources and comprehensive agriculture zoning of Three-North shelter forest district*. Beijing: China forestry Publishing House, 1985.
- [35] Yuen David A, Vincent Alain P, Kido Motoyuki, *et al.* Geophysical applications of multidimensional filtering with wavelets. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 5: 2285 — 2309.
- [36] Zeng H, Guo Q H, Liu X D. Experimental Research of Spatial Resolution Effects for Landscape Pattern A Case Study of the Eastern Part in Zhujiang Delta. *Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis*, 1998, 34(6): 820 — 826.
- [37] Zeng H, Shao N, Guo Q H. A study of landscape heterogeneity for the changping area in the eastern part of zhujiang delta. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 255 — 262.
- [38] Zeng H, Jiang C M. Landscape structure study of Longhua Area in Shenzhen City during the fast urbanization process — Structure and heterogeneity analysis of forest land. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 378 — 383.
- [39] Zeng H, Jiang Z Y, Yu H, *et al.* Landscape Structure Study of Longhua Area in Shenzhen City during the Fast Urbanization Process Ⅲ. Structure and Heterogeneity Analysis of Farmland. *Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis*, 2000, 36(2): 222 — 231.
- [40] Chang X L, Zhang D G, Yang C. Lacunarity Analysis of the Spatial Patterns of Sandy Landscape in Agri Grazing Ecotone. *Journal of Desert Research*, 1996, 19(1): 12 — 17.

#### 参考文献:

- [2] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法. *生态学报*, 2006, 26(7): 2340 ~ 2355.
- [7] 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.
- [9] 龚建周, 夏北成, 李楠. 广州市土地覆被格局异质性的尺度与等级特征. *地理学报*, 2006, 61(8): 873 ~ 881.
- [10] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 陈吉泉, 李博, 马志军, 等. *生态学家面临的挑战*. 北京: 高等教育出版社, 2005.



- [12] 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 ~ 403.
- [13] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651 ~ 657.
- [18] 李双成, 高伟明, 周巧富, 等. 基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析. 生态学报, 2006, 26(12): 4198 ~ 4203.
- [19] 赵则海, 祖元刚, 丛沛桐. 东灵山地区辽东栎林主要土壤因子的 Haar 小波分解. 生态学报, 2002, 22(10): 1660 ~ 1665.
- [20] 祖元刚, 赵则海, 丛沛桐, 等. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林林窗分布规律的小波分析研究. 生态学报, 1999, 19(6): 927 ~ 931.
- [21] 周凌云, 周尚哲, 王芳. 雷州半岛近 50 年气候变化的多时间尺度分析. 华南师范大学学报(自然科学版), 2005, (2): 43 ~ 51.
- [23] Mix Dwight F, Olejniczak Kraig J, 杨志华, 等. 小波基础及应用教程. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [24] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [28] 林业部西北华北东北防护林建设局. 中国三北防护林体系建设总体规划方案. 银川: 宁夏人民出版社, 1993.
- [30] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [31] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254 ~ 261.
- [32] 李月臣, 宫鹏, 刘春霞, 等. 北方 13 省 1982 ~ 1999 年植被变化及其与气候因子的关系. 资源科学, 2006, 28(2): 109 ~ 117.
- [33] 卢玲, 李新, raete Frank Veroust. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2005, 25(5): 1026 ~ 1033.
- [34] 朱俊凤. 三北防护林地区自然资源与综合农业区划. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [36] 曾辉, 郭庆华, 刘晓东. 景观格局空间分辨率效应的实验研究——以珠江三角洲东部地区为例. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(6): 820 ~ 826.
- [37] 曾辉, 邵楠, 郭庆华. 珠江三角洲东部常平地区景观异质性研究. 地理学报, 1999, 54(3): 255 ~ 262.
- [38] 曾辉, 姜传明. 深圳市龙华地区快速城市化过程中的景观结构研究. 生态学报, 2000, 20(3): 378 ~ 383.
- [39] 曾辉, 江子瀛, 喻红, 等. 深圳市龙华地区快速城市化过程中的景观结构研究. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(2): 222 ~ 231.
- [40] 常学礼, 张德干, 杨持. 农牧交错区沙地景观空间格局的间隙度分析. 中国沙漠, 1996, 19(1): 12 ~ 17.