

浙江省森林土壤有机碳密度空间变异特征及其影响因素*

黄中秋^{1, 2} 傅伟军^{1, 2} 周国模^{1, 2} 姜培坤^{1, 2†} 钱新标^{1, 2}

(1 浙江农林大学, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300)

(2 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

摘要 基于 Moran's I 指数和 GIS 地统计插值方法研究浙江省森林土壤有机碳密度(SOCD)的空间自相关性及其分布特征, 并采用线性回归方程分析影响因素对 SOCD 的作用。结果表明: 浙江省森林土壤 0~30 cm 层次 SOCD 为 71.2 t hm⁻², 较全国土壤平均碳密度低; 全局 Moran's I = 0.176, 显示显著空间自相关性; 浙江省森林 SOCD 呈现自西南向东北梯级递减趋势, 表现为三条平行的带状分布; 优势树种、坡位、龄组、海拔、灌木覆盖度、灌木平均高、平均年龄与 SOCD 呈极显著正相关关系, 坡向与 SOCD 呈显著正相关关系, 草本覆盖度与 SOCD 呈极显著负相关关系, 草本平均高影响不显著; 影响因素作用于 SOCD 14.9% 的变异。

关键词 森林土壤; 有机碳密度; 空间变异特征; 影响因素

中图分类号 S714.9 **文献标识码** A

森林生态系统碳汇是全球气候变化研究的重要领域^[1], 森林生态系统的土壤碳库约占全球土壤有机碳库的 73%^[2-4]。土壤有机碳作为森林土壤一种稳定而长效的碳源物质^[5], 其分布与动态变化是学者关注的热点问题。有机质作为土壤的一个特性值, 极有可能在土壤毛管作用力以及作物根系吸水力的驱使下逐渐聚集在 0~30 cm 作物根层^[6], 因此本文以浙江省森林土壤 0~30 cm 层次有机碳密度为例, 研究作物根层碳密度的空间变异特征。土壤有机碳还是一个高度异质性的区域化变量, 受气候、降水、林分类型、地形因子等多种潜在影响因素的控制, 具有尺度效应^[7-8]。

以往在中尺度范围内对森林土壤有机碳的研究基本可以分为两类: 一是基于传统的土壤普查数据, 较少有针对森林土壤专题的大量数据及相关资料信息; 二是在中尺度范围内探讨森林土壤有机碳密度(SOCD)的空间变异特征, 未综合考虑森林土壤有机碳密度的空间自相关性, 忽略了局部变异。

本研究基于浙江省森林资源监测中心在全省范围内 4 km × 6 km GIS 网格布点的森林土壤有机碳密度数据及相关资料信息, 采用 Moran's I 指数

及 GIS 软件中地统计学空间插值方法, 系统研究浙江省森林土壤 0~30 cm 层次有机碳密度的空间自相关性及其分布特征, 定量分析土壤有机碳密度的影响因素, 为省级区域尺度下森林土壤有机碳密度空间变异性的同类研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江省(27° 06' ~ 31° 11' N, 118° 01' ~ 123° 10' E)地处中国东南沿海长江三角洲南翼。属亚热带季风湿润气候, 热量较优、光照充足、降水丰沛, 年均温 15.3 ~ 18.5 °C, 年日照 1 100 ~ 2 200 h, 年均降水量 1 100 ~ 2 000 mm。全省地质构造复杂, 以分割破碎的低山和丘陵为主, 地势自西南向东北呈梯级下降趋势。西南部为平均海拔 800 m 的山区; 中部为丘陵、盆地相间, 海拔多在 100 ~ 500 m; 东北部为海拔 10 m 以下的水网平原。全省林地面积为 661.1 万 hm², 森林覆盖率为 60.97% (按浙江省以往同比计算口径), 且群落丰富, 植被种类繁多。地带性植被为常绿阔叶林、常绿阔叶和落叶混交林, 除

* 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030)和浙江省林业厅项目(20452000127)资助

† 通讯作者, E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

作者简介: 黄中秋(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事资源管理与气候变化研究。E-mail: xiheyinzhq@126.com

收稿日期: 2013-08-07; 收到修改稿日期: 2014-01-11

此之外还有落叶阔叶林、针叶林、竹林等多种植被类型。4—9 月为林木生长旺期。红壤和黄壤为遍布浙江省的地带性土壤,也是林业的主要土壤类型。

1.2 样点布设、样品采集与分析

数据来源于 2010 年浙江省森林土壤有机碳储量和质量调查及浙江省森林资源连续清查(CFI)记录。按照系统抽样 $4\text{ km} \times 6\text{ km}$ 网格布点法在全省林地的固定样地布设样点 839 个(如图 1)。样点位于固定样地的西南角(斜 45° 向外)6 m 处,要求土地利用类型与固定样地相同;若不同,则按顺时针方向重新确定样点。每个样点均为 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ 的正方形区域。

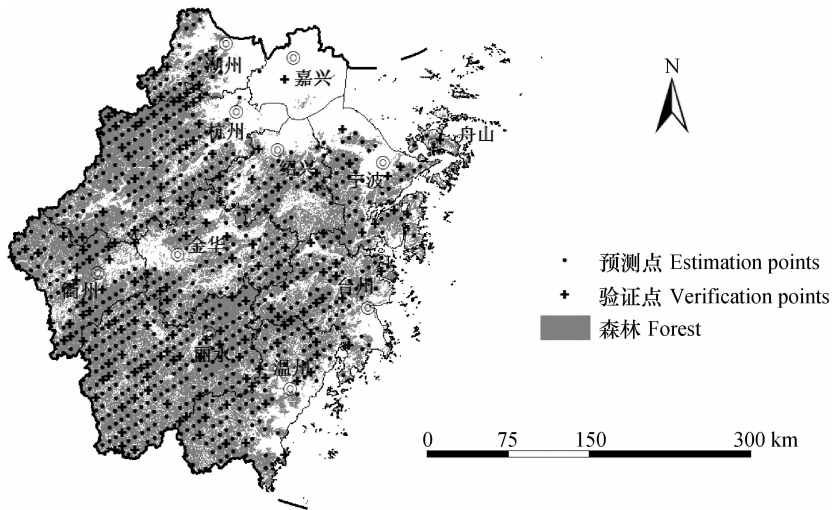


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of sampling sites

1.3 土壤有机碳密度的计算方法

土壤剖面内某一土层 i 的土壤有机碳密度(t hm^{-2})的计算公式如下:

$$\text{SOC}_{D_D} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \delta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i}{10} \quad (1)$$

式中, SOC_{D_D} 为厚度为 D 的土层的土壤有机碳密度(t hm^{-2}); n 为土层数; δ_i 为第 i 层的砾石含量(直径大于 2 mm 的砾石体积百分比); ρ_i 为第 i 层的土壤容重(g cm^{-3}); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(g kg^{-1}),由土壤有机质含量乘以 0.58 (Bemmelen 转换系数)得到; T_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

1.4 数据处理

为保证分析结果的可靠性,数据在进行空间分析之前,需要对其进行预处理,剔除异常值的影响,并进行正态分布检验^[10]。本研究采用 Box-Cox 方法进行数据转换,以及单样本正态分布检验(K-S 检

在每个样点设立典型土壤剖面,沿坡面方向垂直向下挖取,剖面挖掘深 100 cm,宽 60 ~ 80 cm,土层厚度不足 100 cm 时,挖至石质接触面或准石质接触面。用小锄头或小刀修整,进行土壤剖面观察记载,每个剖面按 0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm、30 ~ 60 cm、60 ~ 100 cm 分层取样,并用环刀法测其容重。其中,土壤 0 ~ 30 cm 层次是本文研究的对象。全部样品在 2010 年 6 月 1 日至 11 月 30 日间采集,样品在野外采集后,运送至室内分析室,将各层鲜土若干,风干、磨碎、过筛(2 mm 和 0.25 mm 筛)后用于土壤有机碳的测定。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—外加热法测定^[9]。

验)。

空间自相关性是指在空间上,距离越近的事物或现象越有关系^[11-12]。空间自相关分析的基本测度是 Moran's I 指数,通常使用全局和局部两种指标来度量。Moran's I 的取值经检验具有显著性,且小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关,大于 0 表示正相关^[13]。采用距离带权重计算全局 Moran's I,并通过 LISA(Local Indicators of Spatial Association)局部空间自相关类型图来体现局部 Moran's I 的自相关水平。

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 对原始数据进行整理、计算以及描述性统计分析;采用 Geoda 0.9.5-i 识别高低值空间异常值和计算自相关系数;利用 Vesper 1.6 建立变异函数模型;利用 ArcGIS 9.2 对数据进行空间插值和图件制作。

1.5 空间预测精度评价方法

采用交叉检验^[14]和验证数据集检验两种方法

对土壤有机碳密度空间预测精度进行检验。本文将 $n = 839$ 个采样点通过地统计模块 Create Subsets 分成两部分,80% 的采样点为训练集 ($n = 671$) 和 20% 的采样点为测试集 ($n = 168$),80% 的采样点用来进行半方差模型建模,其余 20% 的采样点用来进行模型验证(图 1)。

2 结果与讨论

2.1 浙江省森林土壤有机碳密度空间变异特征

2.1.1 土壤有机碳密度统计特征 对浙江省森林土壤 839 个采样点的 SOCD 进行统计。结果表明,森林土壤 0~30 cm 层次不同采样点间的 SOCD 差别较大,最小值只占到最大值的 1.97%;变异系

数表明浙江省森林 SOCD 达到中等程度变异水平^[15];原始数据的峰度、偏度值较高,且未通过正态分布检验。

有研究表明,在 0~100 cm 的土壤有机碳储量中,0~30 cm 所占的比例平均为 49%^[16]。以此估算,浙江省森林 SOCD 均值低于方精云等(20.13 kg m⁻²)^[17]、周玉荣等(19.36 kg m⁻²)^[18] 估算的全国森林 SOCD 平均值,与美国大陆的 SOCD(10.8 kg m⁻²)较为接近,高于澳大利亚的森林 SOCD(8.3 kg m⁻²)^[3]。浙江省森林 SOCD 较全国 SOCD 低的原因可能是由于森林资源质量低,低效林面积大^[19],且地势较低的冲积平原地区森林多处于幼中龄阶段,碳蓄积量低^[20]。此外,频繁的人为干扰及低效的森林管理模式也可能导致浙江省森林 SOCD 均值偏低^[21]。

表 1 土壤有机碳密度统计特征
Table 1 Statistical characteristics of SOCD

土层 Soil layer (cm)	样本数 Number of samples	最小值 Min (t hm ⁻²)	最大值 Max (t hm ⁻²)	平均值 Mean (t hm ⁻²)	变异系数 CV	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	K-S p
0~30	839	6.56	332.4	71.2	0.546	7.142	1.923	0

2.1.2 土壤有机碳密度的空间自相关特征 浙江省森林 SOCD 的空间自相关系数,即全局 Moran's I = 0.176,在 0.01 水平上显著^[22],显示正的空间自相关性,表明在近邻的空间位置上 SOCD 的高低与周围样点有因果关系^[6]。

全局指标趋于体现浙江省森林 SOCD 的整体特征,而局部指标被用来探测局部区域的空间自相关性。图 2 为浙江省森林 SOCD 的局部 Moran's I 指

数空间自相关类型图显著区域,结果表明:高值集聚区是指 SOCD 高值集中分布的区域,主要分布在淳安、建德及遂昌、龙泉一带;低值集聚区是指 SOCD 低值集中分布的区域,主要分布在浙中丘陵、盆地及丽水-绍兴沿线,而湖州安吉、德清也有少量高值样点分布;高值空间异常值主要出现在低值集聚区的周边区域,与之对应的是低值空间异常值主要分布在高值集聚区的周边区域。

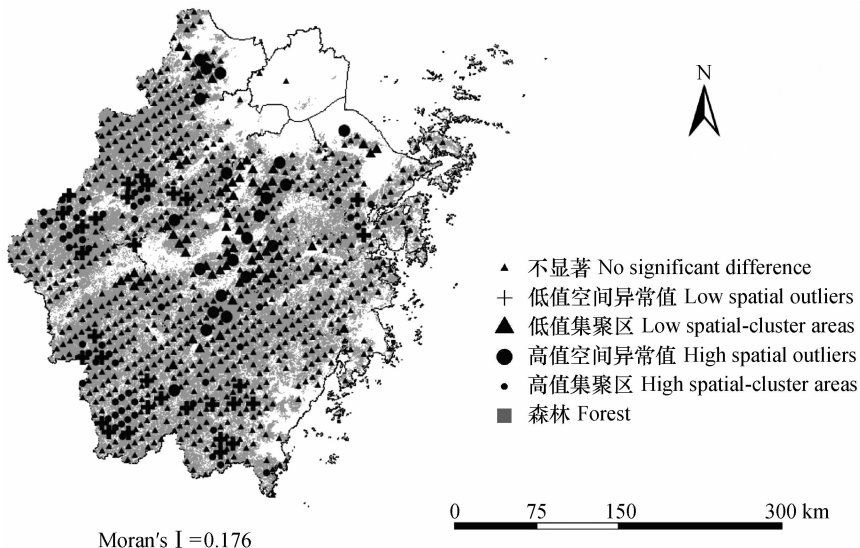


图 2 浙江省森林土壤有机碳密度 LISA 局部空间自相关类型图

Fig. 2 Local spatial autocorrelation map of the forest SOCD in Zhejiang Province

出现高值、低值空间异常值的原因可能与该地区的森林、植被覆盖类型和人为扰动有密切联系。土壤有机质主要来源于枯落物的分解^[23],森林的管理活动如炼山、松土除草和更新等人为扰动每年会从森林中带走大量的林下层植物和凋落物,减少了向土壤中输入的有机碳含量,改变了土壤有机碳的组分和稳定性,不利于有机碳积累^[24]。

2.1.3 土壤有机碳密度的空间分布特征 数据经 Box-Cox 转换后服从正态分布满足地统计学分析的要求。因为 AIC 值(Akaike's Information Criterion)最低^[25]、均方根误差(RMSE)越小^[26]半方差函数模型最优,故采用指数模型(AIC = -116.5, RMSE = 0.0249)对采样点 SOCD 进行半变异函数拟合。指数模型的变程为 24.78 km,表明随机变量在空间上的自相关尺度。当距离 < 变程时,距离越近相关性越强;距离 > 变程时,则空间相关性消失。指数模型的变程明显大于网格布点距离(4 km × 6 km),表明现有网格布点能较好地揭示森林 SOCD 空间分布规律。块金效应为 67.6%,说明由随机因素引起的空间变异程度较由结构因素引起的空间变异程度大。

根据指数模型的半变异函数参数来进行空间插值,得到浙江省森林 SOCD 的空间分布格局。图 3 表明:全省整体 SOCD 水平自西南向东北逐渐降低,呈现明显的自西南向东北方向三条平行的带状分布,三条带状分布分别为杭州西部临安-湖州-嘉兴地区、金华-衢州-绍兴地区和东南沿海区

域;浙江省从西南部山区至东北部冲积平原,除中部丘陵、绍兴西北部及湖州地区的 SOCD 以 32.0 ~ 49.0 t hm⁻² 的斑块为主外,大部分地区 SOCD 处在 > 49.0 t hm⁻² 的斑块;浙江省森林 SOCD 空间分布与林分资源蓄积量分布一致^[8];在杭州界区内,SOCD 差异也较明显,西北山岭地段最高,向东渐趋低缓,形成梯级递减的趋势。

浙江省森林 SOCD 的空间分布与海拔、地势变化一致。这是由于高海拔地区人为扰动较少,乔、灌、草层次结构较完整,森林、植被覆盖率高,天然林分生长较好,蓄积量大^[27]。随着海拔和坡度的降低,人类活动频繁,势必导致森林、植被覆盖率降低。中部地区主要以人工林为主,人工林树龄小,树种、层次结构单一,蓄积量小,所以 SOCD 较低^[20];杭州的桐庐、建德、淳安,丽水的遂昌、龙泉,以及宁波的奉化地区均为浙江省森林 SOCD 高值集聚的区域,相应地这些地区的杉木蓄积量、阔叶树蓄积量均居全省首位,此类凋落物多、根系庞大的树种,其归还量大,有利于土壤有机碳的积累。而湖州、嘉兴有机碳密度低值集聚的区域,其杉木蓄积量仅在 10 万 m³ 以下^[8]。杭州市区、金华-绍兴地区有机碳密度均值较小,是由于受其经济区位的影响,土地利用方式随之改变,森林转化为农田、草地等其他用地,覆被类型的变化直接影响土壤有机碳的含量和分布,造成有机碳密度积累较小^[28]。此外,森林退化亦会改变其立地条件、林下微气候和土壤质量,从而影响森林土壤的固碳能力。

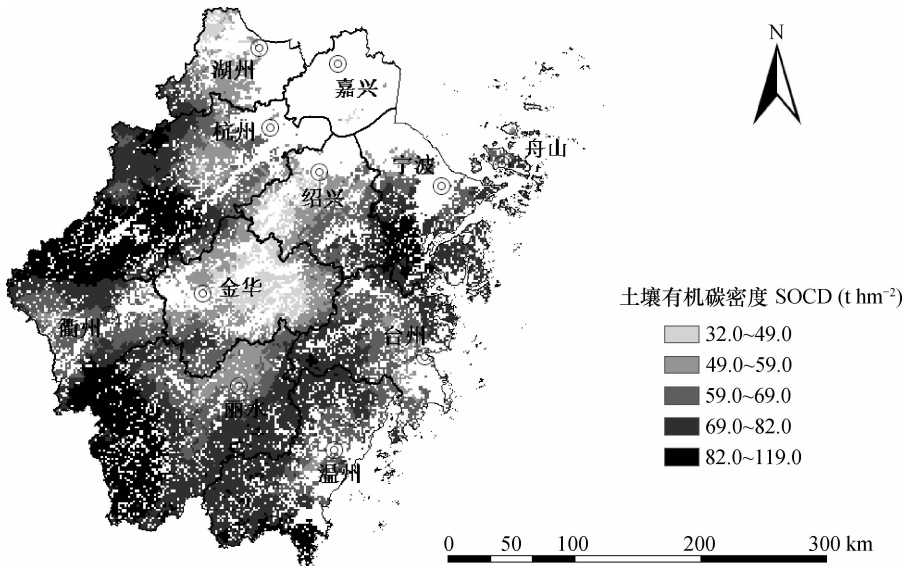


图 3 浙江省森林 SOCD 空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of SOCD in the forest soils of Zhejiang Province

2.1.4 空间预测精度评价结果 根据交叉检验和验证数据集检验两种方法对浙江省森林 SOCD 空间预测精度进行验证,结果表明:指数模型的标准化均方根误差 (RMSSE) 为 0.992,接近于 1,拟合情况较好;空间预测的平均误差 (ME) 为 0.0024,说明采用克里格空间插值方法较合理;均方根误差 (RMSE) 和平均标准误差 (ASE) 分别为 1.153、1.164,均较小,说明空间预测精度较高。实测值与模拟值的变异系数分别为 0.17、0.07,属于中、小程度变异。有机碳密度模拟值的变异系数较实测值小,这是因为克里格方法主要注重整体分布趋势,突出浙江省有机碳密度整体分布特征,对局部异常有一定的平滑效应^[29]。浙江省森林土壤有机碳密度 LISA 局部空间自相关类型图 (图 2) 正好可以弥补这一不足,通过局部 Moran's I 指标量化研究局部区域 SOCD 的空间分布特征。浙江省局部地区 SOCD 的模拟值出现突变情况,可能是由于样点落在实测值异常高的局部区域时,周围样点并不一定能落在同样高的有机碳密度区域^[30],导致上述局部地区少数样点的实测值与模拟值存在较大偏差。

2.2 影响土壤有机碳密度的主要因素

2.2.1 主要影响因素的确定 不同采样点的 SOCD 具有不同的空间变异性,这是由于影响土壤有机碳动态变化的主要因素不同。本文从定性变量 (优势树种、坡向、坡位、龄组) 和定量变量 (海拔、

灌木覆盖度、灌木平均高度、草本覆盖度、草本平均高度、平均年龄) 两个角度探讨影响因素对 SOCD 的作用。定性变量通过赋权重方法将其定量化^[31]。例如优势树种,令对有机碳密度影响最大的阔叶混交林权重为 9,对 SOCD 影响最小的经济类树种权重为 1^[32]。据此得到四种定性变量的权重分配,如表 2 所示。

将上述 10 种影响因素与 SOCD 进行回归分析,得到回归方程为:

$$y = 2.548x_1 + 0.034x_2 - 0.363x_3 + 0.193x_4 + 3.363x_5 - 0.034x_6 + 0.940x_7 + 0.033x_8 + 0.553x_9 + 0.955x_{10} + 31.14$$

式中, y :SOCD, x_1 :优势树种, x_2 :海拔, x_3 :龄组, x_4 :平均年龄, x_5 :草本平均高度, x_6 :草本覆盖度, x_7 :灌木平均高度, x_8 :灌木覆盖度, x_9 :坡位, x_{10} :坡向; $R^2 = 0.149$ 、 $p < 0.05$ 说明此回归方程有效,且上述影响因素作用于 SOCD14.9% 的变异。这是由于不同地质形态,造成气候、水文存在差异,又 10 种因素均为影响 SOCD 动态变化的自然因素,是水热条件对 SOCD 变异的间接反映^[32]。除这些因素外,人为扰动是影响 SOCD 变异的一个重要因素,到目前为止,它对 SOCD 的影响难以定量化。10 个因素中优势树种和海拔对 SOCD 影响程度最大,其 p 值均为 0。因此,本文以优势树种和海拔为例,重点研究其对 SOCD 的影响。

表 2 定性变量影响 SOCD 的权重分配

Table 2 Effect of qualitative variables on weight distribution of SOCD

权重 Weight	优势树种 Dominant tree species	SOCD (t hm ⁻²)	坡向 Slope aspect	SOCD (t hm ⁻²)	坡位 Slope position	SOCD (t hm ⁻²)	龄组 Age groups	SOCD (t hm ⁻²)
1	经济类树种	51.01 (102)	无坡向	47.77 (12)	下坡	64.66 (198)	未成林造林地	64.32 (255)
2	竹种	65.64 (122)	南	67.33 (111)	其他	68.41 (38)	过熟林	65.78 (2)
3	松	67.29 (123)	西南	67.86 (78)	上坡	70.66 (250)	中龄林	68.28 (206)
4	针叶混交林	70.08 (46)	东南	69.80 (108)	中坡	75.54 (353)	近熟林	73.44 (93)
5	硬阔叶类	70.36 (60)	北	70.50 (114)			幼龄林	78.09 (233)
6	杉	73.21 (112)	西北	72.43 (89)			成熟林	82.20 (50)
7	针阔混交林	75.59 (79)	东	73.87 (108)				
8	其他树种	76.56 (67)	西	74.47 (99)				
9	阔叶混交林	89.84 (128)	东北	75.18 (120)				

注:括号内为样本数 Note: Number of samples is shown in brackets

2.2.2 优势树种对 SOCD 的影响 优势树种是指蓄积量比重最大的树种,一般情况下是指其蓄积量占林分蓄积量的 65% 及以上的树种^[33]。浙江省树种繁多,根据《浙江林业自然资源—森林卷》,本文将树种归类为松、杉、硬阔叶类、针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林、竹种、经济类和其他树种共 9 个优势树种进行统计,分析其对森林 SOCD 的影响。由表 2 可知:浙江省森林各优势树种的 SOCD 平均值范围为 51.01 ~ 89.84 t hm⁻²; SOCD 平均值从高到低为阔叶混交林 > 其他树种 > 针阔混交林 > 杉 > 硬阔叶类 > 针叶混交林 > 松 > 竹种 > 经济类树种;阔叶混交林是浙江省森林土壤有机碳积累的主要贡献者,SOCD 均值最高,经济类树种的 SOCD 均值最低。出现这种现象的原因可能是林龄差异,阔叶混交林的成熟林和过熟林居多,而经济类树种的人工林比例较大,多为幼、中林龄^[8]。优势树种碳的集中分布对区域生态功能的发挥起到主导作用,这是由于不同树种的冠层光合固定能力不同^[34],引起凋落物的种类、产量和质量也不同,从而对森林土壤碳汇、源功能产生不同的影响。

2.2.3 海拔对 SOCD 的影响 海拔的不同导致温度、湿度、光照等水热条件的差异,引起森林 SOCD 的空间分布随海拔呈现一定的规律性。浙江省地势呈自西南向东北倾斜趋势。西南部为平均海拔 800 m 以上的山区;中部为丘陵、盆地相间,海拔多在 100 ~ 500 m;东北部为海拔 10 m 以下的太湖、杭州湾水网平原^[19]。据此本文将海拔分为 6 组,分别为 0 ~ 100 m、100 ~ 300 m、300 ~ 500 m、500 ~ 800 m、800 ~ 1000 m、1000 m 以上。由表 3 可得,浙江省林地的固定样地集中分布在 100 ~ 800 m 的丘陵、盆地,水网平原布设的样点最少;整体来看,SOCD 均值呈现随海拔升高而增加的趋势;SOCD 均值介于 51.64 ~ 108.45 t hm⁻²,组 1 的 SOCD 均值最低,峰值出现在组 6;组 1 ~ 组 2 和组 5 ~ 组 6 的 SOCD 变异幅度较大;组 2 和组 3、组 3 和组 4、组 4 和组 5 相邻组之间无显著性差异。随着海拔的升高,浙江省森林 SOCD 均值也随之增大,且海拔与 SOCD 呈现极显著正相关关系。

进入森林土壤中的有机物质主要是地表的凋落物,因此森林 SOCD 受到地表凋落物的分解、转化与呼吸释放过程的综合影响^[21]。不同海拔梯度生长不同的植被类型,导致输入土壤的枯落物数量和种类存在一定差异。海拔对 SOCD 的影响主要体现在温度和降水上,上述两种因素是影响土壤微生物

活性的主要因素,直接影响着有机质分解和有机碳释放的速率。SOCD 随海拔的上升呈递增趋势,主要是因为海拔上升导致温度下降,使土壤有机碳释放速率显著降低^[22]。

表 3 不同海拔梯度的 SOCD
Table 3 SOCD relative to elevation gradient

组号 Group Number	样本数 Number of samples	海拔 Altitude (m)	SOCD (t hm ⁻²)
1	83	0 ~ 100	51.64 e
2	252	100 ~ 300	63.47 d
3	211	300 ~ 500	71.34 cd
4	188	500 ~ 800	76.63 bc
5	66	800 ~ 1 000	87.30 b
6	39	> 1 000	108.5 a

注:同列不同字母表示 $p < 0.05$ 水平下差异性显著 Note: Numbers affixed with the different letters in the same column mean significant difference at $p < 0.05$

3 结 论

浙江省森林土壤 0 ~ 30 cm 层次有机碳密度较全国土壤有机碳密度平均值低,其在空间分布上显示显著空间自相关性;浙江省森林土壤有机碳密度的空间分布与海拔、地势变化一致,呈现自西南向东北梯级递减趋势,表现为三条平行的带状分布;浙江省森林土壤有机碳密度高值集聚的区域分布在杭州的桐庐、建德、淳安,丽水的遂昌、龙泉,以及宁波的奉化地区;在杭州界区内,有机碳密度差异呈自西北向东梯级递减趋势。土壤有机碳密度的积累受到优势树种、坡位、龄组、海拔、灌木覆盖度、灌木平均高、草本覆盖度等多种因素的影响,影响因素作用于土壤有机碳密度 14.9% 的变异。但上述因素对浙江省森林土壤有机碳密度的垂直分布影响还不十分明确,今后应比较其对不同土层之间浙江省森林土壤有机碳密度的影响。

参 考 文 献

- [1] 王敏,李贵才,仲国庆,等. 区域尺度上森林生态系统碳储量的估算方法分析. 林业资源管理, 2010(2): 107—112. Wang M, Li G C, Zhong G Q, et al. Integrating ecosystem process models, remote sensing and ground-based observations for regional-scale analysis of the carbon storage (In Chinese). Forest Resources Management, 2010(2): 107—112
- [2] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget. Science,

- 1993, 259 (5097): 934—941
- [3] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263 (5144): 185—189
- [4] 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. Lin P S, Gao Q Z. Study on the soil organic carbon storage and vertical distribution of several forest types in mountain area of north-east Guangdong (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (5): 243—247
- [5] 赵安玖, 胡庭兴, 陈小紅. 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. Zhao A J, Hu T X, Chen X H. Influence of subtropical forest ecosystems types on spatial heterogeneity of surface soil organic carbon (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2009, 24 (10): 1748—1756
- [6] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 田块尺度下的苏北滩涂新垦农田土壤盐分空间变异性分析. *灌溉排水学报*, 2013, 32 (1): 39—42. Zhang J B, Yang J S, Yao R J, et al. Spatial variability of soil salinity in reclaimed mudflat farmland of north Jiangsu Province (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32 (1): 39—42
- [7] 刘金福, 苏松锦, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤有机碳空间分布及其影响因素. *山地学报*, 2011, 29 (6): 641—648. Liu J F, Su S J, He Z S, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon in midsubtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2011, 29 (6): 641—648
- [8] 高仲亮, 周汝良, 王军国, 等. 计划烧除对森林碳汇的影响分析. *森林防火*, 2010, 6 (2): 35—38. Gao Z L, Zhou R L, Wang J G, et al. Effect analysis of prescribed burning on forest carbon sink (In Chinese). *Forest Fire Prevention*, 2010, 6 (2): 35—38
- [9] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学出版社, 2006: 1—2. Yang W Q, Zhang J, Hu T X, et al. *Forest Soil Ecology*. Chengdu: Sichuan Science Press, 2006: 1—2
- [10] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用. 北京: 中国农业出版社, 2006: 63—73. Shi Z, Li Y. *Geostatistics on the application of soil science* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 2006: 63—73
- [11] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46 (2): 234—240
- [12] Tobler W. On the first law of geography: A reply. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94 (2): 304—310
- [13] 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于 Moran's I 指标的黄土坡耕地填注量的空间自相关性研究. *土壤*, 2011, 43 (3): 446—452. Zhao L S, Zhang Q F, Liang X L, et al. Study on spatial autocorrelation of depression storage in loess sloping field based on Moran's I (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (3): 446—452
- [14] Tang G A, Yang X. ArcGIS geographic information system spatial analysis experimental course. Beijing: Science Press, 2006
- [15] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 19—29
- [16] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 151—163
- [17] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 等. 中国陆地生态系统碳循环//王庚晨, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109—128. Fang J Y, Liu G H, Xu S L, et al. The carbon pool of terrestrial ecosystem in China//Wang G C, Wen Y P. The measurement of greenhouse gases and their release and related processes (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 109—128
- [18] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24 (5): 518—522. Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24 (5): 518—522
- [19] 刘安兴, 张正寿, 丁衣冬. 浙江林业自然资源: 森林卷. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 9—11. Liu A X, Zhang Z S, Ding Y D. *Zhejiang forestry natural resources-forest* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002: 9—11
- [20] 张峰, 杜群, 葛宏立, 等. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究. *生态学报*, 2012, 32 (16): 5275—5286. Zhang F, Du Q, Ge H L, et al. Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (16): 5275—5286
- [21] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征. *应用生态学报*, 2011, 22 (7): 1675—1681. Du Y X, Wu C J, Zhou S X, et al. Forest soil organic carbon density and its distribution characteristics along an altitudinal gradient in Lushan Mountains of China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (7): 1675—1681
- [22] Fu W J, Zhao K L, Zhang C S, et al. Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174 (5): 785—798
- [23] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 等. 土壤有机质及其研究方法综述. *世界科技研究与发展*, 2005, 27 (5): 78—84. Zhang Y, Pang X Y, Bao W K, et al. A review of soil organic matter and its research methods (In Chinese). *World Sci-tech R&D*, 2005, 27 (5): 78—84
- [24] 刘桂林, 蒋家淡, 张鼎华, 等. 亚热带山地土壤碳动态与吸存研究进展. *福建林业科技*, 2007, 34 (2): 163—168. Liu G L, Jiang J T, Zhang D H, et al. The research progress on the carbon dynamics and adsorption in subtropic forest soil (In Chinese). *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2007, 34 (2): 163—168
- [25] Yamaoka K, Nakagawa T, Uno T. Application of Akaike's information criterion (AIC) in the evaluation of linear pharmacokinetic equations. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, 1978, 6 (2): 165—175

- [26] 李云亮,张运林,李俊生,等. 不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究. 环境科学, 2009, 30(3): 680—686. Li Y L, Zhang Y L, Li J S, et al. Comparison of chlorophyll a concentration estimation in Taihu Lake using different methods (In Chinese). Environmental Science, 2009, 30(3): 680—686
- [27] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律. 生物多样性, 2004, 12(1): 1—4. Fang J Y. Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains (In Chinese). Biodiversity Science, 2004, 12(1): 1—4
- [28] 许信旺,潘根兴,曹志红,等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素. 地理研究, 2007, 26(6): 1077—1086. Xu X W, Pan G X, Cao Z H, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui Province of China (In Chinese). Geographical Research, 2007, 26(6): 1077—1086
- [29] 杨雨亭,尚松浩,李超. 土壤水分空间插值的克里金平滑效应修正方法. 水科学进展, 2010, 21(2): 208—213. Yang Y T, Shang S H, Li C. Correcting the smoothing effect of ordinary Kriging estimates in soil moisture interpolation (In Chinese). Advances in Water Science, 2010, 21(2): 208—213
- [30] Feng Y M, Tang S Z, Li Z Y. Simulation of spatial distribution pattern of forest types by using sequential indicator simulation. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 946—952
- [31] Ren H, Chen H, Li L, et al. Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, Southern China. Plant and Soil, 2013, 363(1/2): 123—138
- [32] 李甜甜,季宏兵,孙媛媛,等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 93—97. Li T T, Ji H B, Sun Y Y, et al. Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors in China (In Chinese). Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(1): 93—97
- [33] 孙宝良. 优势树种和树种组划分及应用浅析. 林业勘查设计, 2012, 162(2): 69—70. Sun B L. Discuss on division and application of dominant tree and dominant tree group (In Chinese). Forest Investigation Design, 2012, 162(2): 69—70
- [34] 刘晓东,朱春全,雷静品,等. 杨树人工林冠层光合辐射分布的研究. 林业科学, 2000, 36(3): 2—7. Liu X D, Zhu C Q, Lei J P, et al. The distribution of photosynthetic radiation in the canopy of poplar plantation (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(3): 2—7

CHARACTERISTICS OF SPATIAL VARIATION OF ORGANIC CARBON DENSITY IN FOREST SOIL AND THEIR AFFECTING FACTORS IN ZHEJIANG PROVINCE

Huang Zhongqiu^{1,2} Fu Weijun^{1,2} Zhou Guomo^{1,2} Jiang Peikun^{1,2†} Qian Xinbiao^{1,2}

(1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(2 School of Environmental Science and Resources, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Abstract With the aid of the Moran's I index and GIS geostatistic interpolation methods, spatial autocorrelation and spatial distribution of organic carbon density (SOCD) in forest soils of Zhejiang Province were studied and effects of factors affecting SOCD were analyzed using the linear-regression equation. Results show that SOCD in the 0 ~ 30 cm layer of the forest soils of Zhejiang Province was 71.2 t hm⁻², on average, lower than the country's. The overall Moran's I of the SOCD in Zhejiang Province was 0.176, demonstrating significant spatial autocorrelation. SOCD in the forest soils of Zhejiang Province displayed in distribution a gradient declining from southwest to northeast and three parallel belts. Significantly positive relationships were found of SOCD with dominant tree species, slope position, slope aspect, age group, altitude, shrub coverage, shrubs average height and average age, and a significantly negative relationship was found with herb coverage. SOCD in the 0 ~ 30 cm soil layer was not much affected by herb average height. All these influencing factors explained 14.9% of the variation of SOCD.

Key words Forest soil; Organic carbon density; Spatial variability; Factors

(责任编辑:檀满枝)