

东灵山地区辽东栎林主要土壤因子的 Haar 小波分解

赵则海^{1,2}, 祖元刚¹, 丛沛桐¹

(1. 东北林业大学森林植物生态学开放研究实验室, 哈尔滨 150040; 2. 浙江省台州师范专科学校生化系, 浙江临海 317000)

摘要:小波分解可以区分一维信号的区域变化和局部细节, 是进行土壤因子分析的一种有效方法。应用该方法对北京东灵山地区辽东栎林样带中的 3 个主要土壤因子指标进行 Haar 小波分解。结果表明: 沿山下到山顶样带梯度, 土壤含水量呈明显的逐步下降趋势; 土壤 pH 值变化幅度在 6.5~6.6 之间, 表现比较稳定; 土壤有机质含量在样带中存在 3 个较高值区域, 具有一定的复杂性。较大水平上 3 个土壤因子在样带的下部受到的干扰较大, 在样带的中、上部受到的干扰较小; 在较小水平上, 土壤含水量存在不规则的周期性干扰, pH 值和有机质含量受干扰的情况较为复杂, 规律性不明显。低频近似信号可以有效地揭示出土壤因子在样带中的总体变化规律, 高频细节信号主要反映土壤因子受其它因素干扰程度, 并可以在样带上定位出现奇异性变化的区域。

关键词:辽东栎林; 土壤因子; 小波分解

Haar Wavelet Decomposition of Main Soil Factors in *Liaotungensis* Forest in Dongling Mountain Area

ZHAO Ze-Hai, ZU Yuan-Gang, CONG Pei-Tong (1. *Open Research Laboratory of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*; 2. *Department of Bio-chemistry, Taizhou Teacher College, Linhai 317000, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1660~1665.

Abstract: The method of wavelet decomposition can be used to analyse approximations and details of one dimension soil signal. It is an effective tool for soil factors analysis. The study on decomposition of Haar wavelet for three main soil factors in belt transect of *Liaotungensis* forest in Dongling Mountain area, Beijing, was done by this method. The research results showed: along hillslope from under to upper, soil moisture decreased obviously step-by-step; pH of soil displayed relative stabilization and changed between 6.5 and 6.6; There were three parts that soil organic content had high value in belt transect. Its trend was complexity. Based on bigger levels, three soil factors got more interferences in the under parts of belt transect then that in the middle and upper parts. On lesser levels, soil moisture had irregular periodical interference and changing pH-values and organic content were quite complex and not regular in evidence. The approximation components of low-frequency indicated overall trend of soil factors in belt transect effectively. The detail components of high-frequency showed disturbed degree of soil factor by the other factors and it display location of singularity in belt transect.

Key words: *Liaotungensis* forest; soil factors; wavelet decomposition

文章编号: 1000-0933(2002)10-1660-06 中图分类号: S718.5, S724 文献标识码: A

在植物群落的分布与演替研究中, 作为主要环境因子的土壤因子的研究得到了广泛重视。由于在不同

基金项目: 国家自然科学基金“九五”重大资助项目(39893360)

收稿日期: 2001-12-25

作者简介: 赵则海(1968~), 男, 黑龙江省嫩江县人, 博士, 讲师。从事植物生态学研究。E-mail: zhzh315@sina.com

的地区、不同的样地甚至是同一样地的不同采样点的土壤因子指标均存在不同程度的变化,因此,往往采用在样地中设置多个重复并取其平均值来解决,但这种方法往往忽略了土壤因子在局部地点的复杂性。在北京东灵山地区,土壤的形成与垂直分布主要受海拔高度及其所决定的生物气候特点、地形和地质等因素的影响^[1],分析该地区小环境下土壤指标的变化规律比较困难。近年来小波分析开始应用于植物生态学研究并取得了较好的效果^[2, 3]。小波变换对一维曲线在不同频域、不同域上的奇异点分析方面具有独到之处。小波分析所具有的这种多分辨分析能力,可以用来分解构成曲线信号的高频部分和低频部分,从而获得该信号的趋势分析和局部细节变化规律。小波分解可以很好地分析植物对光照、温度等环境因子引起的植物电位变化的响应^[4],本文采用 Harr 小波分解对辽东栎样带中土壤主要因子进行分析,探讨土壤因子在样带内变化趋势及各个采样点处的细节变化,为土壤因子分析探讨一种较为可靠、有效的研究方法。

1 研究方法

1.1 研究地点概况

东灵山地区位于北纬 39°48′~40°00′,东经 115°24′~115°36′,为太行山系小五台山余脉,海拔 1000m 左右。该地区为暖温带大陆性季风气候;土壤主要为山地棕壤土和山地褐色土;植被区划属于暖温带落叶阔叶林,辽东栎林主要分布在海拔 800~1600m 之间。

1.2 调查与分析方法

在北京东灵山森林生态系统定位研究站附近选择较为典型的辽东栎林,从山下到山顶沿山坡设置 1 条样带。山下海拔 1070m,山顶海拔 1310m,样带长度 264m,样带垂直落差 140m,坡度一般在 30~40°之间。由于受地形和侵蚀作用的影响,样带内土壤的厚度变化较大,山顶多岩石裸露,因此样带内土壤采样时取 0~15cm 深度,土样带回实验室进行测定。在样带内,由下向上间隔 2m 取土样,共 132 个采样点,各采样点至起点的距离构成土壤因子的采样序列(m)。本文选取了 3 个较为主要的环境因子,即:土壤含水量(%),pH 值和土壤有机质含量(%).土壤含水量(%)采用烘干称重法,pH 值采用酸度计法,土壤有机质含量(%)采用酸碱滴定法。

1.3 小波分解

由于在样带内土壤采样间隔为 2m,测定数据为离散型数据序列,因此采用离散小波变换方法。小波变换主要适用于信号分析,具有同时表达时域和频域变化的能力。本文采用较为简单的 Harr 小波作为分解土壤因子信号变化的小波基,尽管 Harr 小波存在光滑性较差,对突变信号的检测效果不佳的缺点,但由于其具有很好的局部性^[5],用于分析土壤因子信号沿海拔梯度变化趋势和受到由干扰引起的振荡很有效果。

Haar 小波表达式为:

$$h(t)=\begin{cases}1 & 0\leq t\leq 1/2 \\ -1 & 1/2\leq t\leq 1 \\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

(1)

由小波母函数公式:

$$\Psi_{a,b}(x)=|a|^{\frac{1}{2}}\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$$

(2)

其中 $a,b\in R,a\neq 0$ 。

当 $a=2^j,b=k2^j$,采样间隔取 1 时,小波滤波函数^[5]为:

$$g_{j,k}(x)=2^{-\frac{j}{2}}g(2^{-j}x-k)$$

(3)

其中 $j\in N,k\in N,j$ 为小波分解的水平数, k 为采样点数。

则,进行 j 次分解的小波变换函数为:

$$W(j,k)=\sum_{x\in Z}s(x)g_{j,k}(x)$$

$x=1,2,3,\cdots,k$

(4)

万方数据

$s(x)$ 为信号数据序列。

反变换函数为：

$$s(x) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} W(j,k) g_{j,k}(x) \tag{5}$$

对土壤因子信号(即原始信号 S)进行多次分解,可以得到“近似”信号部分(即 a_j)和“细节”信号部分(即 d_j),两者关系:

$$S \begin{matrix} \searrow & \rightarrow & \searrow & \rightarrow & \searrow & \rightarrow & \dots & \rightarrow \\ a_1 & & d_1 & & a_2 & & d_2 & & a_3 & & \dots & & a_j \end{matrix}$$

由于土壤因子数据为一定区域内测定的有限数列,因此土壤因子信号的分解次数是有限的,一般以将原始信号分解得到变化规律较为明显、利于进一步分析即可。在 Matlab5.1 工作环境下利用小波工具箱和编制部分 M 文件实现小波分析。

2 结果与分析

2.1 土壤因子的 Haar 小波分解的生态学意义

小波分析所采用的原始信号分别为北京东灵山地区辽东栎林样带内的 3 个主要土壤因子。分别以土壤含水量、土壤 pH 值和土壤有机质含量的离散数据序列(即原始信号)为纵坐标,以土壤因子的采样序列为横坐标作图,见图 1 中的 S_1 、 S_2 和 S_3 。对 3 个土壤因子的小波分解的结果分别见图 2、图 3 和图 4。

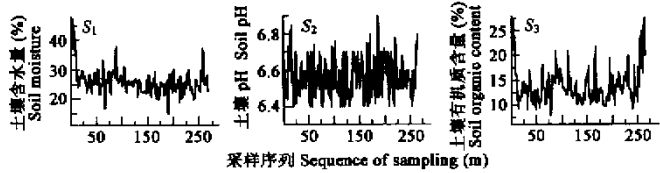


图 1 样带内 3 个土壤因子数据(原始信号)变化

Fig. 1 Changes of original signal of three soil factors in the belt transect

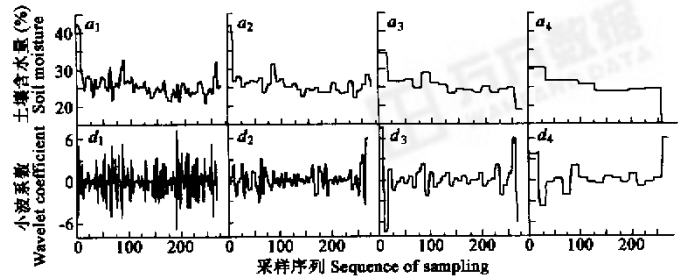


图 2 样带内土壤含水量的小波分解

Fig. 2 The wavelet decomposition of soil moisture in the belt transect

土壤因子的小波分解结果分为两部分:近似信号(a_j)和细节信号(d_j)。通过对多个土壤信号的多水平分解表明,在第 4 次分解已能够得到信号较为明显的变化规律,近似信号和细节信号均已较为简单,继续分解信号将造成更多的近似信号部分被移入细节信号之中,不利于对原始信号的总体变化规律进行分析,因此土壤因子小波分析采用了 4 水平的分解。

近似信号表示土壤因子沿山坡随海拔梯度的增加而变化的去噪部分(分离出其它因子干扰所余下部分),是在各个水平上拟合原始信号的部分,可以较为直观反映出土壤因子在样带中的变化规律。

细节信号是从原始信号分解出来的,代表各个水平近似信号的“噪声”部分,反映土壤因子在样带不同部位的振荡。原始数据中某个区域的曲线振荡变化越大,则反映该区域土壤因子变化越复杂,受到其它因素干扰的程度越大。细节信号所反映出曲线变化的奇异性,包括突变性变化或不连续间断,往往代表该

处原始信号存在较大的幅度的变化,并可以精确地定位该区域的起止点。由于近似信号和细节信号均是从原始信号通过高通滤波器和低通滤波器的逐步分解得到的,在同一水平上的两种信号的曲线变化存在一定的相关性,并随水平数的增加曲线变化趋于简单。

2.2 土壤含水量的 Haar 小波分解

土壤含水量原始信号 S_1 (见图 1)反映土壤含水量在样带中的变化,其变化规律被包含于变化复杂的波动之中。进行 Haar 小波分解之后,在近似信号 a_4 中(见图 2),土壤含水量随海拔梯度的增加而逐步降低,尤其是山下沟谷靠近水源样带部分的含水量最高,平均为 26.85%;山顶树木稀疏、岩石裸露样带部分含水量最低。样带内土壤含水量的这种变化规律对植物种群的空间分布产生了较大的影响,有关样带内植被结构与空间分布规律请参见有关文献资料^[6, 7]。在前 3 个水平分解的近似信号的总体变化规律均不如近似信号 a_4 明显。细节信号 d_1 的波动出现 4 个振荡较小的区域,即在 10~36m、110~130m、180~190m、和 244~250m 范围之间土壤含水量的变化较小;在 40~100m、130~170m、200~230m、和 230m 以上范围之间振荡较大,表示该范围内含水量的变化较剧烈。细节信号 d_1 的规律性较为明显,在细节信号 d_2, d_3 和 d_4 中这种振荡周期性不明显,但在细节信号 d_4 中,除样带的上端外,可以看出土壤含水量在样带的下部受干扰因子较大,引起的振荡沿样带海拔升高而递减。可见,样带内土壤含水量受微小环境条件下干扰因子的影响较大,其变化规律在低水平上表现比较明显,因此分析土壤含水量在微环境下的变化时,取样点较密集为好。

2.3 土壤 pH 值的 Haar 小波分解

土壤 pH 值原始信号 S_2 (见图 1)沿海拔梯度变化范围比较小,在 6.4~6.7 之间,且在样带中的变化比较复杂。进行 Haar 小波分解之后,在近似信号 a_4 (见图 3)中,土壤 pH 值在样带中下部随海拔梯度的增加而逐步降低,在样带中上部随海拔梯度的增加而升高(山顶岩石裸露区域除外);pH 值最低点出现在样带中部,即 96~124m 样带区间,平均为 6.522;pH 值最高点出现在样带的上部,即 192~220m 样带区间,平均为 6.598。总体上 pH 值在样带中偏酸性。pH 值的细节信号 d_1 的振荡幅度沿样带海拔梯度有逐步增大的趋势(山顶岩石裸露区域除外),表示 pH 值在小环境下的异质性在样带中上部表现更为明显。在细节信号 d_2 的振荡规律与细节信号 d_1 相近,由于近似信号 a_1 部分细节被过滤掉,波动出现两个振荡较小的区域,即在 60~90m 和 210~130m 之间,表示该范围内 pH 值的变化较小。细节信号 d_4 中,样带下部和上部的振荡幅度较大,存在其它因素的较强干扰(山顶除外)。

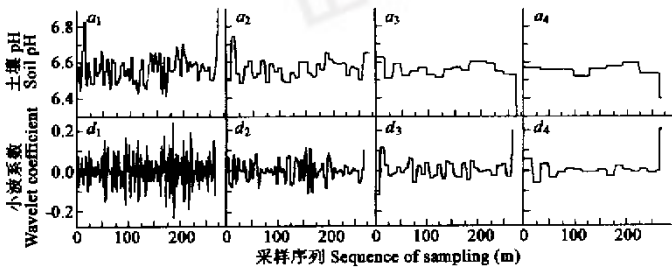


图 3 样带内土壤 pH 的小波分解

Fig. 3 The wavelet decomposition of soil pH in the belt transect

2.4 土壤有机质的 Haar 小波分解

土壤有机质原始信号 S_3 (见图 1)沿样带海拔梯度似乎有上升的变化趋势,但波动信号过于复杂,无法辨别其可靠性。在第 4 水平的近似信号 a_4 (见图 4)中,土壤有机质含量在样带内存在 3 个较高值区域,即在样带 36m 以下、64~128m、190~256m 之间数值较高,有机质含量均超过 14.5% 以上;在 160~190m 范围内有机质含量较低,数值在 12.5% 以下。总体上看,在样带中部土壤有机质含量较低,在样带的下部和上部有机质含量较高。可见,从原始信号分析土壤有机质含量变化规律容易产生误差。土壤有机质含量的细

节信号 d_1 的振荡规律性不明显,但可以定位振幅较大的样点。如在样带 112~120m、160~168m 区域内存在较大的异质性变化。在样带中以 88m 样点为界,下部土壤有机质含量振荡幅度大,上部土壤有机质含量振荡幅度较小。在细节信号 d_2 和 d_3 中,在样带中部有机质含量的振荡较小,土壤有机质含量变化较为稳定,表明样带中部受干扰较小。细节信号 d_4 中,样带中均存在相近的振荡幅度,表明样带内土壤有机质含量在大尺度下均存在较强的干扰(山顶除外)。

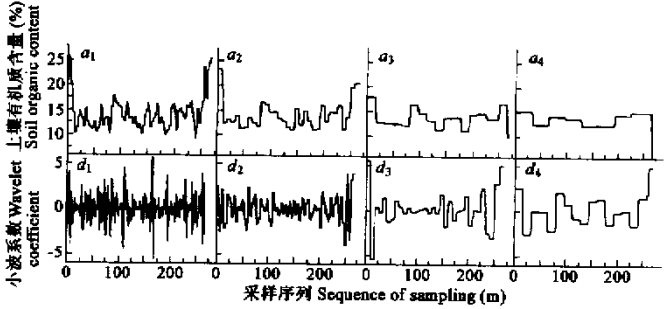


图4 样带内土壤有机质含量的小波分解

Fig. 4 The wavelet decomposition of soil organic content in the belt transect

2.5 影响土壤指标变化的主要干扰因子异质性的定位

影响一个土壤信号在样带内的变化的干扰因子是多方面的,如坡度、林下光照、覆盖的植被以及其它土壤因子之间的相互作用等。样带内任一采样点处的干扰因子大小在小波分解细节信号中表现为振荡强度,是多种干扰因子共同作用的结果。例如,在样带 38m 以下山脚,坡度较缓,平均为 31.46° ,土壤含水量大(见图 2 近似信号),植被盖度达 93%而光照较弱;在样带 110m 以上的样带中部,坡度较大,平均为 38.27° ,植被盖度为 78%,光照稍强。土壤含水量在样带的中下部(采样 38~110m 之间)细节信号震荡较大(见图 2 d_1)。显然,土壤含水量细节信号震荡较大区域处于坡度、光照、植被盖度等因素变化的过渡区,也是干扰因子变化敏感区。同理,可以看出样带中上部(采样 200~226m 之间)为土壤干扰因子变化的敏感区,干扰因子变化的敏感区即是干扰因子综合作用异质性较明显的区域。基于以上的分析,根据不同水平细节信号的振荡幅度,可定位土壤含水量、土壤 pH 值、有机质受干扰的敏感区,坡度、光照、植被盖度等干扰因子在该区域异质性比较明显。

3 讨论

3.1 近似信号可以用来表示土壤因子随海拔梯度的增加而变化的去噪部分,随着分解次数的增加,近似信号的变化规律趋于清晰、简单化,可以较为直观反映出土壤因子在样带中的总体变化规律(或趋势)。随着样带的海拔梯度升高,土壤含水量呈明显的逐步减小变化;土壤 pH 值变化幅度在 $6.5\sim6.6$ 之间,表现比较稳定,只是在样带中部 pH 值较小;土壤有机质含量的变化具有一定的复杂性。在一定程度上,通过植物种群动态变化可以反映土壤因子在样带内的变化^[6]。由于去掉了“噪声”部分,因此在土壤因子总体变化的曲线单调性较好,利于进行沿环境梯度的趋势分析。

3.2 细节信号是各个水平近似信号的“噪声”部分,可以定位土壤因子在样带不同部位的振荡(尤其是奇异变化)的位置,从而反映受其它因素干扰作用的程度,定位土壤因子的异质性。3 个土壤因子信号的第 3、4 水平上的细节信号在样带的下部的振荡较大,反映受到的干扰较大;样带的中、上部振荡较小,反映受到的干扰较小。在第 1、2 水平的细节信号中,可以根据信号振荡变化定位土壤因子的异质性;另外,根据土壤因子细节信号振荡可以定位干扰因子综合作用变化的敏感区。土壤含水量存在不规则的周期性干扰,而 pH 值和有机质受干扰的情况较为复杂,规律性不明显。

3.3 在 3 个土壤因子的小波分析中,第 4 水平的细节信号振荡变化细节保留的太少,而第 1 水平的细节

信号往往含有较多的“噪声”成分,因此,在实际应用中,小波分解应为有限步分解,结合研究课题需要选择合适的分解水平。

3.4 在样带的上部(即山顶)土壤较薄,岩石多裸露,由于地上部植被较为稀疏、低矮,该处的土壤因子受到较为极端的环境条件影响,使土壤因子变化反映出与样带内其它部位明显不同的特点。土壤含水量、pH 值和土壤有机质含量的近似信号 a_4 大幅度下降而细节信号 d_4 反映出较强的振荡(见图 2~图 4 中的 a_4 和 d_4),均可能是山顶土壤因子的特殊性的表现。

参考文献

[1] Sun S Z(孙世洲). The characteristics of the geology, geomorphology and soils in Dongling Mountain region. In: Chen L Z(陈灵芝) ed. *Study on forest ecosystem structure and function in the warm temperate zone*(in Chinese). Beijing: Science Press, 1997. 10~27.

[2] Zu Y G(祖元刚), Zhao Z H(赵则海), et al. An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报), 1999, **19**(6): 927~931.

[3] Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Trans. PAMI*, 1989, **11**(7): 674~693.

[4] Leng Q(冷强), Huang L(黄岚), et al. Wavelat transform analysis of local electrical potential in plants, *Acta Biophysica Sinica*(in Chinese) (生物物理学报), 1998, **14**(1): 140~144.

[5] Li S X(李世雄). *Wavelet transform and its application*(in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1997. 20~21.

[6] Zu Y G(祖元刚), Zhao Z H(赵则海), et al. Fractal analysis on spatial distribution on patterns of population from *Quercus liaotungensis* forest in Dongling Mountain, Beijing China. *Bulletin of Botanical Research*(in Chinese)(植物研究), 2000, **20**(1): 112~119.

[7] Cong P T(丛沛桐), Zhao Z H(赵则海), et al. The research of succession process of *Quercus liaotungensis* community on Dongling Mountain with continues time markov approach. *Bulletin of Botanical Research* (in Chinese)(植物研究), 2000, **20**(4): 438~443.