

基于分维的多尺度植被空间格局分析

柳锦宝¹, 姚云军², 张永福³

(1. 成都信息工程学院(航空港校区)环境工程系, 成都 610225;
2. 北京大学遥感与 GIS 研究所, 北京 100871; 3. 西北工业大学, 西安 710072)

摘要: 植被是一个地区植物群落的总体, 是对于生态环境因素的综合反映。植被在空间上的分布是典型的分维数体, 它在空间所有尺度上都有细节。在许多情况下分维数具有某种形式的自相似性, 即它不随尺度的增加或缩小而变化, 它独立于尺度。因此比较不同尺度上树种的空间格局与其对应的分维数值, 可以对不同尺度上的空间格局有一个全面的了解。通过变异函数计算出的格局的分维数值可以描述不同尺度上空间格局的拓扑学性状和自相似性, 可以很好地揭示植被的空间异质性。
关键词: 植被; 空间异质性; 分形几何学; 半方差; 多尺度
中图分类号: Q948.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2007)01-0155-04

The Analysis of Multi-scale Spatial Patterns of Vegetation Based on Fractal Geometry

LIU Jin-bao¹, YAO Yun-jun², ZHANG Yong-fu³

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China;
2. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;
3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Vegetation is a collectivity of the phytocommunity in a region and is a synthetical reflection about the ecological environment. The spatial distribution of the vegetation is a typical fractal object and show details in different scales. The fractal dimension always embodies self-similar characteristics which means they don't change with the scales. Consequently, comparing the spatial pattern and the fractal dimension between different scales will make us understand the spatial pattern roundly. Based on regionalized variable theories, geostatistics is one kind of spatial statistical theory used to explore the correlativity and dependence between spatial variables. The first characteristic of this method is its emphasis on the importance of spatial dependence of variables. In practical research, semi-variance values of ecological factors or other indices can be calculated from the semi-variance formulate according to the theory, and then, semi-variogram can be drawn, distribution characteristic of the vegetation (such as clumped or uniform pattern) can be found from the graph. Mathematical models simulation should be used in quantification of this characteristic. The fractal dimension which was calculated by double-logarithm semi-variogram, where m (the slope of the graph) shows its heterogeneity characteristic as well. The lower the D value is, the higher heterogeneity the distribution of vegetation has.

Key words: vegetation; spatial heterogeneity; fractal geometry; semi-variance; multi-scale

1 几种空间格局分析方法介绍

1.1 尺度方差分析

尺度方差分析(scale variance analysis) 是于 1972 年发展起来的一种空间等级分析方法。其最初的目的是用来确定一个已知巢式等级系统各组织水平的相对变异程度, 也就是说, 每个组织水平上的空间变异性对整个系统变异性各自独立的贡献^[1]。

尺度方差的统计模型可以写作:

$$X_{ijk...z} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_{ijk} + \dots + \omega_{ijk...z} \quad (1)$$

式中, $X_{ijk...z}$ ——等级系统最低层次上某组成单元(如一个象

元) 的取值; μ ——在这一层次上系统的基本组成单元的总平均, 其余各项分别表示来自各个层次上的影响(α, β, γ 以及 ω 表示等级系统的不同层次), 其中 α 表示系统分解的最高层次的影响。

根据以上的模型, 可以得到各个层次上总方差的公式 (以具有四个层次的等级系统为例, 即系统整体—— α 层次—— β 层次—— γ 层次):

总方差:

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} (X_{ijk} - \bar{X} \dots)^2 \quad (2)$$

α 层次的方差:

* 收稿日期: 2006-01-22
基金项目: 成都信息工程学院院选科研项目(编号: CRF200520); 国家自然科学基金资助项目(项目号: 40201037)
作者简介: 柳锦宝(1979-), 男, 湖北黄梅人, 教师, 现从事遥感与地理信息系统的教学与研究。

$$SS_{\alpha}=\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{k=1}^{K_{ij}}(X_{ik}-\overline{X}_{i...})^2\tag{3}$$

β 层次上的方差:

$$SS_{\beta}=\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{k=1}^{K_{ij}}(X_{ijk}-\overline{X}_{ij.})^2\tag{4}$$

γ 层次上的方差:

$$SS_{\gamma}=\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{k=1}^{K_{ij}}(X_{ijk}-\overline{X}_{ijk.})^2\tag{5}$$

式中: I ——α 层次上的单元数; J_i ——第 i 个 α 层次单元中所包含的 β 层次上的单元数; K_{ij} ——第 ij 个 β 层次单元中所包含的 γ 层次上的单元数。以上各式之间的关系是:

$$SS_{Total}=SS_{\alpha}+SS_{\beta}+SS_{\gamma}\tag{6}$$

用自由度去除各个层次的方差则得到各层次的平均方差值:

$$MS_{\alpha}=\frac{SS_{\alpha}}{I-1}\tag{7}$$

$$MS_{\beta}=\frac{SS_{\beta}}{\sum_{i=1}^I(J_i-1)}\tag{8}$$

$$MS_{\gamma}=\frac{SS_{\gamma}}{\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^{J_i}(K_{ij}-1)}\tag{9}$$

对于遥感图像来说, 尺度方差可以根据以下的公式计算:

$$SV_{\alpha}=MS_{\alpha}/JK\tag{10}$$

$$SV_{\beta}=MS_{\beta}/K\tag{11}$$

$$SV_{\gamma}=MS_{\gamma}\tag{11}$$

因此, 尺度方差是平方和经由自由度标准化后所得。以尺度方差和空间尺度作图, 即得尺度方差图, 由此可以看出各个层次的变异程度。如果想知道各个层次对系统整体变异性的相对贡献, 可直接将各平方和与尺度作图^[2]。采用尺度方差分析时, 使其具有巢式等级结构(例如, 让空间粒度的大小按照 2^n 或 2^{2n} $n=0, 1, 2, 3\dots$ 的序列来增加)。

1.2 谱分析

谱分析 (Spectral analysis) 可以用来分析一维或者二维空间数据中反复出现的块状性格局及其尺度特征。它的基本思想是利用傅立叶转换 (Fourier transformation) 将实测数据分解为若干不同频率、不同振幅和不同起始点的一组正弦波, 然后寻求对实际数据拟合最好的波函数。谱分析的要点是建立谱密度或强度 (spectral density or power) 的周期图 (periodogram), 简称为谱周期图。谱周期图以谱密度为纵坐标, 频率或周期为横坐标, 反映空间数据的周期性变化 (峰值) 和随机性变化 (非峰值部分)。该方法对在研究等距离取样的时间和空间生态学序列数据的格局中已经有广泛应用。谱分析尤其适合于分析具有周期性结构的空间和时间数据。由于采用三角函数转换, 它不受空间数据起始位置的影响。然而, 该方法从统计运算角度而言仍然是空间分析方法中最为复杂的一种, 而其结果的解释也比较困难。迄今为止, 谱分析的应用尚主要以一维数据为主。谱分析似乎对小尺度格局敏感, 而对大尺度结构特征却不是很有效。此外, 尽管检验整个谱周期图的显著性是可行的, 但单个波峰的显著性是无法检验的^[3]。

1.3 小波分析

小波分析是一种能够将时间上或空间上的格局与不同尺度以及具体时、空位置相联系的分析方法。在空间分析方面, 它的优势在于在格局或模式分解的过程中还能够保持和表现等级信息。尤其是借助卫星图像进行尺度上推过程中能够检测空间格局相互作用以及信息丢失^[4]。小波的主要优点是: 适用于时间和空间数据分析并且可以很好地对

具有明显不连续性的数据进行近似; 在一定的近似水平上, 小波可以表达多种类型的函数; 在计算上, 小波变换效率很高; 小波没有对数据平稳性的要求, 因而可以分析非平稳空间数据。它不但能从频率 (或尺度) 的角度分析格局, 而且能将格局、尺度与具体空间位置明确地表示出来^[3]。

小波分析的核心部分是小波转换 (wavelet transform)。经过小波转换后的数据成为尺度 (移动窗口的大小) 和具体空间位置的函数, 以此作图即可以将数据中不同尺度上的特征及其相互关系反映出来。因此, 小波分析很适合揭示空间格局的多尺度和等级结构。因为即使是一维数据的小波转换图有时也不是很容易解释, 因此往往需要计算小波方差 (wavelet variance) 并作图, 来帮助识别块状格局的特征尺度 (如块的平均大小)。小波分析是景观空间分析中的新方法之一, 应用尚少, 但其应用价值是显而易见的。

2 基于分维的空间格局分析

2.1 分形几何学

分形几何学是以欧氏几何无能为力的、不规则 (irregular) 的或者支离破碎的 (fragmentary) 物体为研究对象的几何学, 它能够从看似混沌 (chaos) 的物体结构中找到规律, 这种规律被称之为分形体 (fractal) 的自相似性 (self-similarity) 特征^[5]。所谓自相似性是指物体局部放大与整体相似的特征, 即无论怎样变换尺度 (scale) 来观察物体, 总是存在更精细的结构并且其结构总是相似的。该特性因与尺度无关而成为分形几何学与经典欧氏几何学的主要区别, 被称为分形体的本质特征。对于这一特征进行描述的主要工具是分形维数 (fractal dimension)。一般说来, 不规则物体已经不是欧氏几何意义下的 0, 1, 2, 3 维的整数维的物体, 其维数是非整数, 故称为分数维数 (fractional dimension)。分形体的分数维数一般称为分形维数, 分形维数才是对这类物体结构的有效表征。一般求算分形维数所采取的方法是在双对数坐标下进行线性回归, 所得拟合直线的斜率 (或其转换的结果) 为分形维数值^[6]。因此分形几何学的主要研究内容是分形体的分形维数及自相似规律。

2.2 半方差和双对数半方差图

半方差 (semivariance) 是地统计学中的关键概念, 近几年才被应用到生态学研究。地统计学 (geostatistics) 是由地学 (采矿学和地质学) 发展起来的一种空间统计学 (spatial statistics), 基础是区域化随机变量理论 (regionalized variable theory), 用来研究自然现象的空间相关性和依赖型^[7]。区域化随机变量与普通随机变量不同, 普通随机变量的取值符合某种概率分布, 区域化随机变量则是根据其在某一个域内的位置不同而取值, 它是普通随机变量与位置有关的随机函数。区域化变量间的差异用半方差来表示。半方差与经典统计学中方差的根本差异在于半方差考虑了空间尺度, 即 h 。因此, 如果把植被的某一特征作为依赖变量, 则半方差能够反映出统计意义上该变量在各个不同尺度上的异质性。

双对数半方差图能够揭示植被的空间异质性在不同尺度间的相关关系。对于这种空间关系的表征是采用分形维数, 它的获得是借助于公式:

$$D=(4-m)/2\tag{13}$$

式中: D ——分形维数, m ——双对数半方差图的斜率^[8]。

3 基于半方差维数的空间格局分析

3.1 数据来源

本研究的数据主要来源于 1: 400 万中国植被图。其编

码采用 7 位数字码, 左起第一位数字分别为 1, 2, 3, 4, 分别表示自然植被、农业植被、无植被地段、湖泊。对于自然植被, 第二位数字表示植被纲组; 第三、四位数字表示植被群系纲; 第五、六、七位数字表示植被群系组。对于农业植被, 第二位数字表示几年几熟的连作的耕作制度结合着具有一定生活型的经济林, 这位数字表示的草本群落还反映了人类目前尚不能改造的大气气温所制约的耕作制度; 第三、四位数字为空位, 分别用“0”表示; 第五、六、七位数字表示最基本的制图单位(或一定的生态地段), 这级基本单位所列举出的作物名称是有代表性的或经济意义较大的, 应当提到, 实际上未提名的作物种类更多。植被编码结构见表 1。

表 1 植被编码结构表

× (1s1)	× (1s2)	× × (1s3)	× × × (1s4)
表示自然植被、农业植被、无植被地段、湖泊	表示植被纲组(自然植被)、几年几熟的连作的耕作制度结合着具有一定生活型的经济林	植被群系纲	表示植被群系组(自然植被)或最基本的制图单位(农业植被)

3.2 数据前期处理

通过 GIS 软件 ARC/INFO 从 1: 400 万中国植被图中提取出新疆的植被图来。之所以选择新疆的自然植被作为我们的研究对象, 一方面是由于新疆的自然植被类型比较丰富, 另一方面是由于新疆的植被很多分布在山地和荒漠地区, 受人为的干预比较少。在 ARCMAP 中把新疆的自然植被提取出来, 并做出自然植被的二级、三级专题图来, 最后把做好的专题图以位图 bmp 格式的文件加以存储, 并导入到 ENVI 软件中, 然后通过 ENVI 软件存储为*.img 格式的图像文件。

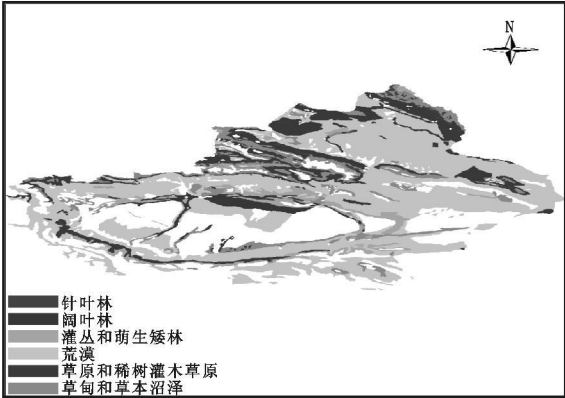


图 1 新疆自然植被的二级分类专题图

3.3 分析方法

双对数半方差图均在一定的尺度范围内存在线性, 直线的斜率经过公式变换即可以得到分形维数。在分形几何学中, 最初分形维数是被用来描述物体结构的复杂性或占据空间的能力。

在本文中, 分形维数的几何意义可以这样理解: 植被是一个分形体, 它在不同尺度上的结构复杂程度可以用不同尺度上的异质性(即半方差)来描述, 这样由半方差得到的分形维数便是对植被整体结构复杂性的表征, 揭示了植被空间异质性的尺度变化特征。

由公式(13), 我们可知:

当 $D = 2$ 时, $m = 0$, 此时双对数半方差图水平。它的意义是在统计意义上所有的尺度间隔样方间的差异性都相同, 即样方内的植被特征均相同, 则植被是同质的。 D 越远离(小于)2, m 值越大, 双对数半方差图中的直线越陡, 表现出不同尺度间隔样方间差异性的差别越显著, 则植被的空间异质性越强。可见, D 值大小揭示出植被空间异质性的尺度变

化特征。从植被空间相关性角度来说, $D = 2$ 植被是同质的, 空间不相关, 整个样本是空间独立的。 D 值越小于 2, 植被的空间相关性越大。应该特别指出的是, 当 $D = 1 (m = 2)$ 时, 可以得知, 在统计意义上 $\Delta Z = \Delta h$, 表明依赖变量随间隔增加而单调变化, 则依赖变量在样带上分布是线性的, 植被具有梯度性质^[9]。

我们已经用 c^{++} 实现了求 img 格式图像的半方差程序, 通过算得的半方差值我们可以做出半方差曲线及双对数半方差图来, 根据半方差曲线图和 D 值的大小我们就可以进行植被空间格局的分析。

4 结果分析

4.1 新疆自然植被的景观格局

表 2 各种自然植被在不同方向的整体分维

自然植被类型	采样方式			
	横向	纵向	西北-东南	东北-西南
草原和稀疏灌木草原	1.832	1.913	1.7688	1.92675
阔叶林	1.86495	1.9179	1.7658	1.92895
针叶林	1.9527	1.9591	1.7651	1.9664
荒漠植被	1.8387	1.8468	1.7754	1.86145
草甸和草本沼泽	1.9133	1.93055	1.76985	1.93805
灌丛和萌生矮林	1.8947	1.93985	1.7677	1.9449

我们可以看到, 除了在西北-东南方向上各种自然植被的分维值差异不大外, 在其余几个方向上还是存在明显的差异的: 均是荒漠植被以及草原和稀疏灌木草原的分维值明显小于其它的植被类型(D 远小于 2), 说明了这两种自然植被的空间占据能力强, 和实际情况也是一致的; 针叶林的分维值明显地高于其它的植被(D 接近于 2), 说明了这种自然植被的空间占据能力是最弱的, 所占有的面积也是最小的, 和新疆的实际植被分布也是一致的; 阔叶林、草甸和草本沼泽以及灌丛和萌生矮林之间的分维值差异不大, 这些植被的分布面积居于中间值。

4.2 新疆荒漠植被的景观格局

由于从上面的分析中可以看到荒漠植被在新疆的自然植被中占据最主要的部分, 因此我们选择荒漠植被作我们进一步的研究对象。

在新疆的荒漠植被中, 主要有温带矮半灌木荒漠、温带半乔木荒漠、温带多汁盐生矮半灌木荒漠、温带高寒匍匐矮半灌木荒漠和温带灌木、半灌木荒漠等荒漠植被类型。

表 3 荒漠植被在不同方向的整体分维

自然植被类型	采样方式			
	横向	纵向	西北-东南	东北-西南
温带矮半灌木荒漠	1.9037	1.90945	1.77395	1.9237
温带半乔木荒漠	1.8427	1.85625	1.76805	1.87705
温带多汁盐生矮半灌木荒漠	1.9505	1.92985	1.7645	1.93635
温带高寒匍匐矮半灌木荒漠	1.8798	1.94685	1.76815	1.9673
温带灌木、半灌木荒漠	1.8903	1.88185	1.7725	1.89445

我们可以看到, 除了在西北-东南方向上各种荒漠植被的分维值差异不大外, 在其余几个方向上还是存在着明显的差异的, 而且不同方向的分维数还是有差别的, 说明了植被空间格局的各向异质性的存在是和地形、气候及地质状况等环境条件密切相关的。在不同的方向上, 温带半乔木荒漠植被的分维值均是最小的(远小于 2), 说明了其在荒漠植被中是占据主导地位的。温带矮半灌木荒漠、温带高寒匍匐矮半灌木荒漠和温带灌木、半灌木荒漠植被的分维相差不是很

多,说明了其占据空间的能力相当。温带多汁盐生矮半灌木荒漠植被的分维值最大(接近于 2),说明了其占据能力最弱,所占据的面积也是最小的,这和实际情形也是一致的。

4.3 新疆温带半乔木荒漠植被主要树种的空间分布格局

由于从上面的分析中可以看到温带半乔木荒漠植被在新疆的荒漠植被中占据最主要的部分,因此我们选择温带半乔木荒漠植被作为我们进一步的研究对象。

表 4 温带半乔木荒漠植被主要树种在不同方向的整体分维

温带半乔木荒漠植被类型	采样方式			
	横向	纵向	西北-东南	东北-西南
梭梭沙漠(温带半乔木荒漠)	1.83965	1.86975	1.76535	1.90385
梭梭柴、琵琶柴壤漠(温带半乔木荒漠)	1.86845	1.9207	1.76435	1.93905
梭梭砾漠(温带半乔木荒漠)	1.918	1.8772	1.767	1.8908

纵向和东北-西南方向的半方差客观反映了实际的情形。梭梭沙漠和梭梭砾漠植被占据了温带半乔木荒漠的主要部分,梭梭柴、琵琶柴壤漠所占据的面积较小。

5 结论与讨论

由于双对数半方差图的所有线性区域中最小的 D 值反映出植被的空间相关性最强,异质性最高,说明该尺度环境因素(或干扰)对植被的作用是最主要的,这对于揭示植被的结构、成因及演替规律具有重要的意义^[10]。我们从上面的实例中就可以得到结论:

(1) 在新疆自然植被的景观格局中,我们根据最小的 D 值,可以确定荒漠植被和草原和稀疏灌木草原在此格局中占据了最主要的部分。

(2) 在新疆荒漠植被的景观格局中,根据最小的 D 值,我们得到了温带半乔木荒漠植被是此格局中占主导地位植被

参考文献:

[1] 邬建国. 景观生态学-格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[2] Jianguo Wu, Dennis E, Jelinski Matt Luck, et al. Tueller, Multiscale Analysis of Landscape Heterogeneity: Scale Variance and Pattern Metrics[J]. Geographic Information Sciences, 2000, 6(1): 6- 19.

[3] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[4] 孙丹峰. IKONOS 影像景观格局特征尺度的小波与半方差分析[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 406- 413.

[5] Mandelbrot, Benoit B. The Fractal Geometry of Nature. [M]. Freeman , 1981.

[6] Milne B T. Lessons from applying fractal methods to landscape patterns[A]. In: Quantitative methods in landscape ecology[M]. New York: Springer- Verlag, 1991.

[7] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58 :1246- 1266.

[8] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data[J]. Nature, 1981, 240- 242.

[9] 唐涛, 蔡庆华, 潘文斌. 地统计学在淡水生态学中的应用[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 280- 288.

[10] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[11] 马克明, 祖元刚. 植被格局的分形特征[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 111- 117.

[12] 李后强, 汪富泉. Fractal theory and its application in molecular sciences[M]. Beijing: Science Press, 1993.

(上接第 154 页)

[18] 张文鸽, 吴泽宁, 逯洪波. BP 神经网络的改进及其应用[J]. 河南科学, 2003, 21(2): 202- 206.

[19] 何耀华, 夏志忠. BP 网络的快速自适应学习算法[J]. 系统工程理论与实践, 2000, (1): 22- 25.

[20] 张友水等. 基于 GIS 的 BP 神经网络遥感影像分类研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 807- 813.

[21] 王静, 基于 BP 神经网络的盐碱土盐分遥感反演模型[D]. 长春: 东北师范大学, 2005. 30- 40.

[22] 乔平林, 等. 基于神经网络的土地荒漠化信息提取方法研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 58- 62.

[23] Wang F. The use of artificial neural networks in a geographical information system for agricultural land-suitability assessment[J]. Environment and Planning A, 1994, 26: 265- 284.

[24] Bryan C Pijanowski. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26: 553- 575.

被的结论。

(3) 在温带半乔木荒漠植被主要树种在不同方向的整体分维中,我们也根据最小的 D 值确定了梭梭沙漠和梭梭砾漠植被占据了温带半乔木荒漠的主要部分。

以上得到的结论都是和新疆植被分布的实际情况一致的。

6 评价与展望

用分形分析方法研究植被的空间异质性可以明显地揭示出植被存在格局地尺度及层次性,不同尺度范围植被的空间相关性即空间异质性规律以及对植被空间异质性影响最大的环境因素或干扰的尺度,从而为认识植被格局提供了丰富的新信息。应用分形分析方法揭示出不同尺度上植被空间异质性得相关规律,这是该方法较其它格局分析方法的优越之处^[11]。

当在一定间隔范围内,样方间的差异性符合一定的规律时,双对数半方差图表现为线性。当双对数半方差图出现拐点时,说明样方间的差异性在拐点之前和之后的尺度上空间相关规律发生显著变化,拐点处是小于拐点的尺度和大于拐点的尺度植被异质性规律的转折点,故可以断定拐点处是植被格局发生变化的尺度。

分形理论是一个活跃而前景广阔的新兴领域,为人类探索自然奥秘带来了新角度、新思想和新工具,揭示了部分与整体之间的内在联系,架起了从部分到整体的桥梁与媒介,说明了部分与整体之间的信息“同构”^[12]。分形理论的优越性和普适性使得人们能够从局部认知整体,从有限中认知无限,从不规则中认知规则,从混沌中认知有序,因而它必将对人类的科学进步产生积极而深远的影响。