

余明, 郑新颖, 薛立. 火力楠林地土壤碳和养分储量垂直分布研究 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 77-82.
YU Ming, ZHENG Xinying, XUE Li. Vertical distribution of soil carbon and nutrient storages under a *Michelia macclurei* plantation[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 77-82.

火力楠林地土壤碳和养分储量垂直分布研究

余 明, 郑新颖, 薛 立

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】对 10 年生火力楠 *Michelia macclurei* 人工林不同土层的土壤碳储量及养分储量进行研究, 以了解火力楠人工林的固碳能力和土壤养分状况。【方法】在各标准地内用五点取样法, 沿土壤剖面按 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 分层采集土壤样品。用常规方法测定土壤 pH 以及有机质、全 N、全 P、全 K、碱解 N、有效 P 和速效 K 的含量, 并计算土壤碳储量和养分储量。【结果】林分土壤呈酸性 (pH3.54~3.79)。火力楠林地的土壤碳含量随着土壤深度的增加而下降。火力楠林地各层土壤的全 P 和全 K 含量差异不显著, 全 N、碱解 N、有效 P 和速效 K 含量均随着土层的加深呈现下降的趋势。火力楠林地 0~100 cm 土壤的碳储量为 259.26 t·hm⁻², N、P 和 K 储量分别为 21.50、7.47 和 209.42 t·hm⁻²。此外, 随着土壤深度的增加, 各层土壤的碳储量以及 P、K 储量总体呈现增加的趋势。【结论】火力楠林地的土壤碳储量高于全国平均水平, 说明火力楠林地土壤具有较好的碳汇潜能和改良土壤的能力。深层土壤的碳储量以及 P、K 储量大于表层土壤, 说明表层土壤的固碳能力较低且淋溶侵蚀较为严重。在今后的经营管理过程中, 应注意防治水土流失, 增强土壤表层的固碳能力。

关键词: 火力楠; 人工林; 碳储量; 养分储量; 垂直分布
中图分类号: S718.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0077-06

Vertical distribution of soil carbon and nutrient storages under a *Michelia macclurei* plantation

YU Ming, ZHENG Xinying, XUE Li

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】Carbon and nutrient storages in different soil layers were studied in a 10-years-old *Michelia macclurei* plantation, in order to understand the soil carbon sequestration capacity and nutrient status of the *M. macclurei* plantation. 【Method】Five-point sampling method was used to collect soil samples from 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 and 80–100 cm depth layers. Soil pH, contents of organic matter, total N, total P, total K, alkalized N, available P and rapidly available K were determined by routine methods. Carbon and nutrient storages were calculated. 【Result】Soil under *M. macclurei* plantation was acidic (pH3.54–3.79). Soil carbon content of *M. macclurei* plantation decreased with the increase of soil depth. There was no significant difference in total P and K contents among different soil layers, while the contents of total N, alkalized N, available P and rapidly available K decreased with the increase of soil depth. Soil carbon storage of *M. macclurei* plantation in 0–100 cm depth layer was 259.26 t·hm⁻². The storages of soil N, P and K in 0–100 cm depth layer were 21.50, 7.47 and 209.42 t·hm⁻², respectively. Soil carbon, P and K storages of each layer increased with increasing soil depth. 【Conclusion】Soil carbon storage of *M. macclurei* plantation is higher

收稿日期: 2018-09-04 网络首发时间: 2019-06-25 15:53:41
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190625.0932.028.html>
作者简介: 余 明 (1995—), 女, 硕士研究生, E-mail: 805352412@qq.com; 通信作者: 薛 立 (1958—), 男, 教授, 博士, E-mail: forxue@scau.edu.cn
基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目“广东省生态公益林培育技术推广”(2015-GDTK-07); 广东省林业厅资助项目“韶关市生态公益林碳储量动态估测研究”(粤财农 2017-83 号)

than the average level over all the nation, indicating that the soil in this stand has higher carbon sink potential and ability of improving the soil. There are more soil carbon, P and K storages in deeper layer than in soil surface, indicating poor carbon sequestration capacity and severe leaching erosion in surface soil. It is suggested that in the future management, attention should be paid to prevent soil erosion and enhance the carbon sequestration capacity of surface soil.

Key words: *Michelia macclurei*; plantation; carbon storage; nutrient storage; vertical distribution

火力楠 *Michelia macclurei* 是木兰科含笑属的常绿阔叶大乔木, 为南方重要的乡土珍贵用材和多功能高效益树种, 具有快速生长、少病虫害、强耐火性等特点^[1]。以往对火力楠林地土壤的研究集中于土壤养分^[2-3]、不同坡位的土壤肥力^[1]、土壤微生物量和可溶性 N 特征^[4] 以及土壤特性对 N、P 添加的响应^[5] 等方面。郑路等^[6] 研究了我国亚热带人工林碳储量, 认为火力楠的侧根发达, 根系死亡后被分解转化为土壤中的碳, 有利于提高土壤层的碳储量; 且火力楠发达的根系在土壤中有较强的穿插作用, 能够增加土壤孔隙度和通透性并改善立地条件^[7]; 郑文辉等^[8] 指出, 火力楠的凋落物数量多、分解速率快且养分释放周期短, 能够为土壤提供大量的营养成分; 汪凤林等^[9] 报道, 火力楠和杉木混交能够加快混合凋落物的分解速率, 增加土壤肥力。鲜见关于火力楠林地土壤碳储量、养分储量及其垂直分布特征的报道。本文选取 10 年生火力楠人工林, 研究其土壤碳和养分的垂直分布特征, 以揭示不同土层的碳和养分分配格局, 提供林分尺度的调查数据, 以了解该地实际的林地土壤碳库现状。在华南地区人工林营造过程中, 可以为树种选择、土壤改良及林地生产力提高方面提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于广东省韶关市小坑国家森林公园, 该地属亚热带季风气候, 年均气温 20℃, 年降雨量 1 500~1 600 mm, 雨热基本同季, 土壤类型为砂页岩发育的红壤, 土层较深厚, 呈酸性^[10]。样地为 10 年生火力楠林地, 海拔 272 m, 坡度 44°, 坡向为 NE20°, 林分郁闭度为 0.8, 样地内平均树高和胸径分别为 (9.39±1.83) m 和 (9.31±2.99) cm。火力楠林地 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层的土壤容重分别为 1.074、1.095、1.167、1.225 和 1.330 g·cm⁻³。试验地为 2007 年采伐杉木林后栽种的火力楠林 1.2 hm², 密度 1 667 株·hm⁻², 2017 年 5—6 月对火力楠林进行林地土壤碳储量调查。在林地内选择具有代表性的火力楠林, 遵循试验标准

地与周边环境的一致性原则, 避开林缘带状区域选取规格为 20 m×20 m 的标准样地, 设 3 个重复。火力楠林下主要植被有乌毛蕨 *Blechnum orientale*、黄牛木 *Cratogeomys cochinchinense*、白茅 *Imperata cylindrica*、扇叶铁线蕨 *Adiantum flabellulatum*、玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、海金沙 *Lygodium japonicum*、米碎花 *Eurya chinensis*、银柴 *Aporosa dioica* 和蜈蚣草 *Eremochloa ciliaris* 等。

1.2 试验设计

在各标准地内按梅花形布点, 挖取 5 个宽度适中、深度为 1 m 的标准土壤剖面。沿土壤剖面按 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 分层采集土壤样品。5 个土壤剖面分层混合取样后带回实验室自然风干, 去除杂物后进行研磨, 过筛 (0.25 mm 孔径), 装瓶待测。

用电位法测定土壤 pH, 用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量, 土壤全 N、P 和 K 含量分别用半微量凯氏法、钼蓝比色法和火焰光度计测定, 土壤碱解 N、有效 P 和速效 K 含量分别采用的碱解-扩散法、0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠法和 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[11]。土壤碳储量的计算方法为:

$$A_i = \sum_{i=1}^n (C_i D_i T_i) \times 0.1,$$

式中: A_i 表示第 i 层土壤单位面积碳储量, t·hm⁻²; T_i 表示第 i 层土壤厚度, cm; D_i 表示第 i 层土壤容重, g·cm⁻³; C_i 表示第 i 层土壤的碳质量分数, g·kg⁻¹; 0.1 为单位换算系数^[12]。

1.3 数据处理

不同土层之间的土壤 pH 和土壤养分含量指标用 SPSS 21.0 软件采用 Duncan's 法进行多重比较, 并用 Microsoft Excel 2016 进行分析和作图。

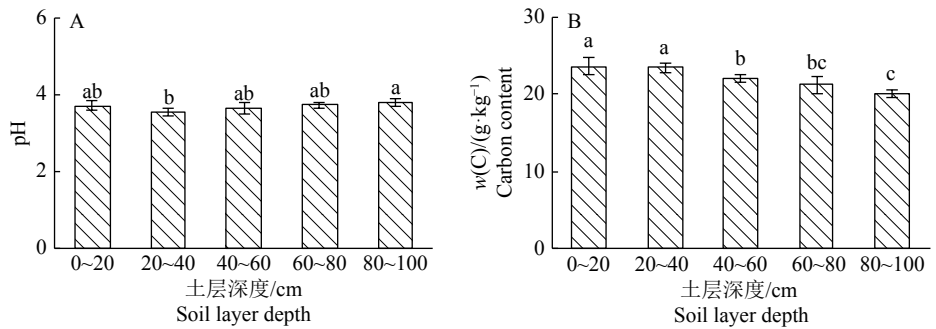
2 结果与分析

2.1 火力楠林地各土层土壤化学性质

由图 1A 可知在 0~100 cm 土层内, 火力楠林地土壤 pH 范围为 3.54~3.79, 且各层土壤 pH 随土层

深度的变化幅度较小, 其中 80~100 cm 土层土壤 pH 最大 (3.79), 20~40 cm 土层土壤 pH 最小

(3.54)。火力楠林地土壤碳含量随着土层的加深而减少 (图 1B)。



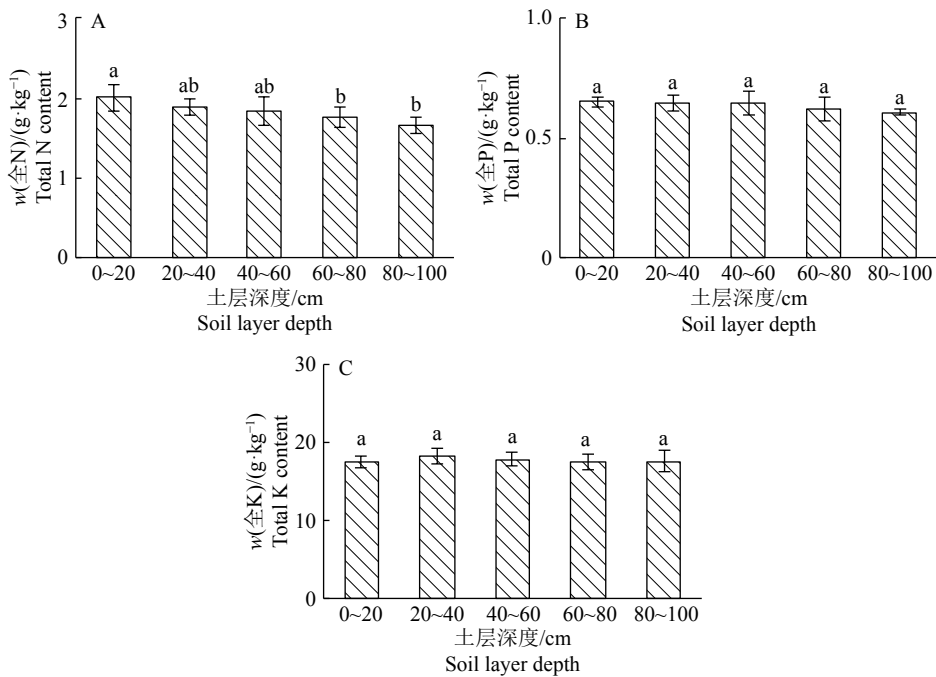
各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
In each figure, different lowercase letters on the bars indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

图 1 不同土层的土壤 pH 和碳含量

Fig. 1 Soil pH and carbon content in different soil layers

多重比较表明, 火力楠林地的土壤全 N 含量随着土壤深度的增加而小幅下降 (图 2A), 80~100 cm 土层土壤全 N 质量分数 ($1.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著

小于 0~20 cm 土层土壤全 N 质量分数 ($2.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P<0.05$)。火力楠林地各层土壤全 P 和全 K 含量差异均不显著 (图 2B, 2C)。



各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
In each figure, different lowercase letters on the bars indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

图 2 不同土层的土壤全量养分含量

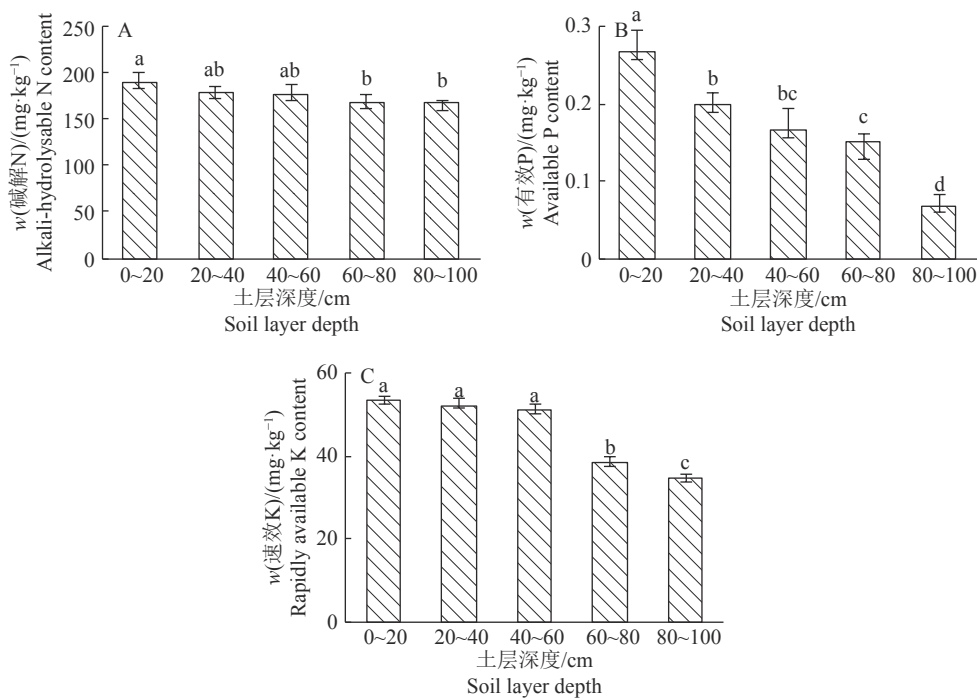
Fig. 2 Contents of soil total nutrients in different soil layers

由图 3A 可知, 火力楠林地各层土壤碱解 N 含量随土层加深而小幅度下降。80~100 cm 土层土壤碱解 N 质量分数 ($166.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著小于 0~20 cm 土层土壤碱解 N 质量分数 ($189.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P<0.05$)。有效 P 含量随土壤深度的增加而显著降低 (图 3B) ($P<0.05$)。土壤速效 K 含量在 0~60 cm 范围内无显著差异, 之后随土层加深而显著降低 ($P<$

0.05) (图 3C)。

2.2 火力楠林地各土层土壤碳储量和养分储量

火力楠林地各土层土壤的碳储量和养分储量及其分配格局见表 1。火力楠林地 0~100 cm 土壤的碳储量为 $259.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随土层深度的增加, 各土层土壤碳储量总体上呈现增加趋势。火力楠林地土壤 P 和 K 储量均随土层的加深而呈现上升的趋



各图中，柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
In each figure, different lowercase letters on the bars indicate significant difference($P<0.05$, Duncan's test)

图 3 不同土层的土壤速效养分含量
Fig. 3 Contents of soil available nutrients in different soil layers

表 1 各土层土壤的碳储量和营养元素储量
Table 1 Soil carbon storage and nutrient storage in different soil layers

土层/cm	碳储量	N 储量	P 储量	K 储量
Soil layers	C storage	N storage	P storage	K storage
0~20	50.82	4.31	1.39	37.69
20~40	51.47	4.17	1.43	40.17
40~60	51.43	4.31	1.49	41.80
60~80	51.99	4.30	1.52	42.84
80~100	53.55	4.40	1.63	46.91
合计 Total	259.26	21.50	7.47	209.42

势。火力楠林地各土层的 3 种营养元素储量的排序均为: K>N>P。

3 讨论与结论

3.1 火力楠林地土壤化学性质

本研究中, 火力楠林地土壤 pH 范围为 3.54~3.79, 属于酸性土壤。华南地区高温多雨, 强烈的淋溶与风化作用引起强烈的脱硅、盐基淋失和富铁铝化过程, 导致土壤 pH 降低^[13]。土壤养分的垂直分布特征受成土母质、气候特征、地形地貌和人为活动等多种因素的影响, 且因养分类型不同而具有显著差异^[14]。贺志龙等^[15]对华北落叶松 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* 土壤养分的研究表明, 随着

土层深度的增加, 土壤总碳、硝态 N、铵态 N、速效 K 含量呈现下降趋势。本研究也发现, 除全 P 和全 K 含量在各土层间差异不显著外, 其余指标均随着土层深度的增加而下降。可能是因为枯落物分解产生的营养元素聚集在土壤的表层, 之后随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散^[16], 呈现明显的表聚性^[17]。且上层土壤通常结构疏松、透气性好, 生物代谢活动旺盛^[18], 有利于土壤养分的转化和积累, 故土壤表层的有机质和含 N 化合物较多。此外, 土壤养分的垂直分布特征还可能受到根系分布的影响。首先, 根系在土壤中的残留物能够被微生物分解转化为营养物质并积累在土壤中, 并且根系的分泌物有利于土壤中难溶养分活化。其次, 根系在土壤中的穿插作用能够增加土壤孔隙度和通透性, 改善土壤物理性质。而植被的根系主要分布在上层土壤中, 且随着土壤深度的增加而逐渐减少, 这导致了土壤碳、N 含量从表层向下层逐渐降低的分布格局^[7]。

本研究中, 火力楠林地土壤全 P 和全 K 含量在各土层间无显著性差异。土壤中的 P 和 K 元素主要来源于森林凋落物分解、降水淋溶和矿物风化, 其含量受成土母质、地形地貌和气候特点等因素的影响^[19]。而矿物风化作用是一个漫长而稳定的过程, 土壤的风化程度在 0~100 cm 土层深度间差异较小, 因此不同土层的土壤全 P 和全 K 含量的垂直

分布特征与土壤深度这一因素相关性不大^[20]。此外, K 素在土壤中的移动性较强, 华南地区雨水充沛, K 素易随水淋失到下层土壤, 导致表层土壤中 K 素的流失^[7]。

3.2 火力楠林地各土层土壤碳储量

土壤有机碳的积累和分解直接或间接地影响着陆地生物碳储量和全球碳库的平衡, 土壤碳储量的垂直分布受枯落物、土壤理化性质和气候变化等因素影响^[21], 土壤碳储量是筛选适宜造林树种的重要指标。在本研究中, 小坑国家森林公园火力楠林地单位面积土壤碳储量为 $259.26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于我国森林土壤平均碳储量 ($193.55\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[22] 以及我国常绿落叶阔叶林土壤碳储量平均值 ($257.57\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[23], 说明火力楠林地土壤具有较好的碳汇储存力及较大的碳汇潜能。有研究表明, 南亚热带地区温暖湿润, 光照充足且雨热同期的气候特点使该地区人工林的生物量和碳积累量相对较高^[24]。本研究位于广东省韶关市, 水热同期且雨量丰富的亚热带季风气候使火力楠人工林具有较高的生产力和枯落物归还量, 从而为土壤输入大量有机碳。此外, 火力楠具有发达的根系, 大量的根系分泌物和根系死亡后被分解转化为有机质和其他营养物质积累在土壤中, 成为土壤碳的来源^[6]。以上均可能是导致本研究中火力楠林地土壤碳储量高于全国平均水平的原因。

单位面积土壤碳储量与碳含量、容重、土层厚度均相关^[25], 许多研究表明, 土壤碳储量随土层深度增加而下降^[26-27]。本研究结果与之不同, 土壤碳储量随着土层深度的增加而总体呈现小幅度上升的趋势。原因可能是深层土壤矿物间的相互作用形成大量稳定的含碳化合物, 增加了对土壤有机质的物理性保护, 使深层土壤中的有机碳具有长周转周期和稳定的性质^[28], 且有机矿物复合体的形成和微生物活跃度的空间异质性等因素使深层土壤有机碳不易被土壤微生物分解^[29], 以上因素导致了土壤碳含量随土层加深而下降的幅度较小, 加之土壤容重随深度增加而增大, 从而导致了各层土壤碳储量呈现增加的趋势。此外, 李斌等^[30]的研究表明, 人为干扰主要作用于浅层土壤且能够显著影响森林土壤的碳汇功能。浅层土壤的有机碳稳定性较弱, 受人类经营活动的影响后容易引起水土流失, 也会导致表层土壤的碳储量减少^[27]。土壤作为一个相对稳定的系统, 其变化较为缓慢, 尤其是土壤有机碳的积累是长期结果^[31], 因而其碳储量随土层深度的变化幅度较小。

3.3 火力楠林地各土层土壤养分储量

土壤养分储量是指单位面积内一定深度的土层中养分的储量, 其变化特征主要取决于土壤系统养分输入和输出的动态平衡过程, 也受降雨、淋溶、矿质化作用和人类的经营等活动等因素的影响^[32]。相关研究表明, 在整个土壤剖面, 土壤碳储量与养分储量具有显著的线性关系, 两者互为影响, 不同养分储量与碳储量的相关性差异较大, 土壤中 N 和碳在积累储存过程中密切相关^[33]。

本研究中, 火力楠林地 3 种土壤营养元素储量排序为: $K>N>P$, 随着土层加深, 火力楠林地土壤 P 和 K 储量均增加。这可能是因为土壤全 P 和全 K 含量在各土层深度无显著性差异, 而土壤容重随土层加深而增大。同时, 土壤中 P 素和 K 素的输入主要受成土母质的影响, 土壤深度对其影响较小^[20]。而深层土壤的呼吸速率较低, 被植物吸收利用的养分较少以及含有大量不易分解的土壤团聚体和有机矿物复合体, 使深层土壤 P 和 K 元素的输出较少, 可能引起其储量升高^[34]。

土壤 N 储量随土层深度的增加呈现波动状态。这可能是因为土壤 N 储量受土壤 N 含量、土壤碳储量、土层厚度和土壤容重等多种因素的共同影响, 其中土壤 N 含量随着土壤的加深而减少, 而土壤碳储量和土壤容重随着土层的加深而提高, 这些共同作用导致了 N 储量的波动。

总体而言, 火力楠林地的土壤养分含量除全 P 和全 K 外, 均随土层的加深而下降, 且土壤 P 含量较低, 今后应适当提高 P 肥的施用量。火力楠林地的土壤碳储量高于全国平均水平, 但深层土壤的碳储量、P 储量和 K 储量大于表层土壤, 这说明火力楠林地土壤具有较好的碳汇潜能, 但表层土壤的固碳能力较低, 且淋溶侵蚀较为严重。今后可选择该树种进行碳汇造林并进一步做好抚育工作, 在经营管理过程中应注意防治水土流失, 增强土壤表层碳的稳定性。

参考文献:

[1] 薛立, 薛晔, 吴敏, 等. 不同坡位火力楠林土壤肥力变化特征 [J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 51-54.
[2] 薛立, 李燕, 屈明, 等. 火力楠、荷木和黎蒴林的土壤特性及涵养水源的研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1623-1627.
[3] 谢腾芳, 薛立, 王相娥, 等. 火力楠和红苞木幼林的土壤肥力研究 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 84-86.
[4] 覃林, 马雪珍, 吴水荣, 等. 南亚热带典型乡土阔叶人工林与桉树人工林土壤微生物量氮及可溶性氮特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(4): 678-684.

- [5] 董喜光, 张越, 薛立, 等. 火力楠林的土壤特性对外源性 N 和 P 的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 104-108.
- [6] 郑路, 蔡道雄, 卢立华, 等. 南亚热带不同树种人工林生态系统碳库特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 110-116.
- [7] 侯晓娟, 李志, 崔诚, 等. 武功山芒根系垂直分布及其与土壤养分的关系 [J]. 草业科学, 2017, 34(12): 2428-2436.
- [8] 郑文辉, 林开敏, 徐昇, 等. 7 种不同树种凋落叶对模拟酸雨缓冲性能的研究 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 104-108.
- [9] 汪凤林, 张月全, 陈爱玲, 等. 不同配比的杉木、火力楠凋落物中土壤酶活性的变化及其对凋落物分解的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(5): 576-583.
- [10] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1464-1471.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-106.
- [12] 葛露露, 孟庆权, 林宇, 等. 滨海沙地不同树种人工林的碳储量及其分配格局 [J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 723-728.
- [13] 方怡然, 李洁, 薛立. 加勒比松林分改造对土壤化学性质和酶活性的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 91-97.
- [14] 杨丹, 项文化, 方晰, 等. 石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征 [J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3452-3462.
- [15] 贺志龙, 张芸香, 郭跃东, 等. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 43-48.
- [16] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 [J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [17] 桑巴叶, 朱玉伟, 陈启民, 等. 准噶尔盆地主要农田防护林的生物量及养分分布特征 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 147-152.
- [18] 文丽, 雷丕锋, 戴凌. 不同林龄樟树林土壤碳氮贮量及分布特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6): 106-111.
- [19] 周永斌, 郭鑫炜, 魏亚伟, 等. 辽西北半干旱区典型人工林土壤 C、N、P 的垂直分布特征 [J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(4): 418-424.
- [20] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 68-76.
- [21] WANG C, HAN G, JIA Y, et al. Insight into the temperature sensitivity of forest litter decomposition and soil enzymes in subtropical forest in China[J]. J Plant Ecol, 2012, 5(3): 279-286.
- [22] 申家朋, 张文辉. 黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律 [J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2746-2754.
- [23] 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 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [24] HE Y, QIN L, LI Z, et al. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China[J]. Forest Ecol Manag, 2013, 295(5): 193-198.
- [25] 季波, 许浩, 何建龙, 等. 宁夏贺兰山青海云杉林土壤碳储量研究 [J]. 生态科学, 2014, 33(5): 920-925.
- [26] XIAO Y H, TONG F C, LIU S R, et al. Response of soil labile organic carbon fractions to forest conversions in subtropical China[J]. Trop Ecol, 2016, 57(4): 691-699.
- [27] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布 [J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5421-5429.
- [28] RUMPEL C, KÖGEL-KNABNER I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. Plant Soil, 2011, 338(1/2): 143-158.
- [29] HICKS P C, CASTANHA C, PORRAS R, et al. The whole-soil carbon flux in response to warming[J]. Science, 2017, 355(6332): 1420.
- [30] 李斌, 方晰, 李岩, 等. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态 [J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4265-4278.
- [31] 杜宝红, 高翠萍, 哈达朝鲁. 不同放牧强度对锡林郭勒典型草原生产力及碳储量的影响 [J]. 水土保持研究, 2018(1): 140-146, 152.
- [32] MCNEILL A, UNKOVICH M. The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems[M]. Berlin: Springer, 2007: 37-64.
- [33] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 子午岭不同林地土壤有机碳及养分储量特征分析 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 130-134.
- [34] 胡亚林, 曾德慧, 姜涛. 科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C、N、P 储量和分配格局 [J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4206-4214.

【责任编辑 李晓卉】