

DOI: 10.5846/stxb201404180761

郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 许涵, 陈德祥, 林明献, 周璋, 杨怀. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征. 生态学报, 2015, 35(23):

Guo X W, Luo T S, Li Y D, Xu H, Chen D X, Lin M X, Zhou Z, Yang H. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon density in a tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23):

海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征

郭晓伟, 骆土寿*, 李意德, 许涵, 陈德祥, 林明献, 周璋, 杨怀

中国林业科学研究院热带林业研究所, 尖峰岭森林生态系统研究站, 广州 510520

摘要: 森林土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分, 在碳循环中有着重要的作用。研究热带雨林土壤性质的空间异质性对于深入分析热带雨林植被分布格局与土壤的关系, 促进热带雨林的保护等具有重要指导意义。本研究在海南岛尖峰岭热带山地雨林 60 ha 大样地内采用野外布点采样、实验室测定和地统计学分析相结合的方法, 定量研究了土壤有机碳密度在局域范围内的空间异质性及分布特征。研究结果表明: (1) A(0—10 cm)、B(10—30 cm)、C(30—60 cm) 三层土壤有机碳平均密度分别为 2.699 kg/m²、2.782 kg/m²、2.434 kg/m², A、B 两层差异性不显著, 与 C 层差异性显著 ($P < 0.05$); (2) 不同层次土壤有机碳密度模型交叉验证结果表明: A 层拟合的半方差函数最适模型为指数模型, B、C 两层为球状模型; 三层土壤有机碳密度的变程分别为: 54.2 m、70.9 m、97.2 m; 块金值与基台值比值分别为: 0.512、0.708、0.882, 表明 A、B 两层属中等程度变异, C 层具有较大的块金值, 属于弱变异, 说明在小尺度范围具有更明显的空间异质性, 也说明不同层次土壤有机碳密度具有不同程度的空间自相关性; Person 相关性分析表明不同层次土壤有机碳密度之间具有不同的相关性: A 层与 B 层及 C 层之间的相关性要小于 B 层和 C 层之间的相关性, 说明热带雨林中土壤有机碳密度表层与下层受到不同生态过程的控制。(3) 普通克里格插值及绘制的空间分布轮廓图表明: 在本研究尺度上 A、B 两层不同深度的土壤有机碳密度的空间分布具有一定的一致性, 空间异质性明显, 呈斑块状分布; C 层空间异质性较弱, 具有一定的连续性, 呈条带状分布; (4) 地形引起的水热分配是影响不同层次土壤有机碳密度空间分布格局的一个重要因素。

关键词: 土壤有机碳; 空间变异; 地统计学; 热带山地雨林; 海南岛

Spatial distribution characteristics of soil organic carbon density in a tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China

GUO Xiaowei, LUO Tushou*, LI Yide, XU Han, CHEN Dexiang, LIN Mingxian, ZHOU Zhang, YANG Huai

Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Jianfengling Long-term Research Station for Tropical Forest Ecosystem, Guangzhou 510520, China

Abstract: Forest soil organic carbon (SOC) is the main component of the terrestrial carbon reservoir, and plays a crucial role in the Earth's carbon cycle. This study aimed to quantify the spatial heterogeneity and distribution patterns of SOC density. The study was conducted in a 60-ha forest plot in a tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China, using field investigation, laboratory analysis, and geostatistical methods. The results showed that the mean SOC density at different soil profile depths (A [0—10 cm], B [10—30 cm], and C [30—60 cm]) was 2.699 kg/m², 2.782 kg/m², and 2.434 kg/m², respectively. The differences for A versus C and, B versus C layers were statistically significant

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费课题“典型森林土壤碳储量分布格局及变化规律研究(201104008)”、“热带雨林生物多样性维持与自然恢复策略研究(201104057)”、“森林生态系统碳氮水耦合观测、模拟与应用技术(201104009)”

收稿日期: 2014-04-18; 网络出版日期: 2015-

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luots@itf.ac.cn

($P < 0.05$), but there was no significant difference between A and B layers ($P > 0.05$). Cross-validation results showed that the most fitted models for SOC density at different layers was exponential for A and spherical for B and C. The ranges of SOC density were 54.2 m, 70.9 m, and 97.2 m for A, B, and C, respectively, while the Nugget:Sill ratios were 0.512, 0.708, and 0.882, respectively. This result implies that SOC density is moderately variable for A and B, but weakly variable for C. Thus, SOC had more significant spatial variability at the small scale. Pearson correlation analysis showed that the correlation coefficients for A versus C and B versus C were less than that between B and C, indicating that different ecological processes may regulate SOC density across surface and subsurface soil layers. Ordinary Kriging interpolation showed that A and B soil layers had moderate spatial autocorrelation, whereas the C layer had weak spatial autocorrelation. Meanwhile, the contour maps produced scattered spatial distributions for the A and B layers, but a banded distribution for the C layer. Topography-induced water and heat distribution may represent an important factor affecting the spatial distribution patterns of SOC density in different soil layers.

Key Words: Soil organic carbon; Spatial heterogeneity; Geostatistics; Tropical mountain rainforest; Hainan island

空间异质性是生态学系统的核心因子^[1]。近年来,生态学研究中的异质性问题受到生态学家的广泛关注,生境的异质性,尤其是土壤要素的空间分布格局已成为异质性研究的一个重要领域,国内外学者已有大量的研究报道。土壤是非匀质的时空连续变体,其形成过程包括物理、化学和生物过程,其形态和演化过程是十分复杂的。由于不同地区在气候、物理、化学、生物、母岩、地形等方面的不同,形成了各种土壤类型,导致土壤性质存在明显的差异;即使在同一土壤类型,不同的时间和空间上土壤的某些性质也不同,即土壤在时间和空间上具有高度的空间异质性^[2]。

土壤有机碳具有高度的空间异质性,而研究尺度的大小对土壤有机碳密度空间分布的精准度有重要影响。全球^[3,4]、全国^[5-7]范围的大尺度研究虽有大范围的代表性,但由于其研究范围较大,过多人为的强调取样点的代表性作用,同时由于取样点密度的局限性,从而忽略了区域尺度范围上土壤有机碳的空间异质性特点,造成计算精准度大大降低;中等尺度范围内土壤有机碳的研究兼具计算的精准度及结果应用范围的适度性,因此应用性较强;地块范围内的小尺度范围研究计算结果精准度更高,但代表范围具有一定局限性。在我国中等区域范围的土壤有机碳研究方面,有针对一定区域^[8-10]、流域^[11,12]、一省^[13-15]或数省^[16]的研究;也有针对一县^[17,18]的研究。然而土壤有机碳密度(SOCD)空间异质性是随着研究尺度的变化而变化,上述研究多是基于以上三个尺度范围,介于小尺度与中等尺度之间连续的空间尺度范围土壤有机碳空间分布特征的研究却鲜见报道。

热带森林面积虽然仅占全球植被的 22%^[19],但其净初级生产力却占世界陆地生产力的 32%—43%^[20],其植被碳储量占全球植被活体碳库的 46%^[21],土壤碳储量占全球土壤碳库的 11%^[22],热带森林在全球碳循环中的重要作用已引起了研究人员的广泛关注。研究热带雨林土壤性质的空间异质性及其影响因素,对于深入分析热带雨林植被分布格局与土壤的关系,以及热带雨林的保护具有重要的科学和指导意义。海南岛尖峰岭位于世界热带的北缘,其热带山地雨林属于由热带雨林向亚热带雨林过渡的类型,这一过渡性质决定了其在研究世界热带和亚热带雨林生态系统中具有不可替代的地位^[23]。前人^[24-28]对海南尖峰岭的土壤性质已开展了大量的研究,但没有从地统计学的方法对土壤有机碳空间异质性进行定量和系统的研究。

鉴于以上认识,本文基于 60 ha 大样地,用地统计学的方法对海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间异质性特征进行统计分析,为进一步研究土壤属性空间异质性与生态学过程的关系奠定基础。

1 研究地区概况

研究样地设在海南岛尖峰岭国家自然保护区内热带山地雨林中,保存最为完整的原始林。样地地理坐标起点为 18° 43' 41.0'' N, 108° 53' 59.6'' E,规格为南北 600 m,东西 1000 m 的长方形,面积为 60 ha。平均海

拔 932 m,地形复杂。热带山地雨林物种复杂,生物多样性高,优势种群不明显,群落组成种类以热带成份占优势^[29]。林分生物现存量(包括凋落物现存量)达 645.2 t/hm²,生物量年平均净积累 6.242 t hm⁻² a⁻¹^[30]。本区气候类型属热带季风气候,水热资源丰富,区域年总辐射量为 5517.4 MJ·m⁻²,年平均气温 19.8℃,最低月平均气温 14.8℃,≥10℃的年平均积温 7204℃,平均相对湿度 88%,年平均降水量 2449 mm,干湿季明显。雨季台风干扰强烈,对海南岛有影响的台风(包括热带风暴),平均每年有 8 个,其中强台风每年平均 2.7 个,年平均登陆台风 2 个^[31]。80%—90%的雨量集中在 5—10 月的雨季,暴雨、大暴雨和特大暴雨量占年降水量的 68.0%,其中特大暴雨占年降水量范围在 26.8%—60.2%间,年均值 44.4%^[32]。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集及分析

在尖峰岭热带山地原始雨林 60 ha 大样地内,于 2013 年旱季的 3—4 月份进行野外土壤采样,参照 CTFS (Center for Tropical Forest Science) 的土壤采样方案,将整个样地划分为 1500 个 20 m × 20 m 的小样方,再具体划分为 10 m × 10 m 的小方格。在选定采样点上,分 3 个剖面层次采取土样,其中 0—10 cm (A 层) 为表土层土壤,10—30 cm (B 层) 为中层土壤,30—60 cm (C 层) 为下层土壤。其中, A 层采样方法为在样地 40 m × 40 m 交叉点周围 50 cm 范围内清除土壤表层枯落物和腐殖质,然后用荷兰 Eijkelkamp 公司产的螺旋式土钻取一个土壤样品,再以交叉点为基点,在基点东、西、南、北、东北、西北、东南、西南八个方向中随机选一个方向,在选定方向上采取距基点 2 m、5 m 和 15 m 位置的土壤样品,共计 1248 个土壤样品; B 层采样方法为在样地 40 m × 40 m 交叉点周围 50 cm 范围内采取一个土壤样品,然后以交叉点为基点,以 A 层选取方向中采取距基点 2 m、5 m 和 15 m 位置中随机选取两个点采取土壤样品,共计 832 个; C 层采样方法为在样地 40 m × 40 m 交叉点采取一个土壤样品,然后以交叉点为基点,以 B 层已选取距基点 2 m、5 m 和 15 m 位置中两个点中再随机选取一个点采取土壤样品,共计 416 个,三层共取土样 2496 份。在挖取每份土样的同时,用 Eijkelkamp 公司产的圆状取土器钻取土壤环刀。土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾氧化容量法测定,土壤容重采用环刀法测定。图 1 为研究区热带山地雨林原始林动态监测样地的地形(I) 及不同层次土壤采样点 A(II)、B(III)、C(IV)。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 描述性统计分析

基于本研究样品数量较多,采样点较密,为了保障数据的有效性,需要排除个别极端大值和极端小值引起较大的误差而影响统计数据的有效性和稳健性。首先,对不同层次土壤有机碳密度数据值进行质量控制^[33],采用四分位数法计算数值分布,确定其极端上限值和极端下限值,其中极端上限值计算方法为 $(P_{75} - P_{25}) \times 1.5 + P_{75}$,极端下限值为 $P_{25} - (P_{75} - P_{25}) \times 1.5$,其中 P_{75} 、 P_{25} 分别为土壤碳含量的第 75 和第 25 个百分点。然后计算其最大值、最小值、中值、均值、标准差、变异系数。其次,利用半方差函数进行空间自相关分析的变量必须满足正态分布,数据的非正态分布会使方差函数产生比例效应,降低估计精度,使某些潜在的特征表现不明显,因此再对数据进行正态分布检验,若不符合正态分布,则对数据进行正态分布转换。

2.2.2 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度是指单位面积内一定深度的土壤有机碳储量。某一土层的有机碳密度 SOC_i (kg/m²) 计算公式如下^[3]:

$$SOC_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤有机碳含量(%); D_i 为容重(g/cm³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

2.2.3 地统计学分析

地统计学分析采用半方差函数 $\gamma(h)$ 来描述土壤属性的空间异质性特征,通过半方差函数计算得到半方差函数值随样本的滞后距增加而变化的散点图,对散点图采用球状模型、指数模型、高斯模型等理论模型进行

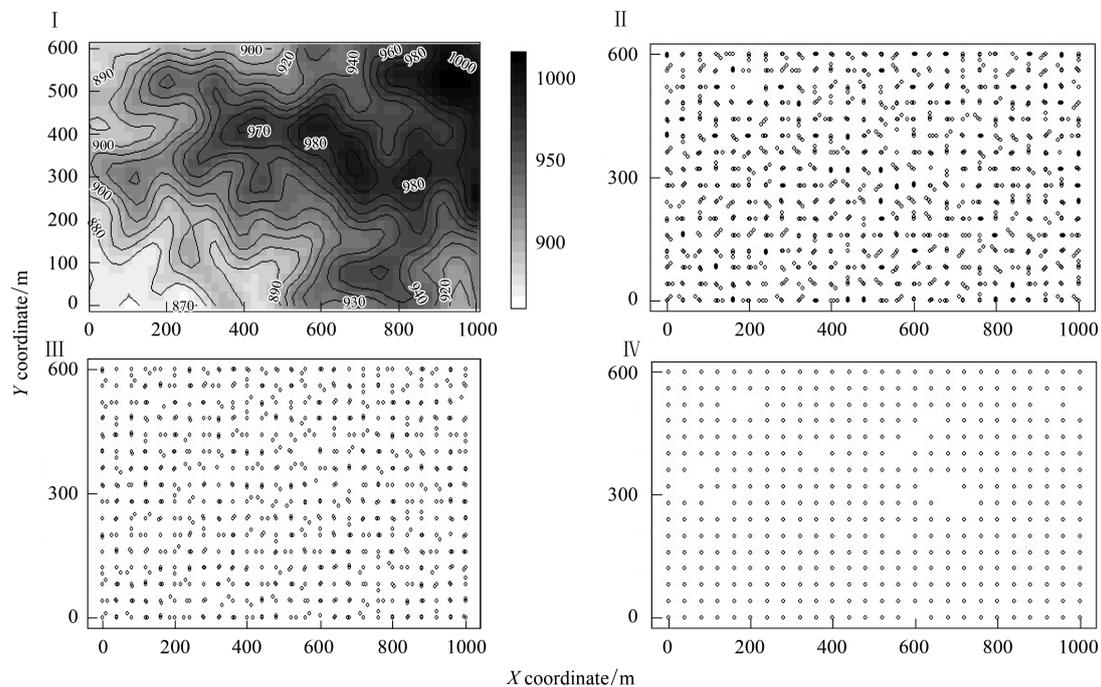


图1 海南尖峰岭 60 ha 热带山地雨林原始林动态监测样地的地形(I)及不同层次土壤采样点 A(II)、B(III)、C(IV)

Fig. 1 Topographic map(I), the sampling points of different soil layers A(II)、B(III)、C(IV) of the 60ha Hainan jianfengling tropical mountain rainforest dynamic plot

拟合。当土壤属性满足二阶平稳假设和本征假设时,且样本空间足够大,其半方差理论变异函数 $\gamma(h)$ 的计算式^[2]为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中, h 为两个采样点的空间距离, $N(h)$ 为空间上具有相同间隔距离 h 的点对数目, $Z(X_i)$ 和 $Z(X_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(X)$ 在空间位置 X_i 和 $X_i + h$ 处的实测值 [$i = 1, 2, \dots, N(h) \setminus$]。SOCD 空间分布格局采用克里格内插法进行空间插值。

变异函数最优模型的选取采用交叉验证法,用均方根误差 RMSE(Root mean square error)和决定系数判断最适合的理论模型。上述土壤随机采样点的选取、数据的描述性统计计算、地统计学分析均在 R 3.0.3 软件 (<http://www.r-project.org/>) 中完成。

3 结果与分析

3.1 不同土层土壤有机碳密度描述性统计分析

基于通过数据质量控制和有效性分析,分别对三层土壤的 1207、806、399 组有效数据进行统计计算,得到尖峰岭热带山地雨林 60 ha 大样地不同层次土壤有机碳密度的描述性统计结果(表 1)。本研究样地不同层次土壤有机碳密度均值排序为 B(2.782) > A(2.699) > C(2.489),其中 C 层变化范围最大,最大值与最小值之差为 4.321;B 层其次,为 3.915;A 层变化范围与 B 层相当,为 3.817;变异系数排序为:C(0.338) > B(0.274) > A(0.257),均属中等强度变异。同时对土壤有机碳不同层次均值进行方差分析,结果表明:A、B 两层土壤有机碳密度无显著性差异,与 C 层比较差异显著($P < 0.05$)。

3.2 不同层次土壤有机碳密度空间异质性

土壤并非是一个匀质体,而是一个时空连续的变体,具有高度的空间异质性。地统计学不仅可以有效揭示土壤属性在空间上的分布变异特征,而且能够将其空间分布格局与相应的生态学过程结合起来,从而有

效地解释空间格局对生态过程与功能的影响。半方差函数 $\gamma(h)$ 反映了不同距离间土壤属性的方差变化,可用于揭示区域化变量在整个研究尺度上的空间变异格局。

表 1 不同层次土壤有机碳密度的描述性统计特征 (kg/m^2)

Table 1 Descriptive statistics characteristics for soil organic carbon density of different layers

土壤/cm Soil layer	样本数 Number of samples	标准差 Standard derivation	最大值 Maximum	最小值 Minimum	中值 Median	均值 Mean	变异系数 Variance coefficient
A(0—10)	1207	0.694	4.629	0.812	2.651	2.699	0.257
B(10—30)	808	0.761	4.944	1.029	2.723	2.782	0.274
C(30—60)	399	0.84	4.815	0.494	2.434	2.489	0.338

基于地统计学分析^[2, 34]表明:本样地不同层次 SOCD 空间变异特征模型分别采用指数模型、球状模型、球状模型描述时模型拟合程度最高(图 2),决定系数分别达到 A(0.950)、B(0.938)、C(0.897)(表 2)。半变异函数 $\gamma(h)$ 通常包括块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、变程(a)等 3 个重要参数,根据这些参数结果评价土壤空间差异性特征。块金值 C_0 表示随机性因素引起的空间变异, C_0 越大说明较小尺度上的某些过程不能忽视;基台值(C_0+C)表示结构性因素和随机性因素引起的系统总变异。块金值与基台值比值反映了随机部分引起的变异占总变异的比, C_0/C_0+C 比值 $<25\%$ 时,空间相关性强;在 $25\%—75\%$ 之间时,具有中等程度的空间相关性; $>75\%$ 时,空间相关性较弱。

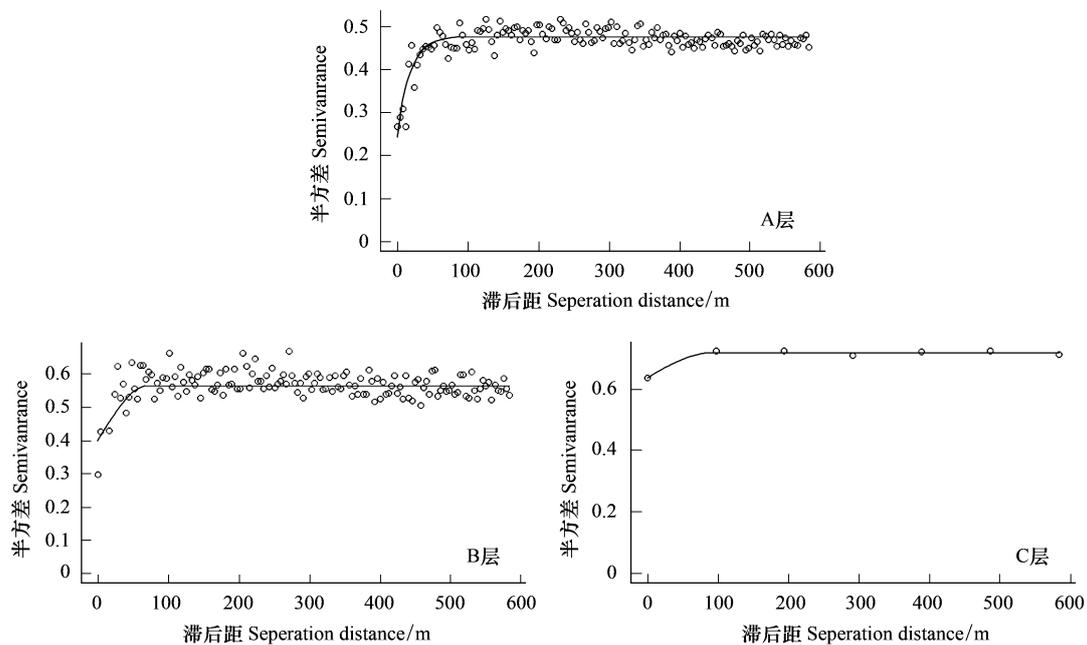


图 2 不同层次土壤有机碳密度半方差函数理论模型的拟合

Fig. 2 Semivariograms of different layers of soil organic carbon density

表 2 不同层次土壤有机碳密度半变异函数模型及参数

Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for different layers of soil organic carbon density

土层 (cm) Soil layer	最适模型 Model type	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	块金值/基台值 (C_0/C_0+C)	变程 Range(a)	R^2	RMSE
A(0—10)	指数模型	0.244	0.477	0.512	54.2	0.95	0.622
B(10—30)	球状模型	0.399	0.564	0.708	70.9	0.938	0.719
C(30—60)	球状模型	0.634	0.722	0.882	97.2	0.897	0.840

由表 2 可知, A(51.2%)、B(70.8%) 两层具有中等程度的空间相关性, 但 B 层结构比大于 A 层; C 层(88.2%) 空间结构比较大, 具有较弱的空间相关性。变程 a 是指在一定研究尺度内, 半变异函数值达到基台值时所对应的距离, 它表明土壤属性的空间自相关范围。在变程范围内, 样点间的距离越小, 其空间相关性越大; 当取样距离大于这个距离时, 土壤属性的空间分布则是随机的。表 2 表明 A、B 和 C 层分别在 54.2 m、70.9 m 和 97.2 m 范围内具有空间相关性。

3.3 不同层次土壤有机碳密度的空间分布格局

基于 Kriging 插值法, 通过对测得的土壤有机碳密度数据进行插值计算, 可绘制不同层次土壤有机碳密度的空间分布图(图 3), 能够更加直观地显示不同层次土壤有机碳密度空间分布格局的差异。本研究样地 A、B 两层土壤有机碳密度值均呈现一定的斑块状分布, 高值多出现在样地山脊线的样方内, 低值多出现在斜坡或沟谷样方, 说明地形是影响土壤有机碳密度空间分布的一个重要因素; C 层土壤有机碳密度的空间分布呈较连续的条带状分布, 具有相对较弱的空间相关性。对三层土壤有机碳密度 ρ 相关性检验 ($P < 0.05$) 表明, $B \& C(0.61) > A \& B(0.54) > A \& C(0.49)$ 。

4 讨论

空间上的结构性和等级特征是生态学系统的一个重要属性, 没有空间上的结构性就没有生态学系统的功能^[35]。无论从区域尺度还是中小尺度, 都普遍存在土壤性质的空间变异^[2, 34, 36], 地统计学方法是定量研究上述问题的一个有力工具, 土壤有机碳密度的空间分布包含两方面的内容: 一是指其垂直方向上随土壤深度的变化; 另一是指其水平方向上随不同地理位置的变化, 海南尖峰岭热带山地雨林 60 ha 大样地不同层次土壤有机碳密度都存在一定程度的空间异质性。

通过以上两方面研究, 在本研究尺度下得出以下几点结论:

(1) A(0—10 cm)、B(10—30 cm) 和 C(30—60 cm) 三层土壤有机碳平均密度分别为 2.699 kg/m^2 、 2.782 kg/m^2 、 2.434 kg/m^2 , A、B 两层差异性不显著, 与 C 层差异性显著 ($P < 0.05$)。本研究样地中土壤表层(A 层) 平均有机碳密度高于西双版纳表层(0—10 cm) 土壤有机碳密度 (2.11 kg/m^2), 低于鼎湖山 (2.88 kg/m^2)、哀牢山 (5.16 kg/m^2)、长白山 (4.78 kg/m^2) 土壤有机碳密度^[37]。可能是由以下几个因素综合作用引起: 1) 一般低纬度湿热的雨林年枯枝落叶量较大, 高纬度山地森林的较小, 温带和寒温带森林的居中, 但高温多湿的气候使土壤微生物活动加剧, 土壤呼吸速率较高, 土壤中的有机物质分解相对较快^[38]。同时热带林植被茂密, 物种多样性丰富, 大量营养从土壤转移到植物体中, 形成了较大的植被碳库; 2) 海南经常受台风干扰, 台风带来的暴雨等降水形成的雨滴击溅作用使土壤结构和土壤团聚体遭到一定程度的破坏, 土壤团聚体的稳定性减弱, 使被结合在土壤团聚体内部的活性有机碳暴露出来被释放分解, 打破了原有的活性碳与稳定态碳之间的平衡, 使稳定态碳不断地被转化和分解^[39]。在不同的土壤深度层, 土壤的物理性质和生物因素影响不同, 一般随着土壤深度的增加, 土壤有机碳稳定性增强, 含量逐渐降低。本研究中土壤 0—10 cm (10cm) 平均有机碳密度 2.699 kg/m^2 , 10—30 cm (20cm) 为 2.782 kg/m^2 , 30—60 cm (30cm) 为 2.434 kg/m^2 , 符合随着土壤深度的增加, 土壤有机碳的含量逐渐减低的趋势。C 层位于土壤底层, 较之 A、B 两层受凋落物分解、植被根系和土壤动物活动影响较小, 且土壤母质比较稳定, 通透性差, 相对板结, 有机质分解速率低。且 Person 相关性分析表明不同层次 SOCD 之间具有不同的相关性: A 层与 B 层、A 层与 C 层之间的相关性要小于 B 层和 C 层之间的相关性, 说明热带雨林 SOCD 表层与下层受到不同生态过程的控制。

(2) 不同层次 SOCD 的水平分布均有明显的空间结构, 模型交叉验证结果表明: A 层拟合的半方差函数最适模型为指数模型, B、C 两层为球状模型。变程分别为: 54.2 m、70.9 m、97.2 m; 块金值与基台值比值分别为: 0.512、0.708、0.882。模型变程、空间结构比和普通克里格插值绘制的空间分布轮廓图均表明: A、B 两层 SOCD 具有中等程度的空间相关性, 呈一定的斑块状分布; C 层空间结构比较大, 空间分布较 A、B 层连续, 具有较弱的空间相关性, 呈条带状分布。说明随着土层深度的增加, 土壤有机碳密度空间变异性减弱, A、B 两

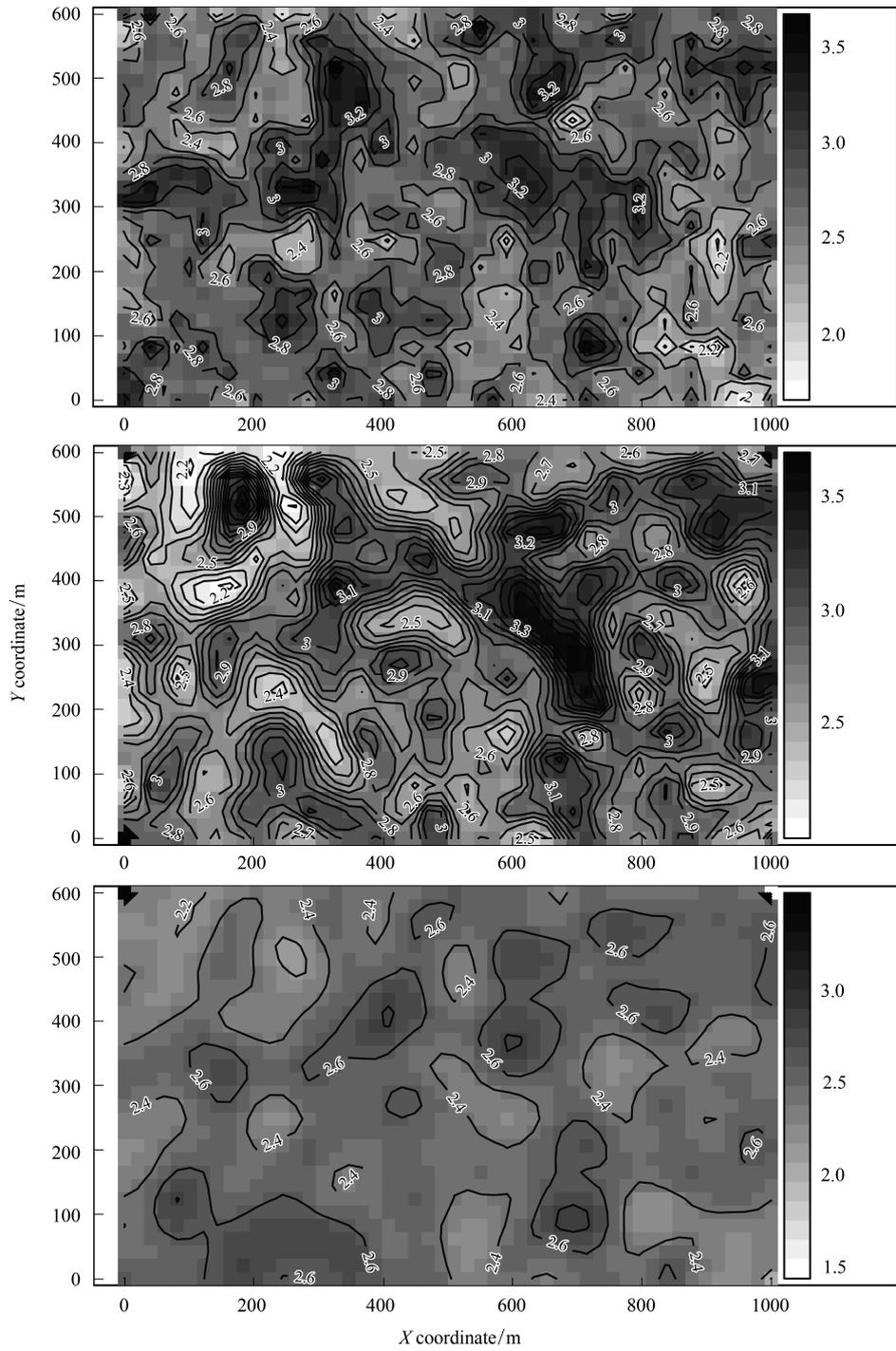


图 3 不同层次土壤有机碳密度空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution of different layers of soil organic carbon density

层 SOCD 主要受气候、土壤母质、地形等自然因素(结构性变异)的影响,C 层空间变异是结构性因素和随机性因素共同作用的结果,在小尺度范围具有更明显的空间异质性。

(3) 地形引起的水热分配是影响不同层次土壤有机碳密度空间分布格局的一个重要因素。山脊线样方土壤表层有机碳含量相对较高,山坡、山谷含量相对较低,表明地形是影响土壤有机碳密度空间分布的一个重要因素。这可能是由于台风侵袭造成样地倒木多,尤其是位于山顶较高样方内的植被,倒木的腐烂进一步增加了山顶土壤有机碳含量的增加。同时,坡顶光照强度大,植被光合作用相对较强,从而使更多的光合产物分

配到植物的根系,促进其根系生长和根的分泌物增加,因此促进了碳向地下部分的输入^[40, 41];而坡度、坡向等地形因素在一定程度上影响光合作用,继而影响到植物生产力和凋落物归还量及其分解,土壤有机碳的含量存在差异。

致谢:感谢复旦大学周旭辉教授对本文英文摘要的修改及润色。

参考文献 (References):

- [1] 邱扬, 张金屯, 郑凤英. 景观生态学的核心: 生态学系统的时空异质性. 生态学杂志, 2000, 19(2): 42-49.
- [2] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [3] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [4] Griggs D J, Noguer M. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, 2002, 57(8): 267-269.
- [5] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 D 辑, 2003, 33(1): 72-80.
- [6] 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.
- [7] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [8] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 项文化, 方晰. 鄂西南区域土壤有机碳储量、密度及其影响因子. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 57-62.
- [9] 林培松, 高全洲. 粤东北山区几种森林土壤有机碳储量及其垂直分配特征. 水土保持学报, 2009, 23(5): 243-247.
- [10] 陈晓琳, 李忠武, 王晓燕, 申卫平, 张雪, 郭旺, 张越男. 中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳空间分异规律. 地理研究, 2011, 30(10): 1825-1834.
- [11] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局. 地理研究, 2003, 22(3): 373-379.
- [12] 石培礼, 于贵瑞. 拉萨河下游河谷不同土地利用方式下土壤有机碳储量格局. 资源科学, 2003, 25(5): 96-102.
- [13] 陈仕栋, 方晰. 湖南省土壤有机碳库及其空间分布格局. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 146-151, 160-160.
- [14] 于建军, 杨锋, 吴克宁, 李玲, 吕巧灵. 河南省土壤有机碳储量及空间分布. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1058-1063.
- [15] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [16] 奚小环, 张建新, 廖启林, 陈德友, 白荣杰, 黄增芳. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题. 第四纪研究, 2008, 28(1): 58-67.
- [17] 李典友, 潘根兴, 陈良松, 李军. 安徽六安市表层土壤有机碳的空间分布及尺度变异分析. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 37-41.
- [18] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64-67.
- [19] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [20] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [21] Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 1982, 14(3): 161-187.
- [22] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22(6): 715-740.
- [23] 方精云, 李意德, 朱彪, 刘国华, 周光益. 海南岛尖峰岭山地雨林的群落结构、物种多样性以及在世界雨林中的地位. 生物多样性, 2004, 12(1): 29-43.
- [24] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 周光益, 陈步峰, 方精云. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18(4): 371-378.
- [25] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 周光益, 陈步峰, 杜志鹄, 林明献. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 416-423.
- [26] 骆土寿, 陈步峰, 李意德, 林明献, 周光益, 陈德祥, 邱坚锐. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2013-2017.
- [27] 魏彦昌, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 郑华, 姜立军. 尖峰岭自然保护区土壤性质空间异质性. 生态学杂志, 2007, 26(2): 197-203.

- [28] 时雷雷, 骆土寿, 许涵, 林明献, 杨怀, 陈德祥, 李意德. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.
- [29] 李意德, 陈步峰, 周光益. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [30] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 杜志鹄, 周光益, 陈步峰, 张振才, 陈焕强. 尖峰岭热带山地雨林生物量的初步研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(4): 293-300.
- [31] 许涵, 李意德, 骆土寿, 林明献, 陈德祥, 莫锦华, 罗文, 黄豪. 达维台风对海南尖峰岭热带山地雨林群落的影响. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1323-1334.
- [32] 蒋有绪, 卢俊培. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京: 科学出版社, 1991.
- [33] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响. 地理学报, 2003, 58(5): 727-734.
- [34] 冯益明, 唐守正, 李增元. 空间统计分析在林业中的应用. 林业科学, 2004, 40(3): 149-155.
- [35] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. 生态学报, 2002, 22(8): 1215-1223.
- [36] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [37] 王斌, 杨校生. 4 种典型地带性森林生态系统碳含量与碳密度比较. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2010, 36(4): 464-469, 473-473.
- [39] 赵安玖, 胡庭兴, 陈小红. 森林类型对土壤表层有机碳空间异质性的影响. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1748-1756.
- [40] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
- [41] Tao B, Ge Q S, Li K R, Shao X M. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem. Geographical Research, 2001, 20(5): 564-575.