

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)6 - 641 - 08

格氏栲天然林土壤有机碳空间分布 及其影响因素

刘金福^{1,2}, 苏松锦^{1,2}, 何中声^{1,2}, 洪伟^{1,2}, 吴彩婷^{1,2}, 董金相^{1,2}, 黎丽珍¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省高校生态与资源统计重点实验室, 福建 福州 350002)

摘 要: 采用 GIS 技术对格氏栲天然林土壤有机碳空间分布特征及其影响因素进行研究, 结果表明: 土壤有机碳含量(O)、土壤有机碳密度、土壤有机碳储量均属于中等变异, 且随土层深度的增加而减少, 表层富集现象明显。土壤有机碳含量在 I 层(0 ~ 20 cm)为 32.15 g/kg, 分别是 II 层(20 ~ 40 cm)、III 层(40 ~ 60 cm)的 2.35、4.63 倍, 剖面均值为 17.60 g/kg; 土壤有机碳密度在 I ~ III 层分别为 6.76 kg/m²、3.17 kg/m²、1.74 kg/m², 土壤剖面平均有机碳密度为 11.67 kg/m²。引入泰森多边形替代土壤类型图, 计算得格氏栲天然林土壤有机碳储量为 1.49 × 10⁴ t, I 层、II 层、III 层分别为 8.66 × 10³ t、4.01 × 10³ t、2.20 × 10³ t。土壤有机碳含量和土壤有机碳密度空间分布情况类似: 在西南和东北各有一个高值区, 以 WS-EN 为中线, 西北和东南呈近似对称的条带状分布, 且向两边表现出递减的趋势。相关分析和逐步回归分析表明, 土壤有机碳含量与土壤理化性质相关性均达到极显著水平, 与全氮(TN)、全磷(TP)、水解性氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)显著正相关, 与全钾(TK)、pH、土壤容重(B)显著负相关, 满足 $O = 38.19 + 72.42 TN + 0.04 AN + 54.47 TP - 7.50 pH - 7.04 B$ 。同时分析了地形、土壤理化性质、人为活动等对格氏栲天然林土壤有机碳含量的影响。研究结果可为提高土壤有机碳储量精度、评估格氏栲天然林生态效益及其在区域碳循环中的作用和功能提供参考依据。

关键词: 格氏栲; 土壤有机碳; 泰森多边形; 空间分布

中图分类号: S153

文献标识码: A

全球森林土壤有机碳储量约占森林生态系统碳库的 69% 和全球土壤碳储量的 30%, 其微小的变化将引发温室效应, 在全球碳循环中扮演着源、汇、库的作用^[1-2]。森林土壤有机碳作为稳定长效的碳源物质, 直接影响了土壤肥力和植被生产力, 反映植物群落的空间分布和时间上的演替^[3], 开展森林土壤有机碳库研究有助于理解陆地生态系统碳循环, 土壤与植被演替关系, 如何实现土壤有机碳的稳定及增加碳汇已成为研究热点之一。土壤有机碳受气候、植被、地形及土地利用等因素控制, 是一个高度异质性的区域化变量, 具有尺度效应。全球^[4]、国家^[5]、区域^[6]、省份^[7]尺度上土壤有机碳储量的估

算多基于土壤普查的剖面数据和文献资料, 计算结果差异大。而同一生态系统内部或林分类型等中小尺度土壤有机碳储量研究^[8]并不多见, 但其对理解大尺度条件下土壤有机碳演变机理及提高区域乃至全国土壤有机碳储量估算精度, 具有重要现实意义。

福建三明小湖地区约有 700 hm² 以珍稀濒危植物格氏栲占绝对优势的天然林分, 堪称“世界格氏栲林”, 引起许多学者高度关注, 先后从种群保护生态学、林窗更新动力学^[9-13]等多角度探讨格氏栲种群濒危机制问题, 明确了格氏栲天然林景观破碎化严重、林窗数量增多、断代现象明显、种群数量呈衰退趋势; 尤其在土壤学研究方面^[9,12,14-15], 也较为系

收稿日期(Received date): 2011-04-15; 改回日期(Accepted): 2011-09-30。

基金项目(Foundation item): 福建省自然科学基金重点项目(2008J0008); 教育部博士点基金项目(200803890011); 博士后基金项目(20070410796)。[Supported by the Key Program of Natural Science Foundation of Fujian Province of China, No. 2008J0008; Doctoral Fund of Ministry of Education of China, No. 200803890011; China Postdoctoral Science Foundation, No. 20070410796.]

作者简介(Biography): 刘金福(1966-), 男, 福建永春, 教授、博导, 主要从事森林生态学研究。[Liu Jinfu(1966-), male, Ph.D., Professor, major in forest ecology.] E-mail: fjljf@126.com

统探讨格氏栲天然林的土壤结构与肥力的关系、土壤及根系呼吸、凋落物数量及分解、碳库与养分库等,但多局限于土壤性质测定上,而其空间分布特征及其影响因素方面尚未见报。考虑到天然林转变为次生林将使土壤有机碳下降,由此产生的大气 CO_2 浓度增加所引起的气候变化将影响格氏栲种群生长发育、格氏栲天然林的结构功能和动态演替,土壤有机碳是否为格氏栲种群衰退主要影响因子,并决定其植被的演替趋势,值得探讨。为此,笔者采用 GIS 技术,引入泰森多边形法,系统研究格氏栲天然林土壤有机碳库及其相关问题,为评估格氏栲林的生态效益及其在区域碳循环、碳平衡中的作用和功能提供重要参考依据。

1 研究区概况

格氏栲自然保护区位于福建省三明市莘口乡楼源小湖村,地理坐标为 $26^{\circ}9' \sim 26^{\circ}12' \text{ N}$, $117^{\circ}27' \sim 117^{\circ}29' \text{ E}$ 。地处武夷山脉东伸支脉,低山丘陵地貌,海拔 250 ~ 500 m,最高海拔 604.2 m,属中亚热带季风气候,温暖湿润,年平均气温 19.5°C ,最高气温 40°C ,最低气温 -5.5°C ,年均降雨量 1500 mm。地带性植被属亚热带常绿阔叶林,土壤以红壤、暗红壤为主,偶见紫色土、山地草甸土等。区内植物资源丰富,群落结构稳定,主要保护对象是以格氏栲为主的珍贵稀有树种及与之相伴生的动植物资源、生态环境。研究区乔木层主要由格氏栲 (*Castanopsis kawakamii*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、木荷 (*Schima superba*) 等构成,种群密度为 100 株/ hm^2 ,平均树高约 21.5 m,胸径约 32.4 cm,郁闭度约 0.8;灌木层主要有沿海紫金牛 (*Ardisia lindleyana*)、鼠刺 (*Itea chinensis*)、狗骨柴 (*Diplospora dubia*) 等,盖度约 25%;草本主要有草珊瑚 (*Sarcandra glabra*)、狗脊蕨 (*Woodwardia japonica*)、华山姜 (*Alpinia oblongifolia*) 等,盖度约 65% [12]。

2 研究方法

2.1 土壤有机碳储量估算方法

土壤有机碳密度是指单位面积中某一厚度土层中有机碳的储量;土壤有机碳储量为土壤有机碳密度与面积的乘积,计算公式

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^k H_i B_i O_i (1 - \delta_i) / 100 \quad (1)$$

$$\text{SOC} = \sum_{j=1}^n \text{SOCD}_j S_j \quad (2)$$

式中 SOCD 为土壤有机碳密度 (kg/m^2), k 为土壤层数, H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm), B_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3), O_i 为第 i 层土壤有机碳含量, δ_i 为第 i 层土壤直径 $> 2 \text{ mm}$ 石砾的体积百分数 (%); SOC 为土壤有机碳储量, n 为样本数, S_j 为第 j 个样点的泰森多边形面积。

2.2 泰森多边形

泰森多边形 (Voronoi 图) 是根据离散分布的气象站降雨量计算平均降雨量而提出的一种插值方法。通过构建 Delaunay 三角网,作各三角形边的垂直平分线,并将其依次连接组合而成,具有一个离散点数据对应一个泰森多边形,每个泰森多边形内的点到相应离散点距离最近和泰森多边形边上的点到其两边离散点的距离相等三个特点 [16]。笔者以 86 个样点为发生单元,生成泰森多边形,并由 ArcGIS9.2 自动计算每个多边形面积,替代土壤图中的评价单元。

2.3 样点采集与室内分析

土壤取样按规则网格法 ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) 进行,每个网格内设一个样点,共设 86 个样点。土壤采集分三层,即 I 层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$)、II 层 ($20 \sim 40 \text{ cm}$)、III 层 ($40 \sim 60 \text{ cm}$),共收集土样 258 个,每个样点层均设置 5 个重复,将其充分混合后,取约 1 kg 土样带回实验室。用手持 GPS 定位每个样点,并记录坡度、海拔等立地因子,直径 $> 2 \text{ mm}$ 石砾的体积百分数用天平测定,土壤容重用环刀测定,土壤有机碳含量用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,土壤理化性质测定参照文献《森林土壤分析方法》[17]。采用 GIS 技术建立基于位置的空间属性数据库。

2.4 数据处理

土壤有机碳统计特征值计算、方差分析、相关分析、逐步回归分析均采用 SPSS 17.0 软件;土壤有机碳含量及土壤有机碳密度空间分布图、土壤有机碳储量丰度指数图通过 ArcGIS9.2 软件绘制。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳及其空间分布特征

3.1.1 土壤有机碳含量及其空间分布特征

由全国第二次土壤普查土壤分级标准 [18] 及表 1 可知,土壤有机质均值为 $30.34 \text{ g}/\text{kg}$,属于国家二级水平。土壤有机碳含量在垂直剖面上差异较大,

且随土壤深度的增加而降低,Ⅰ层均值为32.15 g/kg,分别是Ⅱ层、Ⅲ层的2.35、4.63倍,各土层有机碳含量介于(1.83~33.11)g/kg~(12.38~44.99)g/kg间。土壤有机碳含量变异系数随土层深度的增加而增加,依文献[19]中的标准,Ⅰ~Ⅲ层变异系数分别为23.79%、28.67%、59.22%,整个剖面的变异系数为68.18%,均在10%~100%间,属于中等变异。单因素方差分析(ANOVA)和LSD检验表明,各土层有机碳含量差异极显著, F 值为483.75($P < 0.01$)。

运用ArcGIS9.2软件,对0~60 cm土层中有有机碳含量进行Kriging插值得图1,可知土壤有机碳含量在西南(迎客栲、五女拜寿附近)和东北(腾龙阁)各有一个高值区,以WS-EN为中线,西北和东南呈近似对称的条带状分布,且向两边表现出递减的趋势。土壤有机碳含量70%以上介于15.37~21.64 g/kg间,在西北和东南角较低,中部较高,可能与地形(西北、东南高,西南低、中部较平缓)、有水体分布、人为耕作、林下植被灌草异质性高等因素

有关。西北和东南部受人为干扰较为严重,一方面部分格氏栲林被当地居民垦为果园、农田,原始植被遭受破坏,土壤有机碳随地表径流损失,另一方面草灌植物、凋落物等作为有机碳的重要来源被移除,难以得到补充;中部有五木湖、溪等水体分布,土壤含水率高,不利微生物呼吸,有机物等分解受阻,有利土壤有机碳累积,另外良好的植被覆盖不但保护有机碳少受径流影响,而且还能使其得到充分归还。研究区土壤有机碳含量空间分布较为破碎,异质性大,与其较高变异系数相一致。

3.1.2 土壤有机碳密度及其空间分布特征

从表2可知,研究区剖面土壤容重均值为1.18 g/cm³,Ⅰ~Ⅲ层土壤容重差异较小,随土层深度增加而增加,分别为1.08、1.19、1.28 g/cm³。0~60 cm土层内,有机碳密度值介于7.08~18.90 kg/m²,均值为11.67 kg/m²;从各土层看,有机碳密度随深度增加而减少,Ⅰ层最大,为6.76 kg/m²,占整个剖面的57.93%,比Ⅱ层、Ⅲ层高53.11%、74.26%,可能与植物根系及分泌物、土壤微生物活性、凋落物

表1 格氏栲天然林土壤有机碳含量统计特征值

Table 1 The statistic feature value of soil organic carbon content in *C. kawakamii* natural forest

土层	最小值	最大值	均值	OM 均值	标准差	变异系数/%	F
Ⅰ (0 ~ 20 cm)	12.38	44.99	32.15	55.43	7.65	23.79	
Ⅱ (20 ~ 40 cm)	8.09	25.61	13.71	23.64	3.93	28.67	
Ⅲ (40 ~ 60 cm)	1.83	33.11	6.94	11.96	4.11	59.22	
平均(0 ~ 60 cm)	1.83	44.99	17.60	30.34	12.00	68.18	483.75 **

注:OM 为有机质; ** 表示方差分析在0.01水平上显著;有机质和有机碳含量单位均为g/kg。

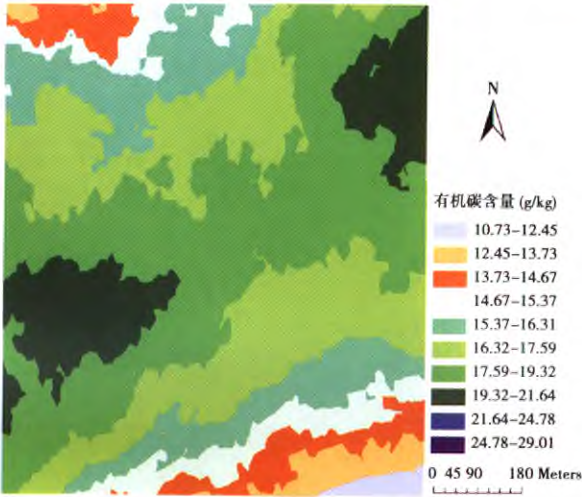


图1 土壤有机碳含量空间分布图
Fig. 1 Spatial distribution map of soil organic carbon content in *C. kawakamii* natural forest

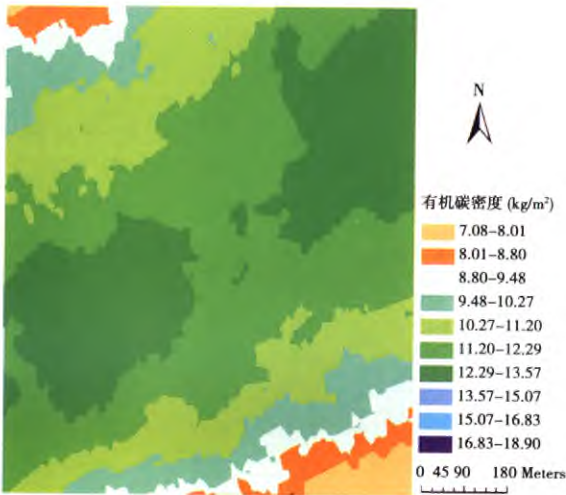


图2 土壤有机碳密度空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution map of soil organic carbon density in *C. kawakamii* natural forest

表2 格氏栲天然林土壤有机碳密度统计特征值

Table 2 The statistic feature value of soil organic carbon density in *C. kawakamii* natural forest

土层	B	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	F
I (0 ~ 20 cm)	1.08	2.99	11.04	6.76	1.86	27.51	
II (20 ~ 40 cm)	1.19	1.66	5.95	3.17	0.94	29.65	
III (40 ~ 60 cm)	1.28	0.41	9.09	1.74	1.11	63.79	
剖面(0 ~ 60 cm)	1.18	7.08	18.90	11.67	2.94	25.19	309.23**

注: ** 表示方差分析在 0.01 水平上显著; 土壤容重单位为 g/cm^3 ; 有机碳密度单位为 kg/m^2 。

分解等对土壤有机碳积累的影响随土壤深度增加而减弱有关。从变异系数看, III 层 (63.79%) > II 层 (29.65%) > I 层 (27.51%), 总变异系数为 25.19%, 属于中等变异。ANOVA 分析与 LSD 检验表明, 不同土层有机碳密度差异极显著, $F = 309.23 (P < 0.01)$ 。

由于研究区土壤容重差异不显著, 土层厚度均取 20 cm, 直径 > 2 mm 石砾的体积百分数均小于 5%, 因此土壤有机碳密度空间分布 (图 2) 与土壤有机碳含量类似, 即西南、东北各有一个高值区, 以此为中线, 向两边呈条带状近似对称分布。约 80% 的土壤有机碳密度值介于 $9.48 \sim 13.57 \text{ kg}/\text{m}^2$, 而 $13.57 \sim 18.90 \text{ kg}/\text{m}^2$ 可忽略不计。研究区三向地带性 (经度、纬度、海拔) 不明显, 可能与采样尺度有关。

3.1.3 土壤有机碳储量

依公式 (2) 可得格氏栲天然林土壤有机碳储量为 $1.49 \times 10^4 \text{ t}$, I 层、II 层、III 层分别为 $8.66 \times 10^3 \text{ t}$ 、 $4.01 \times 10^3 \text{ t}$ 、 $2.20 \times 10^3 \text{ t}$ 。I 层有机碳储量占整个研究区的 58.1%, 表层富集现象明显, 随土层深度

增加而减小 (图 3)。图 4 为土壤有机碳储量 Voronoi 图, 依文献 [6] 将有机碳丰度指数 R 分为 5 级, 可知不同泰森多边形内的土壤对有机碳存储能力高低差异较大。 R 值为 0.61% ~ 0.75%、0.75% ~ 0.87%、0.87% ~ 1.04%、1.04% ~ 1.26%、1.26% ~ 1.62% 的土壤有机碳储量分别占研究区的 12.93%、9.34%、29.16%、29.85%、18.71%, 48.56% 的土壤有机碳储量丰度指数介于 1.04 ~ 1.62, 表明研究区土壤有机碳存储能力总体较强。ANOVA 分析和 LSD 检验表明, 各土层有机碳储量差异极显著, $F = 31.93 (P < 0.01)$ 。

3.2 土壤有机碳的影响因素

由表 3 可知土壤有机碳含量 (O) 与土壤理化性质相关性均达到极显著的水平, 与 TN 、 TP 、 AN 、 AP 、 AK 显著正相关, 相关系数分别为 0.82、0.67、0.76、0.31、0.58; 与 TK 、 pH 、 B (土壤容重) 显著负相关, 相关系数分别为 -0.20、-0.58、-0.48。各土壤理化性质之间的相关性也极显著, 如 TP 与土壤有机碳含量、 TN 、 AN 、 AP 、 AK 呈极显著正相关; 与 pH 、 B 和 TK 呈极显著负相关。为进一步明确土壤有机碳含量

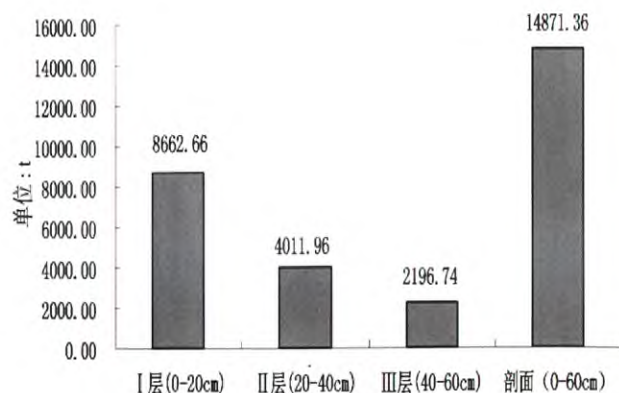


图3 土壤有机碳储量

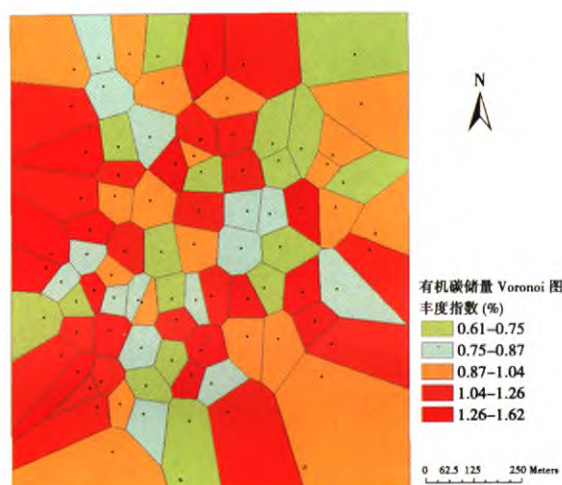
Fig. 3 Reserves of soil organic carbon in *C. kawakamii* natural forest

图4 土壤有机碳储量丰度指数

Fig. 4 Soil carbon enrichment index in *C. kawakamii* natural forest

表3 格氏栲天然林土壤有机碳含量与土壤理化性质相关系数

Tab 3 The correlation coefficient between soil organic carbon content and soil nutrient in *C. kawakamii* natural forest

项目	O	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	B	海拔
TN	0.82**									
TP	0.67**	0.52**								
TK	-0.20**	-0.21**	-0.16*							
AN	0.76**	0.66**	0.61**	-0.04						
AP	0.31**	0.32**	0.22**	-0.05	0.23**					
AK	0.58**	0.45**	0.59**	-0.08	0.61**	0.24**				
pH	-0.58**	-0.42**	-0.46**	0.22**	-0.59**	-0.05	-0.35**			
B	-0.48**	-0.38**	-0.45**	-0.26**	0.09	-0.38**	-0.41**	0.26**		
海拔	0.11	0.28**	0.11	-0.01	-0.17	0.06	0.16	-0.19	0.15	
坡度	0.04	0.01	-0.01	0.18	-0.05	0.02	0.06	-0.03	0.13	-0.08

注: ** . 在 0.01 水平上显著相关, * . 在 0.05 水平上显著相关;TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾;AN 水解性氮;AP 有效磷;AK:速效钾。

与土壤理化性质之间的量化关系,采用逐步回归分析,得回归方程式: $O = 38.19 + 73.88TN + 0.04AN + 54.47TP - 7.50pH - 7.04B$,表明有机碳含量在一定程度上指示土壤结构、养分供应水平和肥力高低。有机碳含量和海拔、坡度相关性不显著,可能与小尺度微生境有关。

4 结论与讨论

4.1 土壤有机碳及空间分布特征

土壤有机碳含量随土壤深度增加而减小,且表层富集现象明显,与大多数研究结果相一致^[7,14,21]。研究区内土壤有机碳含量为 17.60 g/kg,明显高于杨玉盛等^[14] (10.5 ± 0.7 g/kg) 研究结果,可能与土壤有机碳含量空间变异性强、土壤取样数较多、取样点的位置及考虑的因子(海拔、坡度)等有关。土壤有机碳含量在垂直剖面上呈递减规律,与凋落物归还、植物根系的分布及其分泌物等密切相关,而天然林表层凋落物丰富且厚度大,细根密集,蓄积了大量有机碳,随着土壤深度增加,土壤容重增大,不利根系生长及表层有机质向下淋溶迁移,土壤微生物、植物根系等相应减少,致使土壤有机碳含量明显降低。

格氏栲天然林平均土壤有机碳密度为 11.67 kg/m²,其值低于福建省(14.52 kg/m²)^[20] 和亚热带、热带常绿阔叶林(12.40 kg/m²)^[5],高于中国(10.53 kg/m²)^[4],在于福建和亚热带、热带常绿阔叶林土壤有机碳密度是以 1 m 的土层厚度(本研究仅取 60 cm)进行估算,且土壤有机碳密度随土层厚

度增加而增加,故格氏栲天然林平均土壤有机碳密度的实际值应大于实测值;中国总体森林覆盖率较低,土地利用/植被覆盖变化的范围和速率大,不利有机碳积累,而格氏栲天然林地处中亚热带,气候湿润多雨,植被覆盖率和生产力高,土壤有机碳输入量大,即本研究区土壤有机碳密度高于全国平均值。不同土壤类型有机碳密度差异较大,研究区内暗红壤有机碳密度高于福建省赤红壤(7.92 kg/m²)^[20] 和中国东部地区红壤(8.86 kg/m²)^[4]。不同植被类型下的土壤有机碳密度差异也较大,本研究结果高于中亚热带格氏栲人工林(10.59 kg/m²)、福建柏人工林(10.28 kg/m²)、杉木观光木混交林(8.03 kg/m²)和杉木人工林(6.86 kg/m²)^[14],可为选择适宜更新或造林树种提供参考依据。三明格氏栲自然保护区以格氏栲天然林占绝对优势,其土壤有机碳的动态变化将极大地影响其森林的碳源汇功能,在区域碳循环中占有重要地位,因此加强格氏栲天然林生态系统的保护、更新、恢复与重建,对稳定土壤碳库、提高土壤肥力具有重要作用和意义。

格氏栲天然林土壤有机碳含量在西南、东北方向上较高(见图 1),与其坡度小、变化平缓有关,地势平坦有利水土保持、凋落物存储,促进土壤有机碳的累积;另外,WS-EN 向有五木湖、溪流等水体分布,符合土壤有机碳含量与土壤含水率呈正相关^[21] 的规律,也使其保持在较高水平。西北、东南方向受人为干扰严重,部分格氏栲天然林转变为耕地、果园等土地利用方式,林下植被遭受破坏,土壤表层凋落物输入减少,林地生产力下降,不利于碳的积累;另

一方面裸露的地表易造成水土流失,增强土壤呼吸、导致深层土壤可溶性碳和有效养分丧失,从而制约森林物质生产及其演替进程,使有机碳输出大于输入,即土壤有机碳含量较低。整个研究区土壤形成和发育过程类似,母质变化微小,土壤有机碳含量分布多集中于 15.37 ~ 21.64 g/kg 间,而介于 21.64 ~ 29.01 g/kg 可忽略不计。

泰森多边形是一种基于离散分布的点计算其有效影响范围的方法,从土壤有机碳丰度指数 Voronoi 图(图 4)可直观反映每个取样点土壤有机碳的存储能力及影响范围,为小尺度土壤有机碳储量研究提供新方法。森林土壤表层有机碳储量高,占研究区(0 ~ 60 cm)的 58.1%,对碳储量贡献大,但稳定性较差,易受人为活动的干扰,因此开展生态旅游、景观改造等活动时应注意表层植被的保护,以维持土壤碳库的稳定性;另一方面,41.9% 的土壤有机碳储量(6.21×10^3 t)存储于 20 ~ 60 cm 土层中,表明深层土壤有机碳蓄存能力亦不容忽视。

4.2 土壤有机碳的影响因素

土壤有机碳是进入土壤的植物残体量以及在土壤微生物作用下分解损失的平衡结果,受土壤理化性质、地形、植被及林业经营实践等因素控制^[22]。土壤容重影响土壤的通气性和孔隙度、较高的土壤容重不利根系生长和发育;土壤 pH 值过低($\text{pH} < 5.5$)会抑制微生物活性,使有机碳分解速率下降^[21]。研究区内 pH 均值 4.43,偏酸性,有利于有机碳积累。土壤有机碳含量(O)与土壤容重(B)、pH 显著负相关,与 TN 、 TP 、 AN 、 AK 、 AP 显著正相关,回归方程为 $O = 38.19 + 72.42 TN + 0.04 AN + 54.47 TP - 7.50 \text{ pH} - 7.04 B$,表明 O 一定程度上可作为土壤结构及其土壤肥力水平的衡量指标。

Ritchie^[23]等研究表明坡度显著影响土壤有机碳含量。海拔是环境因子的综合体现,通过制约植被类型和植被生产力,影响输入土壤的有机物质量;通过土壤温度、水热等条件影响微生物对有机质的分解和转化^[21]。但本研究区内土壤有机碳含量与海拔、坡度相关性不明显,可能与研究区成土母质、气候和植被类型较为均质,林分结构、光温水热和生物活动等差异弱化了海拔、坡度对土壤有机碳含量的影响有关。

土壤有机碳储量估算至今仍然存在不确定性,主要受到土壤自身结构复杂,空间变异性大;估算方法、研究尺度、土壤参数标准等方面不统一;缺乏从

生态系统角度进行估算,等影响。可见,从多尺度系统探讨根系、凋落物、土壤动物群落对土壤碳汇的贡献,以及从空间异质性角度探讨不同估算方法对有机碳储量影响,值得进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304: 1623 - 1627
- [2] Hua Zheng, Zhiyun Ouyang, Weihua Xu, et al. Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255: 1113 - 1121
- [3] Su Jing, Zhao Shiwei, Ma Jidong, et al. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia Region in loess plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(3): 50 - 52 [苏静,赵世伟,马继东,等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 50 - 52]
- [4] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533 - 544 [王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533 - 544]
- [5] Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in china [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 688 - 699 [解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 688 - 699]
- [6] Ni Jiupai, Yuan Daoxian, Xie Deti, et al. Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distributions in karst area, Chongqing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6292 - 6301 [倪九派,袁道先,谢德体,等. 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6292 - 6301]
- [7] Huang Congde, Zhang Jian, Yang Wanqin, et al. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1217 - 1225 [黄从德,张健,杨万勤,等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217 - 1225]
- [8] Zhao Anjiu, Hu Tingxing, Chen Xiaohong. Influence of subtropical forest ecosystems types on spatial heterogeneity of surface soil organic carbon [J]. Journal of natural resources, 2009, 24(10): 1748 - 1756 [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[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1748 - 1756]
- [9] Liu Jinfu, Hong Wei. Study on fractal feature of soil fertility under different original Castanopsis Kanakamii Stands [J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(6): 565 - 570 [刘金福,洪伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 565 - 570]
- [10] Liu Jinfu, He Zhongsheng, Hong Wei, et al. Conservation ecology of endangered plant Castanopsis kawakamii [J]. Journal of Beijing

- Forestry University, 2011, 33 (5): 136 - 143 [刘金福, 何中声, 洪伟, 等. 濒危植物格氏栲保护生态学研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 136 - 143]
- [11] Liu Jinfu, Hong Wei, Pan Dongming, et al. A study on multidimensional time series of individual age's measurement in *Castanopsis kawakamii* population [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 232 - 236
- [12] Liu Jinfu, Hong Wei, Wu Chengzhen. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1173 - 1178 [刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1173 - 1178]
- [13] He Zhongsheng, Liu Jinfu, Hong Wei, et al. Study on the seedlings competition intensity in a mid-subtropical *Castanopsis Kanakamii* nature forest [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2011, 19(3): 230 - 236 [何中声, 刘金福, 洪伟, 等. 亚热带格氏栲天然林幼苗竞争强度研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 230 - 236]
- [14] Yang Yusheng, Liu Yanli, Chen Guangshui, et al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 1 - 8 [杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机C含量及分配[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 1 - 8]
- [15] Yang Yusheng, Chen Guangshui, Xie Jinsheng, et al. Soil heterotrophic respiration in native *Castanopsis kawakamii* forest and monoculture *Castanopsis kawakamii* plantations in subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 53 - 61 [杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 53 - 61]
- [16] Yan Qingwu, Bian Zhengfu. Study on distribution patterns of settlements based on GIS - SDA [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, 24(3): 57 - 61 [闫庆武, 卞正富. 基于GIS - SDA的居民点空间分布研究[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(3): 57 - 61]
- [17] Zhang Wanru, Yang Guangying, Tu Xingnan, et al. Forest soil analysis [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000 [张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000]
- [18] Office for the Second National Soil Survey of China. China soil species blog [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1993 [全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京: 农业出版社, 1993]
- [19] Si Jianhua, Feng Qi, Yu Tengfei, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Eji na oasis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(12): 2600 - 2606 [司建华, 冯起, 鱼腾飞, 等. 额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2600 - 2606]
- [20] Wang Yixiang, Weng Boqi. Estimate of soil organic carbon density and its stock in Fujian Province [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 20(1): 42 - 45 [王义祥, 翁伯琦. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算[J]. 福建农业学报, 2005, 20(1): 42 - 45]
- [21] Wu Xiaogang, Guo Jinping, Yang Xiuyun, et al. Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3009 - 3019 [武小刚, 郭晋平, 杨秀云, 等. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3009 - 3019]
- [22] Zhang Yong, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Factors affecting variation of soil organic carbon density in Yunnan - Guizhou - Guangxi Region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 526 - 531 [张勇, 史学正, 于东升, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 526 - 531]
- [23] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, et al. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape [J]. *Geomorphology*, 2007, 89(1/2): 163 - 171

Spatial Distribution and Influencing Factors of Soil Organic Carbon in Mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* Natural Forest

LIU Jinfu^{1,2}, SU Songjin^{1,2}, HE Zhongsheng^{1,2}, HONG Wei^{1,2}, WU Caiting^{1,2},
DONG Jinxiang^{1,2}, LI Lizhen¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, China)

Abstract: GIS technology was applied to study the spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon in the mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest of Sanming City, Fujian Province. The results showed that the variation of organic carbon content (O), density and reserve of soil all are moderate, descending with the increase of soil depth and mostly aggregating in layer I (0 ~ 20 cm). The soil organic carbon content in layer I

was 32.15 g/kg, 2.35, 4.63 times than the layer II (20 ~ 40 cm) and layer III (40 ~ 60 cm) respectively, and the entire profile was 17.60 g/kg. The soil organic carbon density layer I ~ III were 6.76 kg/m², 3.17 kg/m² and 1.74 kg/m² respectively, the average soil organic carbon density was 11.67 kg/m². Soil organic carbon reserve in *C. kawakamii* National Forest Park stored at 0 ~ 60 cm was about 1.49×10^4 t, layer I, II, III were 8.66×10^3 t, 4.01×10^3 t, 2.20×10^3 t respectively, which were calculated with voronoi. Soil organic carbon content and density have similar spatial distribution in southwest and northeast, which both have a high value area, along with the direction of WN - ES. They emerged stripe distribution, regularly decreasing from WS - EN line to northwest and southeast respectively. The results of correlation analysis and stepwise regression analysis showed that soil organic carbon content associated with soil physicochemistry properties, reaching a significant level, and were positively correlated with total nitrogen, total phosphorus, hydrolyzable nitrogen, available phosphorous, available potassium, negatively correlated with the PH, total potassium and soil bulk density, and can be further described by the formula: $O = 27.77 + 37.88 TN + 0.05 AN + 59.69 TP - 7.28 pH - 7.04 B$. The effects of topography, soil physicochemistry properties and human disturbance on soil organic carbon in *C. kawakamii* forest were also analyzed. All these results may be available for enhancing the precision of soil organic carbon reserve, assessing eco-efficiency of the *C. kawakamii* natural forest and its roles and functions in regional carbon cycle.

Key words: *Castanopsis kawakamii* forest; soil organic carbon; Voronoi; spatial distribution

封面照片说明:岷江上游干旱河谷

岷江上游干旱河谷区位于四川省阿坝藏族羌族自治州东部,大地构造地貌上属青藏高原与四川盆地的过渡地带,为横断山区东北缘。区内的地质构造主要为龙门山断裂带,新构造运动强烈,地震活跃,以高山峡谷地貌为主,岭谷相对高度达 1 000 ~ 3 000 m。在这种特殊地质地貌以及大气环流的共同作用下,焚风效应显著,河谷地带年降雨量最低的不足 500 mm,蒸发量却高达 1 340 mm 左右,并且风大风频。受这种地质地貌和气候条件控制,在河谷地带发育了典型的干旱河谷灌丛,即灌丛多由带刺的灌木、小灌木、半灌木或小半灌木构成,生长的草本亦多为耐旱种类。岷江上游以茂县飞虹乡及附近为干旱河谷的核心区,干旱河谷景观最为典型。照片即为茂县飞虹乡一带的岷江干旱河谷。

(嘉 益)

作者: [刘金福](#), [苏松锦](#), [何中声](#), [洪伟](#), [吴彩婷](#), [董金相](#), [黎丽珍](#), [LIU Jinfu](#), [SU Songjin](#), [HE Zhongsheng](#), [HONG Wei](#), [WU Caiting](#), [DONG Jinxiang](#), [LI Lizhen](#)

作者单位: [刘金福, 苏松锦, 何中声, 洪伟, 吴彩婷, 董金相, LIU Jinfu, SU Songjin, HE Zhongsheng, HONG Wei, WU Caiting, DONG Jinxiang \(福建农林大学林学院, 福建福州350002; 福建省高校生态与资源统计重点实验室, 福建福州350002\)](#), [黎丽珍, LI Lizhen \(福建农林大学林学院, 福建福州, 350002\)](#)

刊名: [山地学报](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [Journal of Mountain Science](#)

年, 卷(期): 2011, 29(6)

被引用次数: 1次

参考文献(23条)

1. Lal R Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[外文期刊] 2004
2. Hua Zheng; Zhiyun Ouyang; Weihua Xu Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China 2008
3. 苏静; 赵世伟; 马继东 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[期刊论文]-[水土保持研究](#) 2005(03)
4. 王绍强; 周成虎; 李克让 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 2000(05)
5. 解宪丽; 孙波; 周慧珍 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[期刊论文]-[土壤学报](#) 2004(05)
6. 倪九派; 袁道先; 谢德体 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[期刊论文]-[生态学报](#) 2009(11)
7. 黄从德; 张健; 杨万勤 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[期刊论文]-[生态学报](#) 2009(03)
8. 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[期刊论文]-[自然资源学报](#) 2009(10)
9. 刘金福; 洪伟 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[期刊论文]-[山地学报](#) 2001(06)
10. 刘金福; 何中声; 洪伟 濒危植物格氏栲保护生态学研究进展[期刊论文]-[北京林业大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(05)
11. Liu Jinfu; Hong Wei; Pan Dongming A study on multidimensional time series of individual age's measurement in *Castanopsis kawakamii* population 2009(04)
12. 刘金福; 洪伟; 吴承祯 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[期刊论文]-[生态学报](#) 2002(08)
13. 何中声; 刘金福; 洪伟 亚热带格氏栲天然林幼苗竞争强度研究[期刊论文]-[热带亚热带植物学报](#) 2011(03)
14. 杨玉盛; 刘艳丽; 陈光水 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机C含量及分配[期刊论文]-[生态学报](#) 2004(01)
15. 杨玉盛; 陈光水; 谢锦升 格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态[期刊论文]-[土壤学报](#) 2006(01)
16. 闫庆武; 卞正富 基于GIS-SDA的居民点空间分布研究[期刊论文]-[地理与地理信息科学](#) 2008(03)
17. 张万儒; 杨光滢; 屠星南 森林土壤分析方法 2000
18. 全国土壤普查办公室 中国土种志 1993
19. 司建华; 冯起; 鱼腾飞 额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[期刊论文]-[生态学杂志](#) 2009(12)
20. 王义祥; 翁伯琦 福建省土壤有机碳密度和储量的估算[期刊论文]-[福建农业学报](#) 2005(01)
21. 武小刚; 郭晋平; 杨秀云 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[期刊论文]-[生态学报](#) 2011(11)
22. 张勇; 史学正; 于东升 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究[期刊论文]-[土壤学报](#) 2009(03)
23. Ritchie J C; McCarty G W; Venteris E R Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape[外文期刊] 2007(1/2)

引证文献(1条)

1. 何中声, 刘金福, 朱德煌, 洪伟, 郑世群, 苏松锦, 吴承祯 林窗对格氏栲天然林更新层物种生态位的影响[期刊论文]-[广西植物](#) 2012(5)