

冯嘉仪, 储双双, 王婧, 等. 华南地区几种典型人工林土壤有机碳密度及其与土壤物理性质的关系[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 83-90.

华南地区几种典型人工林土壤有机碳密度及其与土壤物理性质的关系

冯嘉仪, 储双双, 王婧, 吴道铭, 莫其锋, 高婕, 林佳慧, 曾曙才
(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探讨华南地区桉树 *Eucalyptus urophylla* 人工林等 4 种林分土壤有机碳积累特征, 为森林土壤碳库管理提供理论依据。【方法】以桉树、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、马尾松 *Pinus massoniana* 人工林以及经济林的 0~100 cm 土层土壤为研究对象, 对比分析了 4 种林分类型的土壤有机碳含量和有机碳密度及其垂直分布特征, 并进一步分析土壤有机碳与土壤容重、孔隙度等物理性质的相关性。【结果】4 种林分 0~100 cm 土层土壤有机碳含量为 8.52~11.84 g·kg⁻¹, 有机碳密度为 2.22~3.04 kg·m⁻²; 经济林的土壤有机碳含量和密度显著高于其他林分, 而桉树人工林与杉木、马尾松人工林之间差异不显著; 不同林分 and 不同土层深度之间有机碳含量和密度均表现出中度的变异特征。土壤有机碳含量和密度均随着土层深度的增加而减小, 0~40 cm 土层的有机碳密度占整个剖面的 50% 以上。有机碳密度 (y) 与有机碳含量 (x) 的拟合曲线决定系数和斜率均随着土层深度的增加呈现递增趋势。有机碳含量和密度均与土壤容重呈极显著负相关, 有机碳含量与毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤通气孔隙度呈极显著正相关, 有机碳密度仅与毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈极显著正相关。【结论】与杉木和马尾松人工林比, 桉树人工林并未显著减弱土壤有机碳的积累效果, 有机碳分布主要集中在土壤表层, 土壤容重、毛管孔隙度和通气孔隙度极显著影响林地土壤有机碳积累。

关键词: 土壤有机碳; 垂直分布; 土壤物理性质; 桉树人工林; 杉木人工林; 马尾松人工林; 经济林
中图分类号: S714.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)01-0083-08

Soil organic carbon density and its relationship with soil physical properties of typical plantations in South China

FENG Jiayi, CHU Shuangshuang, WANG Jing, WU Daoming, MO Qifeng, GAO Jie, LIN Jiahui, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of *Eucalyptus* forest and three other stand types in South China on the accumulation of soil organic carbon, and provide a theoretical basis for the management of forest soil carbon pool. 【Method】Four kinds of plantations, including *E. urophylla*, *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations and economic forest, were chosen. Their soil organic carbon content, organic carbon density and the vertical distribution characteristics of organic carbon density in 0–100 cm soil layers were analyzed. The correlations between soil organic carbon and soil physical properties were further analyzed. 【Result】For the 0–100 cm soil layer, the soil organic carbon content of four stands ranged from 8.52 to 11.84 g·kg⁻¹, and the organic carbon density ranged from 2.22 to 3.04 kg·m⁻². Economic forest had the highest soil organic carbon

content and density, and there were no significant differences in soil organic carbon content and density among the plantations of *E. urophylla*, *C. lanceolata* and *P. massoniana*. Soil organic carbon content and density in both different stands and different soil depths showed moderate variability. Soil organic carbon content and density decreased with the increase of soil depth, and the organic carbon density of 0–40 cm soil layer accounted for more than 50% of the whole vertical section. The regression coefficient and slope of organic carbon density (y) and organic carbon content (x) showed an increasing trend with the increase of soil depth. Both organic carbon content and density significantly negatively correlated with soil bulk density. The organic carbon content significantly positively correlated with capillary water-holding capacity, total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity and aeration porosity. The organic carbon density significantly positively correlated with capillary porosity and non-capillary porosity. 【Conclusion】 Compared with *C. lanceolata* and *P. massoniana*, *E. urophylla* plantation did not significantly reduce the accumulation of soil organic carbon. Most soil organic carbon was accumulated in the upper soil layer. Soil bulk density, capillary porosity and aeration porosity are all crucial to soil organic carbon accumulation.

Key words: soil organic carbon; vertical distribution; soil physical property; *Eucalyptus urophylla* plantation; *Cunninghamia lanceolata* plantation; *Pinus massoniana* plantation; economic forest

森林土壤碳库在全球土壤有机碳库所占比例约为 73%，是陆地生态系统最大的有机碳库，具有较强的固碳作用和碳汇能力，在全球碳循环中发挥着不可替代的作用，已成为全球有机碳循环研究的热点之一^[1]。土壤有机碳为植被及微生物提供碳源，还能以 CO₂ 等温室气体的形式释放到大气中^[2-3]。土壤碳库含量巨大，其微小变化会引起全球生态系统中 CO₂ 浓度巨大的变化，在应对全球气候变化和发挥生态服务功能方面的积极作用越来越被广泛关注。大气中 CO₂ 通过植物光合作用固定下来，以凋落物、动植物残体或根系的方式进入到土壤中。林分类型、土地经营利用方式和土壤性质等因素对土壤有机碳含量有直接影响，不同林分类型土壤有机碳存在较大差异^[4]，是研究森林土壤碳库的重要内容。在实施人工造林的过程中，如何选取适宜的树种和合理的经营管理措施尤为重要。

人工林是重要的人工森林生态系统，造林使土地利用方式发生变化，通过造林后植被生物量碳和土壤碳的相互作用，可直接提高陆地生态系统碳汇量。有研究表明，人工林的建造能有效截获和固定大气中的碳，对减缓全球气候变暖具有积极作用^[5]。人工林受人类活动的干扰较为强烈，其土壤有机碳与经营措施密切相关，分布特征尤其值得关注。桉树 *Eucalyptus urophylla*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、马尾松 *Pinus massoniana* 是华南地区重要的人工造林树种。桉树作为世界三大速生树种之一，在我国南方地区种植总面积达 200 万 hm²^[6]，也是广东省速生丰产林的重要树种，因其适应性强、

生长快和轮伐期短等优点^[7]而被广泛种植，种植面积不断扩大，在带来巨大经济效益的同时，其对生态环境的影响也日益成为人们关注的热点^[8-9]。有学者认为桉树林蓄水性差、对林地养分消耗大^[10-11]，同时也有观点指出桉树具有一定的生态系统服务功能如涵养水源、保育土壤、固碳释氧等^[8, 12]。

华南地区是全国的重要林区之一，华南地区森林土壤也是我国重要的碳库，在我国碳汇计量中起着十分重要的作用。本研究选取了华南地区 3 种重要的人工林（桉树林、杉木林、马尾松林）以及在华南地区经营强度较大的经济林等 4 种主要的林分类型为研究对象，对土壤有机碳含量、有机碳密度及其分布特征进行比较分析，以期探讨不同林分类型对土壤有机碳密度的影响，为今后森林土壤碳库管理提供理论参考，也为正确评价桉树对森林土壤碳汇的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

罗定市位于广东省西南部，111°03′08″~111°52′44″E，22°25′11″~22°57′34″N，全市总面积 2 327.5 km²，其中山地面积 873.4 km²，丘陵面积 954.1 km²，平原面积 500.0 km²。地处北回归线南侧，属于亚热带季风气候，春秋两季气温暖和，全年气温偏高，雨量变化幅度较大，干旱及倒春寒灾害较多。日照充足，雨量充沛，全年平均日照率达到 42 %，年平均气温 22.10 ℃，年平均降雨量 1 500 mm。西部、西北部和南部一部分为云开大山

山地, 东面为云雾山山地, 中部、东北部和南部为盆地、丘陵地带, 成土母岩主要以中生代的红色砂岩为主, 地带性土壤为红壤和黄壤。

1.2 样地设置与土壤采集分析

在资料查阅和实地踏查基础上, 选取了罗定市船步镇、分界镇、附城镇、金鸡镇、朗塘镇、连州镇、龙湾镇、罗平镇、泗纶镇和太平镇共 10 个镇进行样地调查和土壤采集, 每个镇相当于 1 次试验重复。在每个镇选取兼具桉树人工林、杉木人工林、马尾松人工林和经济林且 4 种林分紧邻的区域进行土壤调查采样, 要求 4 种林分所在地段海拔高度相近, 土壤母质和土地利用历史相同。在每种林分类型的中央设置 1 个 20 m×20 m 的样地, 开展样地调查, 样地基本特征见表 1。在样地对角线上设置 3 个采样点, 分别挖取 1 个宽 60 cm、深 100 cm 以上的土壤剖面, 按照 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 分为 5 个土层, 由下至上每层均匀采集 1 kg 土壤样品, 将 3 个采样点相同层次的土壤样品混匀并从中采样 0.5 kg 左右, 用于有机碳含量测定。然后, 由上至下逐层采集环刀样品, 用于土壤容重和毛管持水量测定, 并计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和通气孔隙度^[13]。在采集环刀样品的同时, 采集小铝盒样品, 用于自然含水量

测定。自然含水量测定采用酒精燃烧法^[13], 有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法^[13]。

结合本研究的实际情况, 参照辛文杰等^[14]的方法计算各土层的土壤有机碳密度 (SOC_i):

$$SOC_i = C_i \times D_i \times E_i / 100,$$
 (1)

式中: C_i 为第 i 层土壤的有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; D_i 为第 i 层土壤的容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; E_i 为第 i 层土壤的厚度, cm。某一剖面的总有机碳密度 (SOC) 为:

$$SOC = \sum_{i=1}^n SOC_i,$$
 (2)

式中, n 为该剖面的土层数。各土层的土壤有机碳密度占全剖面密度百分比 (R_i) 的计算公式为:

$$R_i = \frac{SOC_i}{SOC} \times 100\%.$$
 (3)

1.3 数据处理

用 SAS 9.2 软件、ORIGIN 9.1 软件进行数据处理和作图。对不同林分类型、不同土层间的土壤有机碳含量和有机碳密度进行方差分析和 Duncan's 多重比较 ($\alpha=0.05$), 采用 Pearson 线性相关系数对有机碳含量、有机碳密度与土壤物理性质进行相关分析, 采用一元线性回归方法对有机碳密度与有机碳含量进行回归分析。图表中数据为平均值±标准误。

表 1 样地基本情况
Tab. 1 Basic status of sample plots

林分类型	坡度/(°)	凋落物厚度/cm	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm	林龄/年
桉树人工林	21.7±1.3	6.0±0.9	0.5±0.0	13.8±1.10	12.8±0.9	15±1
杉木人工林	27.3±2.2	5.4±0.6	0.7±0.0	11.3±0.67	12.4±1.3	28±3
马尾松人工林	27.1±1.0	5.1±0.4	0.5±0.0	13.2±0.50	13.4±0.9	24±2
经济林	26.8±2.5	4.0±0.7	0.5±0.1	6.3±1.17	12.4±1.6	23±4

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤有机碳含量

由表 2 可知, 各林分表层土壤 (0~20 cm) 的有机碳含量为 13.14~17.34 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 经济林的有机碳含量最大且显著高于桉树人工林, 桉树、杉木和马尾松人工林三者之间无显著差异。在 20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层, 经济林均大于或显著大于其他 3 种人工林, 3 种人工林之间则均无显著差异。0~100 cm 土层有机碳含量的排序为经济林 (11.84 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>杉木人工林 (9.43 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>马尾松人工林 (9.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>桉树人工林 (8.48 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 经济林的土壤有机碳含量最高, 其他 3 种人工林之间均无显著差异。

不同林分类型土壤有机碳含量的层间分异程度不同, 变异系数在 33.98 %~55.67 %, 属于中度变异。其中, 在表层土壤林分类型之间的变异系数最小 (33.98 %), 变异系数随着土层深度的增加而不断增大。

4 种林分类型土壤有机碳含量均随着土层深度增加而减少, 其中 0~20 cm 土层的土壤有机碳含量均显著高于其他土层, 经济林和桉树人工林 20~40 和 40~60 cm 土层之间无显著差异, 但均显著高于 60~80 和 80~100 cm 土层。杉木人工林和马尾松人工林 20~40 cm 土层的土壤有机碳含量显著高于 40~60、60~80 和 80~100 cm 土层。同一林分不同土层有机碳含量变异系数介于 46.13%~58.65%, 属于

表 2 不同林分类型土壤有机碳含量¹⁾

Tab. 2 Soil organic carbon contents of different forest types

土层深度/cm	土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹)				变异系数/%
	桉树人工林	杉木人工林	马尾松人工林	经济林	
0~20	13.14±0.79aB	14.77±1.2aAB	15.74±1.15aAB	17.34±1.19aA	33.98
20~40	9.39±0.78bB	10.42±0.64bB	11.10±0.92bB	13.66±1.23bA	38.56
40~60	8.33±0.77bB	7.82±0.62cB	7.04±0.70cB	12.07±1.01bA	43.14
60~80	6.18±0.53cB	7.09±0.55cAB	6.32±0.60cB	8.43±0.93cA	45.25
80~100	5.56±0.45cB	7.06±0.99cAB	5.81±0.58cB	7.68±1.10cA	55.67
0~100	8.52±0.39B	9.43±0.46B	9.20±0.50B	11.84±0.63A	53.32
变异系数/%	50.57	51.51	58.65	46.13	

1)同列数据后,凡具有一个相同小写字母者表示同一林分不同土层之间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法);同行数据后,凡具有一个相同大写字母者表示同一土层不同林分之间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)

中度变异,马尾松人工林的变异系数最大(58.65%),经济林的变异系数最小(46.13%)。

2.2 不同林分类型土壤有机碳密度

由表 3 可知,各林分表层土壤(0~20 cm)的有机碳密度为 3.29~4.35 kg·m⁻²,在 40~60、60~80 和 80~100 cm 土层,经济林的有机碳密度均显著最大,3 种人工林之间无显著差异。各林分 0~100 cm 土层有机碳密度排序为经济林(3.04 kg·m⁻²)>杉木人工林(2.40 kg·m⁻²)>马尾松人工林(2.38 kg·m⁻²)>桉树人工林(2.22 kg·m⁻²),经济林土壤有机碳密度显著高于其他林分,3 种人工林之间则无显著差异,与有机碳含量的排序分布规律相同。不同林分类型土壤有机碳密度的层间变异系数为 32.77%~56.19%,属于中度变异,分异程度随土层加深而加大。

4 种林分 0~20 cm 土层的土壤有机碳密度均显著高于其他土层,桉树人工林、经济林在 20~40 和 40~60 cm 土层的有机碳密度均显著高于更深的土层,马尾松人工林则表现为 20~40 cm 土层显著高于

更深的土层,而 40~60、60~80 和 80~100 cm 土层之间差异不显著。相同林分土壤有机碳密度随着土层深度增加而减小,变异系数介于 43.16 %~56.07 %,属于中度变异,马尾松人工林不同土层之间的变异系数最大(56.07 %),经济林的变异系数最小(43.16 %)。

不同林分类型土壤各土层有机碳密度占全剖面(0~100 cm)土壤密度的比例如图 1 所示。4 种林分类型表层土壤(0~20 cm)的有机碳密度在整个剖面所占比例最高(28.59 %~32.45 %),分别是 20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层的 1.40~2.11 倍、1.93~2.23 倍、1.85~2.28 倍和 1.26~1.37 倍,可见,土壤有机碳主要汇集在土壤表层,随着土层深度增加而减少,变化逐渐平缓。马尾松人工林有机碳表聚性最明显。4 种林分类型 0~40 cm 土层的有机碳密度均占整个剖面 50% 以上(51.27 %~56.42 %)。

2.3 土壤有机碳密度与有机碳含量的关系

不同土层的土壤有机碳密度(y)与有机碳含量(x)之间的回归分析结果(图 2)表明,决定系数

表 3 不同林分类型土壤的有机碳密度¹⁾

Tab. 3 Soil organic carbon densities of different forest types

土层深度/cm	土壤有机碳密度/(kg·m ⁻²)				变异系数/%
	桉树人工林	杉木人工林	马尾松人工林	经济林	
0~20	3.29±0.17aB	3.60±0.30aAB	3.86±0.27aAB	4.35±0.28aA	32.77
20~40	2.42±0.17bB	2.62±0.17bB	2.85±0.25bAB	3.45±0.33bA	38.42
40~60	2.20±0.18bB	2.04±0.17cB	1.83±0.19cB	3.09±0.25bA	40.49
60~80	1.68±0.13cB	1.95±0.29cB	1.73±0.17cB	2.25±0.23cA	44.09
80~100	1.50±0.11cB	1.80±0.12cB	1.62±0.18cB	2.06±0.25cA	56.19
0~100	2.22±0.09B	2.40±0.12B	2.38±0.12B	3.04±0.15A	50.43
变异系数/%	44.65	51.07	56.07	43.16	

1)同列数据后,凡具有一个相同小写字母者表示同一林分不同土层之间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法);同行数据后,凡具有一个相同大写字母者表示同一土层不同林分之间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)

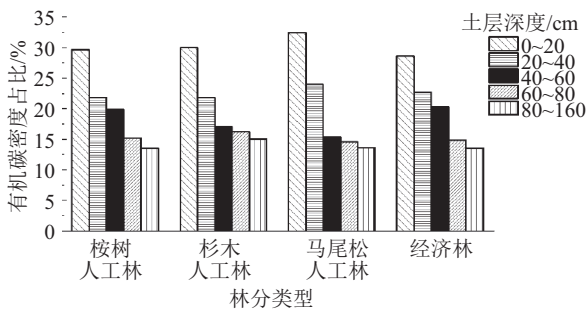


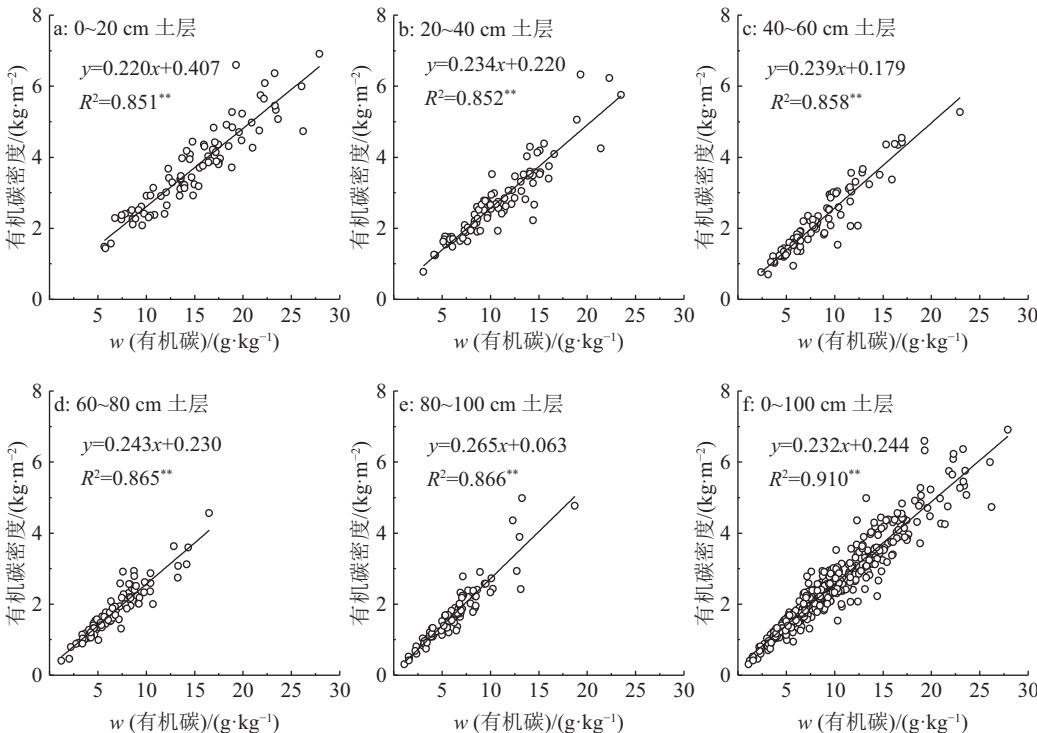
图 1 不同林分类型各土层有机碳密度占全剖面 (0~100 cm) 土壤密度的比例

Fig. 1 Percentages of soil organic carbon density of each soil layer in whole verticle section (0~100 cm) in different forest types

(R^2) 为 0.851~0.866, 有机碳密度与有机碳含量之间的相关性均达到极显著水平。随着土层深度的增加

决定系数越大, 说明土层深度越浅有机碳密度受有机碳含量以外的因素影响越大, 而土壤深度越深, 有机碳密度受有机碳含量的影响越大。

有机碳密度与有机碳含量的拟合曲线斜率随着土层深度的增加呈现递增趋势 (图 2), 而截距则在 0~60 cm 土层随之递减。随着土层深度的增加, 有机碳密度受有机碳含量影响的变化幅度是逐渐增大的, 有机碳含量每增加 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层有机碳密度分别增加 0.220、0.234、0.239、0.243 和 $0.265\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。底层土壤的稳定性更好, 更有利于土壤有机碳的贮存^[15], 除了表层土壤对有机碳汇聚具有重要作用外, 土壤深处有机碳的积累对增加林地土壤有机碳储量同样十分关键。



“***”表示 0.01 水平上显著相关 (Pearson 法)

图 2 不同深度土壤有机碳密度与有机碳含量的关系

Fig. 2 Relationship between organic carbon density and organic carbon content in soil at different depth

2.4 土壤有机碳与土壤物理性质的相关性

2.4.1 土壤有机碳含量与土壤物理性质的相关性

由表 4 可知, 各林分类型的土壤有机碳含量与土壤容重之间均表现为极显著负相关, 与总孔隙度和毛管孔隙度之间均表现为极显著正相关。综合 4 种林分类型来看, 土壤有机碳含量与容重呈极显著负相关, 与土壤毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及通气孔隙度均呈极显著正相关。

马尾松人工林的土壤有机碳含量与土壤物理

<http://xuebao.scau.edu.cn>

性质的相关性最强, 与所有物理性质之间均有显著或极显著的相关关系, 经济林则除了毛管持水量外, 与其他 6 个土壤物理性质指标均存在极显著相关性。桉树人工林和杉木人工林表现较为一致, 除自然含水量、毛管持水量和非毛管孔隙度外, 与其他 4 个指标的相关性均达极显著水平。

2.4.2 土壤有机碳密度与土壤物理性质的相关性

土壤有机碳密度与土壤物理性质的相关性较有机碳含量与土壤物理性质之间的相关性弱 (表 5), 综

表 4 各林分土壤有机碳含量与土壤物理性质的相关性¹⁾

Tab. 4 Correlations between soil organic carbon content and soil physical properties in different stands

林分类型	容重	自然含水量	毛管持水量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	通气孔隙度
桉树人工林	-0.544**	0.142	0.107	0.371**	0.544**	0.174	0.577**
杉木人工林	-0.291**	-0.003	0.176	0.332**	0.291**	0.091	0.310**
马尾松人工林	-0.317**	0.202*	0.226*	0.257**	0.317**	0.195*	0.206*
经济林	-0.769**	0.461**	0.078	0.705**	0.769**	0.585**	0.398**
综合	-0.408**	0.087	0.108**	0.272**	0.408**	0.131**	0.355**

1) “*” 和 “**” 分别表示 0.05 和 0.01 水平上显著相关(Pearson 法)

表 5 各林分土壤有机碳密度与土壤物理性质的相关性¹⁾

Tab. 5 Correlations between soil organic carbon density and soil physical properties in different stands

林分类型	容重	自然含水量	毛管持水量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	通气孔隙度
桉树人工林	-0.333**	-0.023	0.069	0.172	0.333**	0.015	0.471**
杉木人工林	-0.069	-0.136	0.094	0.020	0.069	-0.074	0.118
马尾松人工林	-0.110	0.079	0.130	0.074	0.110	0.086	0.042
经济林	-0.665**	0.404**	0.057	0.622**	0.665**	0.525**	0.324**
综合	-0.193**	-0.062	0.054	0.074	0.194**	-0.025	0.257**

1) “**” 表示 0.01 水平上显著相关(Pearson 法)

合所有林分类型来看,土壤有机碳密度与土壤容重之间表现为极显著负相关,与土壤毛管孔隙度和通气孔隙度之间表现为极显著正相关,与自然含水量、毛管持水量、总孔隙度和非毛管孔隙度的相关性不显著。

经济林的土壤有机碳密度与物理性质的相关性最强,除毛管持水量外,土壤有机碳密度与其他 6 个土壤物理性质指标均存在极显著的相关性。桉树人工林的土壤有机碳密度与土壤容重、毛管孔隙度和通气孔隙度均存在极显著的相关性。杉木人工林和马尾松人工林的土壤有机碳密度与所有土壤物理性质指标均不存在显著的相关关系。

3 讨论与结论

3.1 林分类型和经营管理措施对土壤有机碳分布的影响

土壤有机碳含量是土体含碳丰富度的最直接表征^[16]。植被类型对土壤有机碳的影响主要通过枯落物的质和量及根系作用完成,由于林下枯落物以及灌木和草本的种类等不同因素的影响,不同林分类型土壤有机碳分布也有所差异^[14, 17]。不同的土地利用方式和经营管理措施会对土壤有机碳含量和组分产生重大的影响^[18-19]。本研究中经济林的土壤碳汇作用最为显著,这与王海稳等^[20]的研究结果相似。经济林对养分的需求较高,需要较大的人为投入,农户不定期会施用有机肥以提高经济林产量。有机肥自身含有的有机碳对提高土壤有机碳含量

具有显著作用,增加有机质的输入,有利于土壤微生物群落发展,可提高土壤微生物对有机碳的利用率,从而增加有机碳积累^[21-22]。施肥有利于土壤有机碳及有机碳各组分含量的增加^[23],通过恰当的肥料并配合合理的施肥方式能更好地发挥森林土壤的碳汇功能和固碳效益,施用有机肥、推行秸秆还田及种植绿肥均可显著提高土壤碳库管理指数^[24]。由此可见,适当的人类活动干扰对森林土壤截存有机碳起到了积极的作用。经济林产业是我国林业产业的主体^[8, 25],广东省是我国经济林的重要分布区,经济林在产生经济效益的同时,对森林土壤的碳汇作用也是十分重要的。

桉树、杉木和马尾松人工林的表层土壤(0~20 cm)有机碳含量分别为 13.14、14.77 和 15.74 g·kg⁻¹,有机碳密度分别为 3.29、3.60 和 3.86 kg·m⁻²,均比中国主要人工林土壤有机碳研究中的数据要低^[26],但含量分布的大小趋势一致,差异性均不显著,这可能主要是由于粤西地区地处亚热带,高温天气较多,微生物活动较强,所以不利于土壤有机碳的储存^[27-28]。

有研究表明桉树人工林的土壤有机碳密度在广东省内略高于马尾松和杉木人工林^[29],在全国区域内仅显著低于落叶松 *Larix gmelinii* 人工林,与杉木、马尾松和毛竹 *Phyllostachys heterocycla* ‘Pubescens’ 人工林差异不显著^[26],而桉树人工林在广西地区的碳吸存能力则明显高于其他造林树种人工林^[30]。本文中桉树人工林土壤有机碳含量和密

度与杉木人工林和马尾松人工林差异不显著, 这进一步表明与种植杉木和马尾松相比, 种植桉树并未显著降低土壤有机碳含量, 同时也表明在土壤碳汇方面, 桉树可能与其他速生树种具有相类似的生态效益。

3.2 土壤有机碳的垂直分布特征

本研究中, 4 种林分类型土壤有机碳含量与有机碳密度均表现出相似的规律, 呈现出随着土壤深度的增加而不断减小的趋势, 这与前人研究结果^[31-32]一致。一方面可能由于植被凋落物分解后所形成的有机碳首先进入土壤表层, 因而表现出明显的表聚作用^[33], 另一方面可能是由于植物根系对森林土壤表层的有机碳积累起到了十分重要的作用^[34], 随着土壤深度的增加, 深层土壤有机碳含量受到生物的作用和影响较小, 因而有机碳积累较少。本研究中马尾松人工林土壤有机碳的表聚作用最强, 与马姜明等^[16]的研究结果一致, 这可能与样地中马尾松人工林植被相对丰富、凋落物层和腐殖质层较厚有关, 大量的枯枝落叶在地表形成了一个覆盖层, 对土壤有机碳的积累起到积极的作用, 因此浅层土壤的有机碳积累较多。

本研究中, 土壤有机碳分布在不同土壤深度上的垂直变化幅度较小, 0~20 和 0~40 cm 土层的土壤有机碳储量分别占整个剖面的 28.59% 和 51.27%, 与粤东北山区的数据结果相近 (35.53% 和 55.17%)^[35], 但远低于秦岭 (46.14% 以上和 73.31% 以上)^[36]、重庆缙云山 (49.85 以上和 82.65% 以上)^[37]、大兴安岭 (0~10 cm 土层有机碳储量占整个剖面 84.70% 以上)^[38]和长白山 (0~40 cm 土层有机碳储量占整个剖面 80% 以上)^[39]。这可能是由于粤西地区水热条件较好, 在林木生长季节气温较高, 雨量丰沛, 使淋溶作用增强和分解速度加快, 这一方面加速了林木凋落物的分解过程和输入速率, 将表层土壤中的有机碳溶解并转移到下层, 另一方面在雨水冲刷过程中部分土壤有机碳被矿化, 以 CO₂ 的形式释放到大气中, 使土壤有机碳总量减少^[40]。

3.3 土壤有机碳的影响因子

本研究发现, 土壤有机碳含量和密度均与容重呈极显著负相关关系, 与毛管孔隙度和土壤通气孔隙度呈极显著正相关关系, 而土壤有机碳含量和密度与土壤物理性质的相关关系在各林分中表现不一, 说明受林分凋落物的组成差异和人为干扰程度差异的影响, 土壤物理性质对土壤有机碳的影响是由多种因素共同作用的结果。土壤物理性质对凋落物分解、有机碳的矿化速率和有机碳组分具有重要

影响, 从而间接影响了土壤有机碳的积累。

本研究结果表明, 土壤容重、毛管孔隙度和通气孔隙度极显著影响林地土壤有机碳含量与密度。土壤容重较高的土壤中, 土壤孔隙度较低, 土壤透水性和通气性差, 不利于植物根系生长和土壤微生物生存, 从而影响土壤有机碳积累。表层土壤容重降低会使孔隙度增大, 会促进土壤中的有机碳在表层富集^[41], 随着土层深度的增加容重相应增加, 植物根系数量减少, 有机质积累量减少。土壤的毛管孔隙度则对土壤通气性、透水性以及根系在土壤中的伸展程度有直接影响, 在土壤理化性质和土壤微生物活性等方面也发挥重要的作用^[42]。土壤通气孔隙度是衡量通气性能的指标, 土壤通气孔隙度越大越有助于凋落物分解转化为有机碳, 利于有机碳积累。因此, 可考虑采取相关措施改善土壤物理性质, 使营养物质更好地输入到土壤中, 促进植物根系生长和有机质积累, 从而提高森林土壤碳汇功能。

参考文献:

[1] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[2] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecol Appl, 2000, 10(2): 423-436.

[3] LAL R, LOGAN T J, FAUSEY N R. Long-term tillage effects on a Mollic ochraqualf in North-west Ohio:III: Soil nutrient profile[J]. Soil Till Res, 1990, 15(4): 371-382.

[4] 宇万太, 姜子绍, 李新宇, 等. 不同土地利用方式对潮棕壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2760-2764.

[5] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. Science, 2011, 333(6045): 988-993.

[6] 温远光. 桉树生态、社会问题与科学发展[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

[7] 徐英宝, 曾培贤. 广东省商品林 100 种优良树种栽培技术[M]. 广州: 广东科技出版社 2003.

[8] 侯元兆. 科学地认识我国南方发展桉树速生丰产林问题[J]. 世界林业研究, 2006, 19(3): 13-15.

[9] YU F K, HUANG X H, DUAN C Q, et al. Impacts of *Ageratina adenophora* invasion on soil physical-chemical properties of *Eucalyptus* plantation and implications for constructing agro-forest ecosystem[J]. Ecol Eng, 2014, 64: 130-135.

[10] 余雪标, 陈秋波, 王尚明, 等. 人工林地力衰退研究与防治对策[G]//余雪标. 桉树人工林长期生产力管理研究. 北京: 中国林业出版社, 2000.

[11] 温远光, 刘世荣, 陈放. 连栽对桉树人工林下物种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1667-1671.

- [12] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 辛文杰, 苏印泉, 朱铭强, 等. 千阳县不同林分土壤有机碳的分布特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 66-69.
- [15] VON LÜTZOW, M, KÖGEL-KNABNER I, LUDWIG B, et al. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2008, 171(1): 111-124.
- [16] 马姜明, 梁士楚, 杨栋林, 等. 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]. 环境科学学报, 2013, 22(8): 1282-1287.
- [17] 杜有新, 宋祖祥, 何春林, 等. 江西九江地区森林土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 575-579.
- [18] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 416-424.
- [19] 王峰, 翁伯琦, 王义祥. 土地利用方式和经营管理对土壤有机碳库及其组分影响的研究进展[J]. 福建农业学报, 2009, 24(3): 270-278.
- [20] 王海稳, 张金柱, 许中旗, 等. 太行山区不同土地利用方式下土壤碳贮量的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 89-91.
- [21] 张亚杰, 钱慧慧, 刘坤平, 等. 施肥对玉米/大豆套作土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 29-36.
- [22] 赵鑫, 宇万太, 李建东, 等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2203-2209.
- [23] 刘淑霞, 赵兰坡, 刘景双, 等. 施肥对黑土有机无机复合体组成及有机碳分布特征的影响[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(3): 11-15.
- [24] 吴崇书, 谢国雄, 章明奎. 农艺措施与土地利用方式转变对土壤碳库管理指数的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(4): 611-617.
- [25] 胡芳名, 谭晓风, 裴东, 等. 我国经济林学科进展[J]. 经济林研究, 2010, 28(1): 1-8.
- [26] 王大鹏, 王文斌, 郑亮, 等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. 环境科学学报, 2014, 23(4): 698-704.
- [27] WYNN J G, BIRD M I, VELLEN L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls[J/OL]. Global Biogeochem Cycles, 2006, 20(1): 1-12[2017-05-15]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GB002576/epdf>.
- [28] PREGITZER K S, EUSKIRCHEN E S. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age[J]. Global Change Biol, 2004, 10(12): 2052-2077.
- [29] 刘妹媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1981-1985.
- [30] 汪利燕. 桉树人工林生态效应分析[J]. 广西林业科学, 2010, 39(3): 165-167.
- [31] 赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2637-2645.
- [32] 李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 179-187.
- [33] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [34] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164, 169.
- [35] 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[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 243-247.
- [36] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1569-1577.
- [37] 刘楠, 王玉杰, 王毅力, 等. 重庆缙云山典型林分土壤有机碳密度特征[J]. 环境科学学报, 2009, 18(4): 1492-1496.
- [38] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [39] 刘玲, 王海燕, 戴伟, 等. 长白山东部 4 种林分类型土壤有机碳及养分特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 79-85.
- [40] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
- [41] 王群, 尹飞, 郝四平, 等. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3096-3104.
- [42] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 151-153.

【责任编辑 李晓卉】