

小波分析方法在心叶驼绒藜 (*Ceratoides ewersmanniana*) 空间格局尺度推绎研究中的应用

谢江波^{1,2}, 刘彤^{1,*}, 魏 鹏¹, 贾亚敏¹, 骆 柳¹

(1. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 830222 2. 石河子大学生命科学学院, 石河子 832000)

摘要 :以古尔班通古特沙漠南缘莫索湾沙地选取相隔 15km 的两个 200m × 200m 样地,以建群种心叶驼绒藜 (*Ceratoides ewersmanniana*)及其生境地形为研究对象,应用小波分析定量研究了多尺度上空间格局的推绎以及空间异质性、空间格局依赖于尺度的变化关系。研究发现:小波分析尺度由 1 (5m)变化到 4 (20m)时,两个样地小尺度上的异质性和格局被合并到更大的尺度上,当小波分析的尺度大于等于 5 (25m)时,两个样地的格局变化平稳,对应地形(丘顶、丘坡、丘底)的基频稳定在 110m 左右,心叶驼绒藜的数量动态变化周期稳定在 115 ~ 125m 之间。结果表明:小波分析对信号整体特征的提取作用实现了小尺度上的信息到大尺度上的聚合。结合小波分析对信号突变点的检测,利用位置方差检验局部空间异质性程度,发现位置方差将大尺度上的格局分解到每个取样小样方,位置方差最大的地点对应的异质性也最强,实现了大尺度上的信息到小尺度上的分解。总结认为应用小波分析可以实现对空间格局的尺度推绎,具有对植被、环境的分布格局以及异质性有双重度量作用,由小波系数以及由其衍生的小波方差、位置方差来实现这种度量,图形表现直观,优越性明显。

关键词 :小波分析;尺度推绎;空间格局;小波方差;位置方差

文章编号:1000-0933 (2007)07-2704-11 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Ecological application of wavelet analysis in the scaling of spatial distribution patterns of *Ceratoides ewersmanniana*

XIE Jiang-Bo^{1,2}, LIU Tong^{1,*}, WEI Peng¹, JIA Ya-Min¹, LUO Chen¹

1 The Key Laboratory on Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832000, China

2 College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2704 ~ 2714.

Abstract : Ecological experiments are usually conducted on small scale, but the ecological and environmental issues are usually at large scale. Hence, there is a clear need of scaling. Namely, when we deal with the patterns and processes at larger scale, a special connection needs to be established to the small scale that we are familiar with. Here we presented a wavelet analysis method that could build relationships between spatial distribution patterns at different scales. And with this method, we also studied the how spatial heterogeneity and patterns changed with scale. We investigated the distribution and the habitat of *C. ewersmanniana* in two plots (200m × 20m, the distance between the plots is 15 km) at Mosuowan desert. The results demonstrated that spatial heterogeneity and distribution patterns were incorporated into larger scale when wavelet

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30360017)新疆自治区高校科研优秀青年学者奖励计划资助项目(XJEDU2005E09)

收稿日期:2006-12-12;修订日期:2007-03-30

作者简介:谢江波(1982~)男,湖南人,硕士生,主要从事植物学研究。E-mail:0208xiejiangbo@163.com

*通讯作者 Correspondin author. E-mail:liutong1968@yahoo.com.cn

致谢:新疆生态地理研究所李彦研究员对本文写作给予帮助,特此致谢!

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30360017) and Excellent youth scholar program in Xingjing Autonomous Region (No. XJEDU2005E09)

Received date 2006-12-12 ; **Accepted date** 2007-03-30

Biography XIE Jiang-Bo, Master candidate, mainly engaged in botany. E-mail:0208xiejiangbo@163.com

scale varied from one (5m) to four (20m). However, if the wavelet scale was above five (25m), the spatial distribution patterns varied placidly, oscillation period of landform stabilized at 110m, and the dynamic quantity period of *C. ewersmanniana* stabilized at 115 - 125m. We also identified signal catastrophe points with wavelets and verified heterogeneity degree of local space with position variance. We found that position variance decomposed the distribution patterns at large scale into small sampling plot, and the position with the largest variance also had strongest heterogeneity. In a word, wavelet analysis method could scale-up spatial distribution patterns and habit heterogeneity. With this method and other method derived from this one, such as, wavelet scale, wavelet variance, position variance, and extremely direct-viewing graphs, wavelet analysis could be widely applied in solving the scaling problem in ecological and environmental studies.

Key Words : wavelet analysis ; scaling ; spatial distribution patterns ; wavelet variance ; position variance

空间格局是生态系统或系统属性空间变异程度的具体表现,它包括空间异质性、空间相关性和空间规律性等内容^[1-4]。因此,空间异质性研究是格局研究的一部分。空间异质性对生态学系统的功能和过程有重要的影响,它的改变反映生态学功能和过程的变化^[5-7]。这些生态学问题的界定都与分析时所涉及的时间和空间尺度(scale)有关,生态学实验研究往往在很小的时空尺度上开展,然而很多生态和环境问题是大尺度的,解决这些问题需要把小尺度上获得的信息推绎到大尺度上;其次,为了理解自然,必须考虑大尺度上的格局和过程,并把它们与人们较熟悉的小尺度上的格局和过程联系起来,这些都有必要进行尺度推绎(scaling)^[8]。尺度推绎分为尺度上推(scaling-up)和尺度下推(scaling-down),前者是指将小尺度的信息推绎到大尺度上的过程,是一种信息的聚合(aggregation);后者则是将大尺度上的信息推绎到小尺度上的过程,是一种信息的分解(dis-aggregation)^[9]。而认识空间异质性的多尺度依赖性和景观格局特征对尺度效应关系的影响是进行空间尺度推绎的基础^[3,4]。

一系列定量的方法被提出用来描述这种随尺度变化的空间格局和空间异质性,如点格局分析^[10]、地统计学变异函数分析^[11]、小波分析^[12-20]等,这些方法都是在非线性、多尺度框架内进行格局和异质性分析的工具,克服了传统方法只能分析单一尺度空间分布格局的缺点,很快被发展并应用到植物种群多尺度空间分布格局和两个物种之间多尺度空间关联的研究中^[10,11]。但是除小波分析外,其他两种方法没有考虑各尺度之间格局与异质性的推绎以及这种推绎过程的可视化,另外,这两种方法涉及到对空间变量的取样分析,但是对分析过程中是否损失位置信息没有进行检验。小波分析是一种新的与生态学研究相关的方法,具有可调节的时频分辨能力,能分辨出信号中不同地方存在的形状不同、延续范围不同的突变分量、暂态分量或非稳定分量,即信号在不同位置处的不同特点的局部行为;可以在多尺度下通过小波系数的波动图像直观显示格局与异质性的变化;用位置方差检验异质性时,结合了多尺度与小波方差来进行观察,达到了很好的效果。并且这种方法已经被用来探究多尺度和沿样带微环境的景观结构^[12,13]、土壤异质性^[14]、太阳活动^[15]、林下冠层植物的多样性^[16,17]、植物生产力^[18]、林窗分布规律^[19]、景观格局特征尺度^[20]等。

本文以古尔班通古特沙漠南缘的莫索湾沙漠建群种心叶驼绒藜(*Ceratoides ewersmanniana*)及其生境地形为研究对象,从以下几个方面研究:(1)研究空间异质性、空间格局在小波分析下依赖于尺度的变化关系;(2)空间特征,本文引入新的空间异质性描述参数小波分析位置方差;(3)空间比较,采用同一样地内不同空间变量之间进行比较,建立两空间变量之间的相关关系模型;不同样地内相同空间变量之间进行比较,解决小尺度异质性或格局到大尺度异质性或格局的尺度推绎问题;针对样地最小单元面积问题,本文根据小波分析确定基频的方法,取两个样地进行对比研究,提出了确定单元面积的新方法。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在莫索湾南缘沙漠,地理坐标(44°44'48"N;86°09'13"E)此研究区为古尔班通古特沙漠向南伸

入戈壁的支脉,属典型大陆性、干旱半干旱沙漠性气候。植被和气候特征参见刘彤等文献^[21 22]。

1.2 小波分析方法概述

小波变换是近 10 多年来兴起的一种新的信号分析处理技术,是针对传统的 Fourier 分析与其后短时 Fourier 分析的不足之处提出的。

若 f 是一个可测的,平方可积的函数,即具有有限的能量 $f(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 为 $f(t)$ 的矢量空间, R 为实数集。则连续小波变换定义为信号 $f(t)$ 的小波基函数内积:

$$W_f(a, b) = \langle f(t) | \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad a > 0, f(t) \in L^2(R) \quad (1)$$

经过小波变换后 $f(t)$ 展开为小波级数,即:

$$f(t) = \sum_{j,k \in Z} d_{i,j} \psi_{i,j} \quad (2)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为方便用 $d_{i,j}$ 来表示,这样 $f(t)$ 就被表示成了各种分辨率小波的线性组合,其中 $d_{i,j}$ 就是对应于小波函数 $\psi_{i,j}$ 的小波系数。

(1) 小波方差^[23]:

$$V(a) = \frac{\sum_{i=1}^n W^2(a, b_i)}{n} \quad (3)$$

表示所有位置的数据在给定尺度的小波分解下小波系数离开平均位置的量度,用来检验全局结构(global structure)^[24]。与尺度对应的小波方差峰值是数据优势结构的一个估计^[25 26]。

(2) 位置方差^[23]:

$$P(b) = \frac{\sum_{i=1}^m W^2(a_i, b)}{m} \quad (4)$$

一个位置 b (时间或空间位置) 尺度 a (从 1 到 m) 下小波系数平方的均值,表示数据中高方差的特点^[23]。通过位置方差的对比,实际上可以找出小波系数的模极大值点,小波理论中,模极大值点对应的是信号的突变点,而在生态学中对应的则是异质性强的点。

(3) 尺度因子 (1) 式中积分核:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

是引进的窗口函数,或称小波或基函数(Wavelets or Basic Functions),实际是一组函数系列 $\{\psi_{a,b}(t)\}$,它是由小波母函数或小波 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移而形成的,由于两个参数可以连续改变,故称 (1) 式为连续小波变换。

1.3 数据采集与数据预处理

在野外实地踏查的基础上,于 2005 年 9 月下旬在靠近绿洲到沙漠腹地的 15km 范围内取两个样地,样地 A (86°09'29"E, 44°44'09"N) 和样地 B (86°05'40"E, 44°47'14"N)。在每一样点沿南北方向(与沙漠走向相同)设置 200m × 200m 的样带,以保证取样的代表性和有效性^[21 22],以 5m × 5m 的小样方调查记录每一样方内的心叶驼绒藜株数及地形情况(包括丘顶,丘坡和丘底)。

取样数据作如下预处理(图 1) 荒漠里丘顶分布具有一定的规律性,在小尺度范围内是无规则的,在一定范围内会出现周期性分布,这种周期性分布在小波理论里称之为基频确定。由极限理论知,采用 5m × 5m 的正方形小样方覆盖所取的大样地地形,根据样方里记录的地形信息及植被对生境的要求进行赋值(丘底赋值为 0,沙顶赋值为 2,丘坡赋值为 0.5),做出地形灰度图像,以便对地形作小波分析;另外,由于组成景观格局的各组分之间的相互作用是不平衡的,因此,不同组分(影响因子)在景观格局中所起的作用是不同的,某些

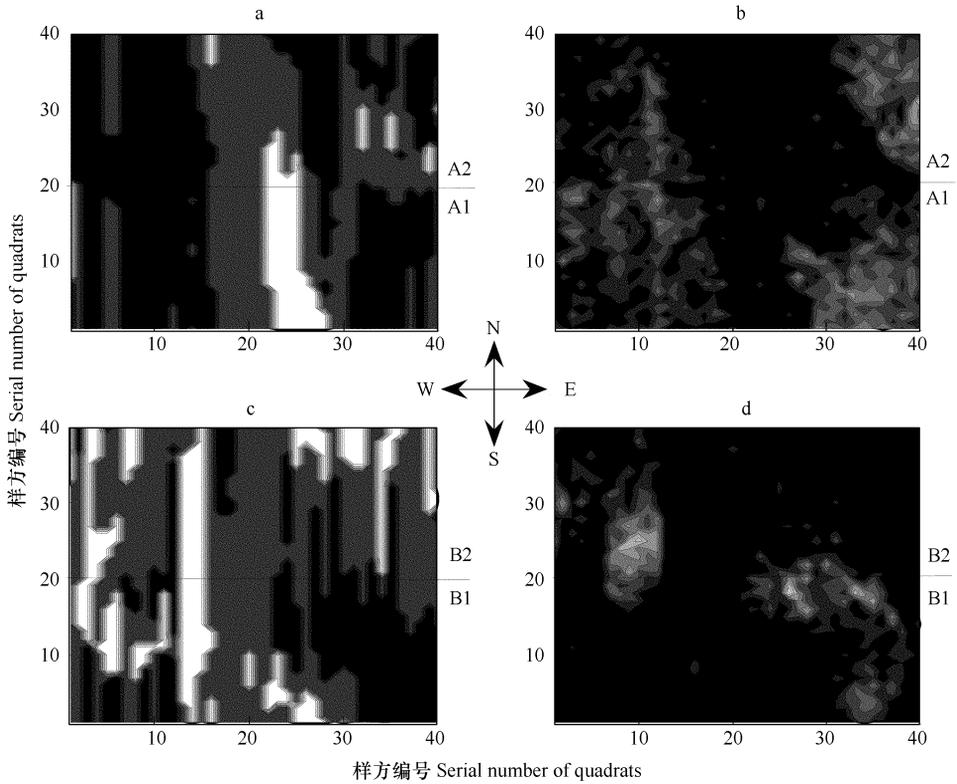


图1 地形与心叶驼绒藜数量灰度图像

Fig. 1 Gray image of landform and the number of *C. ewersmanniana*

(a) A 样地地形 Landform of plot A ; (b) A 样地驼绒藜 *C. ewersmanniana* of plot A ; (c) B 样地地形 Landform of plot B ; (d) B 样地驼绒藜 *C. ewersmanniana* of plot B

组分对景观的结构、功能和动态变化起主导作用或控制作用,成为景观格局发展、演化的主导因素,而小波分析能够实现对信号整体特性的提取,小波分析总能够提取占主导因素的地形因素,小波分析的这一优点也是本文中对样方地形进行赋值的另一理由。为了结合地形进行分析,采用合并样方算法,变化样地的幅度,对样地 A,取东 1 至东 40 合并成一个新样地,南 1 至南 40 不变,合并后取名为 A,取样地 A 的东 1 至东 20 合并成一个新样地,南 1 至南 40 不变,合并后取名为 A1,取样地 A 的东 21 到至东 40 合并成一个新样地,南 1 至南 40 不变,合并后取名为 A2,对样地 B 采用同样的方法合并,取名为 B、B1、B2。地形数据采用垂直投影的方法处理,即将地形灰度值在横轴方向进行垂直累加,由于地形的样方和心叶驼绒藜样方是重合关系,合并样方算法和取名方法都与心叶驼绒藜相同。合并后样方信号看做波动信号,并做出原始波形图(图 2)。

心叶驼绒藜株数和样方地形灰度图用原始记录数据画出,心叶驼绒藜株数和样方地形灰度数据都经过标准化,标准化后的数据经小波分析在波形图上反应则更加直观。

所有数据处理和绘图都在 Matlab6.5 中编程完成。

2 结果与分析

2.1 原始数据分析

A 样地丘顶主要位于东 1~26,南 20~29 小样方所包围的长方形区域,为总面积的 16%,在样方的其余部分有少量的丘顶分布且面积较小,不到总面积的 1%,丘坡占总面积的 40%,丘底占总面积的 44%左右(图 1a)。心叶驼绒藜主要分布在丘底和丘坡,而丘顶分布少或没有(图 1b)。心叶驼绒藜随地形分布如图 2a 所示。

B 样地在东 1~10 之间的白色部分是受人为干扰影响的生境,压踏面积占总面积的 10%,集中分布在东 1 到东 10 样方内,丘顶面积占 14%,丘坡 46%,丘底占 30%(图 1c)。B 样地心叶驼绒藜分布状况与 A 样地

相似 (图 1d)。心叶驼绒藜随地形分布如图 2d 所示。

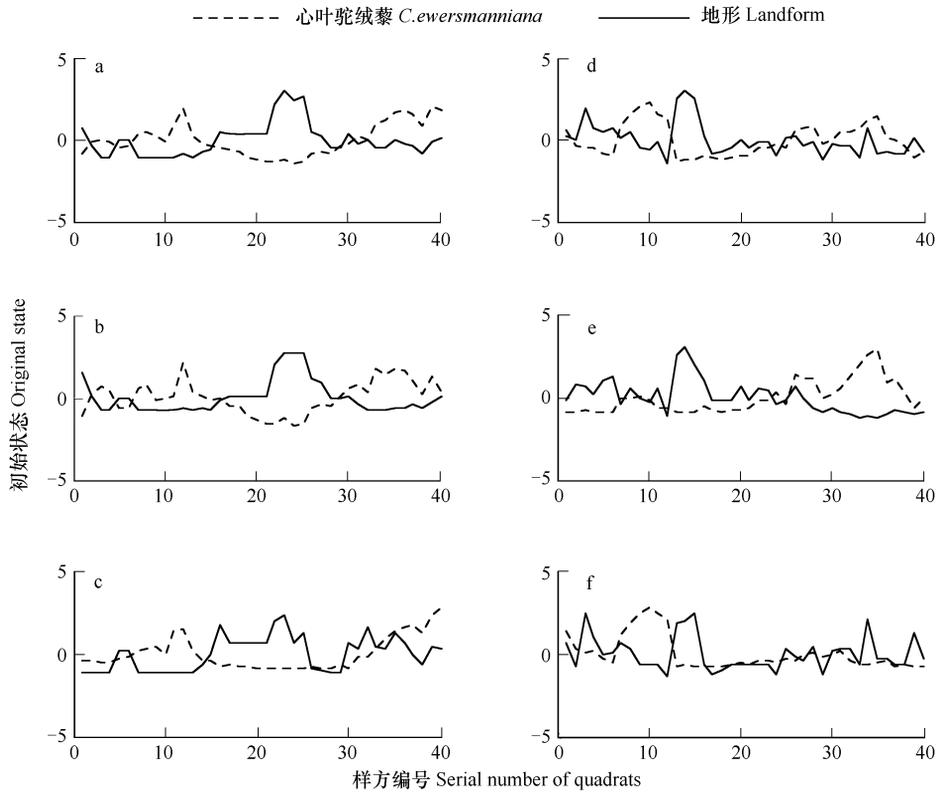


图 2 地形和心叶驼绒藜数量原始波形图

Fig. 2 Original waveform graph of landform and the number of *C. ewersmanniana*

(a) A 样地 Plot A; (b) A1 样地 Plot A1; (c) A2 样地 Plot A2; (d) B 样地 Plot B; (e) B1 样地 Plot B1; (f) B2 样地 Plot B2

2.2 小波变换数据分析

基于野外数据采样的复杂性,本研究采用一维连续小波变换,以墨西哥帽子小波函数为母函数^[15],一维连续小波变换尺度可连续变换,如果采用离散小波变换,那么尺度就是 2 的幂次函数,将忽略某些尺度下的格局分布和过程。

2.2.1 A 样地小波分析结果

在此地形可以看做是波动信号的基频,小尺度上快速变化的地形在大尺度上被合并,样地足够大时,小波分析找出基频,由此植被可以看作是随地形基频分布,所以植被的频率变化与地形频率存在随尺度变化的相关性。

A 样地小波分析尺度为 1 时,小波变换系数波动较大,且变化频率快保留了原始信号的峰值,有 8 个波峰,其中地形以 22 样方处波峰持续时间最长,心叶驼绒藜出现 9 个波峰,其中以 10、38 样方处波峰持续时间最长,种群数量变化周期约为 25m (图 3a);小波分析尺度为 2 时,合并大于原信号频率 1/2 的信号,地形 22 样方处波峰得到加强,心叶驼绒藜 10、38 样方处波峰得到加强,种群数量变化周期约为 40m 左右 (图 3b);小波分析尺度为 3、4 时,快变信号进一步合并 (图 3c、d);小波分析尺度为 5、6、7、8 时,图像的共同特点是,地形在 22 样方处出现一个波峰,在 8、30 样方处出现两个波谷,地形基频为 110m,心叶驼绒藜分布 22 样方处出现波谷,在 12、37 样方处出现两个波峰,心叶驼绒藜数量动态变化周期为 125m,其中地形 30 样方处的 V 型波谷对应的正好是心叶驼绒藜分布的高峰位置,其中包括 3 样方处的波峰 (图 3e、f、g、h)。地形、心叶驼绒藜小波分析方差在尺度 5、6 时分别是 5.6275、7.0370、6.3768、8.2804 (图 4a、c、e),地形与心叶驼绒藜小波系数相关系数在尺度 5、6 时达到极显著相关 (表 1)。

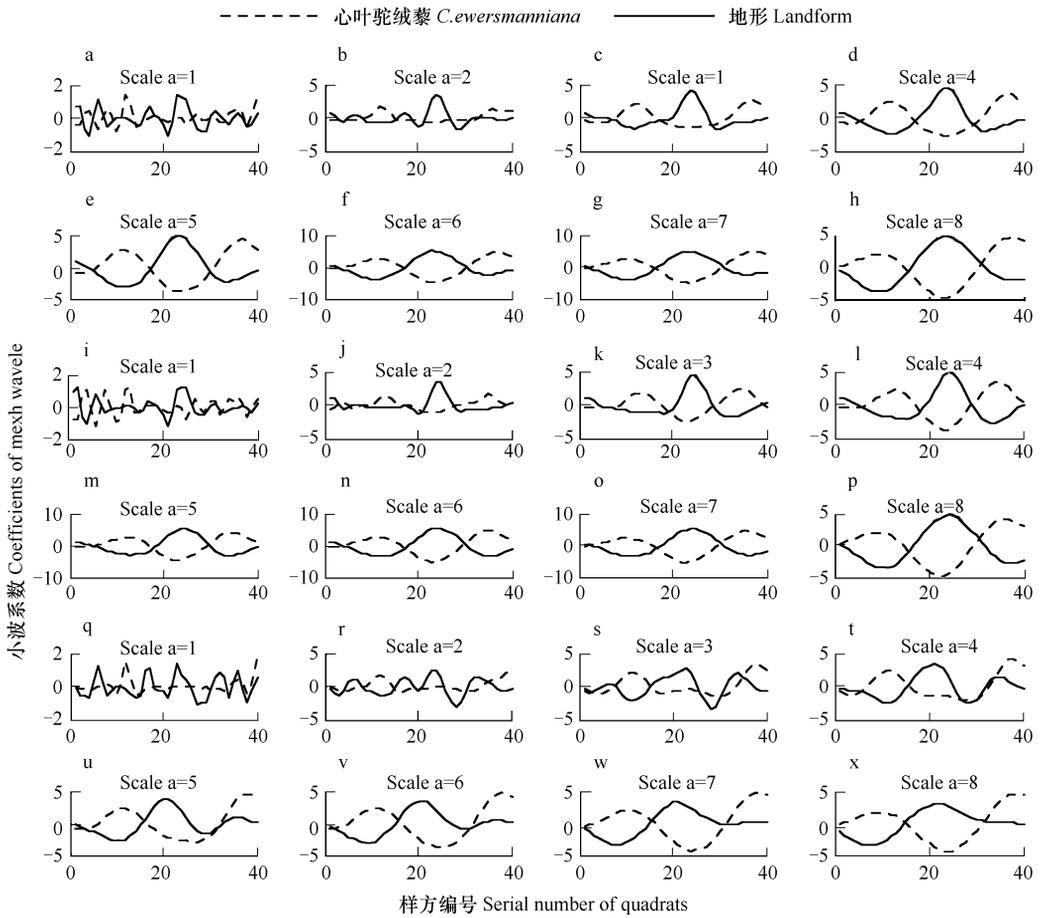


图3 墨西哥帽子小波分析

Fig. 3 Wavelet analysis by the mexican hat function

a-h :A 样地 Plot A ; i-p :A1 样地 Plot A1 ; q-x :A2 样地 Plot A2

A1、A2 样地的小波分析在分解层次为 5 以后都达到了与 A 样地相似的结果,变化幅度仍然以 5 或 6 为最佳分析尺度(图 3i-x)。

对比 3 次小波分析位置方差图像,心叶驼绒藜在 22、36 处都出现波峰,在 6、14、28 处出现波谷,且图 4b, d, f 曲线走向一致,说明小波变换对心叶驼绒藜的分析不损失位置信息。地形在 10、18、25、34 处出现波峰,在 10、15、23、31、33 处出现波谷,3 个曲线的走向趋于一致,说明地形的小波分析仍不损失位置信息(图 4b, d, f)。总结两类结果认为位置方差不受样地大小的影响,是衡量种群局部异质性的参数,可以看作是种群内部因素起作用,即植物在空间的位置有关。

2.2.2 B 样地小波分析结果

B 样地小波分析尺度为 1 时,小波变换系数波动较大,且变化频率快保留了原始信号的峰值,有 8 个波峰,其中地形以 12 样方处波峰持续时间最长,心叶驼绒藜出现 8 个波峰,其中以 8 样方处波峰持续时间最长,种群数量变化周期约为 25m(图 5a);小波分析尺度为 2 时,合并大于原信号频率 1/2 的信号,地形 12 样方处波峰得到加强,心叶驼绒藜 8 样方处波峰得到加强,35 样方处波峰得到加强,种群数量变化周期约为 40m 左右(图 5b);小波分析尺度为 3、4 时,快变信号进一步合并(图 5c、d),直到小波分析尺度为 5 时,此时信号与尺度 6、7、8 时相比,已经趋于稳定,地形出现一个波长,心叶驼绒藜在 7、30 处出现两个波峰,种群数量变化周期为 115m(图 5e、f、g、h)。

B1 样地在尺度 5 和 6 下,心叶驼绒藜在 8、31 处出现波峰,即心叶驼绒藜的数量变化周期为 115m 左右,地形在 12、32 处出现波谷,即地形基频为 100m,与 B 样地结果吻合(图 5i-p)。B1 样地小波系数相关关系在

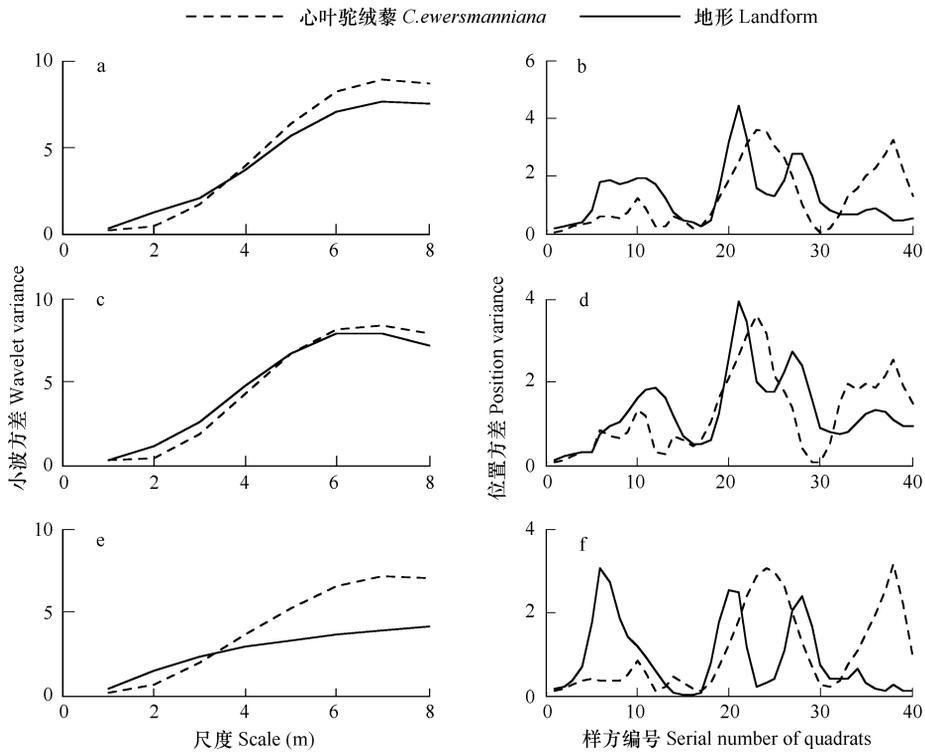


图4 墨西哥帽子小波分析的小波方差与位置方差曲线图

Fig. 4 Curve chart of wavelet variance and position variance of mexh wavelet analysis

a-b: A 样地 Plot A; c-d: A1 样地 Plot A1; e-f: A2 样地 Plot A2

尺度 5、6 下达到极显著负相关, 到达 -0.855 、 -0.929 (表 1)。B2 样地小波分析图像没有出现与 B、B1 样地吻合的情况, 地形在 12、32 处出现波峰, 说明地形基频仍然为 100m, 随之产生的心叶驼绒藜数量周期还是在 110m 左右 (图 5q~x)。

B、B1、B2 样地小波方差随着分析尺度的变大而变大 (图 6)。结合小波分析的多尺度特性, 选择小波分析最适尺度为 5 或 6。

由于 B 样地受人为干扰生境 (图 1c), B、B1、B2 位置方差分析图像出现不稳定的情况 (图 4b、d、f), 说明小波分析对人为干扰比较敏感, 但其定量分析仍需更多数据支持。

2.2.3 A、B 样地内小波分析尺度推绎波形随着分析尺度变化而变化, 空间格局的描述也随之改变。对 A、B 样地分别进行了 8 个尺度的小波分析, 结果可知: 1~4 尺度下的异质性和格局随着尺度的变大而被逐级合并到大尺度上, 达到一定尺度, 如 5 以后, 异质性与格局变化平稳。A 样地有心叶驼绒藜 3552 株, B 样地有心叶驼绒藜 1310 株, 两块样地心叶驼绒藜密度不同, 小波分析结果显示样地地形的基频都在 110m 左右, 由于地形基频保持稳定, 心叶驼绒藜种群数量变化周期也保持在 115m 左右, 两个样地的最佳分析尺度为 5 或 6。同时, 由于两个样地的基频都在 200m 内出现, 说明取样地大小应大于等于 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 。

2.2.4 尺度、小波方差和位置方差的关系及其生态学意义: 由公式 (1)、(5) 可知, 小波分解层次决定时频窗的大小, 当分解层次为 a 时, 实际能够分辨的频率可变为原信号频率的 $1/a$, 对应横轴方向的分析距离为原信号的 a 倍。这一变时频窗的特点在检测信号奇异点时, 对小尺度下小波系数受噪声影响较大, 产生许多伪极值点, 仅凭一个尺度不能确定突变点的位置, 相反, 在大尺度下, 对噪声进行了一定的平滑, 极值点相对稳定, 但由于平滑作用又产生了偏差。只有在合适的尺度下对各突变点引起的小波变换才能避免交迭干扰。同时, 由小波系数产生的小波方差, 是对信号整体趋势提取效果的量度, 此次小波分析采用的是获取信号的低频部分, 由公式 (2) 可知小波系数越分散越能体现图像的整体特征, 对应的小波方差则越大越好。因此, 在用小波

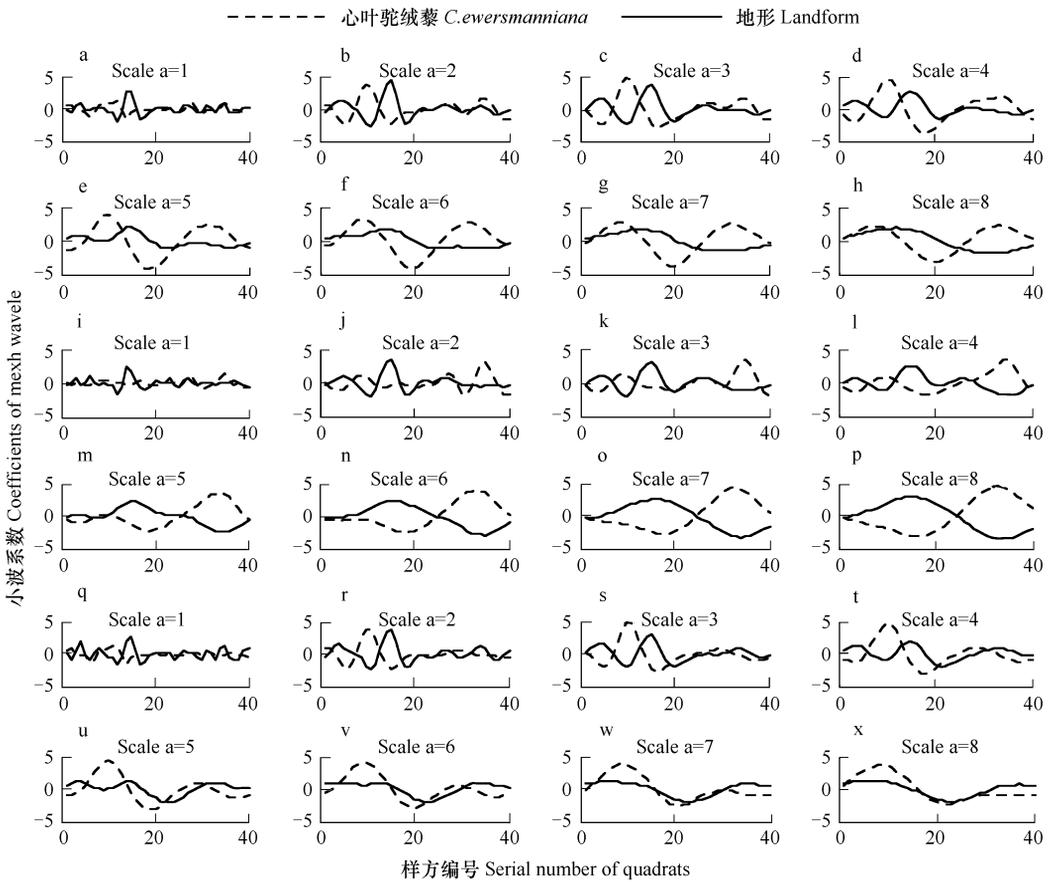


图5 墨西哥帽子小波分析

Fig. 5 Wavelet analysis by the Mexican hat function

a-h : B 样地 Plot B ; i-p : B1 样地 Plot B1 ; q-x : B2 样地 Plot B2

变换位置方差判断信号突变点时,需要把多尺度和小波方差结合起来综合观察。

表1 不同分解尺度下,A、B 两样地心叶驼绒藜小波系数与地形小波系数的相关分析

Table 1 Correlation analysis of wavelet coefficients of *C. ewersmanniana* and landform in different scales of plots A and B

尺度 Scale	样地 Plot					
	A	A1	A2	B	B1	B2
1	-0.074	-0.308	0.160	-0.357 **	-0.003	-0.392 **
2	-0.298	-0.510	-0.199	-0.574 **	-0.163	-0.649 **
3	-0.527 **	-0.775 **	-0.134	-0.513 **	-0.418 **	-0.508 **
4	-0.761 **	-0.910 **	-0.137	-0.294 **	-0.698 **	-0.128
5	-0.873 **	-0.943 **	-0.259	-0.109	-0.855 **	0.296
6	-0.905 **	-0.934 **	-0.416 **	-0.069	-0.929 **	0.597 **
7	-0.899 **	-0.909 **	-0.546 **	-0.105	-0.966 **	0.746 **
8	-0.868 **	-0.874 **	-0.611 **	-0.138	-0.983 **	0.794 **

** 显著性水平为 $p \leq 0.01$ Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

由(4)式可知,位置方差为每一位置的空间变量在各尺度下小波系数离开平均值的量度,对应的是信号的突变点(奇异点)时,方差越大,表示在各尺度空间的小波系数变化越剧烈,亦即尺度变化对其影响越明显,同时说明与尺度有关的生态学过程和景观格局相互作用越剧烈的位置,在地形上反映为两种地形交叉地带,在种群上反映为分布中心消失地带,大的位置方差表明此位置的值在某一尺度空间的投影系数(即小波系数)出现了模极大值;方差越小,对应信号缓变,表示在各尺度空间的小波系数变化平缓,亦即尺度变化对其

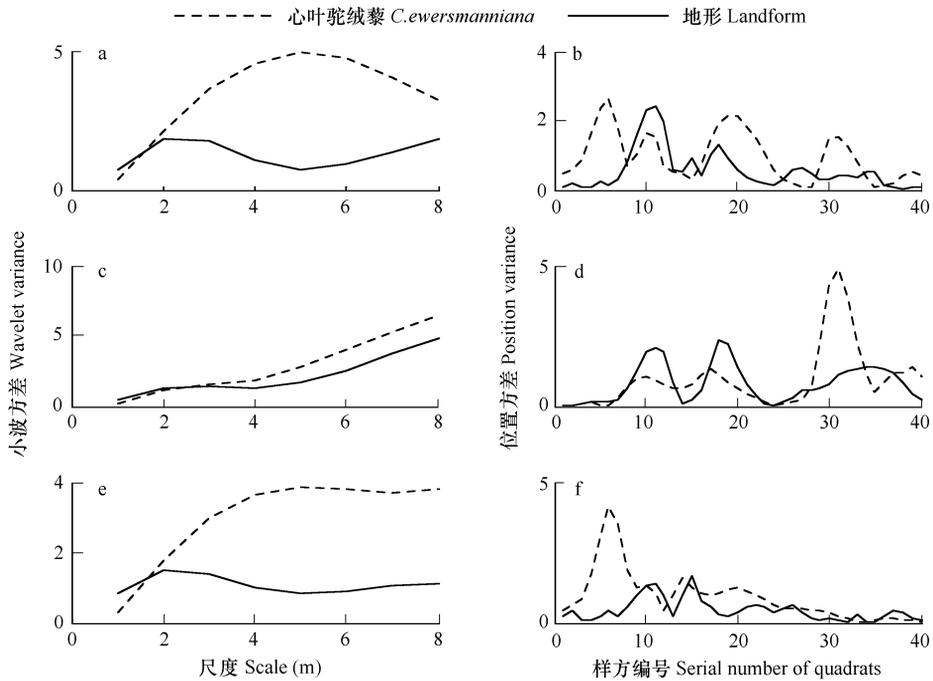


图6 墨西哥帽子小波分析的小波方差与位置方差曲线图

Fig. 6 Curve chart of wavelet variance and position variance of mexh wavelet analysis

(a-b) B 样地 Plot B ; (c-d) B1 样地 Plot B1 ; (e-f) B2 样地 Plot B2

影响越不明显,同时说明与尺度有关的生态学过程和景观格局相互作用稳定的位置,在地形上反映为单种地形地带或两种地形过渡地带,在种群上反映为分布中心地带(图4,图6)。

3 讨论

小波分析通过变化时频窗大小,实现对数据的逐级挖掘和挖掘结果的可视化,植被、地形空间格局由各尺度下的小波系数与小波方差确定,而位置方差是反映空间异质性的一个重要参数,因此该方法直观反映了植被、地形空间格局与异质性依赖于尺度的变化关系,它的结论更贴近测得数据所反映的真实特征,能够揭示复杂的数据信息中的潜在规律。

(1) 小波分析通过变化分析尺度完成尺度上推,在1~25m尺度下,地形和心叶驼绒藜格局与异质性波动大,表明在一系列尺度下心叶驼绒藜的生态学功能与过程不稳定,地形波动与心叶驼绒藜波动相互对应;在25m以上分析尺度,格局与异质性波动平稳,心叶驼绒藜分布格局不再出现随尺度而变化现象,地形也趋向于稳定,心叶驼绒藜生态学功能和过程稳定;两个相隔15km的两个样地小波分析都确定地形基频为110m左右,心叶驼绒藜数量动态变化周期为110~125m左右,该结论对于植被景观空间分析具有重要的参考价值。

(2) 小波分析通过位置方差实现尺度下推,位置方差检验局部空间异质性程度,结果表明,位置方差将大尺度上的格局与异质性分解到每个取样小样方,保留了空间变量的位置信息,位置方差最大的地点对应的异质性也最强。从而在解释多尺度结构和不同方向的结构具有明显的优势,且不受分析数据统计平稳假设的约束^[20]。

(3) 小波分析通过小波系数的波动图像实现了格局与异质性尺度推绎过程的可视化。

(4) 小波分析是研究格局和异质性多尺度变化关系的良好的工具,是研究植物空间分布格局一种实用、便捷、直观的研究方法,为解决植物空间分布格局的尺度优化提供了尺度选择和确定的最佳思路:本研究根据A、B样地出现的地形基频以及心叶驼绒藜出现一个波长来判定莫索湾沙漠心叶驼绒藜取样的单元面积应不小于200m×200m;小波分析在尺度5(25m)以后图像出现的稳定性,确定了莫索湾沙漠心叶驼绒藜特征分析的尺度为5(25m)。

References :

- [1] Wu J G. The key research topics in landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (9) 2074—2076.
- [2] Wu J G. Landscape Ecology — concepts and Theories. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19 (1) 42—52.
- [3] Shen W J, Wu J G, Ren H, *et al.* Effects of changing spatial extent on landscape pattern analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (11) 2219—2231.
- [4] Shen W J, Wu J G, Lin Y B, *et al.* Effects of changing spatial grain size on landscape pattern analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (12) : 2506—2519.
- [5] Wang Z Q, Li H B. Characteristics and comparison of spatial heterogeneity of thema in species of Korean pine in old growth forests. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, 24 (6) 718—723.
- [6] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 1989, 80 (2) :107—138.
- [7] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73 (6) :1943—1967.
- [8] Zhao W W, Fu B J, Chen L D. Some fundamental issues in scaling. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (6) 905—911.
- [9] Guo D Z, Fang T, Du P J, *et al.* Hierarchical Structure and Scaling for Complex System. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32 (3) 213—217.
- [10] Yang H X, Zhang J T, Wu B, *et al.* Point pattern analysis of *artemisia ordosica* population in the mu us sandy land. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2006, 30 (4) 563—570.
- [11] Wang Z Q, Wang Q C, LI H B. Characteristics and comparison of spatial heterogeneity of thema in speciesof korean pine in old growth forests. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, 24 (6) 718—723.
- [12] Saunders S C, Chen J, Crow T R, *et al.* Hierarchical relationships between landscape structure and temperature in a managed forest landscape. *Landscape Ecology*, 1998, 13 (6) 381—395.
- [13] Redding T E, Hope G D, Fortin M J, *et al.* Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83 :121—130.
- [14] Lark R M, Webster R. Analysis and elucidation of soil variation using wavelets. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50 (2) :185—206.
- [15] Rigozo N R, Nordemann D J R, Zanandrea A, *et al.* Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Advances in Space Research*, 2002, 29 (12) :1985—1988.
- [16] Brosofske K D, Chen J, Crow T R, *et al.* Vegetation responses to landscape structure at multiple scales across a Northern Wisconsin, USA, pine barrens landscape. *Plant Ecology*, 1999, 143 203—218.
- [17] Perry J N, Liebhold A M, Rosenberg M S, *et al.* Illustrations andguidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. *Ecography*, 2002, 25 578—600.
- [18] Csillag F, Kabos S. Wavelets, boundaries, and the spatial analysis of landscape pattern. *Ecoscience*, 2002, 9 (2) :177—190.
- [19] Zu Y G, Zhao Z H, Cong P T, *et al.* An elementary study on the distributional rule of canopy gaps ofLarixgm elinii forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (6) 927—931.
- [20] Sun D F. Identifying multi- scale spatial pattern s of landscape from wavelet and semivariogramanalysis is of IKONOS PAN remote sensing data. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (3) 405—413.
- [21] Liu T, Cui Y H, Zhai W, *et al.* Sampling methods of plant community diversity in the desert of the southern edge of Muosuowan region Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2006, 29 (3) 365—374.
- [22] He Z B, Zhao W Z, Chang X L. The modifiable areal unit problem of spatial heterogeneity of vegetation communities in the transitional zone between oasis and desert. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28 (5) 616—622.
- [23] Dale M R T, Mah M. The use of wavelets for spatial pattern analysis in ecology. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9 (6) 805—814.
- [24] Bradshaw G A, Spies T A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1998, 80 (2) 205—215.
- [25] Gao W, Li B L. Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere-forest interface. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32 (11) :1717—1725.

- [26] Li B L, Loehle C. Wavelet analysis of multiscale permeabilities in the subsurface. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22 (23) 3123—3126.

参考文献：

- [1] 邬建国. 景观生态学中的十大研究论题. *生态学报* 2004, 24 (9) 2074~2076.
- [2] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志* 2000, 19 (1) 42~52.
- [3] 申卫军, 邬建国, 任海, 等. 空间幅度变化对景观格局分析的影响. *生态学报* 2003, 23 (11) 2219~2231.
- [4] 申卫军, 邬建国, 林永标, 等. 空间粒度变化对景观格局分析的影响. *生态学报* 2003, 23 (12) 2506~2519.
- [5] 王政权, 李哈滨. 红松老龄林主要树种的空间异质性特征与比较的定量研究. *植物生态学报* 2000, 24 (6) 718~723.
- [8] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 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.
- [9] 郭达志, 方涛, 杜培军, 等. 论复杂系统研究的等级结构与尺度推绎. *中国矿业大学学报* 2003, 32 (3) 213~217.
- [10] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析. *植物生态学报* 2006, 30 (4) 563~570.
- [11] 王政权, 王庆成, 李哈滨. 红松老龄林主要树种的空间异质性特征与比较的定量研究. *植物生态学报* 2000, 24 (6) 718~723.
- [19] 祖元刚, 赵则海, 丛沛桐, 等. 兴安落叶松林 (*Larix gmelinii*) 林窗分布规律的小波分析研究. *生态学报* 1999, 19 (6) 927~931.
- [20] 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.
- [21] 刘彤, 崔运河, 翟伟, 等. 莫索湾南缘沙漠植物群落多样性抽样方法的研究. *干旱区地理* 2006, 29 (3) 365~374.
- [22] 何志斌, 赵文智, 常学礼. 荒漠绿洲过渡带植被空间异质性的可塑性面积单元问题. *植物生态学报* 2004, 28 (5) 616~622.