

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201611037

引文格式: 宋敏, 彭晚霞, 徐庆国, 等. 广西不同森林类型土壤有机碳的空间异质性 [J]. 广西植物, 2017, 37(11):1418-1427
 SONG M, PENG WX, XU QG, et al. Spatial heterogeneity of soil organic carbon under different forest types across Guangxi [J]. *Guihaia*, 2017, 37(11):1418-1427

广西不同森林类型土壤有机碳的空间异质性

宋敏^{1,2,3}, 彭晚霞^{2,3}, 徐庆国^{1*}, 曾馥平^{2,3}, 杜虎^{2,3}, 张浩^{2,3}, 曾昭霞^{2,3}

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所重点实验室, 长沙 410125; 3. 中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站, 广西 环江 547200)

摘要: 采用经典统计学和地统计学相结合的方法, 研究广西 10 类主要森林类型不同土层 (0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm) 土壤有机碳含量的空间异质性。结果表明: 广西森林不同土层土壤有机碳平均含量变化为 8.01~29.78 g·kg⁻¹, 变异系数在 50.27%~74.89% 之间; 10~20 cm 土层土壤有机碳的半变异函数符合球状模型, 其余土层符合指数模型, 且拟合效果均较好; 各土层土壤有机碳半变异函数的块金效应为 16.75%~49.33%, 表现为强烈或中等强度的空间自相关性; Kriging 插值结果显示, 不同森林各土层土壤有机碳含量的分布具有一定相似的空间分布特征, 总体表现为北高南低, 最高和最低值分别出现在东北和东南; 广西不同森林类型不同土壤深度土壤有机碳含量和变异系数不同, 0~100 cm 土壤有机碳平均含量的大小顺序为硬阔>杉木>石山林>软阔>竹林>八角>桉树>油茶>栎类>松树, 总体上土壤有机碳含量随土壤深度的增加而降低, 变异系数则相反。广西森林土壤的空间异质性受结构性和人为因素的共同制约, 其中结构性因素起主导作用。因此, 加强自然林封育和人工林保育、优化调控桉树林和经济林种植规模是提高广西森林固碳潜力的重要措施。

关键词: 土壤有机碳, 空间异质性, Kriging, 森林类型, 广西

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)11-1418-10

Spatial heterogeneity of soil organic carbon under different forest types across Guangxi

SONG Min^{1,2,3}, PENG Wan-Xia^{2,3}, XU Qing-Guo^{1*}, ZENG Fu-Ping^{2,3},
DU Hu^{2,3}, ZHANG Hao^{2,3}, ZENG Zhao-Xia^{2,3}

(1. College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China)

收稿日期: 2017-07-07 修回日期: 2017-08-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502405); 国家自然科学基金 (31370485, 31370623, 31400412, 31460135); 广西科技惠民项目 (桂科转 1599001-6); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB16380255); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2015B231) [Supported by the National Key Research and Development Program (2016YFC0502405); Natural Science Foundation of China (31370485, 31370623, 31400412, 31460135); Guangxi Provincial Benefiting Program of Science and Technology (1599001-6); Guangxi Key Research and Development Program (AB16380255); Postgraduate Research and Innovation Program of Hunan Province (CX2015B231)]。

作者简介: 宋敏 (1987-), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为生态学, (E-mail) songmin_summer@163.com。

*通信作者: 徐庆国, 教授, 博士生导师, 主要从事生态学研究, (E-mail) 1075324207@qq.com。

Abstract: By combination of classical statistics, geostatistics and geographic information system, the spatial heterogeneity of soil organic carbon (SOC) in different layers (0–10, 10–20, 20–30, 30–50 and 50–100 cm) of ten kinds of major forest types in Guangxi were studied. Soil samples were collected from 115 sampling locations and 345 plots (50 m × 20 m), according to 10 km × 10 km grid. The results showed that the average content of SOC in different forests in Guangxi ranged from 8.01 to 29.78 g · kg⁻¹ and the coefficient of variation (CV) ranged from 50.27% to 74.89%. The semivariogram of SOC in 10 – 20 cm soil layer was best fitted with exponential model whereas those in other soil layers were best fitted with spherical model. The nugget effect of semivariogram of SOC in all soil layers ranged from 16.75% to 49.33%, indicating a strong or a moderate spatial autocorrelation. Kriging interpolation results showed characteristics of spatial distribution of SOC in different soil layers were similar, i.e., higher in the north while lower in the south, and the maximum and minimum occurred in the northeast and the southeast of Guangxi, respectively. The average of SOC and its CV varied with forest type and soil layer, and the average of SOC in 0–100 cm layer followed the order: *Castanopsis* > *Cunninghamia lanceolata* > *Cyclobalanopsis glauca* > *Liquidambar* > *Bambusa multiplex* > *Octagon* > *Eucalyptus* > *Cammellia oleifera* > *Quercus* > *Pinus*. On the whole, SOC decreased with increasing soil depth, while the CV exhibited an opposite trend. The spatial heterogeneity of SOC in forest of Guangxi was synthetically influenced by structural and human factors, while the structural factors played a dominant role. It is suggested that expanding the area of natural forests and plantations like *Cunninghamia lanceolata* while reducing the area of *Eucalyptus* and certain economic forests like *Cammellia oleifera* will help increase carbon sequestration potential in forest of Guangxi.

Key words: soil organic carbon, spatial heterogeneity, Kriging, forest type, Guangxi

在人类活动的影响下,全球碳循环发生了显著改变,因大气 CO₂ 等温室气体浓度持续增加而导致的温室效应增强、气候变暖、大气环流变化等一系列生态环境问题受到了国际社会高度的关注(丁仲礼等, 2009)。森林生态系统是陆地生态系统的主体,也是世界上除海洋之外最大的碳库,占全球陆地总碳储量的 46% (Zhang & Wang, 2010),其维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73% (Pan et al, 2011; Woodwell et al, 1978),在维护全球气候系统、调节碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用(罗云建等, 2009)。土壤有机碳是陆地生态系统重要的碳库,对全球气候变化背景下大气二氧化碳浓度变化有重要影响(Huang et al, 2010),同时也是评价土壤肥力的重要指标。森林生态系统中土壤碳的来源、去向及其动态变化对于陆地生态系统的碳源/碳汇有着重大贡献,其固碳功能越来越引起科学家们的重视(Zhou et al, 2006; Luysaert et al, 2008)。土壤空间异质性是土壤的一个重要的属性,不同尺度的土壤空间异质性对土壤的结构与功能及植被空间格局都有重要的影响(John et

al, 2007; 宋同清等, 2009; 刘璐等, 2010; 张志强等, 2013),关于土壤有机碳空间异质性的研究涉及到不同区域(路鹏等, 2005)、土地利用类型(熊汉锋和王运华, 2005; 郭晓敏等, 2006)等方面。运用地统计学方法,既能有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,又能有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响(郭旭东等, 2000; 李步杭等, 2008)。

广西地处中国南疆,地跨北热带、南亚热带、中亚热带三个生物气候带,具有气候温和、热量充足、雨量充沛的气候特点,非常适宜森林植物的生长(杜虎等, 2016)。第八次森林资源清查结果表明,广西林地面积 1 527.17 万 hm²,占全区土地面积的 64.27%。森林面积 1 509.75 万 hm²,占林地面积的 98.86%,森林覆盖率为 56.51%,林木绿化率为 57.73%。活立木总蓄积 55 816.60 万 m³,其中森林蓄积 48 834.12 万 m³,占 87.49%。该研究以广西森林土壤为研究对象,应用经典统计学、地统计学和 GS⁺ 相结合的方法,对研究区土壤有机碳含量空间异质性进行分析,以期从空间变异方面认识广西森林土壤碳生态学过程。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地理坐标为 $104^{\circ}26' \sim 112^{\circ}04' E$ 、 $20^{\circ}54' \sim 26^{\circ}24' N$ ，总面积为 23.67 万 km^2 ，处于云贵高原东南边缘，两广丘陵的西部，南边朝向北部湾，地势呈现为四周多山地，而中部与南部多为平地，属山地丘陵性盆地地貌。该区域属于亚热带季风气候区，全区年平均气温在 $16.5 \sim 23.1^{\circ}\text{C}$ 之间，极端最高气温为 $33.7 \sim 42.5^{\circ}\text{C}$ ，极端最低气温为 $-8.4 \sim 2.9^{\circ}\text{C}$ ，区域年降水量均在 1 070 mm 以上，大部分地区为 1 500 ~ 2 000 mm，雨季（4—9 月）降水量占全年降水量的 70% ~ 85%。该植被区域类型为亚热带常绿阔叶林区域，植被类型多样，物种种类丰富，以常绿树种为主。

1.2 样方设置与调查

广西森林总面积为 1 509.7 万 hm^2 ，总蓄积为 48 834.1 万 m^3 ，其中松 (*Pinus*)、杉 (*Cunninghamia lanceolata*)、桉 (*Eucalyptus*)、八角 (*Octagon*)、栎类 (*Quercus*)、硬阔的椎属 (*Castanopsis*)、软阔 [枫香 (*Liquidambar*)、荷木 (*Schima Superba*)、木姜子 (*Litsea pungens*)]、竹 [毛竹 (*Phyllostachys pubescens*)、丛生竹 (*Bambusa multiplex*)]、石山林 [青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、润楠 (*Machilus*)、肥牛树 (*Cephalomappa sinensis*)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、香椿 (*Toona sinensis*)、任豆 (*Zenia insignis*)、菜豆 (*Radermachera sinica*)、椴子皮 (*Itoa orientalis*)]、油茶 (*Camellia oleifera*) 等 10 个典型森林生态系统占全区森林总面积和总蓄积的 89.60% 和 99.80% (表 1)。参照 IPCC 关于《土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》(Penman et al, 2003) 对系统随机抽样的建议，采用网格法 (约为 0.1 经纬网格) 进行样点布置。本研究共设置 115 个调查样点，各样点设置 3 个重复样地，共计 345 个样地，样地面积为 1 000 m^2 (50 m \times 20 m)，详见杜虎等 (2016) 研究。按各林型、各林龄在各市 (县) 面积和蓄积加权进行样点布置 (表 1、图 1)。调查时记录各样地经纬度、坡向、坡度、坡位、海拔及各项自然条件，森林的树种组成、林龄、层次、结

构、郁闭度、下木和草本地被植物的状况，人工林记录其造林措施和经营活动 (杜虎等, 2016)。

1.3 样品采集与分析

2012 年 9—11 月，在样地网格的 4 个角和中间位置按 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 100 cm 五层次采集土壤样品，各点同层次样品混合成一个土样。对于喀斯特地区土层深度不足 1 m 的，采至基岩层。样品取完后带回实验室，剔除动、植物残体，自然风干后土样过 100 目筛，采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法测定土壤有机碳含量。

1.4 数据处理

本研究通过加权平均法计算 0 ~ 100 cm 深度森林土壤有机碳平均含量。应用 SPSS 16.0 软件对研究区各土层森林土壤有机碳含量进行描述性统计分析，采用 GS^+ 对数据进行半方差函数拟合，ArcGIS 9.3 进行 Kriging 插值绘制土壤有机碳含量空间分布图。运用 Duncan 法进行不同土层深度有机碳含量方差分析 ($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 经典统计分析

由表 2 可知，广西森林土壤有机碳平均含量变化范围为 $8.01 \sim 29.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其含量随剖面深度的增加依次降低。其中 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳含量最高，50 ~ 100 cm 土层土壤有机碳含量最低。整体来看，研究区 0 ~ 100 cm 深度土壤有机碳平均含量为 $12.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。广西森林土壤有机碳含量的标准差和变异系数较大，分别为 6.00% ~ 14.97% 和 50.27% ~ 74.89%，表明了其变异属中等程度变异，有必要用地统计学原理和方法对其进行空间变异性分析。采用 K-S 法进行 5% 的检验水平下的非参数检验，结果表明原始数据均存在着偏态效应，对数据进行自然对数转换之后其结果均满足正态分布的要求 ($K-S$ 值 > 0.05)。

2.2 空间结构特征

表 3 显示，50 ~ 100 cm 土层拟合程度相对较差， R^2 为 0.529，而其他土层拟合程度相对较好，决定系数为 0.688 ~ 0.843，各土层的残差 (RSS) 均很

表 1 广西主要森林类型调查样点分配

Table 1 Details of plots distribution for main forest types in Guangxi

森林类型 Forest type	面积 Area (hm^2)	比例 Ratio (%)	理论样点数 Theoretic sampling point	蓄积 Storage (m^3)	比例 Ratio (%)	理论样点数 Theoretic sampling point	实际样点数 Virtual sampling point
八角 <i>Octagon</i>	508 209.1	3.4	4.27	11 115 556	2.25	2.04	3
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1 323 829.1	8.87	14.87	94 965 180	19.25	18.89	15
松树 <i>Pinus</i>	2 487 154.3	16.66	25.39	142 888 732	28.97	29.42	22
栎类 <i>Quercus</i>	296 433.8	1.99	2.79	15 638 140	3.17	3.03	6
桉树 <i>Eucalyptus</i>	1 570 741	10.52	15.73	61 217 762	12.41	12.81	15
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	338 503.9	2.27	2.77	139 744	0.03	0	3
石山林 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	2 793 945.5	18.72	25.83	208 992	0.04	0	25
硬阔 <i>Castanopsis</i>	1 792 645.9	12.01	2.08	73 797 432	14.96	1.86	5
竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	361 852.8	2.42	3.43	240 981	0.05	0	6
软阔 <i>Liquidambar</i>	2 054 599.6	13.76	17.84	87 163 650	17.67	14.94	14
合计 Total	13 527 915	100	—	487 376 169	100	—	115

小,为 0.012~0.024,各模型能很好地反应土壤有机碳含量的空间结构特征。研究区土壤有机碳含量变异函数值的最佳拟合模型除 10~20 cm 土层的为球状模型外,其余均为指数模型。各土层块金值介于 0.067~0.256 之间。50~100 cm 深度土壤有机碳块金效应值低于 25%,其呈现强烈的空间自相关性;其余各土层的块金效应均在 25%~75%之间,土壤有机碳表现为中等强度的空间自相关性。

2.3 空间分布格局

图 2 显示,研究区各土层森林土壤有机碳含量的分布具有一定相似的空间分布特征,总体表现为西南向东北递增的变化,桂东北区域土壤有机碳含量相对较高,桂东南区域土壤有机碳含量较低。0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层森林土壤有机碳分布特征类似,高值区主要分布在桂北部。20~30、30~50 和 50~100 cm 土层森林土壤有机碳分布特征类似,皆在东北部有三大高值斑块。整个 0~100 cm 土层森林土壤有机碳含量的分布呈由东北向西南方向递减的趋势。整个剖面森林土壤有机碳含量分布的变化特征为随土层深度的

增加而含量逐渐降低,这是因为表层森林土壤有大量的植被凋落物和根系分泌物存在。

2.4 不同森林类型土壤有机碳垂直分布

广西不同森林类型、不同土壤深度土壤有机碳含量不同,总体上均随土壤深度的增加呈下降趋势(表 4),0~10 cm 土层的森林土壤有机碳含量均显著高于其他层次,10~20 cm 土层的土壤有机碳含量也均显著高于 50~100 cm 土层,10~20 cm 与 20~30 cm 土壤有机碳杉木、松树、桉树、石山林和软阔差异显著,20~30 cm 与 50~100 cm 土层之间除八角、栎类外其他森林类型差异显著;不同森林类型 0~100 cm 土壤有机碳平均含量的大小顺序为硬阔>杉木>石山林>软阔>竹林>八角>桉树>油菜>栎类>松树,硬阔显著高于杉木林和石山林,杉木林和石山林差异不显著,但显著高于其他森林,石山林和软阔、竹林差异不显著,但显著高于其他五类森林,竹林与八角、桉树林差异不显著,但显著高于油茶、栎类和松树林,其他林型差异不显著。不同森林类型同一层次的土壤有机碳含量的差异不同,但各层总体上呈现的趋势与 0~100 cm 土壤有机碳含量相似。

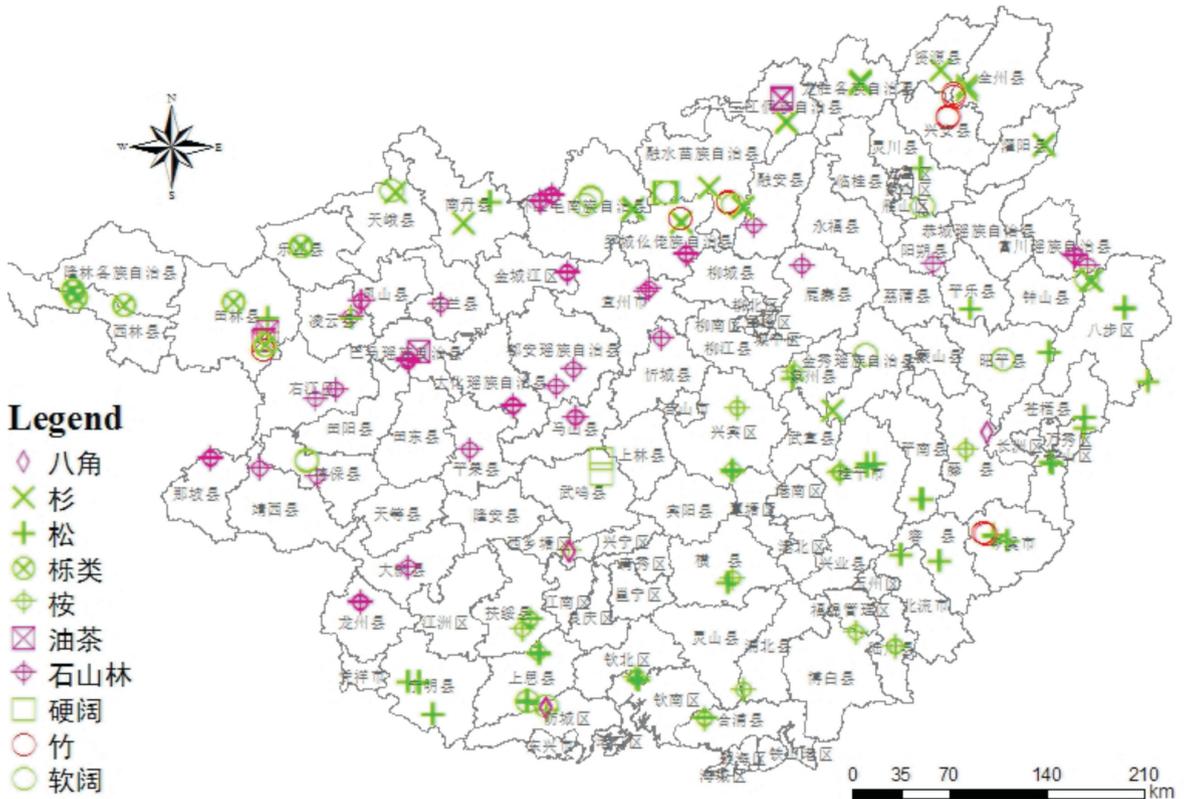


图 1 样地调查分布图

Fig. 1 Map of plots in the study area

由表 5 可知,0~100 cm 土层森林土壤有机碳含量总体处于中等程度变异,变异的大小顺序为松树>石山林>栎类>八角>桉树>竹林>油茶>硬阔>杉木>软阔。不同树种不同土层的变异系数差异不同,其中软阔各土层变异系数的差异较小,为 22.43%~35.93%,最大变异系数在 20~30 cm 土层;栎类 50~100 cm 呈弱变异,仅为 8.84%,最大值出现在 10~20 cm;其他森林的变异系数最大值主要出现在 20~30、30~50 和 50~100 cm 土层。

3 讨论与结论

广西森林土壤有机碳平均含量为 8.01~29.78 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且随土壤深度的增加而降低,均呈中等程度变异,变异系数为 50.27%~74.89%,与前人研究的结果相似(张继光等, 2008),总体趋势上,有机碳含量越低变异系数越大,30~50 cm 土层土壤

有机碳的变异系数为 67.95%,50~100 cm 土层则高达 74.89%。可见广西森林各层土壤有机碳可能受较为强烈的人为干扰和自然因素的共同影响,经典统计分析不能有效反映土壤有机碳空间结构性、随机性、相关性等空间分布信息,有必要采用地统计学原理和方法对其进行空间变异性分析。地统计学的区域化变量理论是建立在本征假设或二级平稳假设基础上,样本点的观测值必须符合正态分布或近正态分布(王政权, 1999),否则用传统的半变异方法计算出的半变异函数值是有偏的。因此,在统计分析前一般先采用 3S 即 3 倍标准差识别异常值,分别用最大和最小值替换(马风云等, 2006),然后对数据进行转化(McGrath et al, 2004)。广西区森林土壤各层土壤有机碳在进行对数转换后,除 10~20 cm 土层土壤有机碳的半变异函数符合球状模型外,其余均符合指数模型,且拟合效果均较好。

表 2 不同土层有机碳描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistics of soil organic carbon in different soil layers

土层 Soil layer (cm)	样本数 Samples number	平均值 Mean ($g \cdot kg^{-1}$)	最大值 Max ($g \cdot kg^{-1}$)	最小值 Min ($g \cdot kg^{-1}$)	标准差 SE	变异系数 CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 值 K-S Value	K-S 值 K-S Value
0~10	345	29.78	76.90	2.50	14.97	50.27	0.81	0.52	0.026 *	0.167#
10~20	345	20.91	67.62	2.28	13.85	66.20	1.28	1.86	0.000 *	0.812#
20~30	345	15.49	49.21	0.00	10.12	65.33	1.25	1.40	0.000 *	0.832#
30~50	345	11.10	35.15	0.00	7.54	67.95	1.24	1.40	0.000 *	1.000#
50~100	345	8.01	28.15	0.00	6.00	74.89	1.33	1.89	0.000 *	0.897#
0~100	345	12.67	34.20	1.45	6.71	52.97	1.19	1.11	0.000 *	0.433#

注：* K-S 值 <0.05 ，非正态分布；# 为自然对数转换后的结果，符合正态分布。

Note : * Data does not obey the normal distribution $K-S < 0.05$; # Data after natural logarithms transformation obeys normal distribution.

表 3 土壤有机碳含量变异函数理论模型及其相关参数

Table 3 Variogram theory model of soil organic carbon content and their corresponding parameters

土层 Soil layer (cm)	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value C_0	基台值 Partial sill C_0+C	块金效应 Nugget effect $C_0/(C_0+C)$ (%)	变程 Range ($^{\circ}$)	决定系数 Determination coefficient R^2	残差 Residual RSS
0~10	指数 Exponential	0.164	0.525	31.24	13.401	0.801	0.012
10~20	球状 Spherical	0.207	0.611	33.88	5.840	0.843	0.024
20~30	指数 Exponential	0.220	0.773	28.46	13.629	0.840	0.021
30~50	指数 Exponential	0.256	0.519	49.33	7.959	0.688	0.021
50~100	指数 Exponential	0.067	0.400	16.75	0.351	0.529	0.023
0~100	指数 Exponential	0.175	0.550	31.82	11.379	0.828	0.013

土壤异质性是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果，土壤空间格局则由不同尺度的自然作用和过程控制，采样尺度对变量空间异质性有较大影响。且空间异质性一般随研究尺度的增大而增加。地统计学方法进行变量的空间分析在较大区域进行比较合适，而面积过小时，由于空间变异趋势微弱，随机变异所占比例相对增加，可能不利于进行空间相关性分析(路鹏等，2005)。本研究对象为广西全区的森林土壤，面积较大，采样的尺度也较大(10 km \times 10 km)。研究表明广西森林各土层土壤有机碳块金值较小，介于0.067~0.256，表明当前的采样尺度范围内由采样误差和

随机因素等引起的变异较小，采样密度能够充分揭示研究区土壤有机碳的空间结构(李双异等，2006)；广西森林各土层的土壤有机碳半变异函数的块金效应为16.75%~49.33%，表现为强烈的空间自相关性和中等强度的空间自相关性，说明结构性因素对研究区土壤有机碳空间变异起主导作用，而随机性因素对其影响相对较小(邬建国，2002)；变程为0.351 $^{\circ}$ ~13.629 $^{\circ}$ ，与经典统计分析的变异系数变化规律相似，土壤有机碳含量最低的50~100 cm土层的块金效应(16.75%)和变程(0.351 $^{\circ}$)最小，空间相关性最强，表明土层越深其空间变异受结构性因素特别是土壤的影响越大，

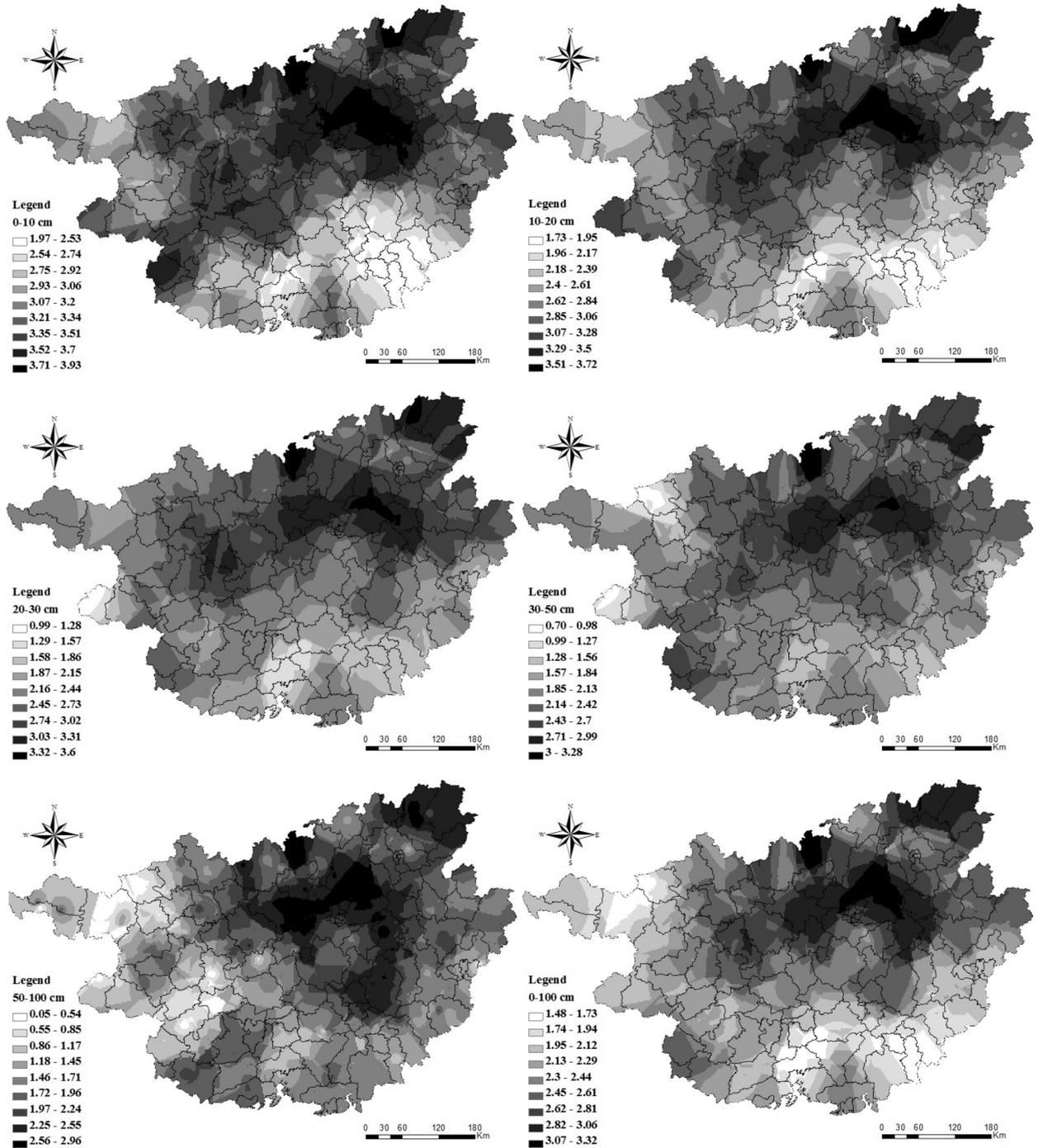


图 2 广西森林土壤有机碳含量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil organic carbon contents in Guangxi forests

人为干扰和随机性因素的影响越小。广西森林虽然由不同的森林类型构成,但在亚热带和中热带季风气候的长期共同作用下,经过历史沉淀,广西森林土壤逐步发育成较成熟的 12 个土类,其中北

部地区为红壤→山地红壤→山地黄壤→山地黄棕壤→山地矮林草甸土;南部地区为赤红壤(或砖红壤)→山地赤红壤→山地黄壤。滨海盐土分布在广西沿海一带,平行于海岸线呈带状分布;石灰土主要

表 4 不同森林类型不同土层土壤有机碳含量差异 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Variability of soil organic carbon affected by different vegetation community types and soil layers

土层 Soil layer (cm)	八角 <i>Octagon</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	松树 <i>Pinus</i>	栎类 <i>Quercus</i>	桉树 <i>Eucalyptus</i>	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	石山林 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	硬阔 <i>Castanopsis</i>	竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i>	软阔 <i>Liquidambar</i>
0~10	23.92Ade	35.29Ab	21.82Acde	22.39Ae	20.19Ae	19.82Ae	39.14Aa	49.90Aa	30.87Abcd	32.25Abc
10~20	14.07Bc	28.79Bb	11.93Bc	13.78Bc	12.98Bc	11.85Bc	28.48Ba	37.27Ba	21.96Bb	24.67Bb
20~30	11.23BCd	20.27Cbc	8.90Cd	10.85BCd	10.01Cd	9.49BCd	21.11Cab	29.85BCa	16.94BCc	18.24Cc
30~50	8.70Ccd	13.03DEb	8.54DEcd	7.52Cd	8.43CDed	6.94CDd	16.15Da	22.66CDa	13.83Cdb	12.50DEbc
50~100	6.16Ccd	10.61Ebc	7.07Ecd	7.75Ced	6.98Ded	4.38Dd	13.64Dab	17.26Da	9.28Dbcd	9.23Ebcd
0~100	9.74BCde	16.33Db	6.03CDde	7.25Ce	9.61CDde	7.69Ce	16.11Dbc	25.49CDa	13.61CDcd	14.98CDe

注: 同列不同大写字母表示同一树种不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 同行不同小写字母表示同一土层不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different capital letters in the same column indicate the significant differences of soil organic carbon content in different soil layers of the same tree species ($P < 0.05$), while different little letters in the same row indicate the significant differences of soil organic carbon content at the same soil layer between the tree species ($P < 0.05$).

表 5 不同森林类型不同土层土壤有机碳含量的变异系数 (%)

Table 5 Variation coefficient of soil organic carbon contents in different forest types and soil layers

土层 Soil (cm)	八角 <i>Octagon</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	松树 <i>Pinus</i>	栎类 <i>Quercus</i>	桉树 <i>Eucalyptus</i>	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	石山林 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	硬阔 <i>Castanopsis</i>	竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i>	软阔 <i>Liquidambar</i>
0~10	51.74	34.46	45.80	42.28	34.75	36.87	43.39	33.71	29.66	27.06
10~20	52.00	36.03	62.75	49.44	40.14	49.73	53.98	34.21	35.23	22.43
20~30	54.32	47.86	65.91	47.01	43.44	43.63	54.93	44.81	42.23	35.93
30~50	58.17	44.19	72.95	32.30	49.94	48.05	49.67	43.01	50.33	26.81
50~100	54.80	35.63	82.46	8.84	54.76	56.04	50.40	77.65	53.16	27.47
0~100	46.51	32.15	58.30	47.55	45.84	39.16	52.16	37.72	39.18	22.56

分布于桂西、桂东北、桂中的岩溶地区。全区以红壤、黄壤、赤红壤和石灰土的面积较大。伴随森林土壤的演变和日趋成熟,土壤有机碳也随之发生演变。不过,在研究区采取大尺度采样,虽然更适于拟合趋势值(巫振富等, 2013),但不能在小尺度上揭示其空间变异细节,有待于进一步开展不同森林类型、不同土壤类型、不同立地条件等小尺度的研究,分析不同尺度上空间信息的相似性和相异性,以提高对研究区土壤有机碳分布规律预测的精度。

土壤是形态和演化过程都十分复杂的自然综

合体,受成土母质、地形、气候、植被等成土因素及人为干扰活动的影响,具有复杂性和空间变异性(王政权, 1999; Goovaerts, 2001; 刘付程等, 2004; 李双异等, 2006)。Kriging方法是地统计学估计值方法的总称,它是建立在半变异函数理论模型及结构分析基础上,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估值的一种方法(李双异等, 2006)。本研究采用的是普通克立格法,插值结果表明,广西森林各土层土壤有机碳含量的分布呈现桂北高而桂南低的特点,其中以东北部最高,这与陈曦(2014)利用广西土壤普查数据结合土壤图

和相关地形 DEM 图估算的结果一致。这可能因为桂北分布有有机碳含量较高的山地土壤和石灰土,而桂南以有机碳含量较低的砖红壤和赤红壤为主,高温多雨导致土壤的呼吸强度高和养分流失严重,大量分布的桉树林也消耗了众多的土壤养分。随着土壤深度的增加,土壤有机碳受地表活动特别是人为干扰的影响减弱,植物根系分布和有机质来源减少,土壤有机碳含量降低,主要受结构性因素特别是土壤母质的影响,土壤有机碳含量变异系数增大,块金效应和变程减小,空间异质性增强,土壤有机碳分布出现了一些局部特征,其中 50~100 cm 土层土壤有机碳分布的斑块破碎率明显增加。

人类活动主要是通过改变土壤形成和发育的生态环境,从而影响着土壤和植被形成发育的方向,土地利用变化是人类活动对生态环境最综合的表现,森林生态系统土壤主要受不同的森林类型和物种组成影响,不同的森林类型的生物量和凋落物返还量不同,根系分布及分泌物的数量和质量不同,土壤有机碳含量差异较大。本研究结果表明,广西 10 类森林类型森林土壤有机碳含量以硬阔林土壤含量最高,杉木林和石山林次之,八角、桉树、油茶和栎类较低,0~100 cm 土层的松树土壤的有机碳含量最低,仅为 $6.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,那是由于松树生长迅速,消耗土壤肥力过快,导致土壤有机质含量较低。总体而言,人工林土壤有机碳含量要低于天然林,这与王大鹏等(2014)的研究结果一致。此外,本研究发现不同类型的人工林土壤有机碳含量也有差异,具体表现为杉木>竹林>桉树>油茶>松树。总体变化趋势与马姜明等(2013)在桂北地区的调查研究结果稍微有些不同,其发现土壤有机碳含量表现为毛竹林>杉木林>桉树林>马尾松林。但两者结果一致表明杉木林和竹林土壤有机碳含量要高于桉树林和松林。因此,加强硬阔、石山林等自然林封育和杉木林、竹林等人工林保育是提高广西森林固碳潜力的重要措施。

参考文献:

CHEN X, 2014. Estimation of soil organic carbon reserves in

- Guangxi and comparison study with some provinces in China [J]. *Sci Geogr Sin*, 34(10): 1247-1253. [陈曦, 2014. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究 [J]. *地理科学*, 34(10): 1247-1253.]
- DING ZL, FU BJ, HAN XG, et al, 2009. Brief introduction to a cluster of projects of "research in key issues of international negotiation with regard to coping with climate change" by CAS [J]. *Bull Chin Acad Sci*, 24(1): 8-17. [丁仲礼, 傅伯杰, 韩兴国, 等, 2009. 中国科学院"应对气候变化国际谈判的关键科学问题"项目简介 [J]. *中国科学院院刊*, 24(1): 8-17.]
- DU H, ZENG FP, SONG TQ, et al, 2016. Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi, China [J]. *Chin J Plan Ecol*, 40(4): 282-291. [杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等, 2016. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素 [J]. *植物生态学报*, 40(4): 282-291.]
- GOOVAERTS P, 2001. Geostatistical modeling of uncertainty in soil science [J]. *Geoderma*, 103(1): 3-26.
- GUO XM, NIU DK, GUO X, et al, 2006. Study on spatial variability of soil nutrients for Moso bamboo forest in Fengxin [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 12(3): 420-425. [郭晓敏, 牛德奎, 郭熙, 等, 2006. 奉新毛竹林土壤养分空间变异性研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 12(3): 420-425.]
- GUO XD, FU BJ, MA KM, et al, 2000. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei Province: semivariogram and kriging analysis [J]. *Acta Geogr Sin*, 11(4): 557-563. [郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等, 2000. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征-变异函数与 Kriging 插值分析 [J]. *地理学报*, 11(4): 557-563.]
- HUANG Y, SUN WJ, ZHANG W, et al, 2010. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review [J]. *Sci China Life Sci*, 53(7): 766-775.
- JOHN R, DALLING JW, HARMS KE, et al, 2007. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 104(3): 864-869.
- LI BH, ZHANG J, YAO XL, et al, 2008. Seasonal dynamic sand spatial distribution patterns of herbs diversity in broad leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 19(3): 467-473. [李步杭, 张健, 姚晓琳, 等, 2008. 长白山阔叶红松林草本植物多样性季节动态及空间分布格局 [J]. *应用生态学报*, 19(3): 467-473.]
- LI SY, LIU HY, ZHANG XD, et al, 2006. Spatial variability of soil fertility quality indices in northeast China [J]. *Chin J Soil Sci*, 37(2): 220-225. [李双异, 刘慧屿, 张旭东, 等, 2006. 东北黑土地区主要土壤肥力质量指标的空间变异性 [J]. *土壤通报*, 37(2): 220-225.]
- LIU FC, SHI XZ, YU DS, et al, 2004. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin [J]. *Geogr Res*, 23(1): 163-170. [刘付程, 史学正, 于东升, 等, 2004. 太湖流域典型地区土壤全氮的

- 空间变异特征 [J]. 地理研究, 23(1): 163-170.]
- LIU L, ZENG FP, SONG TQ, et al, 2010. Spatial heterogeneity of soil nutrients in karst area's Mulun National Nature Reserve [J]. Chin J Appl Ecol, 21(7): 1667-1673. [刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等, 2010. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征 [J]. 应用生态学报, 21(7): 1667-1673.]
- LU P, PENG PQ, SONG BL, et al, 2005. Geostatistical and GIS analyses on soil total P in the typical area of Dongting Lake Plain [J]. Sci Agric Sin, 38(6): 1204-1212. [路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等, 2005. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析 [J]. 中国农业科学, 38(6): 1204-1212.]
- LU P, HUANG DY, SONG BL, et al, 2005. Spatial variability of soil nutrition in the typical landscape unit of red soil hilly in subtropical region [J]. Plant Nutr Fert Sci, 11(6): 717-723. [路鹏, 黄道友, 宋变兰, 等, 2005. 亚热带红壤丘陵地区典型景观单元土壤养分的空间变异 [J]. 植物营养与肥料学报, 11(6): 717-723.]
- LUO YJ, ZHANG XQ, WANG XK, et al, 2009. Forest biomass Estimation method and their prospects [J]. Sci Silv Sin, 45(8): 129-134. [罗云建, 张小全, 王效科, 等, 2009. 森林生物量的估算及其研究进展 [J]. 林业科学, 45(8): 129-134.]
- LUYSSAERT S, SCHULZE ED, BORNER A, et al, 2008. Old growth forests as global carbon sinks [J]. Nature, 455(7210): 213-215.
- MA FY, LI XR, ZHANG JG, et al, 2006. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area [J]. Chin J Appl Ecol, 17(5): 789-795. [马风云, 李新荣, 张景光, 等, 2006. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性 [J]. 应用生态学报, 17(5): 789-795.]
- MA JM, LIANG SC, YANG DL, et al, 2013. Characteristics of content and density of soil organic carbon in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* forest and the other three forest types in northern Guangxi [J]. J Ecol Environ, 22(8): 1282-1287. [马姜明, 梁士楚, 杨栋林, 等, 2013. 桂北地区桉树林及其他三种森林类型土壤有机碳含量及密度特征 [J]. 生态环境学报, 22(8): 1282-1287.]
- MCGRATH D, ZHANG CS, CARTON OT, 2004. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silver mines area, Ireland [J]. Environ Poll, 127(2): 239-248.
- PAN Y, BIRDSEY RA, FANG J, et al, 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 333(6045): 988-993.
- PENMAN J, GYTARSKY M, HIRAISHI T, et al, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry [J]. IPCC, 35(5): 103-105.
- SONG TQ, PENG WX, ZENG FP, et al, 2009. Spatial heterogeneity of soil moisture in dry season in Mulun National Nature Reserve in karst area [J]. Chin J Appl Ecol, 20(1): 99-104. [宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等, 2009. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性 [J]. 应用生态学报, 20(1): 99-104.]
- XIONG HF, WANG YH, 2005. Spatial heterogeneity of soil nutrients in wetland of Liangzi Lake [J]. Plant Nutr Fert Sci, 11(5): 584-589. [熊汉锋, 王运华, 2005. 梁子湖湿地土壤养分的空间异质性 [J]. 植物营养与肥料学报, 11(5): 584-589.]
- WANG DP, WANG WB, ZHENG L, et al, 2014. Compared of soil organic carbon of different plantations in China [J]. J Ecol Environ, 23(4): 698-704. [王大鹏, 王文斌, 郑亮, 等, 2014. 中国主要人工林土壤有机碳的比较 [J]. 生态环境学报, (4): 698-704.]
- WANG ZQ, 1999. Statistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press: 71-99. 王政权, 1999. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社: 71-99.]
- WOODWELL GM, WHITTAKER RH, REINERS WA, et al, 1978. The biota and the world carbon budget [J]. Science, 199(4325): 141-146.
- WU JG, 2002. Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy [M]. Beijing: Higher Education Press. [郭建国, 2002. 景观生态学: 模式、流程、规模和层次结构 [M]. 北京: 高等教育出版社.]
- WU ZF, ZHAO YF, QI L, et al, 2012. Effect of scale of model on prediction of soil organic matter in complex landscape region [J]. Acta Pedol Sin, 50(2): 296-305. [巫振富, 赵彦锋, 齐力, 等, 2012. 复杂景观区土壤有机质预测模型的尺度效应 [J]. 土壤学报, 50(2): 296-305.]
- ZHANG JG, CHEN HS, SU YR, et al, 2008. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of karst hilly region [J]. Acta Pedol Sin, 45(3): 544-549. [张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等, 2008. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异 [J]. 土壤学报, 45(3): 544-549.]
- ZHANG QZ, WANG CK, 2010. Carbon density and distribution of six Chinese temperate forests [J]. Sci China Life Sci, 53(7): 831-840.
- ZHANG ZX, XU MX, WU YB, et al, 2013. Spatial variability of soil organic carbon of croplands in the hilly Loess Plateau region of China: a case study in Zhuanglang County, Gansu Province [J]. Plant Nutr Fert Sci, 19(4): 955-963. [张志霞, 许明祥, 吴永斌, 等, 2013. 黄土丘陵区县域农田土壤有机碳空间变异性-以甘肃庄浪县为例 [J]. 植物营养与肥料学报, 19(4): 955-963.]
- ZHOU GY, LIU S, LI Z, et al, 2007. Old-growth forests can accumulate carbon in soils [J]. Science, 314(5804): 1417.