

DOI: 10.5846/stxb201411112226

范晓晖, 王德彩, 孙孝林, 阳景阳, 王会利, 邓小军, 黄智刚, 唐健. 南宁市桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子的关系. 生态学报, 2016, 36(13):

Fan X H, Wang D C, Sun X L, Yang J Y, Wang H L, Deng X J, Huang Z G, Tang J. Relationships between soil organic carbon density of *Eucalyptus* plantations and terrain factors in Nanning. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13):

南宁市桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子的关系

范晓晖¹, 王德彩⁴, 孙孝林^{2,*}, 阳景阳¹, 王会利³, 邓小军³, 黄智刚¹, 唐 健³

1 广西大学农学院, 南宁 530004

2 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275

3 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西林科院, 南宁 530002

4 河南农业大学林学院, 郑州 450002

摘要: 桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子的关系还不明确, 且当前的研究较少地关注复合地形因子, 对两者的线性和非线性关系强度的对比研究也较少。本文以南宁市高峰林场中的桉树人工林地作为研究区, 采用条件拉丁超立方抽样法布设采样点, 通过建立数字高程模型提取和计算得到地形因子的指标; 采用线性回归和回归树分别建立桉树人工林土壤有机碳密度-地形因子的线性和非线性回归模型。结果表明: 研究区土壤表层 0—50 cm 和全剖面的土壤有机碳密度均值分别为 2.8 kg/m²、7.7 kg/m² 和 10.9 kg/m², 属于中等水平; 仅坡度在 0.05 显著性水平上与表层和全剖面土壤有机碳密度显著相关, 总体而言, 简单地形因子与土壤有机碳密度的相关性普遍好于复合地形因子; 随着土壤层次厚度的增加, 线性和非线性回归模型对土壤有机碳密度空间变异解释能力都提升; 回归模型对土壤有机碳密度空间变异的解释能力大小顺序为: 回归树 > 全变量多元线性回归 > 逐步线性回归, 因此, 桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子之间的非线性关系比线性关系强。

关键词: 土壤有机碳密度; 地形因子; 桉树人工林

Relationships between soil organic carbon density of *Eucalyptus* plantations and terrain factors in Nanning

FAN Xiaohui¹, WANG Decai⁴, SUN Xiaolin^{2,*}, YANG Jingyang¹, WANG Huili³, DENG Xiaojun³, HUANG Zhigang¹, TANG Jian³

1 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

3 Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Tress Resource Cultivation, Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China

4 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: *Eucalyptus* plantations have widely expanded in the past two decades, which has triggered much debate with respect to their ecological and environmental impacts. One argument has focused on the organic carbon stocks of soil under *Eucalyptus* plantations. Although many studies have been devoted to this topic, the relationships between soil organic carbon density under a *Eucalyptus* plantation and terrain attributes are still unclear. In addition, little attention has been paid to secondary terrain attributes, as well as comparison of linear and non-linear relationships. This study was conducted in the Gaofeng Forest, a hilly area under *Eucalyptus* plantations with altitudes ranging from 125 m above sea level to 300 m in

基金项目: 国家自然科学基金(41201216); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室基金; 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题基金

收稿日期: 2014-11-11; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sun_xiaolin@yahoo.com

Nanning, China, and the linear and non-linear relationships between soil organic carbon density and terrain attributes (including both primary and secondary attributes) were investigated. A 10 m digital elevation model was constructed based on 1:10,000 digital topographic data of this area, and several commonly used terrain attributes, i.e., elevation, slope, aspect, plan curvature, profile curvature, and topographic wetness index, were extracted from the model. Then, the conditioned Latin hypercube sampling method was used to select representative samples based on these extracted terrain attributes. This method is a form of stratified sampling with the advantage of generating a set of samples that can precisely reflect the shape of a sampled distribution. Fifty sampling sites were selected using this method, of which only 41 were ultimately visited since the remaining 9 were not accessible. At each visited site, a soil profile was dug to the rocks or to a depth of 1.4 m. Soil samples were collected for each diagnostic layer of the profiles, which were then measured for soil organic carbon content using the potassium dichromate-oxidation method. Finally, correlation analysis, multiple linear regression, stepwise multiple linear regression, and regression tree modeling were explored to analyze relationships between the extracted terrain attributes and soil organic carbon density. In order to compare linear and non-linear relationships, pseudo- R^2 values, reflecting the spatial variability of soil organic carbon density explained by the models, were computed. The results showed that the 41 sampling sites represented the topographic conditions of this study area very well, as distributions of their terrain attributes were very similar to those of the whole study area. The soil organic carbon density within soil layer A, the 0—50 cm soil layer, and complete soil profile were 2.8 kg/hm², 7.7 kg/hm², and 10.9 kg/hm², respectively. However, only slope was correlated with the soil organic carbon density of soil layer A and the complete profile at a 0.05 level of significance. In general, primary terrain factors (i.e., elevation, slope, and aspect) were much more strongly correlated with soil organic carbon density than secondary factors (i.e., plan curvature, profile curvature, and topographic wetness index). This might be because the primary terrain attributes directly reflect redistribution of material and energy in the soil, whereas the secondary attributes can only reflect the overall environmental characteristics of soil. As soil depth increased, much more of the variability in soil organic carbon density was explained by the linear regression and non-linear tree models built from the terrain attributes. Comparatively, the non-linear tree models explained most of the variability of soil organic carbon density, followed by multiple linear regression models and stepwise regression models. Thus, it was concluded that non-linear relationships between soil organic carbon density under *Eucalyptus* plantations and terrain attributes are stronger than their corresponding linear relationships.

Key Words: soil organic carbon density; terrain attributes; *Eucalyptus* plantations

土壤是陆地最大的有机碳库^[1],其中,森林土壤约占 70%^[2]。桉树是我国乃至世界主要的人工森林树种之一,在广西的种植面积居全国首位^[3]。然而,桉树的大面积人工种植引发了诸多生态环境问题的争议^[4-6]。土壤有机碳密度及储量便是其中的热点问题之一^[7]。

地形是影响森林土壤有机碳密度空间分布的重要因素^[8-9],主要通过再分配水、热资源来影响土壤有机碳的输入和输出^[10]。目前,关于桉树人工林土壤有机碳密度与地形的关系研究较多地集中在简单地形因子,如高程、坡度等,并使用单一的线性相关分析方法,如刘姝媛等^[7]、Ramarson 等^[11]和张苏俊等^[12]。然而,这些研究结果揭示的两者相关关系相差迥异。

事实上,土壤与地形之间的关系非常复杂^[13],大量研究已表明两者之间不仅存在线性关系,还存在非线性关系^[14-15]。截至目前,很少有研究探讨桉树人工林土壤有机碳密度与地形之间的非线性关系。此外,随着地形分析研究的发展和广泛应用,很多研究表明,复合地形因子相对简单地形因子更能直观地反映地形地貌特征及土壤中的水文特征^[16],例如地形湿度指数广泛地用于预测土壤有机质的空间分布^[17]。因此,非常有必要研究复合地形因子与桉树人工林土壤有机碳密度之间的关系。

为此,本研究以广西南宁市高峰林场桉树人工林地研究区,首先建立该区的数字高程模型并提取简单

和复合地形因子,再采用条件拉丁超立方抽样法选择采样点,最后运用线性回归和回归树方法分别建立土壤有机碳密度与地形因子的线性和非线性关系模型,以期为区域桉树人工林土壤有机碳储量的精准估算提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西南宁高峰林场林业示范基地内,地理范围为 $108^{\circ}20'57''$ — $108^{\circ}21'54''$ E, $22^{\circ}57'8''$ — $22^{\circ}58'41''$ N,南北长约 2800 m,东西长约 1600 m,面积约为 3.03 km²(图 1)。该研究区属于丘陵地形,高程 125—300 m;年均气温为 21.6 ℃,年均降水量 1300.6 mm,其中 4—9 月的降水量占全年的 79.8%,处于亚热带湿润季风气候区^[18];土壤母质以古生代的泥岩、泥质页岩、砂页岩等沉积岩系为主,均风化发育为赤红壤^[19];植被以桉树人工林为主,林下灌草植物以木姜(*Litsea pungens*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、半边旗(*Pteris semipinnata*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)等为优势^[20]。本区域自本世纪之初开始种植桉树,约 5 年轮伐轮种一次,现生长的桉树树龄为 2—4 年、胸径约为 3—14 cm。

1.2 地形因子

本研究利用 Arcgis10 软件,在研究区 1:1 万数字划线图的基础上,用不规则三角网方法,建立研究区的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)(图 1),再

从该 DEM 中提取出常用的简单和复合地形因子。简单地形因子包括:高程(m)、坡度(°)、坡向(°);复合地形因子包括:平面曲率($1/(100\text{ m})$)、剖面曲率($1/(100\text{ m})$)和地形湿度指数(Topographic Wetness Index, TWI)。TWI 的计算公式同文献[21],即 $TWI = \ln(SCA/G)$ (SCA 为单位面积的汇流面积, G 为坡度, $\ln$ 为自然对数转换)。

1.3 土壤采样及实验分析

本研究采用条件拉丁超立方抽样法选择采样点。条件拉丁超立方抽样法是在特定的条件范围内进行拉丁超立方抽样的一种多维分层抽样方法。与常用的拉丁超立方抽样相比,该方法确保每一个样点都是真实存在且具有代表性^[22]。本研究将上述地形因子(高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率和地形湿度指数等)设定为条件变量,再运用该方法选择出 50 个样点。在实际的采样中,有些样点位置由于植被异常丰茂而无法到达,最终有效样点数为 41 个,如图 1 所示。

在采样点上,本研究采集了土壤剖面,深度至母质层或 140 cm(母质层深度大于 140 cm)。土壤剖面分层根据中国土壤系统分类规定,按照土层颜色、质地、松紧度、砾石含量及根系来划分土壤层次,详细记录各层的形态特征和厚度,并分层采样,同时采集环刀样来测定土壤容重。样品经风干等处理后使用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量^[23]。

1.4 土壤有机碳密度计算方法

本研究计算的土壤有机碳密度是指单位面积一定深度土层中土壤有机碳的储量^[24],共计算了三个深度

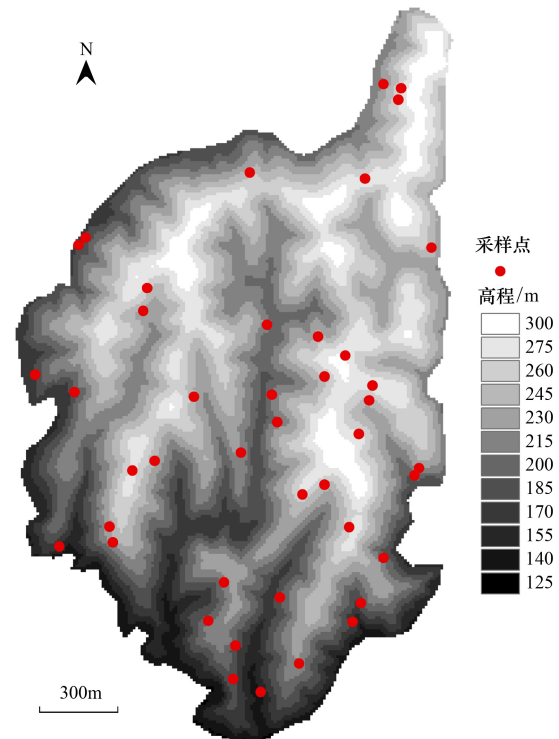


图 1 研究区的数字高程图及采样点
Fig.1 Digital elevation map of the study area and sample points

的有机碳密度:土壤表层(即 A 层)、0—50cm 土层和全剖面。其中,全剖面计算至采样深度,即母质层或 140cm(母质层深度大于 140cm)。由于本研究区的土壤发育较好(地处南亚热带,土壤为赤红壤且种植桉树),一般至母质层附近才出现较多砾石,并且研究区的面积较小,区内相同土层的容重差异很小,所以本研究计算土壤有机碳密度时,根据参考文献^[25-26]等未考虑砾石含量及容重,计算公式为:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^k \text{SOCD}_i = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times H_i / 100 \quad (1)$$

其中,SOCD 为土壤的有机碳密度(kg/hm^2); SOCD_i 为第 i 土层的有机碳密度(kg/hm^2), C 为土壤有机碳含量(g/kg), D 为土壤容重(g/cm^3), H 为土层厚度(cm)。

1.5 数据分析

本研究利用 Spss19.0 软件进行数据的基本处理和土壤有机碳密度与地形因子之间的相关性分析,并建立全变量多元线性回归模型及逐步线性回归模型($P < 0.05$);同时利用 R 软件中的 rpart 包建立回归树非线性回归模型。回归树是根据各自变量的属性,利用自上而下的递归分割方法将变量逐层分割,最后在树的末端得到相应因变量的描述或预测^[27-28]。

本文通过比较线性模型和非线性模型的解释空间变异能力的大小,即 R^2 ,来对比土壤有机碳密度与地形因子的线性和非线性关系强度。由于回归树非线性模型不能直接计算 R^2 ,本研究根据各模型的误差均方(Mean Square Error, MSE),通过公式 $\text{pseudo-}R^2 = 1 - \text{MSE}/\text{Var}(y)$ ($\text{Var}(y)$ 为样本方差)来计算各模型的伪 R^2 值。

2 结果与讨论

2.1 采样点上的地形因子和土壤有机碳密度

表 1 列出了采样点及研究区地形因子的统计数据。可以看到:除自身变异较大的平面曲率和剖面曲率^[29]外,采样点的其他地形因子统计值与研究区的相近,说明采样点基本反映了研究区的地形条件;标准差的差别较小,最小值、最大值也比较接近,说明采样点所包含的地形变异能较好地代表整个研究区。总体上,研究区高程范围为 150—300m,属于典型丘陵地形;山坡的坡度陡,平均坡度 25.33° ;研究区内的坡形类型丰富;土壤的水分状况差异明显。

表 1 采样点及研究区地形因子的统计数据

Table 1 Statistics of terrain attributes on the sampling sites and the whole study area

地形因子 Terrain factors		采样点(n=41) Sample in study area				研究区 Study area			
		平均值 Average	标准差 Standard Deviation	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	最小值 Min	最大值 Max
简单地形因子	高程/m	216.53	35.12	138.35	276.05	212.02	55.91	125	300
Primary terrain factors	坡度/ $^\circ$	27.56	6.33	8.07	42.42	25.33	8.53	0	52.41
	坡向/ $^\circ$	203.57	93.31	25.6	338.76	191.68	95.75	-1.0*	360
复合地形因子	平面曲率	0.50	1.43	-2.01	5.71	0.07	1.7	-17.05	15.74
Secondary terrain factors	剖面曲率	-0.53	1.34	-3.17	2.05	0.07	2.12	-10.81	16.78
	地形湿度指数	4.05	0.88	2.71	7.88	4.49	1.83	1.73	17.55

* 在 ArcGIS 中,平区的坡向值取为-1.0,以区别其他有坡向的地区

采样点上的土壤有机碳密度统计分析结果见表 2。可以看到:土壤表层、0—50cm 和全剖面的土壤有机碳密度均值分别为 $2.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $7.7 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $10.9 \text{ kg}/\text{hm}^2$,与广东地区桉树人工林土壤有机碳密度相比,属于中等水平^[7,12]。

表 2 土壤有机碳密度 (kg/m²) 统计值 (n=41)
Table 2 Basic statistical parameters of SOCD (kg/hm²)

土层 Soil layer	最小值 Min	最大值 Max	均值 Average
表层 A soil layer	1.77	4.38	2.80
0—50 cm 土层 0—50 cm soil layer	3.25	10.72	7.70
全剖面 Complete profile	4.35	15.17	10.9

2.2 土壤有机碳密度与地形因子的相关关系

表 3 列出了土壤有机碳密度与地形因子的相关分析结果。仅坡度在 0.05 显著性水平上与表层和全剖面土壤有机碳密度显著正相关。结合采样观察,这可能与本研究区的林地经营管理有关。在缓坡地区,施肥、除草等经营管理活动有效地遏制了林下灌草植物的生长,不利于有机碳的积累;而陡坡地区不利于人为活动,林下自然生长的灌草植物较多,促进了有机碳在土壤中的积累。

表 3 土壤有机碳密度与地形因子的相关性 (n=41)
Table 3 Correlations between terrain factors and SOCD

土层 Soil layer	简单地形因子 Primary terrain factors			绝对平 均值 Absolute average	复合地形因子 Secondary terrain factors			绝对平 均值 Absolute average
	高程 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect		平面曲率 Plane curvature	剖面曲率 Profile curvature	地形湿 度指数 Topographic wetness index	
表层土壤有机碳密度 SOC density within A soil layer	-0.029	0.319 *	0.115	0.154	0.013	0.184	0.119	0.105
0—50 cm 土壤有机碳密度 SOC density within 0—50 soil layer	-0.157	0.240	0.104	0.167	-0.016	0.053	0.197	0.089
全剖面土壤有机碳密度 Complete profile SOC density	-0.078	0.338 *	0.008	0.141	-0.107	0.133	0.189	0.143

* 在 0.05 水平上显著

简单地形因子与土壤有机碳密度相关系数的绝对平均值要高于复合地形因子,说明简单地形因子与土壤有机碳密度的相关性要好于复合地形因子。这可能是因为简单地形因子直接表征地表物质和能量的再次分配,例如,坡向表征光照辐射在地表的再分配和程度,从而影响土壤有机物质的分解速率^[30]。相对来讲,复合地形因子反映的是土壤的环境特征,例如,地形湿度指数表达土壤的水文特征^[29],并未参加土壤有机碳的积累过程。

总体而言,土壤有机碳密度与地形因子之间的相关性不明显。这可能是因为其他非地形因素,如母质、桉树生长状况、林地经营管理方式等,以及地形因子之间的交互、综合作用造成的。尽管本研究区的母质非常相近,但桉树生长状况及林地经营管理方式略有不同。单个地形因子对土壤有机碳的作用可能会因这些因素的共同作用而变小或变弱。例如,孙孝林等^[29]分析指出,尽管缓坡处的地表径流减缓,水分入渗较强,凋落物易堆积,利于有机物质在土壤中的积累,但如果缓坡处的平面曲率大于 0,则地面表现为发散型坡形,物质和能力在这种坡形上容易流失,不利于有机碳的积累。一些研究表明,人为的林木采伐等活动对桉树人工林土壤有机碳具有负面影响^[6],以及桉树林龄可以削弱坡向对桉树人工林土壤有机碳的影响^[12]。

2.3 土壤有机碳密度与地形因子之间的回归模型

土壤有机碳密度与地形因子之间的线性和非线性回归模型见表 4。逐步线性回归模型由于设置了显著性水平 0.05 的进入要求,除坡度外的其他地形因子与土壤有机碳密度之间的相关性较弱,因此仅坡度进入该模型。在表 4 中,随着土层厚度的增加,线性和非线性回归模型对土壤有机碳密度空间变异的解释能力都提升。这可能是因为随着土层厚度的增加,非地形因素如桉树生长状况、林地经营管理方式影响较小,使得地形因子与土壤有机碳密度之间的关系更紧密。

表 4 中线性回归模型的 R^2 值与伪 R^2 值存在差异,这主要由计算公式的不同造成的,但两者的差异并不大。伪 R^2 值大小整体上呈现出:回归树>全变量多元线性回归>逐步线性回归。因此,土壤有机碳密度与地形因子的回归树模型的解释空间变异能力要强于它们之间的全变量多元线性回归和逐步线性回归模型。同时,这也说明桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子的非线性关系要强于它们之间的线性关系。从上述土壤有机碳密度与地形因子之间的相关关系讨论中可知,桉树生长状况、林地经营管理方式等因素,以及地形因子之间的交互、综合作用可能导致了它们之间的非线性关系强于线性关系。

研究区的简单地形因子坡度与土壤有机碳密度的相关关系最为显著,而在非线性回归树模型中坡度位于最高的分类节点,且多次被用于分类,其次为剖面曲率和平面曲率。这说明,简单地形因子坡度在研究区土壤有机碳密度的模型中起决定性作用。如前所述,这可能是因为简单地形因子直接表征地表物质和能量的再次分配,而复合地形因子反映的是土壤的环境特征。

表 4 土壤有机碳密度和地形因子间的回归方程 ($n=41$)

Table 4 Regression equations between SOCD and terrain attributes				
土层 Soil layer	分析方法 Analytical method	模型 Model	R^2	伪 R^2 Pseudo- R^2
表层土壤有机碳密度 SOC density within A soil layer	全变量多元线性回归	$y = -0.977 + 0.317\text{Tw} + 0.05\text{Slo} + 0.069\text{Prc} + 0.126\text{Plc} + 0\text{Asp} + 0.005\text{Ele}$	0.216	0.215
	逐步线性回归 ($P < 0.05$)	$y = 1.713 + 0.039\text{Slo}$	0.11	0.11
	回归树	$\begin{cases} \text{Slo} \geq 29.46, \text{则 } 3.229 \\ \text{Slo} < 29.46, \text{则 } \begin{cases} \text{Prc} < 0.2516, \text{则 } 2.26 \\ \text{Prc} \geq 0.2516, \text{则 } 3.081 \end{cases} \end{cases}$	—	0.377
0—50 cm 土壤有机碳密度	全变量多元线性回归	$y = -0.279 + 0.957\text{Tw} + 0.078\text{Slo} + 0.058\text{Prc} + 0.357\text{Plc} - 0.001\text{Asp} + 0.009\text{Ele}$	0.238	0.257
	逐步线性回归 ($P < 0.05$)	—	—	—
	回归树	$\begin{cases} \text{Slo} < 23.66, \text{则 } 6.731 \\ \text{Slo} \geq 23.66, \text{则 } \begin{cases} \text{Prc} < 1.393, \text{则 } 8.713 \\ \text{Prc} \geq 1.393, \text{则 } \begin{cases} \text{Slo} < 29.25, \text{则 } 8.03 \\ \text{Slo} \geq 29.25, \text{则 } 7.38 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$	—	0.290
全剖面土壤有机碳密度	全变量多元线性回归	$y = -1.435 + 1.077\text{Tw} + 0.189\text{Slo} - 0.063\text{Pro} + 0.258\text{Plc} + 0.002\text{Asp} + 0.001\text{Eb}$	0.267	0.285
	逐步线性回归 ($P < 0.05$)	$y = 6.827 + 0.148 \text{ Slo}$	0.165	0.255
	回归树	$\begin{cases} \text{Slo} < 23.66, \text{则 } 8.78 \\ \text{Slo} \geq 29.46, \text{则 } \begin{cases} \text{Plc} < -0.013, \text{则 } 1077 \\ \text{Plc} \geq -0.013, \text{则 } \begin{cases} \text{Slo} < 28.92, \text{则 } 11.13 \\ \text{Slo} \geq 28.92, \text{则 } 12.4 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$	—	0.302

表中 Ele, Slo, Asp, Plc, Prc, Twi 分别为高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率及地形湿度指数

3 结论

针对桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子之间的关系还不明确的问题,本文利用条件拉丁超立方抽样法选择样点,分析了地形因子与土壤有机碳密度之间的相关性、线性回归模型和非线性回归模型(即回归树)。结果表明:(1)利用条件拉丁超立方采样方法获取到的样点能有效的反映研究区的地形特征,其代表性能满足本文的研究需要;(2)简单地形因子与土壤有机碳密度的相关性要强于复合地形因子,这是因为简单地形因子直接表征影响土壤有机碳积累过程的地表物质和能量再次分配;(3)由于土壤下层受非地形因素

如桉树生长状况、林地经营管理方式的影响较小,土壤有机碳密度与地形因子之间的回归模型对土壤有机碳密度空间变异的解释能力随着土壤厚度的增加而增加;(4)土壤有机碳密度与地形因子之间的非线性关系要强于两者的线性关系,简单地形因子坡度发挥了更大作用。

影响土壤有机碳密度的地形因子,除了本文介绍的地形因子外,还有坡长、高程变异系数、地形起伏度等,以及其他非地形因素如母质、植被生长状况和人为活动等,本文仅选取了常用的地形因子进行了研究。此外,除了本文使用的线性回归和非线性回归树模型外,其他常用的土壤空间变异模型还有多种,例如神经网络。今后将开展这两个方面的研究。

参考文献 (References):

- [1] Fiener P, Gottfried T, Sommer M, Steger K. Soil organic carbon patterns under different land uses in South India. *Geoderma Regional*, 2014, 2-3: 91-101.
- [2] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 1-6.
- [3] 项东云, 陈健波, 叶露, 申文辉. 广西桉树人工林发展现状、问题与对策. *广西林业科学*, 2007, 35(4): 195-201.
- [4] Yu F K, Huang X H, Duan C Q, He S Z, Zhang G S, Liu C E, Fu D G, Shao H B. Impacts of *Ageratina adenophora* invasion on soil physical-chemical properties of *Eucalyptus* plantation and implications for constructing agro-forest ecosystem. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 130-135.
- [5] Adam B McKiernan, Mark J Hovenden, Timothy J Brodribb, Brad M Potts, Noel W Davies, Julianne M, O'Reilly-Wapstra. Effect of limited water availability on foliar plant secondary metabolites of two *Eucalyptus* species. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 105: 55-64.
- [6] 梁宏温, 温远光, 温琳华, 殷庆仓, 黄锡泽, 周国福. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳贮量的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4242-4250.
- [7] 刘妹媛, 刘月秀, 叶金盛, 宫彦章, 曾曙才. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 1981-1985.
- [8] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 仇瑶, 何平. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素. *生态学报*, 2014, 34(7): 1626-1634.
- [9] Jörg Prietael, Dominik Christophel. Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. *Geoderma*, 2014, 221-222: 28-39.
- [10] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例. *生态学报*, 2014, 34(5): 1105-1113.
- [11] Ramarson Herintsitohaina Razakamanarivo, Grinand Clovis, Marie Antoinette Razafindrakoto, Bernoux Martial, Albrecht Alain. Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: A multiple regression approach. *Geoderma*, 2011, 162(3/4): 335-346.
- [12] 张苏峻, 黎艳明, 周毅, 苏志尧. 粤西桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因素. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(5): 22-28.
- [13] 李启权, 王昌全, 张文江, 余勇, 李冰, 杨娟, 白根川, 蔡艳. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 459-466.
- [14] Alex B McBratney, Maria De Lourdes Mendonça Santos, Budiman Minasny. On digital soil mapping. *Geoderma*, 2003, 117(1/2): 3-52.
- [15] James A Thompson, Randall K Kolka. Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil-landscape modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1086-1093.
- [16] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, Fuller L G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modeling & Software*, 2002, 17(3): 295-311.
- [17] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 刘洪斌. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 113-120.
- [18] 李艳兰, 何慧, 黄雪松. 南宁市近 50 年气候变化特征. *广西大学学报: 自然科学版*, 2007, 32(2): 159-162.
- [19] 龚子同, 韦启瑞. 桂南热带土壤林业利用的途径——以广西高峰林场为例. *农业现代化研究*, 1985, (1): 36-38, 42.
- [20] 韦善华, 黄承标, 陶大燕, 张克如, 何斌, 朱贤良. 广西高峰林场林业示范基地 3 种人工林林地土壤理化性质的研究. *西部林业科学*, 2012, 41(5): 95-99.
- [21] Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, Peterson G A. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(2): 443-452.
- [22] Budiman Minasny, Alex B McBratney. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(9): 1378-1388.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
- [24] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [25] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 于大炮, 周莉, 周旺明, 彭舜磊, 代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 10-16.
- [26] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 张琳, 孔祥斌. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨. *土壤通报*, 2005, 36(6): 836-839.
- [27] 谢益辉. 基于 R 软件 rpart 包的分类与回归树应用. *统计与信息论坛*, 2007, 22(5): 67-70.
- [28] 温小霓, 蔡汝骏. 分类与回归树及其应用研究. *统计与决策*, 2007, (23): 14-16.
- [29] 孙孝林, 赵玉国, 赵量, 李德成, 张甘霖. 应用土壤-景观定量模型预测土壤属性空间分布及制图. *土壤*, 2008, 40(5): 837-842.
- [30] 郭月峰, 姚云峰, 秦富仓, 祁伟, 王欣, 常伟东. 地形因子对老哈河流域土壤有机碳的影响. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(2): 156-161.