

广州典型森林土壤有机碳库分配特征*

张修玉^{1,3}, 管东生¹, 黎华寿², 黄康有¹, 许振成³

- (1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广东 广州 510640
3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘 要: 对广州2种典型森林土壤碳库分配特征进行了研究, 结果表明: ①两种森林土壤有机碳(SOC)表层含量及其差异程度最高, 随土壤深度增加, 差异逐渐减小。马尾松林SOC密度范围为55.54~66.69 t/hm², 常绿阔叶林SOC范围为84.91~151.16 t/hm²。②两种森林土壤活性有机碳(AOCs)含量为马尾松林<常绿阔叶林; 各种AOC分配比例均随龄级增长而升高。③两种森林土壤的水溶性有机碳(WSC)、易氧化态碳(EOC)和微生物量碳(MBC)含量分别与SOC相关性达到极显著水平, 轻组碳(LFC)与颗粒性碳(POC)含量分别与SOC相关性达到显著水平。④幼龄林与中龄林的土壤碳库大于相应的地上部植被碳库, 而成龄林的土壤碳库小于植被碳库; 土壤碳库占森林生态系统总碳库的比例随着生物量的增长呈下降趋势。

关键词: 土壤有机碳; 活性有机碳; 森林土壤; 广州; 碳库; 分配

中图分类号: Q145; Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)05-0137-06

Allocation Characteristics of Organic Carbon Pool in Typical Forest Soils in Guangzhou

ZHANG Xiuyu^{1,3}, GUAN Dongsheng¹, LI Huashou², HUANG Kangyou¹, XU Zhencheng³

- (1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
3. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Allocation characteristics of soil carbon pool for two types of subtropical forests in Guangzhou were studied in this paper. The following results were obtained (1) Soil organic carbon (SOC) contents and difference were at the highest level in soil surface layers and the difference fell off gradually downwards along the forest soil profile. SOC density of *Pinus massoniana* forest ranged from 55.54 t/hm² to 66.69 t/hm² while that of evergreen broad-leaved forest ranged from 84.91 t/hm² to 151.16 t/hm². (2) Active organic carbon (AOC) contents in soil surface layers were lower in *Pinus massoniana* forest than in evergreen broad-leaved forest. Allocation ratio of all kinds of AOCs increased with the rise of age class. (3) The correlations between water-soluble carbon (WSC) and SOC, easily oxidizable carbon (EOC) and SOC, microbial biomass carbon (MBC) and SOC were all at the most significant level ($P < 0.01$), while between light fraction carbon (LFC) and SOC, particulate organic carbon (POC) and SOC, were all at significant level ($P < 0.05$). (4) Storage of soil carbon was higher than that of forest vegetation carbon pool in young and middle age forests, which was contrary to the conclusion in mature forest. Fur-

* 收稿日期: 2008-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49571064); 广东省自然科学基金资助项目(021740); 中山大学985工程环境与污染控制技术创新平台基金资助项目。

作者简介: 张修玉(1979年生), 男, 博士; 通讯作者: 管东生; E-mail: eesgds@mail.sysu.edu.cn

thermore, the ratio of soil carbon pool/forest ecosystem carbon pool decreased with the rise of biomass.

Key words: soil organic carbon; active organic carbon; forest soil; Guangzhou; carbon pool; allocation

森林土壤作为陆地生态系统最大的碳库,在全球碳循环与收支中占主导地位,其碳源/汇功能在调节碳平衡、减缓大气中 CO₂ 等温室气体浓度上升方面具有不可替代的作用^[1]。然而,随着工业化与城市化的快速发展,森林面积急剧减少,森林生态系统碳储量及其分配状态有所改变。由于森林土壤有机碳库变化比较缓慢,其分配动态对大气 CO₂ 含量的影响更为长远,因此,森林土壤有机碳储量及其分配的动态变化已成为碳循环研究领域的热点^[2-4]。

近年来,对全球或区域性大尺度的森林土壤有机碳库储量研究较多,但由于森林土壤碳库分布受气候、地形和人类干扰等影响呈现地域差异性和时空变异性^[5],因此,其储量和分配特征与样带植被类型及其生物量关系密切。另外,由于土壤碳库中的活性有机碳与大气 CO₂ 相互反馈作用较为频繁,所以土壤活性有机碳分配特征也越来越受到关注^[7]。本文对广州两种典型森林土壤有机碳库及其活性碳库分配特征进行了分析,旨在扩充森林生态系统碳循环的基础资料,并为全球变暖背景下制定减排增汇的环境政策提供参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究样地位于广州市(东经 112°57'~114°3',北纬 22°26'~23°56'),为亚热带季风海洋性气候,年平均气温 21.4~21.8℃,年降雨量 1 689~1 876 mm,土壤为赤红壤。马尾松(*Pinus massoniana*)林样地乔木主要为马尾松,常绿阔叶林样地乔木主要有黄杞(*Engelhardtia chrysolepis*)、锥树(*Castanopsis chinensis*)与荷木(*Schima Superba*)等。两种森林样地的林下植被主要为华南地区常见物种,包括桃金娘(*Rhodymyrtus tomentosa*)、亮叶猴耳环(*Pithecellobium lucidum*)、五角杜荑山(*Maesa japonica*)、大沙叶(*Pavetta hongkongensis* Brem)、九节(*Psychotria rubra*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、水杨梅(*Geum aleppicum* Jacq)、蒲桃(*Syzygium jambos*)、三叉虎(*Evodia lepta*)等。

1.2 土壤取样方法

本文依次按照马尾松林和常绿阔叶林的幼龄林、中龄林和成龄林的土壤进行取样,每种林型设置一个 50 m×50 m 的样地,共调查 6 个样地,在

设置的样地内按“S”型进行土壤取样,每个样地设置 6 个重复,共计 36 个土壤剖面,每个土壤剖面分 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 等 4 个土层取样,共计 144 个土壤样品。

1.3 植被碳储量估算方法

对乔木层马尾松与常绿阔叶树利用测高仪测量其高度,用软尺测量其胸围,然后估算立地乔木与粗死木质残体的生物量^[8]。在每个大样方中设置 6 个 2 m×2 m 的小样方,对灌木、草本与凋落物利用直接收获法获得其生物量,然后利用 6 个小样方的平均值推算大样方的林下植被与凋落物的生物量。最后,乔木层和粗死木质残体碳储量由生物量乘以 0.5 得到,林下植被与凋落物碳储量由生物量乘以 0.45 得到。

1.4 土壤样品分析方法

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)研究深度为 1 m,采用重铬酸钾外加热法测定^[9]。土壤活性有机碳(Active organic carbon, AOCs)分析深度范围为 0~20 cm 土层,其中,水溶性碳(Water-soluble carbon, WSC)采用常温 25℃的蒸馏水浸提^[10],水土比为 2:1,于恒温震荡 30 min (250 次/min)后,离心 10 min (10 000 r/min),再用 0.45 μm 滤膜抽滤,其滤液直接在 TOC-VcsH 有机碳分析仪上测定;易氧化态碳(Easily oxidizable carbon, EOC)采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法^[10];微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸浸提法^[10],即土壤样品氯仿熏蒸后 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提,提取液在 TOC-VcsH 有机碳分析仪上测定;轻组碳(Light fraction carbon, LFC)采用相对密度法分离后测定^[11];颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)采用 5 g/L 六偏磷酸钠分散测定法^[12]。

1.5 数据统计分析方法

(1) 土壤有机碳密度为:

$$SOC_d = \sum_{i=1}^n T_i \times \delta_i \times C_i \times (1 - \theta_i) / 100$$

式中, SOC_d 为土壤有机碳密度 (t/hm²); n 为层数; δ_i 为土壤剖面第 i 层砾石含量系数 (%) (砾石 > 2 mm); θ_i 为土壤剖面第 i 层的土壤容重 (g/cm³); C_i 为土壤剖面第 i 层的有机碳含量 (g/kg); T_i 为土壤剖面第 i 层的土层厚度 (cm)。

(2) 统计分析前,对数据进行了正态分布检

验，对不符合正态分布的数据进行了对数转换，然后利用 SPSS11.5 进行单因素多重比较 LSD 法分析差异显著性，并用 Pearson 系数对 SOC 与 AOCs 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量与密度特征

土壤有机碳是植物所需养分和土壤微生物生命活动的能量来源，不同森林土壤中的有机碳含量与密度反映了进入土壤的以植物为主的生物残体等有机物质输入与土壤微生物分解作用为主的有机物质输出之间的动态平衡^[13]，因此，有机物质的输入量在很大程度上取决于地上部的森林类型及其相应的龄级。由表 1 可知，不同森林类型相比，土壤有机碳含量为马尾松林 < 常绿阔叶林。相同森林类型比，幼龄林 < 中龄林 < 成龄林，即土壤有机碳含量随龄级增长而升高，但随着土壤深度的增加，差异

逐渐减小，到 60 ~ 100 cm 土层时，各森林类型的各种龄级之间均无显著差异。

1 m 土层深度内，SOC 密度分布规律与其含量规律相同，随龄级增长呈上升趋势（图 1，图中字母表示差异显著， $P < 0.05$ ），其中，马尾松林 SOC 密度范围为 55.54 ~ 66.69 t/hm²，常绿阔叶林 SOC 范围为 84.91 ~ 151.16 t/hm²。利用土壤系统分类方法对中国 SOC 密度的研究结果分别为 91.4 和 96.0 t/hm²^[14-15]，利用 CEVSA 模型得出中国 SOC 密度为 91.7 t/hm²^[16]；而根据王绍强等对中国东部地区 SOC 密度的研究，中国东部赤红壤 SOC 密度为 122.8 t/hm²^[17]，甘海华等研究表明，广东赤红壤 SOC 密度为 103.1 t/hm²^[18]；本研究中常绿阔叶中龄林及其成龄林的 SOC 密度高于上述学者的研究结果，而马尾松林与常绿阔叶幼龄林 SOC 密度低于上述研究结果，这说明阔叶幼龄林与马尾松林的 SOC 密度偏低。

表 1 不同类型森林土壤有机碳含量特征¹⁾
Table1 SOC contents of different types of forests in Guangzhou g/kg

森林类型		距地表深度/cm			
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 100
马尾松林	幼龄林	12.59 ± 2.85a	4.47 ± 0.79a	2.11 ± 0.34a	1.75 ± 0.24a
	中龄林	13.57 ± 2.06a	4.26 ± 0.96a	2.14 ± 0.28a	1.96 ± 0.31a
	成龄林	14.79 ± 3.57a	5.63 ± 1.27a	2.70 ± 0.41a	2.05 ± 0.17a
常绿阔叶林	幼龄林	19.28 ± 5.25b	8.13 ± 1.61a	3.09 ± 0.47a	2.08 ± 0.33a
	中龄林	25.19 ± 5.43bc	12.51 ± 2.29b	5.98 ± 0.69a	3.46 ± 0.56a
	成龄林	31.06 ± 4.58c	14.37 ± 2.74b	9.03 ± 1.15b	4.12 ± 0.68a

1) 数据为平均值 ± 标准差，同一列中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下文表同。

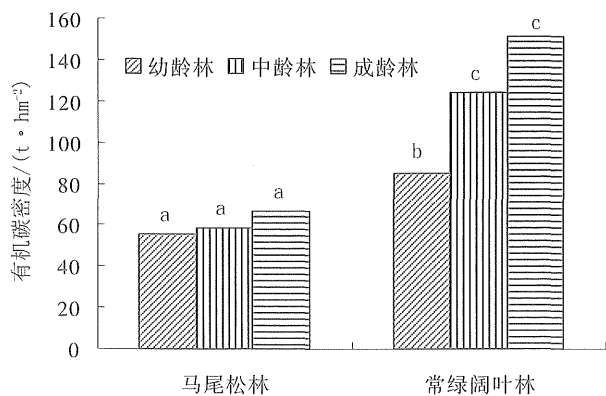


图 1 不同类型森林土壤有机碳密度特征
Fig. 1 SOC density of different type forests

2.2 土壤表层活性碳含量与分配特征

土壤活性有机碳 (AOCs) 是受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性，且在土壤圈中不稳定、移动较快、对植物和微生物有较高活性的那部分土壤碳素^[7]，包括水溶性碳 (WSC)、易氧化态碳 (EOC)、微生物量碳 (MBC)、轻组碳 (LFC) 和颗粒有机碳 (POC) 等指标。与有机碳含量规律相同，不同森林类型相比，森林土壤活性有机碳含量为马尾松林 < 常绿阔叶林（表 2），相同森林类型比，各种土壤活性有机碳含量为幼龄林 < 中龄林 < 成龄林。其中，WSC、EOC 和 MBC 出现了差异极显著现象，而 LFC 与 POC 只存在差异显著现象。

研究发现^[19]，土壤中某些 AOCs 是土壤微生物生长的速效基质，其含量高低直接影响土壤微生物

物的活性程度, 并以此影响温室气体如 CO₂ 和甲烷的排放, 由于土壤 AOCs 的动态变化与大气 CO₂ 波动存在相互反馈作用, 大气 CO₂ 浓度无疑是影响土壤 AOCs 含量的重要因素。同时, AOCs 作为

土壤有机质中最活跃和最易变化的部分, 它不仅易被植物吸收利用, 还能在一定条件下促进有机物分解和 N 的矿化, 从而进一步影响土壤中的养分循环^[20]。

表 2 土壤表层活性有机碳含量特征

Table 2 AOC contents in soil surface layers

g/kg

森林类型		WSC	MBC	EOC	LFC	POC
马尾松林	幼龄林	0.10 ± 0.03a	0.30 ± 0.05a	0.36 ± 0.05a	2.34 ± 0.14a	2.16 ± 0.15a
	中龄林	0.13 ± 0.05a	0.37 ± 0.03a	0.43 ± 0.07a	2.56 ± 0.22a	2.48 ± 0.20a
	成熟林	0.14 ± 0.02a	0.46 ± 0.09a	0.55 ± 0.09a	2.79 ± 0.18a	2.81 ± 0.25a
常绿阔叶林	幼龄林	0.21 ± 0.04b	0.57 ± 0.08ab	2.00 ± 0.14b	4.28 ± 0.39ab	3.81 ± 0.49a
	中龄林	0.29 ± 0.06bc	0.81 ± 0.17b	3.37 ± 0.23c	6.04 ± 1.04b	5.49 ± 0.66ab
	成熟林	0.39 ± 0.08c	1.10 ± 0.22c	4.35 ± 0.37c	7.50 ± 0.95b	7.24 ± 1.24b

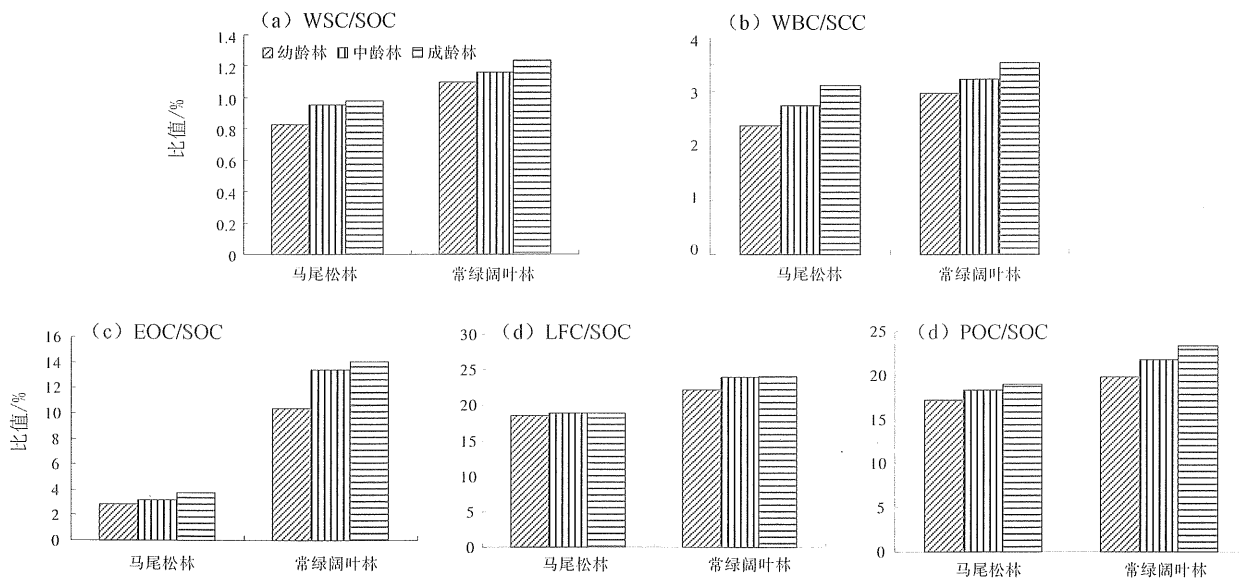


图 2 土壤表层活性有机碳分配特征

Fig. 2 Allocation characteristics of AOCs in soil surface layer

虽然森林土壤 AOCs 含量相对较小, 但却能直接提供森林土壤有效养分, 并在土壤有机和无机物质的转化、迁移和降解方面起着重要的作用^[7]。马尾松林与常绿阔叶林的 WSC、EOC、MBC 与 POC 4 种表层土壤 AOCs 的分配比例随龄级增大而上升 (图 2)。在本文所研究的 5 种森林表层土壤 AOCs 中, WSC 的分配比例最小, 其范围为 0.83% ~ 1.24%, MBC 次之, 但也不足 4%; 而 LFC 与 POC 分配比例较大, 其范围分别为 18.59% ~ 24.15% 和 17.16% ~ 23.31%。

值得注意的是, 表层土壤 AOC 的含量为常绿阔叶林 > 马尾松林, 这是因为在森林植被群落演替的最后阶段, 森林植被叶片含 N 量达到最高^[13],

由于森林表层土壤 AOCs 主要来源于森林凋落叶片的分解与有机质的降解^[21], 随着叶片凋落物向土壤的归还和表层土壤有机质在微生物等作用下的降解, 土壤中 C 库与 N 库储量增大, C 源与 N 源的充足供给使土壤微生物数量和多样性激增, 在土壤微生物的作用下, AOCs 含量也自然随之增加。

2.3 土壤表层活性碳与有机碳相关性分析

本文研究的 2 种森林类型的表层土壤中, WSC、EOC 和 MBC 三种 AOCs 的含量分别与土壤总有机碳相关性达到极显著水平 (表 3), 而 LFC 与 POC 的含量分别与土壤总有机碳相关性达到显著水平, 且相关性均为常绿阔叶林 > 马尾松林。

由于土壤 AOCs 直接参与了土壤生物化学转化

过程, 能促进土壤养分的有效化利用, 所以, 森林土壤表层某些 AOCs 与 SOC 处于动态平衡之中, 可以在一定条件下相互转化^[7], 因此, 森林土壤表层 SOC 含量越高, 某些 AOCs 含量也随之越高, 这与 Wang 等^[22]的研究结果一致。由于土壤微生物的主要食物来源为 AOCs, 因此, 土壤表层 AOCs 与 SOC 相关性可能与微生物对 AOCs 的分解利用程度的复杂多变有关。LFC 和 POC 与 SOC 的相关性低于前三种 AOCs, 主要是因为 LFC 与 POC 在土壤中易与其它物种如沙砾相结合, 其相对含量除了与生物因素有关外, 还可能与土壤结构等物理性质有关^[23]。

表3 土壤表层活性碳与有机碳相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between AOCs and SOC of soil surface layer

森林类型	WSC	MBC	EOC	LFC	POC
马尾松林	0.8411 **	0.8697 **	0.8571 **	0.5710 *	0.5973 *
常绿阔叶林	0.9319 **	0.9265 **	0.9079 **	0.6014 *	0.6153 *

1) * 表示相关显著 ($P < 0.05$), ** 表示相关极显著 ($P < 0.01$).

2.4 森林生物量对土壤碳库的贡献

森林植被在其生长过程中, 随着净初级生产力的升高, 凋落物与粗死木质残体等通过分解作用都最终归还到土壤中, 这无疑对地下土壤碳库的累积起到了积极的促进作用, 所以, 森林生物量对土壤碳库储量的贡献不容忽视。本研究中马尾松与常绿阔叶林的幼龄林与中龄林的土壤碳库大于植被碳库, 而成龄林的土壤碳库小于植被碳库 (图3), 主要原因是土壤碳库在累积的同时, 有部分被消耗掉以供应地上部植被生长, 导致土壤碳库的累积速度要低于地上部森林植被碳库的累积速度。因此,

对相同森林类型而言, 土壤碳库占总碳库的比例随着生物量的增长呈下降趋势。另外, Zhou 等^[24]研究发现, 成龄林土壤碳库也有累积现象。但地上部森林植被生物量的大小与地下部土壤碳库储量是否存在相关性目前还不明确, 有待进一步深入研究。

3 结 论

(1) 广州典型森林土壤有机碳分配特征为常绿阔叶林 > 马尾松林, 不同龄级森林土壤有机碳含量为成龄林 > 中龄林 > 幼龄林, 随着土壤深度增加, 有机碳含量差异逐渐减小; 土壤有机碳密度随森林龄级增长呈上升趋势, 0 ~ 100 cm 土层深度内, 马尾松林与常绿阔叶林土壤有机碳密度范围分别 55.54 ~ 66.69 和 84.91 ~ 151.16 t/hm²。

(2) 广州2种森林类型土壤表层 AOCs 含量为马尾松林 < 常绿阔叶林, 其中, WSC、EOC 和 MBC 含量存在差异极显著现象, 而 LFC 与 POC 存在差异显著现象; WSC、EOC、MBC、POC 与 LFC 分配比例均随龄级增长而升高。

(3) 广州2种典型森林土壤的 WSC、EOC 和 MBC 含量分别与土壤 SOC 相关性达到极显著水平, LFC 与 POC 的含量分别与 SOC 相关性达到显著水平, 且相关水平均为常绿阔叶林 > 马尾松林。

(4) 广州2种森林生物量对土壤有机碳以及活性碳库分配的贡献随龄级增长而升高, 幼龄林与中龄林的土壤碳库大于植被碳库, 而成龄林的土壤碳库小于植被碳库, 土壤碳库占总碳库的比例随着生物量的增长呈下降趋势。

参考文献:

- [1] LAL R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220:242-258.
- [2] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123:1-22.
- [3] MEERSMANS J, RIDDERF D, CANTERS F, et al. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium) [J]. Geoderma, 2008, 143:1-13.
- [4] BROWN S, HALL M, ANDRASKO K, et al. Baselines for land-use change in the tropics: application to avoided deforestation projects [J]. Mitigation Adaptation Strategies Global Change, 2007, 12(6):1001-1026.
- [5] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(5):692-703.

LV Chaoqun, SUN Shucun. A review on the distribution

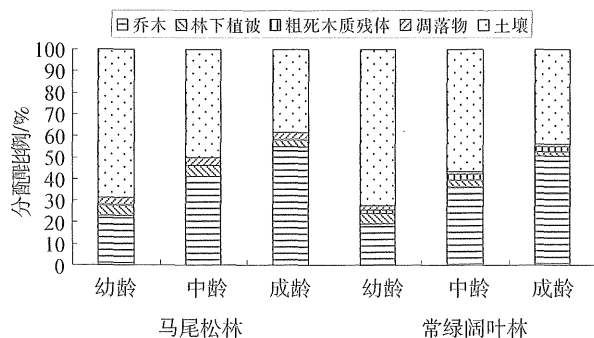


图3 森林生态系统碳库分配特征

Fig. 3 Characteristics of carbon allocation in forest ecosystem

- patterns of carbon density in terrestrial ecosystems[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 692 - 703.
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123:1 - 22.
- [7] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(11):1412 - 1417.
- LIU Min, YU Wangtai, JIANG Zichao, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11):1412 - 1417.
- [8] 管东生. 流溪河水库林区森林生态系统研究[C]//鼎湖山森林生态系统定位研究站. 热带亚热带森林生态系统研究(5). 北京: 科学出版社, 1989:123 - 134.
- [9] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983:105 - 107.
- [10] JIANG P K, XU Q F. Abundance and Dynamics of Soil Labile Carbon Pools Under Different Types of Forest Vegetation[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 505 - 511.
- [11] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 170 - 175.
- XIE Jinsheng, YANG Yusheng, XIE Mingshu, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic matter of light fraction in eroded degraded red soil in subtropics of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1):170 - 175.
- [12] CAMBADELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic matter changes across grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56:777 - 783.
- [13] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5):1 - 6.
- WANG Qingkui, WANG Silong, FENG Zengwei. Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broadleaved forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5):1 - 6.
- [14] YU D S, SHI X Z, WANG H J, et al. National Scale Analysis of Soil Organic Carbon Storage in China Based on Chinese Soil Taxonomy[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 11 - 18.
- [15] XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Soil organic carbon storage in China[J]. *Pedosphere*, 2004a, 14(4): 491 - 500.
- [16] LI Z P, HAN F X, SU Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China[J]. *Geoderma*, 2007, 138:119 - 126.
- [17] 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.
- 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.
- [18] 甘海华, 吴顺辉, 范秀丹. 广东土壤有机碳储量及空间分布特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9):1499 - 1502.
- GAN Haihua, WU Shunhui, FAN Xiudan. Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9):1499 - 1502.
- [19] NI J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, 49: 339 - 358.
- [20] SAGGAR S, MCLINTOSH P D, HEDLEY C B, et al. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient, and organic matter turnover under Hieracium (H. pilosella L.) [J]. *Biology and Fertilizer of Soils*, 1999, 30(3):232 - 238.
- [21] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 等. 人工油松林(Pinus tabulae formis)恢复过程土壤微生物生物量C、N的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(3):1011 - 1018.
- LIU Zhanfeng, LIU Guohua, FU Bojie, et al. Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1011 - 1018.
- [22] WANG Q K, WANG S L. Soil organic matter under different forest types in Southern China[J]. *Geoderma*, 2007, 142:349 - 356.
- [23] LOBE I, AMELUNG W, Du-PREEZ C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soil soft South Africa Highveld[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52:93 - 101.
- [24] ZHOU G, LIU S, LI Z, et al. Old-growth Forests can Accumulate Carbon in Soil[J]. *Science*, 2006, 314: 1417.