

DOI: 10.5846/stxb201209041252

姜春, 吴志峰, 钱乐祥, 文雅, 邓南荣. 广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应. 生态学报 2013, 33(16): 5118–5125.

Jiang C, Wu Z F, Qian L X, Wen Y, Deng N R. Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(16): 5118–5125.

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应

姜春^{1,2,3,4}, 吴志峰¹, 钱乐祥^{1,*}, 文雅⁵, 邓南荣³

(1. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

3. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;

5. 华南农业大学信息学院, 广州 510642)

摘要: 研究土壤有机碳的尺度效应能够为区域生态环境保护 and 确定合理的土壤取样间距提供科学依据。采用土壤类型法估算了广东山区表层(0–20 cm)和全剖面(0–100 cm)土壤有机碳密度, 选择 4 条采样带, 获取采样间距为 250 m 的土壤有机碳密度序列, 并利用离散小波变换工具对其进行多尺度分解, 得到 2×250 m、 $2^2 \times 250$ m、 $2^3 \times 250$ m、 $2^4 \times 250$ m、 $2^5 \times 250$ m 和 $2^6 \times 250$ m 6 个分解尺度上的小波信息, 计算小波信息方差。结果表明: 土壤有机碳密度具有较强的空间异质性, 其空间异质性的 size 受控于不同尺度下土壤有机碳密度分布格局的主导因子影响程度; 整体在大于等于 1 km 的尺度, 其空间异质性较强; 各个样带特征尺度的差异与各样带的土壤和植被类型、地貌特征以及土地利用方式、耕作管理方式等人类活动干扰强度有关。

关键词: 土壤有机碳; 空间变异; 尺度效应; 小波变换; 广东山区

Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province

JIANG Chun^{1,2,3,4}, WU Zhifeng¹, QIAN Lexiang^{1,*}, WEN Ya⁵, DENG Nanrong³

1 School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3 Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Understanding the scaling effect on the spatial variation of soil organic carbon (SOC) is necessary for regional eco-environmental protection and for determination of reasonable soil sampling intervals. The objective of this study was to characterize the scaling effect on the spatial variation of SOC using wavelet multi-analysis techniques. This study was based on data from 223 typical soil profiles that were derived from the second national soil survey data from Guangdong Province. The soil profile data included soil types, soil organic matter (SOM) content, soil bulk density, soil depth and area. We estimated SOC density from depths of 20 cm and 100 cm in mountainous areas of Guangdong Province, and then developed an SOC density map with a grid size of 250 m by using the soil type map (1:200000). In detail, we selected four spatial sampling transects, which comprised two horizontal transects with a grid size of 250 m from $24^\circ 50' N$ to $24^\circ N$ latitude, and two left-oblique transects with a grid size of 250 m from $111^\circ E$ to $114^\circ E$ longitude, and from $115^\circ E$ to $116^\circ E$ longitude. These four transects reflect the general characteristics of the study area. By using the method of discrete wavelet

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171446); 国家科技支撑计划项目(2012BAH32B03); 省部共建黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室开放基金项目(GTYR2011001)

收稿日期: 2012-09-04; 修订日期: 2013-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qian-lx@163.com

<http://www.ecologica.cn>

transform (DWT) on the spatial sampling data of SOC density along the above four transects, we derived wavelet approximate information and wavelet detailed information over six different scales of 2×250 m (0.5 km), $2^2 \times 250$ m (1 km), $2^3 \times 250$ m (2 km), $2^4 \times 250$ m (4 km), $2^5 \times 250$ m (8 km) and $2^6 \times 250$ m (16 km) respectively. The descriptive statistical characteristics of SOC density were tabulated, and then we calculated the variance of the wavelet detailed information of SOC density, which can then represent the magnitude of variation in SOC density. The results showed the following. (1) On the whole, the spatial heterogeneity of SOC density was strong and varied with different transects and soil depth, which was controlled by dominant influence factors on different scales. (2) The overall optimum scale of grid size on which SOC had the maximum spatial heterogeneity was equal to or greater than 1 km. (3) The variation of different scales of each transect varied with soil type and vegetation type, geomorphologic characteristics, human activities (e. g. land use, cultivation management) and other influencing factors. In summary, this study provided a reference for the application of discrete wavelet transform to the spatial variation of SOC density on large regional scales, and made the analysis of SOC variation patterns more convenient.

Key Words: soil organic carbon; spatial variation; scaling effect; wavelet transform; mountainous areas of Guangdong Province

空间变异及其尺度效应在地理学、生态学、水文学和土壤学等学科领域都具有非常重要的地位,已经成为当前各学科研究的热点之一^[1-5]。

关于土壤有机碳空间变异的尺度效应研究,目前主要集中在农田或果园等小区域土壤有机碳/有机质空间变异的尺度效应以及区域尺度和国家尺度间的对比分析方面,研究方法也多采用传统的数理统计分析、空间自相关分析、半方差分析、GIS模型中的地统计分析等^[6-10]。近年来,小波分析凭借其能够有效处理非平稳信号的优势被较多地应用到地学和生态学中,试图揭示自然或生态因子的多尺度格局^[11-12]。G. Katul等^[13]应用 Haar 小波对碳、水和热等地表通量参数分别从秒到小时、小时到天以及周到年 3 个时间尺度上进行了分析。李双成等^[14]通过小波变换揭示了西藏高原生态系统的(NDVI)与地形因子的多尺度空间格局和相关性。李小梅等^[2,15]利用小波多尺度分析工具分析了福州市 NDVI 和地形因子等生态环境参数的尺度—格局特征以及生态环境参数相关关系的尺度响应。赵则海等^[16]利用离散小波变换分析了北京东灵山地区辽东栎林样带中的土壤 pH 值、含水量和有机质这 3 个主要土壤因子指标沿山下到山顶样带梯度的不同分解水平上的变化规律。Bingcheng Si 等^[11]利用小波分析研究了土壤水力特性和物理特性相关关系的尺度效应,并综述了小波分析法在土壤学中的应用。Qiaosheng Shu 等^[17]以辽宁省阜新市一农田示范区作为研究区,利用连续小波变换研究得出了土壤水力特性和物理特性之间的相关性依赖于尺度和空间位置。Asim Biswas^[18]等综述了连续小波变换在土壤空间变异研究中的应用,揭示了土壤属性的尺度和位置依赖性。

综上所述,目前小波分析多应用在生态环境的尺度研究中,利用小波分析研究土壤性质的尺度效应方面,多是集中在小区域土壤水力特性和物理特性相关关系的尺度效应研究以及土壤因子的多尺度变化规律上,而在省域这种大范围内来研究土壤有机质/有机碳空间变异的尺度效应至今还未见报道。基于此,本文以广东山区为例,采用土壤类型法估算了研究区域的土壤有机碳密度,并以此作为研究对象,选择 4 条样带,利用小波分析技术对土壤有机碳密度进行多尺度分解,以期在栅格尺度上定量揭示土壤有机碳密度的多尺度空间分布格局,既有助于区域的碳循环研究,也为确定合理的土壤取样间距和广东山区生态环境保护与资源可持续利用研究提供科学依据。

1 研究区和数据源

1.1 研究区概况

广东省政府采用以县域为单位,认为山区和丘陵面积占全县总面积 70% 以上的为山区县,按这一标准,广东省共有 50 个山区县(市),即本文的研究区域(图 1)。广东山区东起莲花山,西至云开大山,北部为南岭

山地,南部包括部分沿海丘陵台地,主要分布在粤北、粤东和粤西北,位于北纬 $21^{\circ}42' - 25^{\circ}31'$,东经 $110^{\circ}32' - 117^{\circ}11'$ 。地处中亚热带和南亚热带季风气候区,夏季多台风暴雨,冬春季有冷空气入侵。地势北高南低,地貌形态复杂,山地丘陵广布,山谷相间排列。植被类型主要为南亚热带常绿季雨林、中亚热带常绿阔叶林、亚热带草坡及人工杉林、松林等,由于人类活动的长期影响,原生的季雨林和常绿阔叶林已极少存在,大部分已变成针叶林、针阔混交林、稀树灌丛草坡、人工植被或次生林。土壤类型主要为地带性赤红壤和红壤及人为土壤水稻土^[19]。

1.2 数据源概况

本研究以广东省 1:20 万土壤类型图、广东山区行政边界图及第二次土壤普查得到的 223 个典型土种剖面作为基础数据源,采用土壤类型法估算了研究区域以土属为基本单位的土壤有机碳密度^[20-21]。为了满足研究的需要,通过土属标识码,分别以 20 cm 和 100 cm 深度土属有机碳密度作为属性,绘制了栅格大小为 250 m \times 250 m 的广东山区土壤有机碳密度空间分布图(图 2 和图 3)。

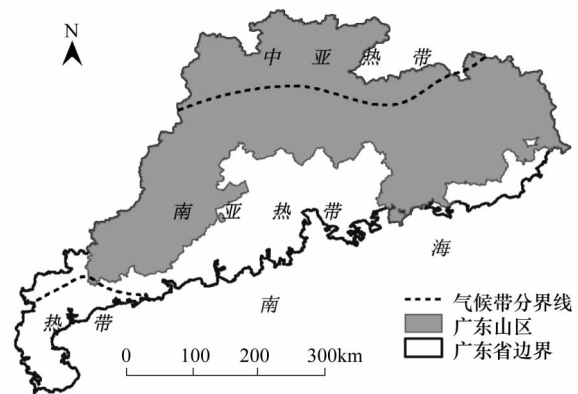


图 1 研究区域位置和范围示意图

Fig. 1 The scheme of study area's location and scope

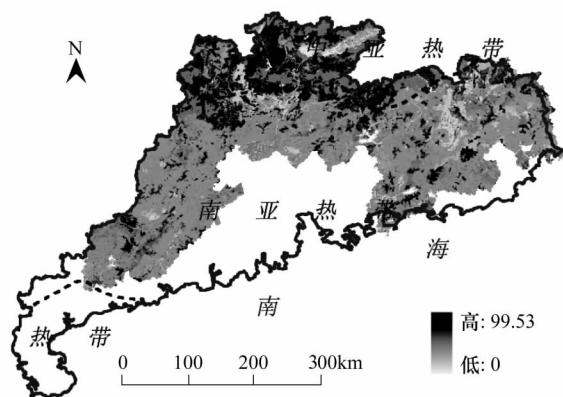


图 2 0—20 cm 土壤有机碳密度分布图

Fig. 2 The distribution of SOC density (0—20cm)

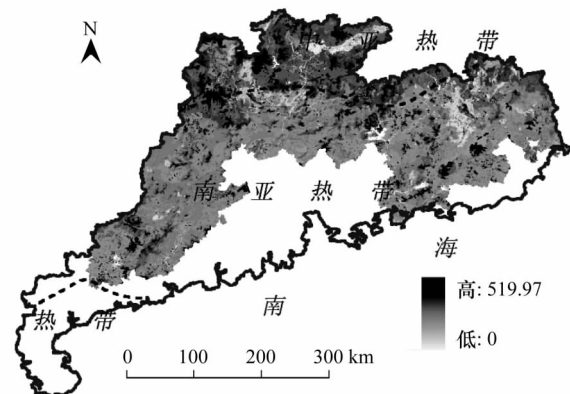


图 3 0—100 cm 土壤有机碳密度分布图

Fig. 3 The distribution of SOC density (0—100cm)

SOC (Soil Organic Carbon) 为土壤有机碳

2 研究方法

2.1 样带剖面数据的提取

为了使得根据样带提取出的总的像元能够近似反映出研究区的总体特征,本文在选择经纬度采样法的同时还考虑了研究区的地貌、气候和形态特征:地貌形态复杂,地处中亚热带和南亚热带两个季风气候区,呈由南而北突的人字形条带。因此,分别沿 $24^{\circ}50'N$ 和 $24^{\circ}N$ 设置了间距为 250 m 的纬度采样带 1 和样带 2,分别沿 111° — 114° 和 115° — 116° 设置了间距为 250 m 的经度倾斜样带 3 和样带 4,如图 4 所示。在 ArcGIS9.2 软件的支持下,得到土壤有机碳密度在 4 条样带上的一维空间数据序列。

2.2 小波多尺度分析—离散小波变换

2.2.1 小波多尺度分析的基本原理

小波多尺度分析是通过构造小波基进行时间(空间)和频率变换,通过伸缩平移运算对时间(空间)序列进行多尺度分析,最终达到高频处时间(空间)细分,低频处频率细分,能自动适应时间(空间)序列分析的要求,因此它是时间(空间)序列尺度特性的强大分析工具,具体实现过程如下:

对于一组在位置 $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 处的空间序列 y_i , 小波变换可以表示为:

$$W(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \overline{\varphi_{s, \tau}(x)} dx \quad (1)$$

$$\varphi_{s, \tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \varphi\left(\frac{x - \tau}{s}\right) \quad (2)$$

式中, $\varphi(x)$ 为被称之为小波的函数, s 为小波函数的扩张或收缩因子, 即尺度因子, τ 为 $\varphi(x)$ 在时间或空间上的转化或迁移, 即平移因子, 待基本小波与待分析函数经过以上运算之后, 可分解得到不同尺度下的小波系数^[11]。

2.2.2 空间变异的尺度效应的量度——小波方差

本文选择小波方差来度量土壤有机碳密度空间变异的尺度效应, 它表示土壤有机碳密度的空间采样序列在给定尺度的小波分解下小波细节信息离开平均位置的量度, 用来检验全局结构, 某一尺度的小波方差越大, 表示该尺度上结构信息越丰富, 空间异质性越强, 可以揭示特征尺度, 即指能够描述土壤有机碳密度空间异质性的最佳采样间距。具体做法为:

设 $W(a, b)$ 为信号 $f(n)$ 在尺度 a , 位置 b 上的小波变换系数, 参照文献^[2], 尺度 a 下的小波方差可以定义为:

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

式中, n 为样带序列的总样本数。

3 结果与分析

3.1 各样带土壤有机碳密度的描述性统计特征

4 条采样带 6195 个本土土壤有机碳密度的描述性统计特征如表 1。由表 1 可知, 在原始尺度下 4 条样带两种剖面深度的土壤有机碳密度具有不同的统计特征, 均值和标准差随样带和深度表现出了一定的差异, 这与 4 条样带的自然地理景观特征有关; 由均值和标准差计算得到的变异系数最小为 24.5%, 最大为 40.3%, 表明了土壤有机碳密度具有较强的空间变异性。

表 1 土壤有机碳(SOC)密度描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of SOC density

土壤深度/cm Soil depth	描述特性 Descriptive characteristics	SOC 密度 SOC density/(tC/hm ²)			
		样带 1 Transect 1 N=912	样带 2 Transect 2 N=2060	样带 3 Transect 3 N=2118	样带 4 Transect 4 N=1105
0—20	最小值	0.83	0.98	0.64	1.13
	最大值	74.77	74.77	75.01	74.77
	平均值	51.76	34.5	36.4	31.3
	标准差	14.448	11.875	11.625	10.687
0—100	最小值	1.8	2.48	2.19	8.1
	最大值	186.11	253.65	437.67	519.97
	平均值	125.61	97.71	99.95	96.21
	标准差	33.277	28.414	25.594	38.785

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon

3.2 土壤有机碳密度的 DB6 小波分解的意义

小波分析可分为连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT), 离散小波变换被认为是对二进连续小波

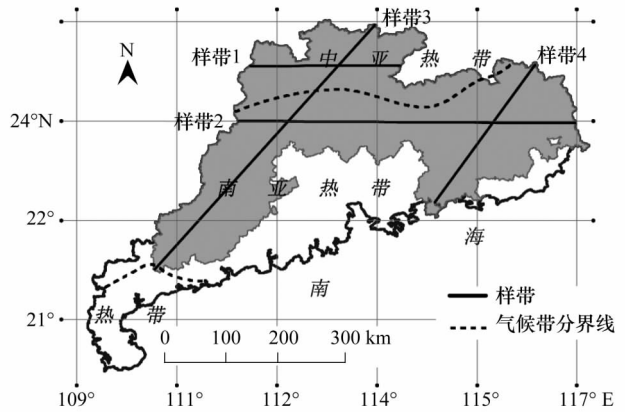


图 4 研究区域样带位置图

Fig. 4 The transects' location map of study area

的亚采样,并且从连续小波减弱到离散小波没有任何信息损失^[18],本文采用一维离散小波变换对土壤有机碳密度样带序列进行尺度分解,小波母函数选择在小波分析中常用的 DB6,算法采用 Mallat 算法,是通过调节尺度因子对信号实施由细至粗的分解和由粗至细的重构,分别对应分解后的细节信息(d_j)和近似信息(a_j),两者之和等于原始信息^[2]。分解级别选择 6 级,认为这个级别基本已达到分解末端^[22]。6 级分解尺度对应的栅格大小分别为 $2 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 、 $2^2 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 、 $2^3 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 、 $2^4 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 、 $2^5 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 和 $2^6 \times 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$,即对应的采样间距分别为 0.5、1、2、4、8、16 km。算法的实现过程均在 Matlab7.0 软件中通过编程实现。

下面以样带 1 为例,分别给出了 0—20 cm 土壤有机碳密度的原始信息及经过 6 级分解后的近似信息和细节信息,如图 5—图 7 所示,并对其生态学意义进行了阐释。

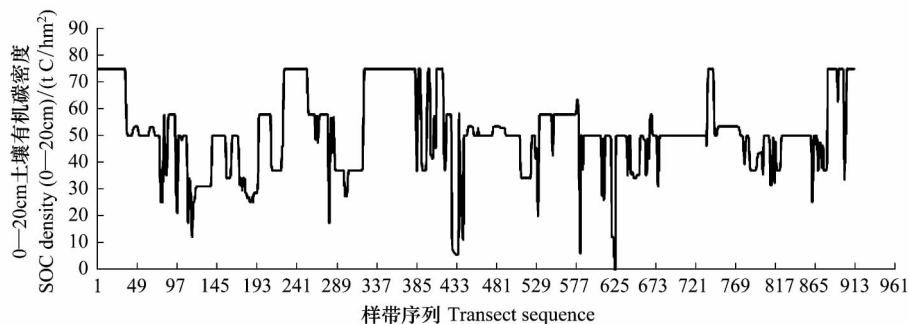


图 5 0—20 cm 土壤有机碳密度原始信息变化情况

Fig. 5 The change of original SOC density (0—20cm)

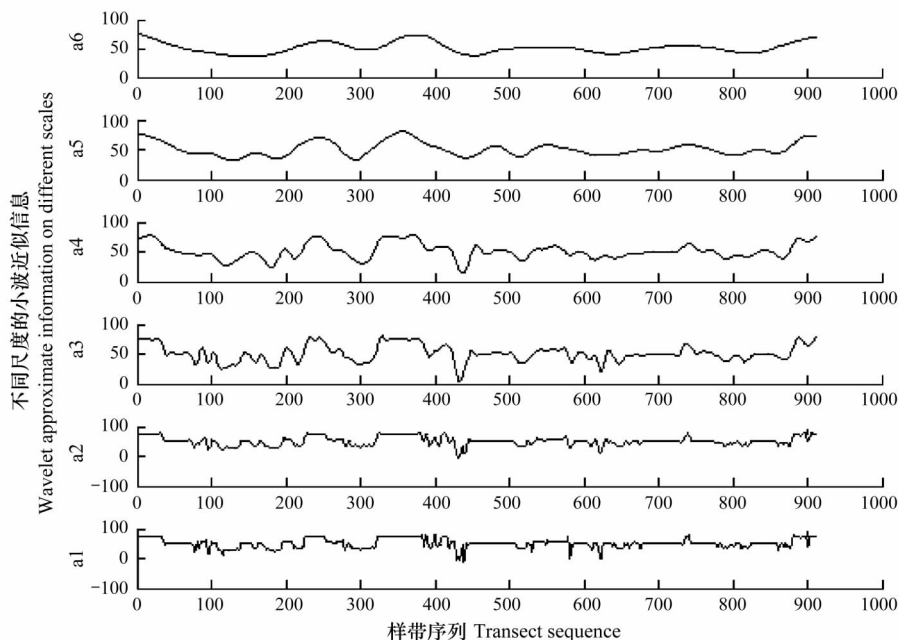


图 6 0—20 cm 土壤有机碳密度小波分解后的近似信息

Fig. 6 The approximate information of decomposed original SOC density (0—20cm)

图 6 中,横坐标表示采样序列的位置,纵坐标表示土壤有机碳密度在各分解尺度下的近似信息,结合图 5 中其原始采样数据序列特征,不难发现,近似信息表示土壤有机碳密度沿着采样带随地理位置的变化而变化的拟合原始信息的部分,随着尺度的增大,近似信息去掉了由干扰因素造成的部分变化明显的噪声值(细节信息),而保留了原信息的主要成分。每一次尺度上推,近似信息的空间单元尺度(对应为本文中的土壤采样间距)会放大 2 倍,同时其原来尺度上两个单元内的信息差被分解到小波细节信息中去,两个相邻单元之间

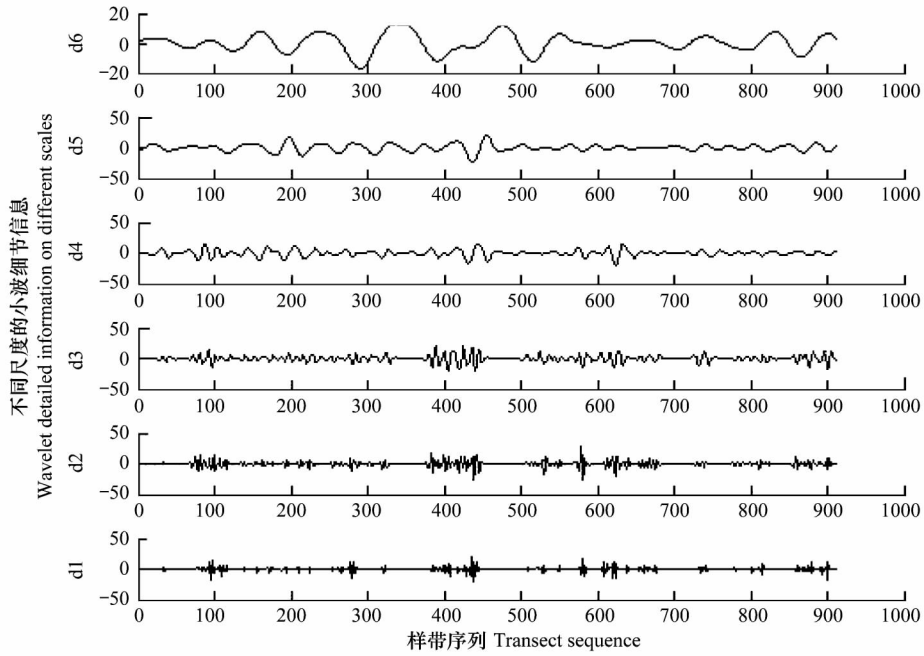


图7 0—20 cm 土壤有机碳密度小波分解后的细节信息

Fig.7 The detailed information of decomposed original SOC density (0—20cm)

的近似信息就出现了平滑和近似,其变化规律也趋于清晰和简单化^[2,16],能够较为直观地反映出土壤有机碳密度在样带中的总体变化规律。

图7中,细节信息从原始信号中分解出来,代表了各个分解尺度上近似信息的“噪声”部分,反映了土壤有机碳密度在样带不同空间位置的波动变化情况。某个区域的波动变化越大,则反映了该区域土壤有机碳密度变化越复杂,受到其它因素干扰的强度越大。由于尺度效应的影响,细节信息在不同尺度上可以识别到土壤有机碳密度的空间异质性情况,通过细节信息方差-尺度图可以直观地表现出土壤有机碳密度的空间异质性格局—尺度响应特征。

3.3 尺度效应分析

根据土壤有机碳密度经过多尺度分解后的细节重构信息和小波方差的计算公式2,在Excel软件中通过插入函数运算可以得到其在不同样带的小波方差-尺度图,横轴表示尺度,如3.2节所述,各尺度对应的采样间距分别为0.5、1、2、4、8、16 km;纵轴表示土壤有机碳密度在不同尺度上的小波方差,如图8所示。

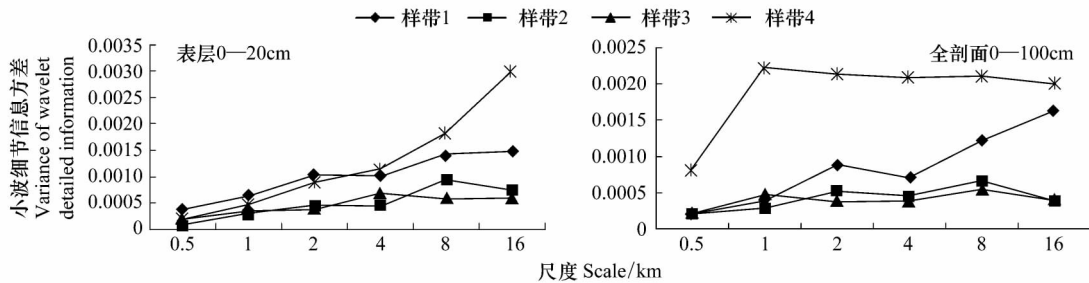


图8 表层(0—20 cm)和全剖面(0—100 cm)土壤有机碳密度的小波方差—尺度图

Fig.8 Comparison of wavelet variance-scale of SOC density (0—20cm and 0—100cm)

由图8可知,小波细节信息方差随尺度的增大而表现出不同的特征。首先来看0—20 cm土壤有机碳密度在各条样带上的空间异质性—尺度效应:0—20 cm土壤有机碳密度在不同尺度上具有不同的空间异质性,不同样带的土壤有机碳密度随着尺度的增大变异程度不同;样带1和样带4土壤有机碳密度随尺度增大异质性

增强,在 16 km 尺度异质性最强;样带 2 和样带 3 土壤有机碳密度分别在 8 km 和 4 km 尺度异质性最大;从整体区域来看,样带 1 和样带 4 比样带 2 和样带 3 具有更大的变异程度。再来看 0—100 cm 土壤有机碳密度的空间异质性—尺度响应特征:样带 1 在 2 km 尺度出现一个拐点,然后随着尺度增大,异质性增强;样带 2 和样带 3 的土壤有机碳密度在不同尺度上变异不是太大,在 8 km 尺度异质性最强;样带 4 在 1 km 尺度表现了最大的空间异质性,其后呈现随尺度增大而略微减小的趋势,具有不太显著的尺度效应。

土壤有机碳的空间变异是由气候、植被、土壤类型、地形、母质以及土地利用方式等各种因素在不同方向、不同尺度共同作用的结果^[7-8],空间异质性大小的尺度效应受控于不同尺度下控制土壤有机碳变化的各种生态过程的重要程度。样带 1 横跨粤北山地丘陵区,自西向东的地形分布有向南凸出的三列弧形山地和两列谷地,并兼有盆地、台地和平原,海拔高度、坡度和地形起伏度的变化幅度均较大,使得土壤类型具有明显的垂直地带性分布特征,因此,土壤有机碳密度具有显著的空间变异性,且随着尺度的增大,异质性增强,体现了地形要素在大的尺度上对土壤有机碳密度的影响程度;0—20 cm 土壤有机碳密度的空间变异性大于 0—100 cm 的土壤有机碳密度,这说明了深层土壤母质的相对稳定性以及表层土壤有机碳受到的影响因子更复杂。

样带 2 和样带 3 的土壤有机碳密度的变异性没有明显的规律,整体上受尺度的影响不大。究其原因,样带 2 位于亚热带珠三角外缘的丘陵台地,地貌特征和样带 1 类似,山系排列有序,宽谷、盆地和平原镶嵌其中,但山体海拔趋于平缓,样带 3 跨越了亚热带和中亚热带两个气候带,基本切合了粤北东部和粤西部山地东北—西南向的山脉、谷地走向,山脉之间盆谷分布,山体海拔自东北向西南呈较低趋势,因此,整体上来说样带 2 和样带 3 的地势均较为平坦,受地形因子的影响不大,而土壤母质、类型和植被等因素可能是造成这种空间差异性的主要因素。

样带 4 主要位于莲花山—阴那山山地与罗浮山脉之间的谷地,东北部为西北—东南向岭谷,中部主要为谷地并被山嶂切割,西南部斜跨莲花山脉,地貌形态复杂多样;在较小尺度内,该样带受人类活动影响较大,施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤有机碳的空间相关性减弱,随着尺度的增大,局部复杂的地形使得土壤有机碳的区域差异性增强,同时还受到湿润海洋气流的影响,影响因素更加复杂,因此,0—20 cm 土壤有机碳密度空间异质性没有明显的特征尺度;与 0—20 cm 相比,0—100 cm 土壤有机碳密度随尺度变化的空间异质性格局具有不同的表现特征,究其原因,土层深度越厚受人类活动的影响越小,土壤类型、母岩母质和质地的差异是造成 0—100 cm 土壤有机碳密度异质性大小的主要原因,在 1 km 尺度表现了最强的空间异质性,然后随着尺度的增大差异不明显。

4 结论与讨论

本文利用一维离散小波变换在栅格尺度上初步探索了广东山区土壤有机碳密度的空间异质性格局—尺度效应,主要研究结论有:土壤有机碳密度具有较强的空间异质性,空间异质性的大小受控于不同尺度下土壤有机碳密度分布格局的主导因子影响程度;整体在大于等于 1 km 的尺度,其空间异质性较强;各个样带特征尺度的差异与各样带的土壤和植被类型、地貌特征以及土地利用方式、耕作管理方式等人类活动干涉强度有关。

利用小波变换研究广东山区土壤有机碳密度空间变异的尺度效应,为小波变换在大区域尺度下来研究土壤有机碳的空间变异提供一种参考,从而使分析土壤有机碳的变异规律变得较为方便。但本文也存在着以下不足之处:

(1) 本文中数据的原始采样间距为 250 m,每一次尺度上推,采样间距变为上一尺度的 2 倍,减少了连续小波变换时小波系数的冗余度,但同时也可能使土壤有机碳空间变异性最大的尺度没有挖掘出来。因此,通过改变数据的原始采样间距大小,再分别使用离散小波变换对其进行多尺度分解,能够更准确地揭示出土壤有机碳空间变异的多尺度响应特征。

(2) 本文采用的是一维小波分析,而二维小波分析是针对整个研究区域进行小波系数的计算,克服了人为因素和样带代表性等限制,因此应该具有更大的优势。在后续的研究中,可以尝试利用二维小波或超小波

的分析方法来研究包括土壤有机碳在内的其他土壤性质的尺度效应。

致谢: 感谢国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院李明杰博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Wu J G. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy. Beijing: Higher Education Press, 2000: 186–192.
- [2] Li X M. Research on the Spatial Scale of Eco-Environment based on Wavelet Transform [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008.
- [3] Ou M M, Wang J W. Review of research on soil spatial variability. *Soils*, 2003, 35(1): 30–33.
- [4] Tang X H, Huang X X, Wei C F. Review of research on SOC spatial distribution characteristics at different scales. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(3): 224–228.
- [5] Xu X W. Regional Distribution and Variation of SOC Storage in Agricultural Soils at Different Scales [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [6] Zhang F S, Liu Z X, Zhang Y, Miao Y G, Qu W, Kang Z J. Scaling effect on spatial variability of soil organic matter in crop land. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(3): 350–356.
- [7] Guo X D, Fu B J, Ma K M, Chen L D, Yang F L. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557–563.
- [8] Lei Y W, Wei C Z, Li J H, Hou Z A, Ye J, Bao B Y. Characters of soil nutrient spatial variability in different scale. *Soils*, 2004, 36(4): 376–381, 391–391.
- [9] Xie X L. Study on Soil Organic Carbon Stocks in National and Regional Scale Using GIS [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2004.
- [10] Feng N N, Li Y X, Zhang X Z, Wang Y D, Xia J G. The spatial variability of the content of organic matter in hilly tea plantation soils with different sampling scales. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 349–356.
- [11] Si B C. Spatial scaling analyses of soil physical properties: A review of spectral and wavelet methods. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 547–562.
- [12] Shu Q S, Xie L Y. Advances in spatial scaling effects of soil hydraulic properties. *Soils*, 2010, 42(4): 513–518.
- [13] Katul G, Lai C T, Schäfer K, Vidakovic B, Albertson J, Ellsworth D, Oren R. Multiscale analysis of vegetation surface fluxes: from seconds to years. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 1119–1132.
- [14] Li S C, Gao M W, Zhou Q F, Liu F Y. Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198–4203.
- [15] Li X M, Sha J M, Lian J L. Regional characteristic scale of NDVI based on wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2864–2873.
- [16] 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*, 2002, 22(10): 1660–1665.
- [17] Shu Q S, Liu Z X, Si B C. Characterizing scale- and location-development correlation of water retention parameters with soil physical properties using wavelet techniques. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2284–2292.
- [18] Biswas A, Si B C. Application of continuous wavelet transform in examining soil spatial variation: A review. *Mathematical Geosciences*, 2011, 43(3): 379–396.
- [19] Soil Survey Office of Guangdong Province. *Guangdong Soil*. Beijing: Science Press, 1993: 3–385.
- [20] Wen Y, Huang N S, Kuang Y Q. Pattern and characteristics of soil organic carbon density in Mountain Area of Guangdong Province, China. *Journal of Basic Science and Environment*, 2010, 18(supplement): 10–18.
- [21] Jiang C. The Scale-Correlation Analysis between Soil Organic Carbon Density and Its Influence Factors based on Wavelet [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011.
- [22] Zhang M F, Liao K, Zheng D X. A multi-scale analysis on the structure of integrated ecological information tupe based on the wavelet transform. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 21–27.

参考文献:

- [1] 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: 186–192.
- [2] 李小梅. 基于小波变换的生态环境空间尺度研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [3] 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. *土壤*, 2003, 35(1): 30–33.
- [4] 唐晓红, 黄雪夏, 魏朝富. 不同尺度土壤有机碳空间分布特征研究综述. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 224–228.
- [5] 许信旺. 不同尺度区域农田土壤有机碳分布与变化 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [6] 张法升, 刘作新, 张颖, 苗永刚, 曲威, 亢振军. 农田土壤有机质空间变异的尺度效应. *中国科学院研究生院学报*, 2009, 26(3): 350–356.
- [7] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557–563.
- [8] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 候振安, 冶军, 鲍柏杨. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. *土壤*, 2004, 36(4): 376–381, 391–391.
- [9] 解宪丽. 基于 GIS 的国家尺度和区域尺度土壤有机碳库研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2004.
- [10] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 王永东, 夏建国. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异. *生态学报*, 2006, 26(2): 349–356.
- [12] 舒乔生, 谢立亚. 土壤水力特性的空间尺度效应研究进展. *土壤*, 2010, 42(4): 513–518.
- [14] 李双成, 高伟明, 周巧富, 刘逢媛. 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.
- [15] 李小梅, 沙晋明, 连江龙. 基于小波变换的 NDVI 区域特征尺度. *生态学报*, 2010, 30(11): 2864–2873.
- [16] 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.
- [19] 广东省土壤普查办公室. *广东土壤*. 北京: 科学出版社, 1993: 3–385.
- [20] 文雅, 黄宁生, 匡耀求. 广东省山区土壤有机碳密度特征及空间格局. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(增刊): 10–18.
- [21] 姜春. 基于小波的土壤有机碳密度与其影响因子的尺度相关分析 [D]. 广州: 广州大学, 2011.
- [22] 张明锋, 廖克, 郑达贤. 基于小波变换的生态综合信息图谱的多尺度结构分析. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1): 21–27.