

兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林窗分布规律的小波分析研究

祖元刚, 赵则海, 丛沛桐, 何卫国

(东北林业大学森林植物生态学开放研究实验室, 哈尔滨 150040)

5781.232

摘要: 采用小波分析的方法对黑龙江省大兴安岭兴安落叶松林的林窗分布进行分析, 研究表明: 兴安落叶松林样带内计算林窗分布百分率小波变换的最佳尺度为 10m。林窗分布的疏密变化尺度为 20m 左右, 在样地中 20 × 20m² 的小区域内具有较为稳定的分布特点。在样带中林窗分布呈斑块状, 且斑块分布随样带的海拔的升高呈间断性分布。小波分析被证明是植被空间格局研究的简捷可靠的新方法。

关键词: 小波; 林窗分布; 尺度; 样带 兴安落叶松 落叶松

An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests using wavelet analysis

ZU Yuan-Gang, ZHAO Ze-Hai, CONG Pei-Tong, HE Wei-Guo (Open Research Laboratory of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests in Daxinganling, Heilongjiang Province, was studied using wavelet analysis. The results obtained are as follows: The optimum scale of wavelet transformation for estimating the percent of gap distribution in transect of forests is 10 meters. That for variable density of gap distribution is about 20 meters. The gap distribution in small areas of 20 × 20m² in transects is relatively stable and tends to be fragmental and discontinuous with increase in altitude. It was approved that the wavelet analysis is an effective and credible method in the study on spatial pattern of vegetational distribution.

Key words: wavelet; gap distribution; scale; transect

文章编号: 1000-0933(1999)06-0927-05 中图分类号: Q141 文献标识码: A

随着植物生态学研究的逐步深入, 运用数学理论和方法来定量化地描述和解释自然界丰富多样的生态学现象已经成为当今生态学发展的重要前沿。80 年代中期以来, 多变量、多维度、非线性、偏微分方程和时间序列分析等多种复杂的数学手段来计算、模拟和仿真生态系统及其过程, 较以往的传统生态学研究有了长足的进步。由于自然界的本质是非线性的, 在非线性的科学中, 一种被誉为“数学显微镜”的小波变换 (wavelet transform) 理论与方法引起科学技术界人士的普遍关注。近年来, 随着小波理论的不断发展与完善, 在信号处理、图象分析、模式识别、地质勘探以及地震探测等众多领域中取得了突破性进展。虽然小波理论在植物生态学研究尚处于起步阶段, 但它的广泛的应用前景与分析解决问题的潜在能力吸引着人们的兴趣。有关森林中林窗 (又译为林隙) 的研究已有 50 余年的历史, 多应用传统生态学原理和方法进行研究, 也有一些通过建立数学分析模型进行描述的报道^[1]。由于林窗在森林中的分布规律十分复杂, 具有典型的非线性特点, 所以小波分析提供了一种解决这一问题的新工具。通过小波变换选用合适的尺度 (scale) 和窗口函数 (window function) 可以显示出测定的数据信息微细的结构与特点。近年来有关运用小波分析的原理与方法对森林内林窗的研究尚不多见, 一个典型的例子是美国的 G. A. Bradshaw 和

基金项目: 东北林业大学森林植物生态学开放研究实验室开放基金资助项目

收稿日期: 1999-02-04; 修订日期: 1999-06-10

Thomas. A. Spice 应用小波理论分析了林窗的结构特征^[2]。目前,国内这方面的研究尚属空白。本文以中国东北分布极为广泛的兴安落叶松林为研究对象,应用小波分析的方法探讨了兴安落叶松林内的林窗分布规律。

1 研究方法

1.1 小波及小波变换

小波分析(wavelet analysis)是在 Fourier 分析基础上发展起来的一种数学方法。小波变换解决了 Gabor 提出的窗口和 Fourier 变换的窗口大小及形状均固定的问题,因而小波分析是一种窗口大小固定但形状可以改变的时频局部化分析^[3,4]。

如果函数 $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$ 满足“容许性”条件:

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{1}$$

那么 Ψ 称为是一个“基小波”(或母小波)。从而生成函数族 $\Psi(a, b)$

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

关于基小波 Ψ , 在 $L^2(\mathbb{R})$ 上的连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3}$$

其中 $f \in L^2(\mathbb{R})$ $a, b \in L^2(\mathbb{R})$ 而 $a \neq 0$

由于 $\Psi \in L^1(\mathbb{R})$ 则

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt < \infty \quad \text{即 } \Psi(t) \text{ 是衰减性的。}$$

而 $\int_{-\infty}^{\infty} t \Psi(t) dt = 0$ 即 $\Psi(t)$ 又具有波动性,此 Ψ 的图象是一个小的波。

由(2)式可知, $\Psi(a, b)$ 的震荡性随 $1/|a|$ 的增大而增大,所以 a 为频率参数,这里用于确定尺度因子; b 是时间参数,用于确定移动因子。由(2)式得到时间频率窗公式为:

$$[b + at^* - a\Delta_\omega, b + at^* + a\Delta_\omega] \times \left[\frac{\omega^*}{a} - \frac{1}{a} \Delta_\omega, \frac{\omega^*}{a} + \frac{1}{a} \Delta_\omega \right] \tag{4}$$

由(4)式得到面积为 $4\Delta_\omega^2$, 宽度为 $2a\Delta_\omega$ 的矩形时间频率窗(图1)。横轴为窗口函数 $\Psi_{a,b}$ 的中心(用 $b + at^*$ 表示), 纵轴为中心频率(用 ω^*/a 表示)。选择合适的 a 和 b 的参数值可以得到大小相同而形状不同的窗口。当尺度因子 a 取值较小时,可得到用于分析数据高频信号的高而窄的窗口; 当尺度因子 a 取值较大时,可得到用于分析数据低频信号的低而宽的窗口。因而,(2)式又被称为窗函数(又称之为小波分析函数)。

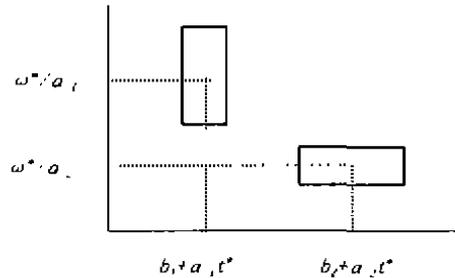


图1 时间频率窗($a < a_2$)

Fig. 1 Window of time frequency ($a < a_2$)

得到了连续小波变换的公式(3),但在实际运

用中测定的数据信息往往是离散型数据,所以需要将连续小波变换的公式(3)离散化。离散化的小波变换公式为:

$$W\Psi f(a, b) = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n f(b_i) g\left(\frac{b_i - a_i}{a}\right) \tag{5}$$

其中, a 为尺度因子; b_i 为沿样带的距离; a_i 为沿样带的距离; $\frac{1}{a} g\left(\frac{b_i - a_i}{a}\right)$ 为尺度函数(或窗口小波函数); $f(b_i)$ 为第 i 个样方的林窗分布百分率。

小波方差(wavelet variance)公式为:

$$V_{i,a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W^2(a, b_j) \quad (6)$$

其中 n 为数据向量长度。

小波的选择有多种,结合野外测定数据的复杂性,本文采用的是墨西哥帽子小波(Mexican hat wavelet)。墨西哥帽子小波为高斯函数(gaussian function)的 $e^{-t^2/2}$ 的二阶导数,即

$$\Psi_t = (1 - t^2)e^{-t^2/2} \quad (7)$$

$\Psi_{ab}(t)$ 选用墨西哥帽子小波作为窗口小波函数, $\Psi_{ab}(t)$ 的曲线随 a 和 b 的取值不同而出现波形的变化和相应的平移(图 2)。

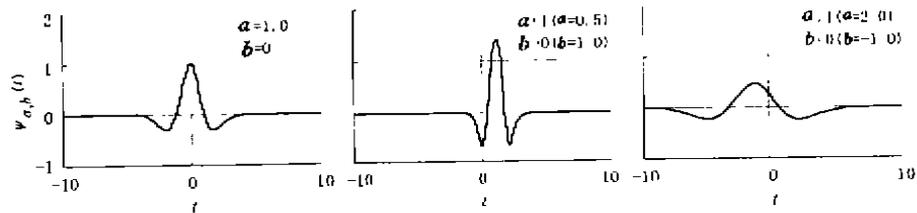


图 2 用“墨西哥帽”小波公式 $\Psi_t = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$ 做“母小波”的小波公式 $\Psi_{ab}(t)$ 在选择不同的 a 与 b 的值的波形变化
Fig. 2 Changes in the shape of the wavelet function $\Psi_{ab}(t)$ with selected values of a and b for the “mother wavelet” given by the “Mexican hat” function $\Psi_t = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$

1.2 研究地区自然概况

研究地点位于大兴安岭林业管理局所属新林林业局西南部的塔源林场(51°16′13″~51°34′44″N, 123°41′8″~124°32′47″E),该林场位于大兴安岭伊勒呼里山北坡,呼玛河流域、塔哈河上游。塔源林场属于大兴安岭腹地,地势西高东低,平均海拔较高,多为海拔 1000m 以上的高地,最高点在西南部,海拔 1240m。该区属于寒冻风化剥蚀山地地貌,山顶浑圆,坡积物、残积物较多。土壤有棕色针叶林土、暗棕壤、草甸土、沼泽土等类型。气候冬季晴燥、严寒而漫长,年平均气温 $-2 \sim -4$ °C,最低气温 -47 °C,年降水 500mm 以上,主要集中在 7~8 月,无霜期 90d 左右。植物属于达乌里区系,植被属于寒温带针叶林,原生林以兴安落叶松林占绝对优势,次生林以白桦(*Betula platyphylla*)林占优势。

1.3 调查方法

在塔源林场天然林区选取有代表性的兴安落叶松林作为研究地点。样带所在的山体海拔落差 174m,坡向西南,从山的底部向山的顶部(沿海拔梯度)设置一条长度为 1000m、宽度为 20m 的样带(transect)。以林冠层(canopy layer)中出现不超过树高的 1/4 的空隙确定为林窗。在样带中以 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 为一个单元,以垂直样带方向的 10 个单元构成一个 $1\text{m} \times 10\text{m}$ 的样方(quadrat),在每一个 $1\text{m} \times 10\text{m}$ 的样方中分别记录观察到的林窗数目和非林窗数目,以如下公式计算林窗分布百分率:

$$\text{林窗分布百分率}(\%) = \frac{\text{样方中林窗数目}}{\text{样方中林窗数目} + \text{样方中非林窗数目}} \times 100\% \quad (8)$$

2 小波分析

本文采用 MATLAB5.1 中的 WAVELET 软件(小波分析工具箱)进行兴安落叶松林窗尺度变换一维小波分析。

2.1 原始数据分析

林窗分布百分率在 1000m 样带上的分布十分复杂,参见图 3。整条样带中的林窗分布百分率,由山下到山的中部逐步上升,从山的中部开始到山上有逐步下降的趋势。样带在山的下部和中部的波动较小,但是在样带的上部出现了较大的波动。另外,样带中林窗分布百分率的波动曲线具有多个波动中心。例如图 3 中所在 60m 到 140m 地段的波动中心为 76%;在 320m 至 650m 地段的波动中心为 93%;而在较为

复杂的 680m 至 900m 地段的波动中心为 68%。由于包含的各种信息较多,波形复杂,不易于进行较为细致的分析。

2.2 小波方差分析

小波变换是分析复杂信号极为方便的工具。但为了得到比较合适的分析小波窗需要对每一个尺度下的小波变换图象进行分析和比较,从而筛选出即利于分析数据中所包含的规律与特征又不丢失有用的信息的最佳尺度下的小波窗。对于生态学研究中的大量测量数据来说,这无疑是一项耗时费力的工作。如果利用小波方差公式(6)计算出小波方差的大小,则可以很方便地得出小波变换的最佳尺度。首先尺度因子 a 从小到大地取值,应用式(5)计算每一个 a 值所对应的样带中每一个样方的林窗分布百分率的小波变换值,然后求其均方值。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;尺度定得过小,则又由于波形过于致密而不易于对于干扰信号与要研究的信息加以区别。所以,在实际运用中结合研究内容尽可能地选取合适的尺度因子进行空间分布格局的小波分析。参看图 4,图象存在两个波峰:一个波峰的中心在 $a=10m$ 处,波的尺度范围为 $6\sim 16m$,波方差变化幅度大,小波方差达 $70\%^2$ 。另一个波峰的中心在 $a=30m$ 处,波的尺度范围为 $18\sim 53m$ 小波方差的变化幅度较平稳且小波方差较小为 $24\%^2$ 。显然,尺度 $10m$ 为最佳尺度。

2.3 小波变换分析

以 $a=10m$ 进行小波变换的结果参见(图 5)。波动频率中心基本在 0 附近,波幅在 $0\sim 3$ 之间变化(不考虑负值)。小波变换的结果表明,样带中林窗的分布百分率呈间断性分布。在 $0\sim 20m, 30\sim 50m, 680\sim 700m, 790\sim 810m$ 和 $830\sim 850m$ 小区域内有十分明显的峰,对应的小波变换的值分别为:2.90、2.00、2.20、3.00 和 2.40。由此可知,样带在这 5 个区域存在较高的林窗分布百分率,而且主要集中在样带的 $0\sim 50m$ 和 $680\sim 850m$ 两个较大的区域中。在 $90\sim 110m, 160\sim 180m, 190\sim 220m, 290\sim 305m, 310\sim 340m, 350\sim 370m, 630\sim 660m$ 和 $760\sim 780m$ 小区域内有较为明显的峰,相对应的小波变换值分别为:1.40、1.20、

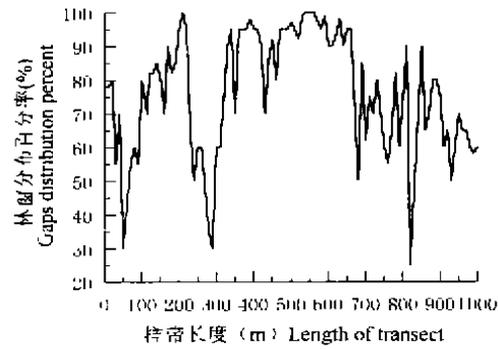


图 3 兴安落叶松林 1000m 样带内的林窗分布百分率变化
Fig. 3 Change of percentage of caps distribution in transect of *Larix gmelinii* forest

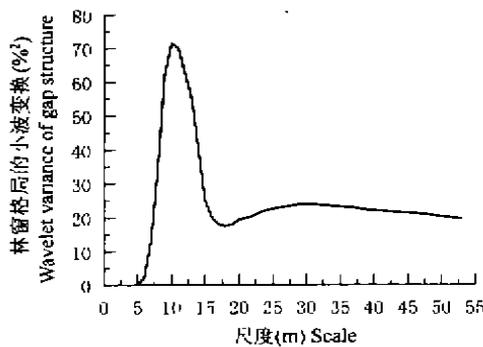


图 4 不同分布格局尺度的林窗分布的小波变换($\%^2$)
Fig. 4 Wavelet variance of gap distribution as results of variable scale of the pattern

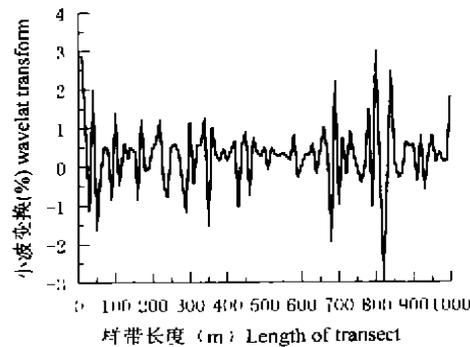


图 5 当尺度 $a=10m$ 时的林窗分布的小波变换($\%$)
Fig. 5 Wavelet transform of gap distribution when the scale "a" equal to 10 meter

1.20、1.15、1.30、1.05、1.00和1.60,并主要分布在样带的0~370m与630~780m两个较大的区域中。而小波变换值小于1.00的波幅较小的区域主要分布在370~630m和830~985m两个小区域内。上述数据表明,样带中反映明显密集与稀疏的林窗分布变化的尺度为20m左右。在 $20 \times 20\text{m}^2$ 的样带面积中林窗疏密分布具有相对稳定的特点。总的看来,样带中林窗分布密集与稀疏的区域呈相互间隔分布。形成上述特点的原因主要与林内树冠的冠幅的大小和林木分布的空间格局有密切关系。

另外,样带中0~370m和630~850m的区域中,是林窗疏密分布变化比较剧烈的区域,林窗分布格局为斑块状;而在样带370~630m和830~985m的区域中林窗疏密分布变化比较平缓,林窗分布较为均匀。

3 结论

由上述小波分析可以得到3个结论:

(1)根据样带的林窗分布百分率小波方差分析结果,样带的林窗分布百分率小波变换的最佳尺度为10m。

(2)兴安落叶松林的林窗分布的疏密变化尺度为20m左右,在样地中 $20 \times 20\text{m}^2$ 的小区域内具有较为稳定的分布特点。

(3)兴安落叶松林的林窗分布在样带中呈斑块状分布,且斑块分布随样带海拔的升高呈间断性变化。

小波分析为植物空间分布格局研究提供了一种实用、便捷的研究方法,它能够解决植物空间分布格局的尺度优化问题,它的结论更贴近测得数据所反映的真实特征,能够揭示比较复杂的数据信息中的潜在规律。总之,小波理论在生态学研究领域将会得到广泛的应用与发展。

参考文献

- [1] 朱启疆,范韶华,等.森林间隙率模型及模型验证.环境遥感,1995,10(1):70~74.
- [2] Bradshaw G A and Thomas A Spies. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1992, 80:205~215.
- [3] 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,1995.7~11,80~86.
- [4] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1994.1~3.