

基于小波变换的土壤有机碳与其影响因子 多尺度相关分析*

姜春^{1,2,3,4} 钱乐祥¹ 吴志峰^{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 基于GIS,采用小波变换和相关分析方法,以广东山区表层(0~20 cm)土壤有机碳密度及其影响因子(包括归一化植被指数NDVI、海拔、坡度和坡向)作为分析对象,选取4条样带,使用一维离散小波变换对分析对象进行多尺度分解,在栅格尺度上定量分析土壤有机碳密度与其影响因子相关关系的多尺度响应特征。结果表明:研究区土壤有机碳密度与其影响因子具有不同程度的尺度相关性。NDVI在2、8和16 km尺度、海拔在8和16 km尺度下的控制作用最强;坡度的控制作用极弱,尺度相关性不显著;坡向在大于2 km尺度表现为随尺度增加而增大的负相关作用。不同样带的土壤有机碳密度受不同影响因子的制约,NDVI和海拔是影响广东山区土壤有机碳密度分布的主要因子,坡度和坡向仅在个别样带、较大尺度上起作用。

关键词 土壤有机碳 小波变换 尺度相关 偏相关系数 广东山区

文章编号 1001-9332(2013)12-3415-08 中图分类号 S159.2 文献标识码 A

Multi-scale correlation analysis of soil organic carbon with its influence factors using wavelet transform. JIANG Chun^{1,2,3,4}, QIAN Le-xiang¹, WU Zhi-feng¹, WEN Ya⁵, DENG Nan-rong³ (¹School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; ²Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; ³Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2013 24(12): 3415-3422.

Abstract: Based on GIS, this paper chose the soil organic carbon (SOC) density in soil surface layer (0-20 cm) and its influence factors (NDVI, elevation, slope and aspect) as research objects, one-dimensional discrete wavelet transform (DWT) was used as the multi-scale decomposition tool to quantitatively revealed the multi-scale correlation relationships among SOC density and its influence factors on the grid scale along 4 transects of the mountainous area of Guangdong Province. The results showed that the correlation among SOC density and its influence factors was scale-dependent with varying degree. The influence of NDVI was strongest at the scales of 2, 8 and 16 km, while elevation showed its greatest influence at the scales of 8 and 16 km. The control action of slope was rather weak, with a less significant correlation depending on scale. The negative effect of aspect became stronger with increasing scale at >2 km scale. The SOC density of the different transects was affected by various factors, of which NDVI and elevation were the main factors, and slope and aspect only reacted with individual transects at larger scales.

Key words: soil organic carbon; wavelet transform; multi-scale correlation; partial correlation coefficient; mountainous area of Guangdong Province.

* 国家自然科学基金项目(41171446)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAH32B03)资助。

** 通讯作者。E-mail: gzuwzf@163.com

2013-03-27 收稿, 2013-09-25 接受。

土壤有机碳具有较大的空间变异性,是由土壤的理化特性、气候、植被、地形及土地利用方式等诸多物理、生物和人为因素在不同方向、不同尺度下共同作用的结果^[1-4].有研究发现,不同尺度下影响土壤有机碳空间变异的主导因子不同.在国家尺度上,对土壤有机碳分布起控制作用的主要是气候类型.就省域尺度而言,气候类型有所差异,气温和降水也会表现出一定程度的地域分异,但土壤类型、植被类型、地貌及土地利用方式等因素对土壤有机碳分布特征的影响更强^[5].

目前,对土壤有机碳与其影响因子的相关性研究多是在某一个固定的时空尺度上进行,研究方法也多采用传统的简单相关分析,无法揭示相关关系的尺度效应.近年来,小波分析凭借其能够有效处理地学中非平稳信号的优势而得到越来越广泛的应用,能够揭示自然或生态因子的多尺度格局^[6-7].李双成等^[8]通过小波变换揭示了西藏高原生态系统的归一化植被指数(NDVI)与地形因子的多尺度空间格局和相关性.李小梅等^[9-10]利用小波多尺度分析对福州市NDVI和地形因子等生态环境参数进行多尺度分解,分析了各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.Si等^[11-12]利用小波分析技术研究了小麦产量和地形因子的多尺度相关性,以及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.Shu等^[13]利用连续小波变换技术分析辽宁省阜新市一个农田示范区土壤水力特性和物理特性之间的相关性,结果表明,这种相关关系依赖于尺度和空间位置.

以往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,而在土壤有机质/有机碳与其影响因子的相关关系的尺度效应研究至今还未见报道.基于此,本文以广东山区为例,以表层(0~20 cm)土壤有机碳密度及其影响因子(NDVI、海拔、坡度和坡向)作为研究对象,选择4条样带,采用小波分析技术对所有变量进行多尺度分解,以期在栅格尺度上定量揭示土壤有机碳密度与其影响因子相关关系的多尺度响应特征,为有效开展区域的碳循环研究奠定基础,也为在大区域尺度下研究影响因子对土壤有机碳控制作用的尺度效应提供一个有效的研究方法.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

广东山区(图1)包含广东省50个山区县(市),山区县指以县域为单位,山区和丘陵面积占全县总面积70%以上的县.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,地理坐标为21°42'—25°31' N, 110°32'—117°11' E.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,山地丘陵广布,山谷相间排列.植被类型主要为亚热带常绿季雨林、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,大多已变成针叶林、针阔混交林、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^[14].

1.2 数据来源

广东省1:20万土壤类型图和广东山区行政边界图是估算土壤有机碳密度和绘制土壤有机碳密度空间分布图的基础图形数据,土壤类型图由广东省生态环境与土壤研究所建成,依据1979—1990年广东省第二次土壤普查绘制的全省各县市土壤类型图,通过数字化得到.土壤剖面数据是估算土壤有机碳密度的属性数据,来源于广东省第二次土壤普查后出版的《广东土种志》^[15]和《广东土壤》^[14],共摘录223个代表不同土种的典型剖面数据,其中包括典型土壤剖面分层的有机质含量、土壤容重、土层厚度和面积等数据.植被指数数据为2000年的16 d合成L3产品MOD13Q1,共包含植被生长旺盛季节

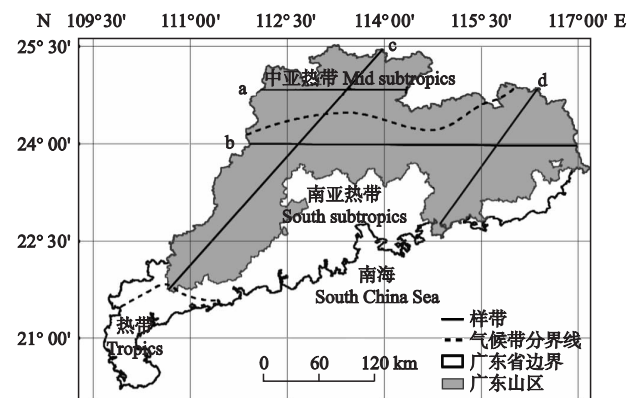


图1 研究区域和样带位置

Fig. 1 Location of the study area and transects.

a~d: 样带1~4 Transect 1~4. 下同 The same below.

(9—11 月) 的 6 景 MODIS NDVI ,分辨率为 250 m ,来源于 NASA 的陆地过程分布式数据档案中心. 基础地形数据为广东省 1: 25 万等高线数据 ,等高距为 50 m ,来源于国家基础地理信息系统数据库 ,数据完成时间为 1998 年.

1.3 样带的选取和样带自然地理景观的总体特征

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 ,呈由南而北凸的人字形条带 ,因此 ,分别沿 24°50' N 和 24° N 设置了 250 m × 250 m 的纬度采样带 1 和样带 2 ,经度采样带分别沿 111°—114° E 和 115°—116° E 设置了 250 m × 250 m 的倾斜样

带 3 和样带 4(图 1) . 样带 1 位于中亚热带粤北山区 ,地势全省最高 ,地貌特征为山谷相间排列 ,并且兼有盆地、谷地和平原; 样带 2 位于南亚热带珠三角外缘的丘陵台地 ,地貌特征与样带 1 类似 ,但山体海拔趋于平缓; 样带 3 横跨南亚热带和亚热带两个气候带 ,自东北向西南山体海拔整体降低 ,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; 样带 4 位于南亚热带粤东山区 ,地处莲花山—阴那山山地与罗浮山脉之间的谷地 ,下端跨越莲花山 ,中间有山障出现(图 2) .

1.4 数据预处理

首先 ,采用土壤类型分布图和典型剖面土壤数据库相结合的土壤类型法 ,对研究区土壤有机碳密度进行估算 ,并绘制栅格大小为 250 m × 250 m 的土

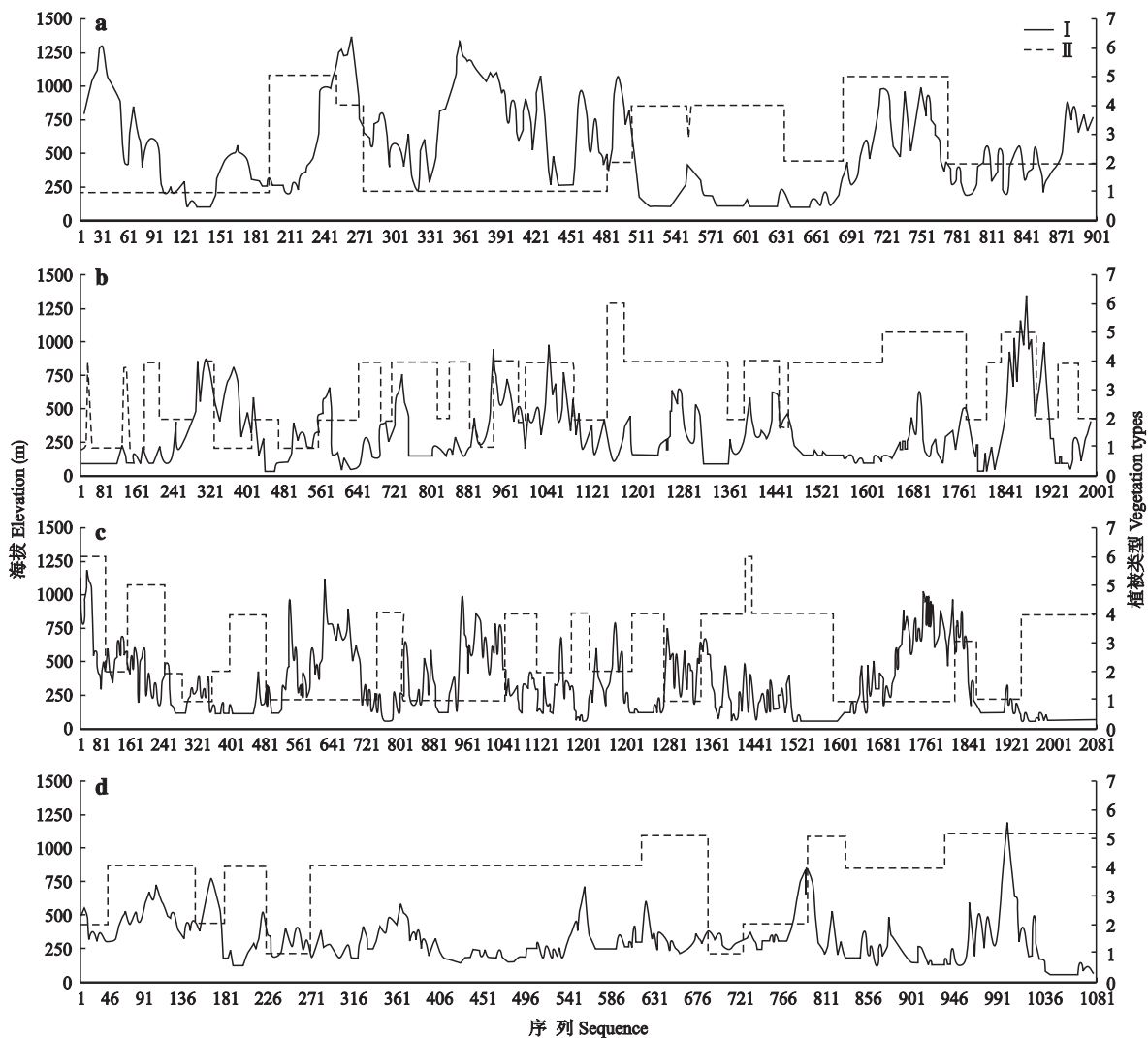


图 2 各样带海拔(I)和植被类型(II)的变化

Fig.2 Change of elevation (I) and vegetation types (II) along 4 transects.

植被类型中: 1 代表阔叶林 ,2 代表马尾松 ,3 代表杉木林 ,4 代表农业植被 ,5 代表灌丛和萌生矮林 1 indicated broad-leaved forest ,2 indicated *Pinus massoniana* forest ,3 indicated China fir forest ,4 indicated agricultural vegetation ,5 indicated shrub and coppice wood in the vegetation type.

表 1 研究区土壤有机碳密度及其影响因子的描述性特征

Table 1 Feature descriptions of SOC density and its influence factors in the study area

统计因子 Statistical factor	描述特性 Descriptive characteristics	样带 Transect			
		a(n = 912)	b(n = 2060)	c(n = 2118)	d(n = 1105)
土壤有机碳密度 SOC density (t C · hm ⁻²)	Min	5.96	4.51	2.33	1.13
	Max	74.77	74.77	75.01	74.77
	Mean	51.14	34.46	36.59	30.59
	SD	15.43	11.90	12.06	11.47
归一化植被指数 NDVI	Min	0.06	0.23	0.12	0.10
	Max	0.89	0.89	0.88	0.87
	Mean	0.75	0.74	0.72	0.71
	SD	0.12	0.10	0.12	0.12
海拔 Elevation (m)	Min	100	50	50	50
	Max	1380	1342	992	985
	Mean	509	300	268	256
	SD	333.27	215.33	202.29	134.39
坡度 Slope (°)	Min	0	0	0	0
	Max	39.16	27.61	28.88	25.27
	Mean	11.36	6.98	7.19	6.31
	SD	7.84	5.68	5.77	4.92
坡向 Aspect (°)	Min	-1	-1	-1	-1
	Max	356	356	357	353
	Mean	167	153	151	157
	SD	104.82	106.98	106.33	93.02

a ~ d: 样带 1 ~ 4 Transect 1 ~ 4. 下同 The same below.

壤有机碳密度空间分布图^[16-17]. 其次,利用 ERDAS 软件对 MODIS NDVI 进行投影转换和 MVC 最大值合成,得到研究区域的秋季 MODIS NDVI; 利用 ArcGIS 9.2 软件对等高线数据进行处理,获取研究区的格网 DEM、坡度和坡向的空间分布图,格网大小为 250 m × 250 m. 最后,借助于 ArcGIS 9.2 分别得到土壤有机碳密度及其影响因子 4 条样带的一维空间数据序列(表 1). 对于土壤有机碳密度空间变异的尺度效应,文献[17]中曾进行了深入分析和讨论.

1.5 小波多尺度分析——离散小波变换

小波多尺度分析是通过构造小波基对分析函数进行多尺度分解,其基本原理见文献[17]. 小波分析可分为连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT),后者被认为是对二进连续小波的亚采样,并且从连续小波减弱到离散小波没有任何信息损失^[13]. 本文采用一维离散小波变换对土壤有机碳及其影响因子的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和近似信息. 细节信息反映了被分解信息的特殊纹理或突变信息,近似信息反映了被分解信息的本征特征,两者之间具有正交关系,两者之和等于原始被分解的信息^[9]. 分解级别选择 6 级,分解到这个级别基本已经达到分解末端^[18],6 级分解尺度分别对应

的栅格大小为 2 × 250 m × 250 m、2² × 250 m × 250 m、2³ × 250 m × 250 m、2⁴ × 250 m × 250 m、2⁵ × 250 m × 250 m 和 2⁶ × 250 m × 250 m,即相应的采样间距分别为 0.5、1、2、4、8 和 16 km^[17].

Carl 和 Kühn^[19]认为,这种分解可以看作是去自相关的过程,而运用这种去自相关的小波分析方法来研究地理要素的空间格局更能表现出要素的真实特性. 因此,本文采用小波分解后的近似信息研究土壤有机碳密度与其影响因子间的尺度相关性.

1.6 偏相关分析

在相关分析中,相关系数经常用在研究土壤有机碳与其影响因子的相关关系,其数值的大小代表两个变量之间线性相关的强弱. 但在实际情况中,由于变量之间的相关性受多个因素的影响,简单相关系数反映的往往是非本质的联系,需要在剔除其他相关因素影响的条件下计算变量间的相关系数,即偏相关系数^[20]. 为了更准确地获得土壤有机碳密度与其影响因子的内在相关联系,土壤有机碳密度和各影响因子之间的偏相关系数是以其他影响因子作为控制变量而得出,相关系数的计算在 SPSS 软件的支持下完成.

1.7 数据处理

利用 SPSS 软件分尺度计算不同样带土壤有机碳密度与各个影响因子数据序列小波分解后的近似信息之间的偏相关系数,横轴的 0.25 km 尺度对应

为原始取样间距,偏相关系数的计算采用原始采样数据序列,0.5~16 km 尺度对应的分别是 6 级分解的取样间距。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度与 NDVI 的尺度相关性

由表 2 可知,整体上,样带 3 和样带 4 的土壤有机碳密度与 NDVI 存在显著的正相关关系,且表现出了随尺度变化的不同特征;样带 1 在 ≤ 8 km 尺度表现出正的尺度相关性;除 16 km 尺度外,样带 2 的土壤有机碳密度与 NDVI 没有相关性。

样带 1 的土壤有机碳密度与 NDVI 的相关性具有较强的尺度依赖性,相关系数随尺度的增大呈现先增大后减小的趋势,在 2 km 尺度的相关性最大。究其原因,样带 1 属中亚热带粤北山地丘陵区的纬度样带,不受南北水热状况差异的影响,由于受湿润海洋气流的影响,生物气候条件东西差异不明显,但样带 1 自西向东横跨“三山两谷”,较大的海拔高差使 NDVI 的空间差异较大,在 2 km 尺度两者的相关性最大,随着尺度的增大,局部地形间的差异被削弱,土壤有机碳密度与 NDVI 的相关性减弱。因此,在水热条件一致的情况下,样带 1 土壤有机碳密度与 NDVI 的多尺度相关性主要是受局部地形要素差异的影响。

样带 2 的土壤有机碳密度与 NDVI 基本没有尺度相关性,主要归因于该样带在东西方向上的生物气候条件差异不大,与样带 1 相比,样带 2 地势较平缓,由局部地形差异引起的区域气候差异不明显,NDVI 随尺度变化的空间差异较小。因此样带 2 的土壤有机碳密度与 NDVI 的相关性不具有尺度依赖性。

样带 3 的土壤有机碳密度与 NDVI 的相关性随尺度的增大而增大,在 16 km 尺度相关性最大。样带 3 自东北向西南跨越了中亚热带和南亚热带两个气

表 2 不同尺度下土壤有机碳密度与 NDVI 的偏相关系数
Table 2 Partial correlation coefficients between SOC density and NDVI at different scales

样带 Transect	尺度 Scale (km)						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
a	0.247**	0.250**	0.268**	0.318**	0.220**	0.161**	0.057
b	0.066	0.068	0.067	0.071	0.068	0.057	0.132**
c	0.206**	0.212**	0.229**	0.260**	0.297**	0.351**	0.470**
d	0.240**	0.242**	0.252**	0.288**	0.348**	0.261**	0.384**

** $P < 0.01$. 下同 The same below.

候带,南北水热条件差异明显,且距离跨度较大,土壤和植被类型均表现出明显的纬度地带性,南北生

物气候条件差异使得 NDVI 随着尺度的增大而空间差异性显著。因此,样带 3 的土壤有机碳密度与 NDVI 的相关性具有随尺度增大而增大的明显的尺度依赖性。

样带 4 的土壤有机碳密度与 NDVI 的相关系数在 0.25~4 km 尺度范围内呈现增大的趋势,在 8 km 尺度有所下降,到了 16 km 尺度又增大且在该尺度上相关系数最大。样带 4 处于南亚热带粤东丘陵山地区,自东北向西南分布的地形依次为西北-东南向岭谷、宽谷和山嶂、东北-西南向岭谷,与梅江干流基本平行,复杂的地貌类型和地形分布及河流和海洋的影响,使得植被类型和植被生长状况具有显著的空间差异。因此,NDVI 具有较大的空间变异性,在 2 km 尺度以后这种差异更明显。土壤有机碳密度与其相关性随尺度增大而增强,具有明显的尺度效应。

2.2 土壤有机碳密度与海拔的尺度相关性

由表 3 可知,整体上,海拔对土壤有机碳密度具有正向控制作用,且随着尺度的增大,其控制作用增强,尤其以样带 1 最为显著。

样带 1 的土壤有机碳密度与海拔的相关系数在 0.25~8 km 尺度范围内呈增大的趋势,8 km 尺度的相关系数最大,到 16 km 尺度略有下降,但其值仍然大于前 5 个尺度的相关系数。样带 1 自西向东岭谷排列有序,海拔居全区之首且高差较大,随着空间尺度的增大,这种地形差异以及由地形差异造成的土壤有机碳密度空间格局的变异性越来越明显,在 8 km 尺度,两者的相关性最大,地形间的差异到了 16 km 尺度有所减弱,因此相关性稍有下降。这说明海拔作为大的宏观因素影响土壤有机碳密度的空间分布。

样带 2 的土壤有机碳密度与海拔在不同尺度上均呈弱正相关,但相关系数变化不大。这是因为样带 2 的整体海拔较低,地形起伏度较小,在不同空间尺度上的地形差异不大。因此样带 2 的土壤有机碳密

表 3 不同尺度下土壤有机碳密度与海拔的偏相关系数
Table 3 Partial correlation coefficients between SOC density and elevation at different scales

样带 Transect	尺度 Scale (km)						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
a	0.565**	0.581**	0.611**	0.661**	0.721**	0.808**	0.761**
b	0.369**	0.373**	0.376**	0.373**	0.339**	0.349**	0.357**
c	0.214**	0.217**	0.230**	0.243**	0.301**	0.364**	0.488**
d	0.134**	0.137**	0.147**	0.178**	0.252**	0.422**	0.544**

度与海拔的相关性基本不具有尺度依赖性。

样带 3 和样带 4 的土壤有机碳密度与海拔的多

尺度相关性基本具有相同的变化趋势,均表现为随尺度增大而相关性增大的特点,在 16 km 尺度的相关系数最大. 样带 3 和样带 4 自东北向西南具有不同的地貌特征(包括岭谷走向和主要地貌类型),在 0.25 ~ 2 km 尺度,地形间的差异并不明显,随着空间尺度的增大,一些局部的细节信息被忽略,能够观测到的地貌整体信息越来越丰富,在 16 km 尺度,土壤有机碳密度与海拔的相关性最大. 因此,在样带 3 和样带 4,海拔对土壤有机碳密度的正向控制作用具有一定的尺度响应特征.

2.3 土壤有机碳密度与坡度的尺度相关性

由表 4 可知,样带 1、样带 2 和样带 3 的土壤有机碳密度几乎不受坡度的影响,仅在个别尺度上与坡度有极弱相关. 样带 4 在 2 ~ 16 km 尺度范围内存在随尺度增大而增大的弱正相关. 由于土壤有机碳密度随着坡度的增大而先升高后降低,而样带 1 的坡度变化范围较大,因此,土壤有机碳密度与坡度之间没有明显的线性相关关系. 样带 2 和样带 3 的地势较为平缓,平均坡度低于样带 1 且变化范围小,土壤有机碳密度没有明显的相关性,尺度效应也不明显. 样带 4 的地形较为复杂,坡度大小不仅影响坡地的水分、热量和土层厚度,而且表层土壤更易遭受剥蚀和崩落,随着空间尺度的增大,不同地形间的坡度差异直接影响了土壤有机碳密度的空间分布. 在 16 km 尺度,土壤有机碳密度与坡度的相关性最大. 综上并根据以往的研究成果,坡度对土壤有机碳的影响一般在坡面尺度上最为明显,当研究尺度增大到几百米甚至上千米时,坡度的概念已不具备土壤侵蚀和地貌学的意义,因此,基础数据的栅格大小在一定程度上决定了土壤有机碳密度与坡度的相关性.

2.4 土壤有机碳密度与坡向的尺度相关性

由表 5 可知,土壤有机碳密度与坡向仅在个别样带和较大尺度上具有显著的负相关性. 整体上,样

表 4 不同尺度下土壤有机碳密度与坡度的偏相关系数
Table 4 Partial correlation coefficients between SOC density and slope at different scales

样带 Tran- sect	尺度 Scale (km)						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
a	-0.054	-0.047	-0.026	-0.028	0.022	-0.176**	0.044
b	0.011	0.006	0.016	0.073	0.092	0.059	0.099
c	-0.020	-0.023	-0.019	-0.047	-0.046	-0.042	-0.188**
d	0.047	0.052	0.084	0.148**	0.272**	0.349**	0.592**

表 5 不同尺度下土壤有机碳密度与坡向的偏相关系数
Table 5 Partial correlation coefficients between SOC density and aspect at different scales

样带 Tran- sect	尺度 Scale (km)						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
a	0.010	0.015	0.015	-0.057	-0.059	-0.136**	-0.091
b	-0.022	-0.023	-0.061	-0.080	-0.191**	-0.318**	0.381**
c	-0.028	-0.031	-0.045	-0.051	-0.018	-0.078	-0.039
d	-0.077	-0.080	-0.091	-0.105**	-0.148**	-0.205**	0.369**

带 1 和样带 3 的土壤有机碳密度基本不受坡向的控制. 样带 2 和样带 4 在 2 km 尺度以后与坡向具有随尺度增大而增大的负相关性. 坡向的不同,地面接受的光、热、水亦不同,从而导致南北坡坡地小气候和地面物质冲刷侵蚀状况的差异. 这在粤东山地尤其是莲花山东段的土壤垂直分布上可以得到明显的反映. 样带 2 的一部分和样带 4 的全部位于粤东山区,粤东山地濒临海洋和南北坡地貌类型的差异使得不同坡向的水热条件不同,进而造成土壤有机碳密度的显著差异. 从东南坡向西北坡方向,土壤有机碳密度下降,东南坡高于西北坡,因此随着坡向的增大,土壤有机碳密度存在一定程度的降低趋势,且随着空间尺度的增大,土壤有机碳密度与坡向的负相关作用增强,这说明由坡向引起的热量分异在较大的空间尺度上更显著. 样带 1 远离海洋,受海洋气流和季风的影响较弱,而且样带 1 跨越的山脉走向多呈西北-东南向,南北坡的气候差异不如东北-西南走向的山脉明显;样带 3 跨越的山脉走向也多呈西北-东南向,与样带 1 的成因类似.

2.5 不同样带土壤有机碳密度与其影响因子间的尺度相关性

由图 3 可知,对于样带 1,各个影响因子在不同尺度下对土壤有机碳密度的作用程度不同. 从 0.25 km 到 16 km 尺度,海拔对土壤有机碳密度的影响均最大,其次是 NDVI,坡度和坡向仅在 8 km 尺度对土壤有机碳密度有极弱的负相关作用. 较高的山体海拔和较大的地势起伏是影响样带 1 植被和土壤区域空间差异的主要原因,较大的坡度变化和以西北-东南走向为主的山脉走势使坡度和坡向与土壤有机碳密度之间没有显著的线性相关性.

对于样带 2,从 0.25 km 到 2 km 尺度,只有海拔对土壤有机碳密度的大小起作用;从 4 km 到 16 km 尺度,海拔和坡向是影响土壤有机碳密度大小的主要地形因子;在 4 km 和 8 km 尺度,海拔的作用程度大于坡向;在 16 km 尺度,坡向大于海拔. 由以上分析可知,海拔和坡向是影响该样带土壤有机碳密

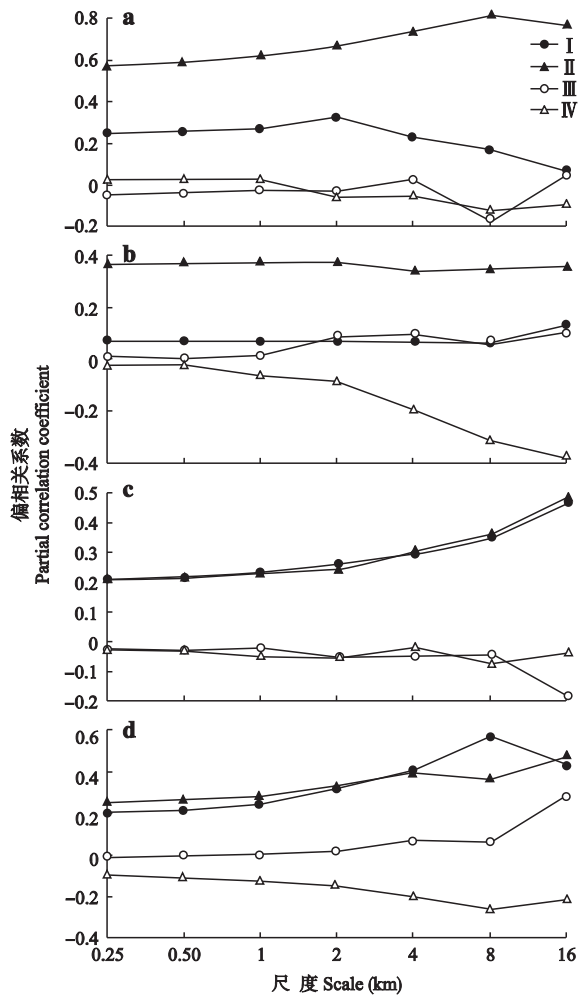


图 3 不同样带土壤有机碳密度与影响因子的尺度相关性
Fig. 3 Scale-correlation between SOC density and its influence factors along different transects.

I: NDVI; II: 海拔 Elevation; III: 坡度 Slope; IV: 坡向 Aspect.

度分布特征的主要因子. 样带 2 东西跨度较长, 地势起伏较样带 1 平缓, 但这种岭谷相间排列的地形特征仍然造成了该样带土壤有机碳密度的空间差异, 农业植被所占比例较大, NDVI 差异性小.

对于样带 3, 从 0.25 km 到 16 km 尺度, 只有 NDVI 和海拔对土壤有机碳密度的大小起作用, 两者的控制作用大小几乎相同; 在 16 km 尺度, 坡度与土壤有机碳密度表现出较弱的负相关性. 样带 3 自东北向西南跨越了两个气候带, 南北纬度跨度大, 海拔亦有一定的差异, 致使该样带经过区域的气候特征同时具有地带性和区域性的特点, 植被和土壤的空间差异性明显. 因此, NDVI 和海拔是有机碳密度空间分布差异的主要因子.

对于样带 4, 从 0.25 km 到 1 km 尺度, 影响因子只有 NDVI 和海拔, NDVI 的影响程度稍大于海拔; 随着尺度的增大, 坡度和坡向的作用强度呈增大

的趋势, 在 16 km 尺度上, 所有因子的影响程度均达到了最大值. 在不同尺度上, 各因子对土壤有机碳密度的影响程度不同. 样带 4 与各影响因子的相关性随尺度增大表现为较复杂的变化特征, 这与该样带自东北向西南复杂的地形、人类活动干扰以及海洋湿润气流的影响有关.

3 讨 论

本文集成使用多种数据源, 综合运用 GIS、小波变换、相关分析等研究方法, 分析了广东山区土壤有机碳密度与其影响因子之间的多尺度相关关系. 结果表明, 土壤有机碳密度与其影响因子具有不同程度的尺度相关性. NDVI 和海拔对土壤有机碳密度的正向控制作用基本随着尺度的增大而增强, 其中, NDVI 在 2、8 和 16 km 尺度、海拔在 8 和 16 km 尺度下的控制作用最强; 坡度的控制作用极弱, 具有不太显著的尺度相关性; 坡向在 2 km 尺度以后表现为随尺度增大而增大的负相关作用. 不同样带的土壤有机碳密度主导影响因子不同. NDVI 和海拔是影响广东山区土壤有机碳密度分布的主要因子, 坡度和坡向仅在个别样带、较大尺度上起作用, 整体上, 尺度越大影响因子越多. 产生这种差异的原因主要与各样带所处的地貌和气候特征有关.

本文利用一维离散小波变换, 在栅格尺度上研究了土壤有机碳密度与其影响因子之间的尺度相关性, 得出了土壤有机碳密度与其影响因子的相关性具有随空间位置和尺度大小的不同而改变的响应特征. 程先富等^[21]研究得出, 表层土壤有机碳含量与海拔和坡向呈显著正相关; 李玉琴^[22]研究得出, 坡度与土壤有机碳呈显著负相关, 坡向的正弦值与有机碳的相关性不显著, 坡向的余弦值与有机碳构成显著负相关; 胡宏祥等^[23]研究得出土壤有机质含量随山体海拔升高而呈减少的趋势; 黄平等^[24]研究得出, 土壤有机质含量的最高值分别对应了不同的最佳坡度和坡向范围, 坡向的影响不如坡度明显. 以上研究表明, 地形因子对土壤有机碳的影响具有复杂性. 本文的分析结果既有与前人研究相同的结论, 也有相反的结论, 这主要取决于研究尺度和研究方法的不同. 前人的研究多是集中在某一固定的时空尺度上, 研究方法主要是传统的简单相关分析, 无法揭示土壤有机碳密度与其影响因子间的真正相关性; 而本文借助于小波变换, 能够揭示土壤有机碳密度与其影响因子间相关关系的尺度效应. 此外, 目前基于植被指数建立土壤有机碳光谱模型是利用遥感手

段来估算土壤有机碳含量的一个发展方向. 本研究得出了 NDVI 和海拔是影响广东山区土壤有机碳密度空间分布的主要因子. 因此, 在后续的研究中可以考虑利用神经网络、多元逐步回归分析等方法, 对土壤有机碳含量和遥感影像光谱值及其数学变化形式, 以及研究区海拔进行分析, 建立有机碳含量反演模型, 从而通过遥感影像将研究区域有机碳含量的空间分布趋势直观地显示出来.

参考文献

- [1] Zhou L (周莉), Li B-G (李保国), Zhou G-S (周广胜). Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2005, **20**(1): 99–105 (in Chinese)
- [2] Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), Ma K-M (马克明) *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS: A case study in Zung-hua City of Hebei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 557–563 (in Chinese)
- [3] Ou M-M (区美美), Wang J-W (王建武). Review of research on soil spatial variability. *Soils* (土壤), 2003, **35**(1): 30–33 (in Chinese)
- [4] Lei Y-W (雷咏雯), Wei C-Z (危常州), Li J-H (李俊华) *et al.* Characters of soil nutrients spatial variability in different scale. *Soils* (土壤), 2004, **36**(4): 376–381 (in Chinese)
- [5] Xu X-W (许信旺). Regional Distribution and Variation of SOC Storage in Agricultural Soils at Different Scales. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [6] Biswas A, Si BC. Application of continuous wavelet transform in examining soil spatial variation: A review. *Mathematical Geosciences*, 2011, **43**: 379–396
- [7] Shu Q-S (舒乔生), Xie L-Y (谢立亚). Advances in spatial scaling effects of soil hydraulic properties. *Soils* (土壤), 2010, **42**(4): 513–518 (in Chinese)
- [8] Li S-C (李双成), Gao W-M (高伟明), Zhou Q-F (周巧富) *et al.* Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(12): 4198–4203 (in Chinese)
- [9] Li X-M (李小梅). Research on the Spatial Scale of Eco-environment Based on Wavelet Transform. PhD Thesis. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008 (in Chinese)
- [10] Li X-M (李小梅), Sha J-M (沙晋明), Lian J-L (连江龙). Regional characteristic scale of NDVI based on wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(11): 2864–2873 (in Chinese)
- [11] Si BC, Farrell RE. Scale-dependent relationship between wheat yield and topographic indices: A wavelet approach. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**: 577–587
- [12] Si BC. Spatial scaling analyses of soil physical properties: A review of spectral and wavelet methods. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**: 547–562
- [13] Shu QS, Liu ZX, Si BC. Characterizing scale- and location-development correlation of water retention parameters with soil physical properties using wavelet techniques. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**: 2284–2292
- [14] Soil Survey Office of Guangdong Province (广东省土壤调查办公室). Guangdong Soil. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
- [15] Soil Survey Office of Guangdong Province (广东省土壤普查办公室). Guangdong Soil Species. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)
- [16] Wen Y (文雅), Huang N-S (黄宁生), Kuang Y-Q (匡耀求). Pattern and characteristics of soil organic carbon density in mountain area of Guangdong Province, China. *Journal of Basic Science and Environment* (应用基础与工程科学学报), 2010, **18**(suppl.): 10–18 (in Chinese)
- [17] Jiang C (姜春), Wu Z-F (吴志峰), Qian L-X (钱乐祥) *et al.* Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(16): 5118–5125 (in Chinese)
- [18] Zhang M-F (张明锋), Liao K (廖克), Zheng D-X (郑达贤). A multi-scale analysis on the structure of integrated ecological information tupe based on the wavelet transform. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2007, **2**(1): 21–27 (in Chinese)
- [19] Carl G, Kühn I. Analyzing spatial ecological data using linear regression and wavelet analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2008, **22**: 315–324
- [20] Yan L-K (严丽坤). Application of correlation coefficient and biased correlation coefficient in related analysis. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics* (云南财贸学院学报), 2003, **19**(3): 78–80 (in Chinese)
- [21] Cheng X-F (程先富), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升) *et al.* Organic carbon pool of forest soil and its relationship to environment factors in Xingguo County of Jiangxi Province. *Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(2): 211–217 (in Chinese)
- [22] Li Y-Q (李玉琴). Spatial Variability of SOC of Watershed in Western Sichuan Mountains. Master Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [23] Hu H-X (胡宏祥), Hong T-Q (洪天求), Fan L-L (樊丽莉). Study on soil organic matter and N and P variations of Ma'anshan in Chaohu. *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2006(11): 26–28 (in Chinese)
- [24] Huang P (黄平), Li T-X (李廷轩), Zhang J-B (张佳宝) *et al.* Effects of slope's gradient and aspect on spatial heterogeneity of soil organic matter in low mountain region. *Soils* (土壤), 2009, **41**(2): 264–268 (in Chinese)

作者简介 姜春,女,1984年生,博士研究生.主要从事环境遥感和GIS在土壤学和景观生态学方面的应用研究,发表论文4篇. E-mail: jiangchun@soil.gd.cn

责任编辑 杨弘