

DOI: 10.11766/trxb201701130603

典型麻竹林土壤植硅体碳的空间异质性特征*

张金林¹ 傅伟军¹ 周秀峰¹ 尹帅¹ 吴家森¹ 姜培坤^{1†} 杨杰¹ 郑蓉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 福建省林业科学研究院, 福州 350012)

摘要 土壤植硅体碳 (Phytolith Occluded Organic Carbon, PhytOC) 是土壤稳定性碳库的重要来源之一, 对于增强土壤碳汇, 维持全球CO₂平衡具有重要意义。为了了解土壤植硅体碳的空间分布, 基于地统计学方法, 结合ArcGIS 10.0空间分析软件, 分析典型麻竹主产区——福建南靖县麻竹林不同土层的土壤植硅体碳的空间变异性。结果表明: 南靖县麻竹土壤植硅体碳平均含量介于0.30~0.75 g kg⁻¹之间, 变异系数介于80.38%~87.46%, 表现为中等程度的变异性; 地统计分析得出块基比介于8.7%~74.9%, 有较强的空间自相关性, 且参数比均较小, 模型拟合度较好; 0~100 cm土层土壤植硅体碳平均储量为4.23 t hm⁻²; 土壤植硅体碳含量随土壤剖面深度的增加而降低, 土壤植硅体碳、土壤植硅体和土壤全硅的空间分布图较为相似, 它们之间也呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$)。样地的竹林年龄与表层的土壤植硅体碳呈现显著正相关关系 ($p < 0.05$)。样地的海拔与表层的土壤植硅体碳呈现显著负相关关系 ($p < 0.05$)。

关键词 麻竹; 地统计学; 植硅体碳; 空间变异

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A

植硅体 (Phytolith) 又称植物蛋白石, 是植物在生长过程中, 植物体通过根部吸收土壤溶液中的可溶性单硅酸 (H₄SiO₄), 最终以无定形硅形态 (SiO₂ · nH₂O) 存在于植物的细胞壁、细胞腔及细胞间隙内的水合物^[1-2]。植硅体在硅化的这一过程中, 常伴有少量的有机碳被包裹在内, 被称为植硅体闭蓄有机碳, 即植硅体碳 (Phytolith Occluded Organic Carbon, PhytOC)^[3-5]。由于植硅体具有超强的耐高温、抗氧化及抗分解等特性, 使得植硅体碳可以在植硅体这层坚硬外壳的保护下存于土壤以及沉积物中高达上万年之久^[6]。因此, 植硅体碳也是土壤稳定性碳库的重要来源之一, 对于增强土壤碳汇, 维持全球CO₂平衡具有重要意义, 近年来受到了国内外的广泛关注^[7-9]。

由于森林植被生长和分布的不均匀以及土壤立地存在的差异 (如海拔、坡度、坡向和土壤理化性质等), 使得土壤植硅体碳含量存在一定的空间变

异性。以往土壤植硅体碳的研究均是选取某种森林类型采集若干点来代表该种森林类型土壤植硅体碳储量, 这样以点代面的研究方式可能存在巨大的误差。如果对同种森林类型进行大面积、多样点土壤样品采集, 并结合地统计学和ArcGIS对土壤植硅体碳进行空间变异研究, 这样可以减少以点代面带来的研究误差。

森林是地球陆地生态系统的主体, 在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用^[10]。而在全球森林面积急剧下降的今天, 竹林面积却仍在增加, 因此竹林是一个不断增大的碳汇^[11-12]。而麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) 是我国南方栽培最广的竹种之一, 南靖县具有“中国麻竹之乡”的美称, 是福建省最大的麻竹生产种植区, 目前全县种植麻竹10 200 hm²。为此, 本文选取南靖县麻竹林下土壤为研究对象, 基于地统计学结合ArcGIS 10.0空间分析软件, 分析研究其不同土层的土壤植

* 国家自然科学基金项目 (41471197) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41471197)

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

作者简介: 张金林 (1989—), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事森林土壤与环境研究。E-mail: coolold3@163.com

收稿日期: 2017-01-13; 收到修改稿日期: 2017-04-24; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-05-25

植硅体碳的空间变异性,旨在为中国竹林生态系统的植硅体碳汇估测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南靖县位于 $24^{\circ}26'20'' \sim 24^{\circ}59'58''N$, $117^{\circ}0'12'' \sim 117^{\circ}36'36''E$,地处闽东南,属于南亚热带季风气候,光照充足,雨量充沛,年均气温 $20.4 \sim 22.3^{\circ}C$,年均日照数 $1\ 831 \sim 1\ 946\ h$,年均降水量 $1\ 235 \sim 2\ 481\ mm$,年均无霜期为 $312\ d$ 。全县整个地势由西北向东南倾斜,地貌类型以丘陵为主,其次是中低山地,最后是台地以及河谷平原,林业主要土壤类型是红壤(湿润富铁土或淋溶土)和黄壤(常湿淋溶土或锥形土)。当地的麻竹林人工经营水平较高,每年春、秋各施肥1次,主要施用复合肥,平均施肥量为 $750\ kg\ hm^{-2}$ 。林下仅有少量的肖梵天花(*Urena lobata* Linn)、鸭跖草(*Commelina communis*)等草本植物。

1.2 样品采集

2014年10月,根据南靖县森林经营档案、农户调查和野外实地考察,选择南靖县种植麻竹的6个乡镇进行采样。在南靖县林业局专业工作人员的现场指导和确认下,选取生长均匀并可以全面反映南靖县麻竹林特点的代表性样地100块(图1),同时建立 $20\ m \times 20\ m$ 的标准样地,测量样地内的不同年龄的竹子的胸径,砍伐一株与平均胸径相同的竹子作为标准竹,并测量其株高。同时测量丛间距和记录每丛麻竹株数。样地设立典型土壤剖面,分别采集 $0 \sim 10\ cm$ 、 $10 \sim 30\ cm$ 、 $30 \sim 60\ cm$ 和 $60 \sim 100\ cm$ 土层的土样,土壤容重的测定采用环刀法,同时记录采样点坐标、海拔、坡度、坡向、种植年限等基础信息。采回土样在自然条件下风干后,剔除砾石和根系后过 $2\ mm$ 筛备用,其中用于提取植硅体的土样需过 $2\ mm$ 筛后再经玛瑙研钵磨细过 $0.154\ mm$ 筛。

1.3 分析方法

土壤pH采用酸度计法测定(水土比为 $2.5:1.0$);土壤有效磷(Available Phosphorus, AP)采用Bary法测定;土壤有机质(Soil Organic Carbon, SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;土壤碱解氮(Alkali-hydrolyzable Nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定;土壤全硅(Total Silicon, TSi)

采用偏硼酸锂熔融—乙酸缓冲液提取—钼蓝比色法测定^[13]。

土壤中植硅体的提取采取微波消解法^[14],消解后,土壤中植硅体分离采用离心—重液浮选方法,依次用比重 2.35 和 1.60 的溴化锌重液进行两次浮选除去杂质^[15],从而提取出较纯净的植硅体。土壤植硅体碳的测定采用碱溶分光光度法^[16]。

1.4 数据处理

土壤剖面内某一土层(i)的土壤植硅体碳储量的计算公式如下:

$$Y = \sum ((1 - \delta_i) \times \text{PhytOC}_i \times \rho_i \times H_i / 10) \quad (1)$$

式中, Y 为第 i 层的土壤植硅体碳储量($t\ hm^{-2}$); 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); PhytOC_i 为第 i 层的土壤植硅体碳含量($g\ kg^{-1}$); ρ_i 为第 i 层的土壤容重($g\ cm^{-3}$); H_i 为第 i 层的土层厚度(cm)。

采用加权平均法得到 $0 \sim 100\ cm$ 土层的土壤植硅体碳平均含量;采用Microsoft Excel 2013对原始数据进行整理;采用IBM Statistics SPSS 20.0进行指标描述性统计分析、Q-Q图制作、正态检验、对数转换和相关性分析;采用Vesper和ArcGIS 10.0建立变异函数模型;最后采用ArcGIS 10.0进行克里格空间插值和分布图制作。

2 结果

2.1 土壤植硅体碳含量的描述性统计特征

南靖县麻竹各层土壤的植硅体碳含量的描述性统计结果(表1)表明:南靖县麻竹 $0 \sim 100\ cm$ 土层的土壤植硅体碳平均含量为 $0.42\ g\ kg^{-1}$,不同层次土壤植硅体碳平均含量介于 $0.30 \sim 0.75\ g\ kg^{-1}$ 之间,且随着土壤剖面深度的增加而降低。其中, $0 \sim 10\ cm$ 土层的土壤植硅体碳平均含量最大,为 $0.75\ g\ kg^{-1}$, $60 \sim 100\ cm$ 土层的土壤植硅体碳平均含量最小,为 $0.30\ g\ kg^{-1}$ 。 $0 \sim 10\ cm$ 、 $10 \sim 30\ cm$ 、 $30 \sim 60\ cm$ 、 $60 \sim 100\ cm$ 和 $0 \sim 100\ cm$ 土层的土壤植硅体碳含量的变异系数分别为 80.38% 、 80.46% 、 84.94% 、 87.46% 和 80.97% ,均小于 1 ,表现为中等程度的变异性^[17]。但其变异系数均较高,表明研究区可能受到一定的土地利用方式变化的影响。

麻竹各层土壤的植硅体碳含量的峰度和偏度偏高且原始数据K-S检验的 p 值均小于 0.05 ,说明不符合正态分布($K-S_p > 0.05$)。通过Q-Q图也可

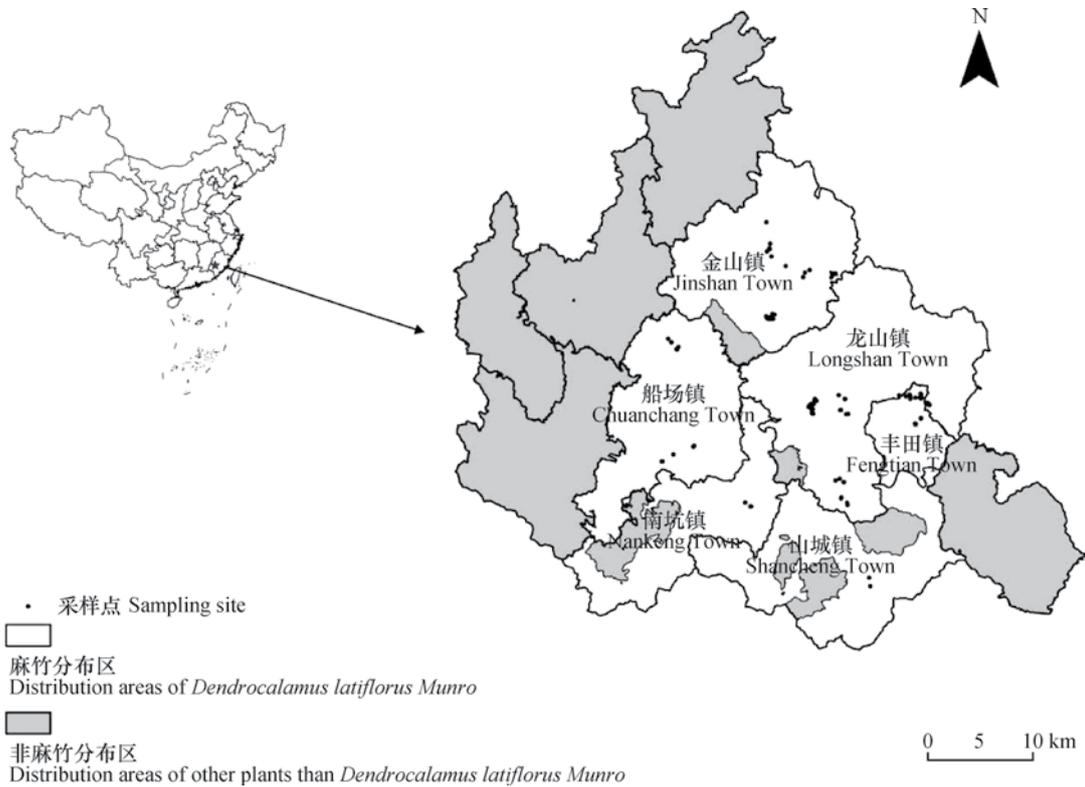


图1 南靖县样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Nanjing County

表1 不同土层的植硅体碳含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of PhytOC content relative to soil layer

土层 Soil layer (cm)	平均值 Mean (g kg ⁻¹)	最大值 Maximum (g kg ⁻¹)	最小值 Minimum (g kg ⁻¹)	标准差 SD (g kg ⁻¹)	变异系数 CV (%)
0~10	0.75	3.09	0.15	0.61	80.38
10~30	0.53	2.35	0.08	0.43	80.46
30~60	0.38	2.17	0.08	0.33	84.94
60~100	0.30	1.55	0.04	0.27	87.46
0~100	0.42	2.01	0.10	0.34	80.97

以直观地看出原始数据与期望正态线差异较大，不符合正态分布。因此需要对原始数据进行数据转换^[18]。对各层土壤植硅体碳含量数据进行自然对数转换，转换后数据的峰度和偏度显著降低，且K-S检验的 p 值均大于0.05，符合正态分布的要求。通过自然对数转换后的数据所作的Q-Q图也可以看出图中数据分布趋势与期望正态线基本一致，满足地统计学的分析要求，可以进行半方差函数模型建模。

2.2 土壤植硅体碳含量的拟合模型

采用地统计学方法，通过ArcGIS和Vesper软件对自然对数转换后的麻竹各层土壤的土壤植硅体碳含量进行半方差函数拟合，选出最优插值模型并验证。0~10 cm土层的土壤植硅体碳含量符合高斯模型；10~30 cm、60~100 cm和0~100 cm土层的土壤植硅体碳含量符合指数模型；30~60 cm土层的土壤植硅体碳含量符合球状模型。

块金值与基台值的比值也就是块基比可以用来

反映空间相关性程度,当块基比小于25%时,说明空间相关性的程度很高,当块基比大于25%且小于75%时,说明空间相关性的程度中等,当块基比大于75%时,说明空间相关性的程度很弱^[19]。只有当空间自相关性达到中等及以上的情况就说明结构性因素是引起空间变异的主要因素,而不是随机因素引起的,此时才可用ArcGIS10.0进行克里格空间插值。从表2可知,0~10 cm和0~100 cm土层的土壤植硅体碳含量的块基比分别为12.55%和8.73%,说明其均具有很好的空间相关性,由结构因素引起的空间变异程度较由随机因素引起的空间变异程度大。而10~30 cm、30~60 cm和60~100 cm土

层的土壤植硅体碳含量的块基比分别为28.39%、74.88%、28.41%,大于25%且小于75%,说明具有中等程度的相关性,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。

在不同参数得出的模型中,符合以下标准的模型是最优模型:标准平均值(MS)的绝对值接近于0,标准均方根预测误差(RMSS)最接近于1,即参数比值(标准平均值的绝对值与标准均方根预测误差的比值)越小,模型拟合越好^[20]。由表2可知麻竹土壤表层各基本化学性质和植硅体碳含量的参数比均很小,说明模型拟合度较好,采用克里格空间插值法比较合理。

表2 土壤植硅体碳含量的半方差函数理论模型参数和拟合检验参数

Table 2 Parameters of semivariogram models and fitting test parameters of PhytOC content relative to soil layer

土层 Soil layer (cm)	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (km)	标准平均值 Standardized mean	标准均方根预测误差 Standardized Root-Mean-Square	参数比值 SM/SRMS
0~10	高斯 ^①	0.0843	0.6712	12.55	0.2158	0.0359	0.9015	0.0398
10~30	指数 ^②	0.1685	0.5935	28.39	0.3057	0.0373	0.8968	0.0416
30~60	球状 ^③	0.3121	0.4168	74.88	0.1546	0.1342	1.2193	0.1101
60~100	指数 ^②	0.1835	0.6457	28.41	0.2539	0.0346	0.9428	0.0366
0~100	指数 ^②	0.0558	0.6394	8.73	0.3322	0.0386	0.8752	0.0441

注: ①Gaussian, ②Exponential, ③Spherical

2.3 土壤植硅体碳含量的空间分布

根据表3中半方差函数模型及参数,并应用ArcGIS10.0的地统计分析模块,采用克里格空间插值法对麻竹土壤表层各基本化学性质和植硅体碳含量进行空间插值,得到麻竹各层土壤的植硅体碳含量的空间分布格局(图2)。0~10 cm土层麻竹土壤植硅体碳含量显著高于其他土层,其空间分布呈现成片中高值的相间。0~10 cm和10~30 cm土层麻竹土壤植硅体碳含量的空间分布较为相似,在金山镇呈现明显的带状分布,土壤植硅体碳含量由北至南逐渐增加;在龙山镇、船场镇和南坑镇呈现成片中高值的相间分布,其含量分别介于0.60~3.09 g kg⁻¹和0.43~1.31 g kg⁻¹;在丰田镇和山城镇总体呈现一块成片的中值区,其含量分别在0.60~0.87 g kg⁻¹和0.33~0.60 g kg⁻¹之间。30~60 cm和60~100 cm土层土壤植硅体碳含量较低,其中30~60 cm土层呈现块

状相间分布,而60~100 cm土层呈现中低值成片的相间,块状或破碎状的分布。0~100 cm土层的土壤植硅体碳含量分布结合了其他各土层的特点,但整体呈现土壤植硅体碳含量相对中等。总体而言土壤植硅体碳含量随着土壤剖面深度的增加而降低,从0~10 cm至10~30 cm土层和10~30 cm至30~60 cm土层的降幅较大,底部两个土层降幅较小。这主要是因为土壤植硅体和土壤植硅体碳主要来源于植物的凋落物,当植物的残体掉落后会在土壤表层形成凋落物层,凋落物经过分解后首先进入土壤表层,且植硅体不易被分解掉,可以长期保存在土壤中,植硅体就会在土壤表层中慢慢积累,因此土壤表层中的植硅体和土壤植硅体碳含量相对较高。而且有研究表明,在未受到外界扰动的土壤中,植硅体会在表层土壤中出现富集的现象^[21]。但实际上在外界动物的扰动下和土壤侵蚀的作用下,且由于植硅体

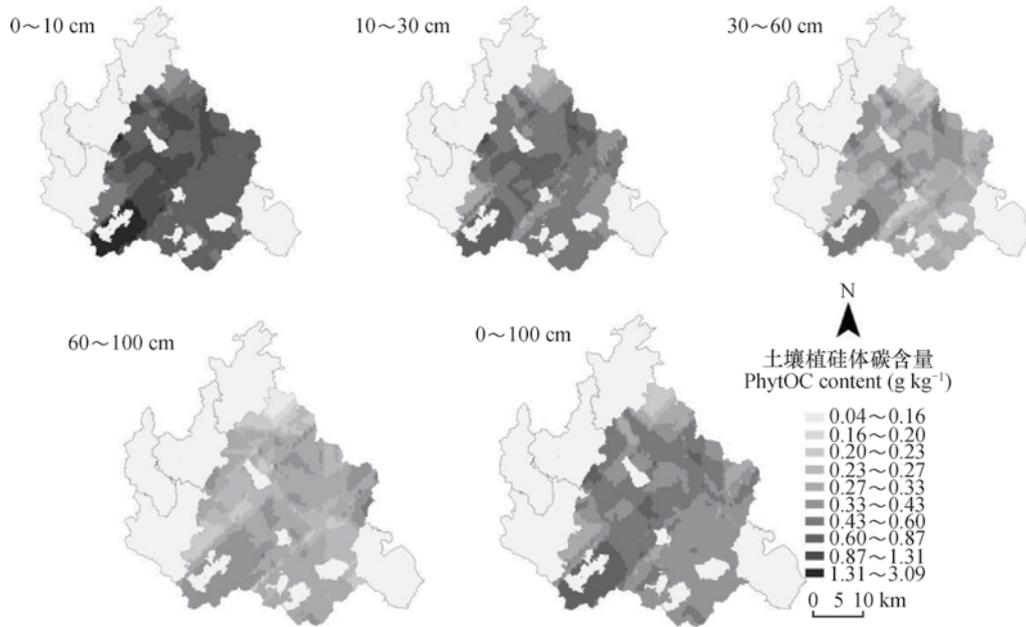


图2 麻竹土壤植硅体碳含量空间分布图

Fig. 2 Distribution of PhytOC content for *Dendrocalamus latiflorus* Munro

很小一般在 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ 的范围内^[3]，在土壤表层富集的植硅体会通过土壤的孔隙慢慢向下进行迁移。因而土壤剖面中的植硅体碳分布存在差异，且随着土壤剖面深度的增加麻竹土壤植硅体碳含量在降低。

2.4 不同土层植硅体碳储量统计特征

南靖县麻竹各层土壤植硅体碳储量的描述性统计结果（表3）表明：南靖县麻竹不同土层土壤的植硅体碳平均储量介于 $0.72 \sim 4.23 \text{ t hm}^{-2}$ ，且随着

土壤剖面深度的增加而增大。其中 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层的土壤植硅体碳平均储量为 0.72 t hm^{-2} ， $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的土壤植硅体碳平均储量为 4.23 t hm^{-2} ，最小值仅占最大值的4.85%。南靖县现在种植麻竹 $10 \ 200 \text{ hm}^2$ ，由此可估算出南靖县麻竹 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的土壤植硅体碳总储量达到 $4.31 \times 10^4 \text{ t}$ ，占土壤有机碳总储量的3.90%，其中 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的土壤有机碳总储量达到 $1.11 \times 10^6 \text{ t}$ 。

表3 不同土层土壤的植硅体碳储量的描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistics of PhytOC stock relative to soil layer

土层 Soil layer (cm)	平均值 Mean (t hm^{-2})	最大值 Maximum (t hm^{-2})	最小值 Minimum (t hm^{-2})	标准差 SD (t hm^{-2})	变异系数 CV (%)	容重 Bulk density (g cm^{-3})	砾石含量 Gravel content (%)
0~10	0.72	2.94	0.14	0.58	80.37	1.16	16.91
10~30	1.06	4.65	0.16	0.85	80.47	1.19	16.33
30~60	1.16	6.59	0.25	0.99	84.95	1.21	15.33
60~100	1.29	6.59	0.19	1.13	87.47	1.21	11.89
0~100	4.23	20.40	0.99	3.43	81.10	1.20	14.31

3 讨论

3.1 麻竹土壤植硅体碳含量和储量

由于土壤自身无法产生植硅体碳，因此土壤植

硅体碳的积累主要受植物中的植硅体含量、植硅体自身生物地球化学稳定性以及凋落物年输入量的共同影响。项婷婷^[22]对中国重要丛生竹生态系统植硅体碳汇进行了研究，得出麻竹土壤 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 、

10~30 cm和30~60 cm土层植硅体碳的平均分别含量为0.120, 0.035和0.024 g kg⁻¹, 远小于本研究在龙山镇0~10 cm、10~30 cm和30~60 cm土层的植硅体碳平均含量的0.62, 0.46和0.33 g kg⁻¹, 同时也远小于本研究在南靖全县0~10 cm、10~30 cm和30~60 cm土层的植硅体碳平均含量的0.75, 0.53和0.38 g kg⁻¹, 一方面是因为其采样时间为一月份, 而一月份麻竹生长较为缓慢, 凋落物很少; 气温较低, 凋落物分解很慢。而本研究采样时间为10月份, 麻竹生长旺盛, 凋落物较多; 气温较高, 土壤表层的凋落物分解较快, 释放大量的植硅体碳进入土壤。另一方面项婷婷研究中的位于南靖县龙山镇的样地, 其立竹密度为2 079株hm⁻², 远小于本研究在龙山镇和全县的立竹密度(分别为9 315和8 958株hm⁻²), 说明其样地的凋落物的年输入量较小, 导致进入土壤的植硅体碳较少。龙山镇是南靖县麻竹分布最多的镇, 全镇麻竹总面积达5 520 hm², 然而项婷婷的研究设置了4块实验样地, 也远小于本研究设置在龙山镇的研究样地数(33块)和南靖全县的样地数。样地数量上的明显差异也是导致本研究与项婷婷研究植硅体碳含量差异的原因之一。因此, 也表明要准确估测某种森林类型土壤植硅体碳含量和储量, 应采用大面积、多样点同时结合地统计学的方法开展研究。

不同森林类型的土壤植硅体含量很大程度上受不同植物对植硅体积累能力的影响, 土壤中的植硅体主要来源于植物体内形成和积累的植硅体, 然而不同植物对植硅体积累的能力不同, 使得不同森林类型植物体内的植硅体含量存在很大的差异。研究发现, 被子植物积累植硅体的能力强于裸子植物, 而被子植物中的单子叶植物积累植硅体的能力又要强于双子叶植物, 其中单子叶植物的禾本科植物积累植硅体的能力较强^[23]。同时已经有研究表明竹亚科的植物可以固定较多的植硅体碳且单位面积竹类植物植硅体碳封存能力远高于很多其他植物^[24]。林维雷等^[25]对浙江南部亚热带毛竹林、杉木林、针阔混交林、马尾松林和阔叶林土壤植硅体碳的研究结果发现这五种森林类型0~100 cm土层植硅体碳储量分别为5.138、3.562、2.810、2.191和2.146 t hm⁻², 比较本研究麻竹土壤0~100 cm土层植硅体碳储量4.23 t hm⁻²的研究结果, 发现麻竹和毛竹的土壤植硅体碳储量要高于杉木林、针阔混交林、马尾松林和阔叶林土壤, 主要是因为麻

竹和毛竹均属于禾本科单子叶植物, 它们形成和积累植硅体的能力较强, 植物体内的植硅体含量较高, 因此土壤中封存较多的植硅体碳。这说明竹类植物不仅植物部分植硅体碳含量高, 其土壤积累植硅体碳的能力也强, 可以封存更多的植硅体碳, 因此竹子在维持全球碳平衡中具有重要意义。而毛竹的土壤植硅体碳储量要高于麻竹, 一方面毛竹地上部分不同器官竹叶、竹枝和竹秆中的植硅体封存碳和植硅体碳占干物质的含量均显著高于麻竹, 且毛竹的凋落物年输入量大于麻竹。另一方面毛竹土壤不同土层中的SiO₂、植硅体和植硅体碳含量也均显著高于麻竹^[22, 26]。

3.2 麻竹土壤植硅体碳含量的影响因素

表层的土壤植硅体碳含量、植硅体含量和土壤全硅三者之间呈现极显著相关(表4), 这一结果与他人的结果相同^[27-28], 而且相关分析结果与空间插值分析所呈现的结果相吻合。由于土壤自身无法产生植硅体和植硅体碳, 土壤中植硅体和植硅体碳主要来源于植物中的植硅体的输入, 如植物凋落物、森林火灾和食草动物的排泄等^[29], 凋落物经过分解后进入土壤。土壤中的硅被植物吸收, 经过植物自身硅化作用在体内形成植硅体, 并以枯落物的形式返回到土壤中, 所以植物对硅的吸收能力和土壤中硅含量是影响土壤植硅体含量和土壤植硅体碳含量的重要因素, 这说明提高土壤中硅含量可以增加土壤中植硅体和植硅体碳含量。因此通过施用硅肥或其他措施促进植物对硅的吸收和利用以形成更多的植硅体进而增加植硅体碳含量, 对增强土壤稳定性碳汇具有重要的指导意义。

样地的海拔与表层的土壤植硅体碳含量呈现显著负相关关系($p < 0.05$)。不同的海拔会导致温度、湿度、光照等水热条件的差异, 从而使森林土壤植硅体碳含量的空间分布呈现一定的规律性。随着海拔的升高, 南靖县土壤植硅体碳含量均值也随之减小。主要原因是进入土壤中的植硅体碳主要来源于地表凋落物, 因此土壤植硅体碳含量受到地表植物凋落物的分解、转化与呼吸释放过程的综合影响^[30]。海拔对植硅体碳的影响主要表现在温度上, 这也是影响土壤微生物活性和酶活性的关键因素。从而直接影响着凋落物的分解和植硅体碳释放的速率。土壤植硅体碳随着海拔的升高呈现出降低的趋势, 主要是因为随着海拔的升高气温逐渐下降, 使得凋落物的分解速率下降, 从而造成进入土

表4 土壤表层基本化学性质和植硅体碳含量的相关性

Table 4 Relationships between basic soil chemical properties and PhytOC content in the top-soil

项目	pH	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK	有机碳 SOC	全硅 TSi	植硅体 Phytolith	植硅体碳 PhytOC
pH	1							
碱解氮AN	0.174	1						
有效磷AP	-0.177	0.09	1					
速效钾AK	0.123	0.527**	-0.027	1				
有机碳SOC	-0.466**	-0.051	0.016	0.145	1			
全硅TSi	0.115	-0.142	-0.048	-0.142	-0.138	1		
植硅体Phytolith	0.117	-0.15	-0.141	-0.146	-0.049	0.791**	1	
植硅体碳PhytOC	0.014	-0.065	0.033	-0.041	0.052	0.475**	0.573**	1

注：**表示极显著相关 ($p < 0.01$) Note: ** denotes extremely significant correlation ($p < 0.01$)

壤的植硅体和植硅体碳较少。竹林年龄与表层的土壤植硅体碳呈现显著正相关关系 ($p < 0.05$)。随着麻竹栽培时间的增长,植物产生的凋落物也随之增多,进而经过分解后进入土壤的植硅体和植硅体碳也越来越多。由于植硅体是一种非晶体的固体颗粒,它的主要成分是 SiO_2 ,具有很好的抗高温、抗分解、抗腐蚀等特性,相较于其他的有机碳具有更好的稳定性,因而在植硅体的保护下土壤植硅体碳在土壤会慢慢积累。

4 结 论

各层土壤植硅体碳的平均含量变化较大且分布不均匀,介于 $0.30 \sim 0.75 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,且随着土壤剖面深度的增加而降低。其模型拟合度较好,块基比均小于1,且参数比均很小。麻竹土壤表层各基本化学性质和土壤植硅体碳含量的空间分布格局均有差异,但土壤植硅体碳、土壤植硅体和土壤全硅的空间分布图较为相似,三者之间呈极显著性正相关,这说明提高土壤中的硅含量可以增加土壤中植硅体和植硅体碳的含量,这对增强土壤稳定性碳汇具有重要的指导意义。麻竹土壤具有很强的积累植硅体碳的能力,每公顷麻竹林 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层中储存 4.23 t 的土壤植硅体碳,高于杉木林、针阔混交林、马尾松林和阔叶林土壤,这说明麻竹土壤可以增强土壤稳定性碳汇。同时麻竹表层土壤植硅体碳含量的空间分布受样地海拔和竹林年龄等环境因素的影响。

参 考 文 献

- [1] Parr J F, Sullivan L A. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37 (1) : 117—124
- [2] Piperno D R. Quaternary environmental history and agricultural impact on vegetation in central America. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2006, 93 (2) : 274—296
- [3] Parr J F, Sullivan L A, Chen B, et al. Carbon bio-sequestration within the Phytoliths of economic bamboo species. *Global Change Biology*, 2010, 16 (10) : 2661—2667
- [4] Parr J F, Sullivan L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars. *Plant Soil*, 2011, 342 (1/2) : 165—171
- [5] Zuo X X, Lu H Y, Gu Z Y. Distribution of soil Phytolith-occluded carbon in the Chinese Loess Plateau and its implications for silica-carbon cycles. *Plant Soil*, 2014, 374 (1/2) : 223—232
- [6] Wilding L P. Radiocarbon dating of biogenetic opal. *Science*, 1967, 156 (3771) : 66—67
- [7] Song Z L, Liu H Y, Li B L, et al. The production of Phytolith-occluded carbon in China's forests implications to biogeochemical carbon sequestration. *Global Change Biology*, 2013, 19 (9) : 2907—2915
- [8] Song Z L, Parr J F, Guo F S. Potential of global cropland Phytolith carbon sink from optimization of cropping system and fertilization. *PLoS One*, 2013, 8 (9) : 1—6
- [9] 应雨骐, 项婷婷, 李永夫, 等. 中国亚热带重要树种植硅体碳封存潜力估测. *自然资源学报*, 2015, 30

- (1) : 133—140
Ying Y Q, Xiang T T, Li Y F, et al. Estimation of sequestration potential via phytolith carbon by important forest species in subtropical China (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (1) : 133—140
- [10] 许乃政, 刘红樱, 魏峰. 土壤碳库及其变化研究进展. *江苏农业科学*, 2011, 39 (2) : 1—5
Xu N Z, Liu H Y, Wei F. Research progress in soil carbon pool and its variation (In Chinese). *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39 (2) : 1—5
- [11] 周国模, 姜培坤, 徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化. 北京: 科学出版社, 2010
Zhou G M, Jiang P K, Xu Q F. Carbon fixing and transition in the ecosystem of bamboo stands (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [12] 王兵, 魏文俊, 邢兆凯, 等. 中国竹林生态系统的碳储量. *生态环境*, 2008, 17 (4) : 1680—1684
Wang B, Wei W J, Xing Z K, et al. Carbon storage of bamboo forest ecosystem in China (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17 (4) : 1680—1684
- [13] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析测定方法. 北京: 科学出版社, 2012
Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [14] Parr J F, Dolic V, Lancaster G, et al. A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from herbarium specimens. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2001, 116 (3) : 203—212
- [15] Parr J F. A comparison of heavy liquid floatation and microwave digestion techniques for the extraction of fossil phytoliths from sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2002, 120 (3) : 315—336
- [16] 杨杰, 李永夫, 黄张婷, 等. 碱溶分光光度法测定植硅体碳含量. *分析化学*, 2014, 42 (9) : 1389—1390
Yang J, Li Y F, Huang Z T, et al. Determination of phytolith-occluded carbon content using alkali dissolution spectrophotometry (In Chinese). *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2014, 42 (9) : 1389—1390
- [17] 张智, 任意, 鲁剑巍, 等. 长江中游农田土壤微量养分空间分布特征. *土壤学报*, 2016, 53 (6) : 1489—1496
Zhang Z, Ren Y, Lu J W, et al. Spatial distribution of micronutrients in farmland soils in the mid-reaches of the Yangtze River (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6) : 1489—1496
- [18] 于雷, 魏东, 王惠霞, 等. 江汉平原县域尺度土壤有机质空间变异特征与合理采样数研究. *自然资源学报*, 2016, 31 (5) : 855—863
Yu L, Wei D, Wang H X, et al. Spatial variability of soil organic matter and appropriate number of samples on county scale in Jiangnan Plain (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2016, 31 (5) : 855—863
- [19] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究. *土壤学报*, 2014, 51 (5) : 1087—1095
Zhang W M, Jiang X S, Wu M, et al. Spatial heterogeneity of soil organic carbon on the south coast of Hangzhou Bay (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5) : 1087—1095
- [20] 张佳佳, 傅伟军, 杜群, 等. 浙江省森林凋落物碳含量空间变异特征. *林业科学*, 2014, 50 (2) : 8—13
Zhang J J, Fu W J, Du Q, et al. Spatial variability characteristics of carbon densities in the forest litter in Zhejiang Province (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50 (2) : 8—13
- [21] 林维雷. 亚热带重要森林类型土壤植硅体碳的研究. 杭州: 浙江农林大学, 2015
Lin W L. Study on phytolith-occluded carbon in soil under important forest kinds (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015
- [22] 项婷婷. 中国重要丛生竹生态系统植硅体碳汇研究. 杭州: 浙江农林大学, 2015
Xiang T T. Research of phytolith-occluded carbon sequestration of important *Sympodial* bamboo ecosystem in China (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015
- [23] Demaster D J, Leynaert A, Queguiner B. The silica balance in the world ocean: A reestimate. *Science*, 1995, 368 (5209) : 375—379
- [24] 杨杰, 吴家森, 姜培坤, 等. 苦竹林植硅体碳与硅的研究. *自然资源学报*, 2016, 31 (2) : 299—309
Yang J, Wu J S, Jiang P K, et al. Study on phytolith-occluded organic carbon and silicon in a *Pleioblastus amarus* forest (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2016, 31 (2) : 299—309
- [25] 林维雷, 应雨琪, 姜培坤, 等. 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究. *土壤学报*, 2015, 52 (6) : 1365—1373
Lin W L, Ying Y Q, Jiang P K, et al. Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1365—1373
- [26] 杨杰. 中国重要散生竹生态系统植硅体碳汇研究. 杭州: 浙江农林大学, 2016
Yang J. Phytolith occluded carbon in soil under

- important forest kinds (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2016
- [27] 应雨骐, 项婷婷, 林维雷, 等. 中国亚热带5种林分凋落物层植硅体碳的封存特性. 林业科学, 2015, 51 (3): 1—7
- Ying Y Q, Xiang T T, Lin W L, et al. Phytolith-occluded carbon in litters of different stands in the subtropics of China (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51 (3): 1—7
- [28] 杨杰, 项婷婷, 姜培坤, 等. 绿竹生态系统植硅体碳积累与分布特征. 浙江农林大学学报, 2016, 33 (2): 225—231
- Yang J, Xiang T T, Jiang P K, et al. Phytolith-occluded organic carbon accumulation and distribution in a *Dendrocalamopsis oldhami* bamboo stand ecosystem (In Chinese). *Journal of Zhejiang A & F University*, 2016, 33 (2): 225—231
- [29] 孟赐福, 姜培坤, 徐秋芳, 等. 植物生态系统中的植硅体闭蓄有机碳及其在全球土壤碳汇中的重要作用. 浙江农林大学学报, 2013, 30 (6): 921—929
- Meng C F, Jiang P K, Xu Q F, et al. PhytOC in plant ecological system and its important roles in the global soil carbon sink (In Chinese). *Journal of Zhejiang A & F University*, 2013, 30 (6): 921—929
- [30] 黄中秋, 傅伟军, 周国模, 等. 浙江省森林土壤有机碳密度空间变异特征及其影响因素. 土壤学报, 2014, 51 (4): 906—913
- Huang Z Q, Fu W J, Zhou G M, et al. Characteristics of spatial variation of organic carbon density in forest soil and their affecting factors in Zhejiang Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 906—913

Spatial Variability of Phytolith-occluded Organic Carbon in Soil under Typical *Dendrocalamus latiflorus* Munro Groves

ZHANG Jinlin¹ FU Weijun¹ ZHOU Xiufeng¹ YIN Shuai¹ WU Jiasen¹ JIANG Peikun^{1†}
YANG Jie¹ ZHENG Rong²

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

(2 Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China)

Abstract 【Objective】As phytolith features super tolerance to high temperature, oxidation and decomposition, the organic carbon occluded inside the phytolith shell may exist and accumulate in soils and sediments for thousands of years and is hence named as Phytolith occluded organic carbon (PhytOC), which is, therefore, regarded as an important soil organic carbon pool, and contributes significantly to the carbon sink in the soil and global CO₂ balance. Forest ecosystem is a mainstay of the terrestrial ecosystem. However, the area of forests on the globe is shrinking drastically today, while the area of bamboo groves is still on a rising trend. So, bamboo groves are a growing carbon sink and playing a critical role in carbon cycling in the terrestrial ecosystem. As *Dendrocalamus latiflorus* Munro grows very fast and features large volumes of biomass, well-developed root system and outstanding ecological functions, it is favored to be one of the bamboo species extensively cultivated in South China. Nanjing County is known as “Land of *Dendrocalamus latiflorus* Munro in China” and one of the largest *Dendrocalamus latiflorus* Munro cultivation region in Fujian Province. In this paper an attempt was made to explore characteristics of the spatial distribution of PhytOC in the soil under the bamboo groves, aiming at providing some scientific basis for assessing the pool of PhytOC in the bamboo ecosystems of China. 【Method】A total of 100 tracts of *Dendrocalamus latiflorus* Munro groves in Nanjing County was selected as object for the study. Soils in different soil layers were sampled for extraction and isolation of PhytOC using the microwave digestion method and then the centrifuging-heavy liquid floatation extraction method. In order to extract fairly pure phytolith, the floatation extraction process was performed twice, using heavy liquid, Zinc bromide, 2.35 and 1.60 in specific gravity sequently to remove impurities.

The isolated pure phytolith was put into a ventilated oven at 65°C for 48 hours till they were fully dried and constant in weight. And then, the phytolith was weighed after the samples cooled down in a vacuum dryer. The Alkali Dissolution Spectrophotometry method was applied to analysis of the PhytOC and then spatial variability of the PhytOC in the bamboo soil analyzed using the software of ArcGIS 10.0 and the Geostatistic method.

【Result】 Results show that average content of PhytOC in the soil varied from 0.30 ~ 0.75 g kg⁻¹ with soil layer under *Dendrocalamus latiflorus Munro* groves in Nanjing County, with variation coefficients ranging from 80.38% to 87.46%, which indicates a moderate degree of variability. Geostatistical analysis reveals that PhytOC contents in the 10 ~ 30 cm, 60 ~ 100 cm and 0 ~ 100 cm soil layers fit exponential models; in the 0 ~ 10 cm soil layer fit the Gaussian model; and in the 30 ~ 60 cm soil layer fit spherical models. Nugget /Sill ratio of the PhytOC varied from 8.7% to 74.9%, displaying strong and moderate spatial correlation; moreover their SM/SRMS ratios were low, indicating that the models fit well. In the 0 ~ 100 cm soil layer under the bamboo groves, the pool of PhytOC reached 4.23 t hm⁻², significantly higher than that under the Chinese fir forest, Masson pine forest, broadleaf forest and mixed conifer-broadleaf forest. Kriging reveals that the contents of PhytOC displayed a decreasing trend with soil depth, which is quite similar to the distributions of phytolith and total silicon in the top-soil. Besides that, a ultra-significantly positive correlation ($p < 0.01$) was observed between them, and a significant positive relationship, too, between the content of PhytOC in the 0 ~ 100 cm soil layer and age of the bamboo forest, but a significantly negative one between the content of PhytOC and elevation of the groves ($p < 0.05$). **【Conclusion】** All the findings in this study suggest that to raise the content of soil silicon may help increase the content of soil phytolith and soil PhytOC in the top-soil; and that *Dendrocalamus latiflorus Munro* groves can hold a large pool of PhytOC, because the plant per se has a high content of PhytOC, and the soil under the groves is highly capable of fixing and accumulating PhytOC, as well. Therefore, the *Dendrocalamus latiflorus Munro* ecosystem plays an important role in expanding the stable organic carbon pool in the soil.

Key words *Dendrocalamus latiflorus Munro*; Geostatistics; PhytOC; Spatial variation

(责任编辑: 檀满枝)