

不同林分土壤有机碳密度研究

梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 王琛, 吕锡芝

水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室//北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 在全球气候变化背景下, 森林土壤有机碳作为土壤碳库的重要组成部分, 已成为森林生态系统碳循环研究的重点之一; 而森林土壤有机碳在剖面上具有明显的垂直分布差异, 根据土壤发生层次特点, 分别研究各层土壤有机碳含量分布规律, 对于准确确定森林土壤碳储量具有重要意义。2008年7月在北京西山妙峰山林区侧柏(*Platycladus orientalis*)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、栓皮栎(*Quercus variabilis*)林和侧柏、油松(*Pinus tabulaeformis*)混交林内, 分别随机选取3个位置挖土壤剖面, 然后根据土壤发生层次性特点, 把各剖面划分为四个土层(0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm和40~60 cm), 每层用环刀取样测定土壤容重, 用土壤袋采集1000 g的土壤样品, 经除杂、风干、过筛等程序后, 对土样的有机碳含量和碳密度进行了测定和初步研究。结果表明: 4种林分下土壤有机碳平均含量和土壤有机碳密度不同, 不同林分土壤0~10 cm有机碳含量和碳密度最高, 并且均随土壤深度增加呈降低的趋势; 其土壤有机碳密度的大小顺序为: 栓皮栎林>侧柏、油松林>侧柏林>刺槐林。4种林分类型0~20 cm土层单位面积有机碳储量占总有机碳储量分别为: 栓皮栎林51.1%, 刺槐林44.2%, 侧柏林43.0%, 侧柏、油松混交林37.7%, 平均为44.0%。

关键词: 土壤有机碳含量; 土壤有机碳密度; 垂直分布

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2010)04-0889-05

土壤有机碳储量是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的平衡^[1]。据研究, 全球土壤碳库(1395~2200 Gt, 1 Gt=10¹⁵ g)是陆地植被碳库(500~600 Gt)的2~3倍, 是全球大气碳库(750 Gt)的2倍多^[2], 其碳库微小的变化将会对大气CO₂浓度及全球变化产生巨大影响。森林生态系统作为陆地生物圈的主体, 除了本身维持着约86%以上的植被碳库外, 还维持着约73%的土壤碳库^[3]。因而, 森林生态系统在全球碳循环和碳平衡中发挥着不可替代的作用。森林土壤作为森林生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环中扮演着源、汇、库的作用^[4-5], 森林土壤碳储量及空间分布已成为全球有机碳循环研究的热点问题。不同森林生态系统的土壤有机碳储量受植被类型、气候条件等因素的影响具有较高的变异性。近年来, 随着碳循环成为当前全球变化研究的热点问题, 有关土壤有机碳含量及碳密度的研究较多, 但大都基于收集大量的土壤普查资料对其进行汇总估算, 而对于不同森林植被下土壤有机碳的垂直分布状况的研究报道相对较少。

本研究采用野外调查测定、野外定位观测和室内分析相结合的方法, 选择侧柏(*Platycladus orientalis*)林、栓皮栎(*Quercus variabilis*)林、刺槐(*Robinia*

pseudoacacia)林和侧柏、油松(*Pinus tabulaeformis*)混交林四种人工林为研究对象, 研究了不同林分下土壤有机碳含量及碳密度, 分析了不同林分下土壤碳密度的垂直变化, 它将对合理评测森林土壤碳储量在剖面的分布有着重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于北京市妙峰山林场, 地理坐标: 40°3'46"N, 116°5'45"E, 海拔在60 m~1100 m之间, 属华北暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区, 年平均气温8.5~9.5℃, ≥10℃有效积温3385~4210℃, 无霜期150 d左右, 多年平均降水量600 mm, 其中7、8、9三个月的降水量占全年的70%以上。土壤在海拔70~900 m之间为山地淋溶褐土, 900 m以上为棕壤, 山地母质为花岗岩、石灰岩、凝灰岩、砂岩等岩石风化的残积、坡积物。土壤pH为6.4~8.4。山区温度随海拔升高而降低, 不同海拔高度及走向显著的影响着植被生长期。森林类型主要以侧柏、油松、栓皮栎、刺槐等人工林与山杏灌丛、荆条灌丛为主, 并夹杂有部分原生植被以槲栎、鹅耳枥等。本研究选取了不同人工干扰形成的四种典型林分为研究对象, 设置固定样地, 对植被及土壤有机碳进行测定。表1为这些固定样

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A02); 北京市科委重大项目(D0706001000091); 北京市教委项目: 基于首都森林生态系统定位站平台的林木耗水研究

作者简介: 梁启鹏(1980年生), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与林业森林碳汇方向的研究。E-mail: kanghanban@163.com;

余新晓(1961年生), 男, 教授, 博士, 从事水土保持及森林生态水文方面的研究。E-mail: yuxinxiao111@126.com

收稿日期: 2010-01-13

表 1 样地基本信息

Tab 1 condition of different plots				
林分类型	坡度	坡向	海拔/m	主要植物
侧柏林	17°~26°	半阳坡	180	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>) 刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)
刺槐林	19°~30°	半阳坡	245	榿树(<i>Quercus dentata</i>) 侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>) 侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>)
侧柏、油松	19°~30°	半阳坡	160	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>) 构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>)
栓皮栎林	16°~23°	半阳坡	550	栓皮栎(<i>Quercus variabilis</i>)

地的立地条件和植被组成。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤采样及分析

2008 年 7 月, 在 4 种人工林样地内, 各挖去三个土壤剖面, 剖面深度随土壤发生层次而定, 土壤剖面发生层次确定后, 按 0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm 分层取样。每层用土壤环刀取土样测定土壤容重, 同时取约 1 000 g 装入土壤袋, 仔细挑除土壤袋内的植物根系和砾石等杂物, 经自然风干后, 取部分土壤过 2 mm 土壤筛, 用于土壤有机质(有机碳)的测定。土壤有机碳采用重铬酸钾—外加热法进行测定^[6]。

1.2.2 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量, 一般用 t·hm⁻², 或 kg·m⁻², 由于它以土体体积为基础作计算, 排除了面积和土壤深度的影响, 因此土壤碳密度已成为评价和衡量土壤有机碳储量的一个极其重要的指标^[7]。某一土层的有机碳密度(SOC_i, kg·m⁻²)计算公式为:

$$SOC_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中, *i* 为土层代号, *C_i* 为 *i* 层土壤有机碳含量(g·kg⁻¹), 若测定值为土壤有机质含量, 则采用 0.58 换算得到 *C_i*, 0.58 为 Bemmelen 系数^[8], *D_i* 为容重(g·cm⁻³), *E_i* 为土层厚度(cm), *G_i* 为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土壤剖面由 *n* 层组成, 那么该剖面的有机碳密度(SOC_i, kg·m⁻²)为:

$$SOC_i = \sum_i^n C_i \times D_i \times E_i (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

对各层土壤单位面积有机碳储量占总有机碳储量的百分比按照下式计算:

$$R_i = \frac{SOC_i}{\sum_{i=1}^n SOC_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中 *i* 为土层代号, SOC_i 表示第 *i* 层土壤有机碳密度(kg·m⁻²), *n* 是土壤层数。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量及其剖面分布特征

土壤有机碳含量由土壤有机碳分解速率、作物残余物数量、组成植物根系及返还至土壤中的有机物等因素决定, 其大小决定于土壤有机碳输入、输出及相关土壤性质和过程。随着土地利用方式的改变, 不同植被类型下, 经营土地方式的不同将会影响土壤有机碳含量。由表 2 可以看出: 不同植被类型下土壤有机碳平均含量存在明显差异, 研究区 4 种林分下 0~60 cm 土壤平均有机碳含量介于 5.17~12.87 g·kg⁻¹ 之间, 以栓皮栎林土壤平均有机碳含量最大, 为 12.87 g/kg, 以刺槐林土壤平均有机碳含量最低, 仅为 5.17 g·kg⁻¹, 较栓皮栎林土壤平均有机碳低 60%。不同林分类型土壤有机碳含量与林分类型、枯落物现存量、气候条件以及人为干扰活动有关。

受不同植被下凋落物现存量、林木根系分布及

表 2 不同林分类型的土壤有机碳含量

Tab 2 soil organic carbon content of different forest types					
林分类型	w(有机碳)/(g·kg ⁻¹)				
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均
侧柏林	9.29	6.99	6.21	4.82	6.83
刺槐林	6.85	6.23	4.94	2.66	5.17
侧柏、油松	13.23	11.14	10.19	8.61	10.79
栓皮栎林	23.06	12.99	9.65	5.78	12.87

人工扰动土壤方式的影响, 土壤有机碳在土壤剖面的分布也随之出现差异。不同林分类型土壤各层有机碳含量介于 2.66~23.06 g·kg⁻¹ 之间(表 2), 其中最大值是最小值的 8.67 倍, 各林分类型土壤层有机碳含量均以表土层(0~10 cm)最大, 且随着土层厚度的增加, 不同林分土壤有机碳含量呈下降趋势。由图 1 可见, 四种不同林分类型土壤中, 栓皮

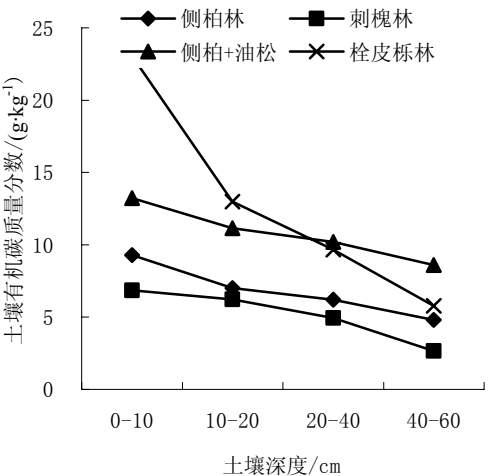


图 1 不同林分土壤各层次有机碳质量分数

Fig.1 soil organic carbon content of different forest types

栎林土壤有机碳含量随土层加深而明显递减，表层 0~10 cm 土壤有机碳含量是 10~20 cm 的 1.78 倍，差异显著。侧柏、油松混交林土壤有机碳随土层变化相对比较平缓，各层土壤有机碳含量变化不明显。随着土层的加深，不同林分类型的土壤有机碳变化不同，其中栓皮栎林为 5.78~23.06 g·kg⁻¹，侧柏、油松混交林为 8.61~13.23 g·kg⁻¹，侧柏林为 4.82~9.29 g·kg⁻¹，刺槐林为 2.66~6.85 g·kg⁻¹。不同林分下，土壤有机碳含量最大值与最小值土层深度相同，分别为 0~10 cm 和 40~60 cm 层。在相同土层深度，受植被类型、土壤质地等条件的影响，土壤有机碳含量差异较大。

2.2 土壤有机碳密度及其垂直分布特征

一般情况下，土壤有机碳密度的大小估算根据土壤单位体积中有机碳质量来计算，通常采用土层厚 1 m 为标准，但由于土壤发育的情况有所差异，并非所有的土壤厚度均能达到 1 m 或 1 m 以上，所以在实际调查、计算中以实际土壤厚度为准。不同植被类型中，由于土壤受不同植物根系分布、凋落物分解程度以及人为干扰等因素的影响，致使土壤有机碳含量及土壤容重随之发生变化，所以土壤碳密度也随之出现差异。分析结果表明（表 3）：不同林分类型土壤有机碳密度差异较大，0~60 cm 土壤有机碳平均密度介于 3.78~7.85 kg·m⁻²，在四种林分类型中，以栓皮栎林土壤平均有机碳密度最大，为 7.85 kg·m⁻²，而以刺槐林土壤平均有机碳密度最低，为 3.78 kg·m⁻²，各林分土壤平均有机碳含量大小依次为：栓皮栎林>侧柏、油松林>侧柏林>刺槐林，刺槐林土壤有机碳密度比侧柏、油松林和栓皮栎林分别低 49%和 52%以上，侧柏林较二者分别低 29%和 32%以上。

表 3 不同林分类型的土壤有机碳密度
Tab 2 soil organic carbon density of different forest types

林分类型	有机碳密度/(kg·m ⁻²)				
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	合计(0~60 cm)
侧柏林	1.28	1.00	1.71	1.31	5.30
刺槐林	0.88	0.79	1.35	0.76	3.78
侧柏、油松	1.59	1.23	2.68	1.99	7.48
栓皮栎林	2.41	1.60	2.37	1.47	7.85

受植被类型、土壤质地、人为干扰等综合因素的影响，不同植被条件下，土壤容重、砾石含量在垂直分布上存在很大的异质性，从而导致土壤有机碳密度也随之发生变化。不同林分类型土壤各层 10 cm 厚度的有机碳密度都随着土层深度的增加而降低（图 2），以表土 10 cm 的土壤有机碳密度最大。主要是由于植物根系集中分布在土壤表层，凋落物和腐殖层以及土壤微生物的分解对土壤有机碳的

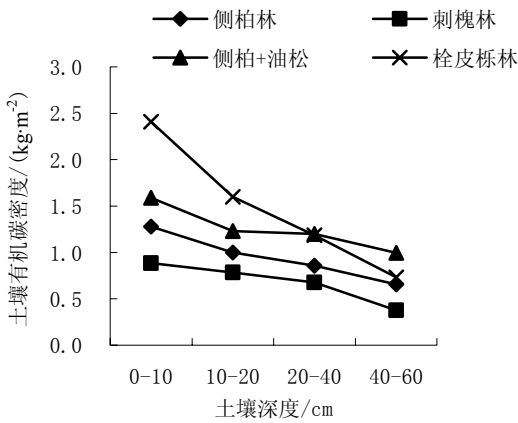


图 2 不同林分类型土壤各层 10cm 厚度的平均有机碳密度
Fig.2 Mean soil organic carbon density in 10 cm soil layer of different forest types

贡献主要作用于地表，且随土壤深度的增加而减弱所致。因而表层土壤的碳密度大^[9]。

不同林分类型各层 10 cm 土壤有机碳密度随土层加深变化范围不同。栓皮栎林为 0.73~2.41 kg·m⁻²，侧柏、油松混交林为 1~1.59 kg·m⁻²，刺槐林为 0.38~0.88 kg·m⁻²，侧柏林为 0.66~1.28 kg·m⁻²，不同林分中，土壤各层 10 cm 土壤有机碳密度最大值和最小值出现深度相同，在相同深度，不同植被下，10 cm 土壤层碳密度也不同。

根据公式（3）计算 4 种不同林分 0~20 cm，20~40 cm，40~60 cm 不同土壤层次单位面积有机碳储量占总土壤有机碳储量的百分比。由图 3 可知，0~20 cm 土壤有机碳储量百分比大小顺序依次为：栓皮栎林（51.1%）>刺槐林（44.2%）>侧柏林（43.0%）>侧柏、油松混交林（37.7%），平均为 43.98%。不同林分 20~40 cm 土壤有机碳储量百分比中，栓皮栎林为 30.2%，侧柏林、刺槐林和侧柏、油松混交

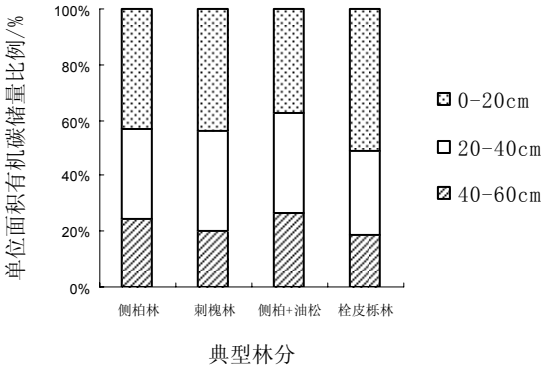


图 3 不同林分类型土壤有机碳储量剖面分布
Fig.3 soil organic carbon stock of different forest types at different horizons

林土壤有机碳百分比在 32.3%~35.8%之间,变化幅度较小。40~60 cm 土壤有机碳储量百分比大小顺序为:侧柏、油松混交林(26.6%)>侧柏林(24.7%)>刺槐林(20.0%)>栓皮栎林(18.7%)。可见,4种林分土壤有机碳主要存储于 0~20 cm 中,其在整个土壤有机碳中所占的比重在 43.0%~51.1%之间变化。随着土层的加深,土壤有机碳所占比重急剧降低,最底层(40~60 cm)土壤有机碳百分比最低。主要是由于土壤有机碳在剖面上的垂直分布主要受植被类型的影响,不同植被土壤有机碳在剖面上的分布不同。同时,根系的垂直分布直接影响输入到土壤剖面各个层次的有机碳数量;而且随土层深度的增加分解者的活动减弱,导致植物碎屑在土壤中的位置越深,其分解也越慢^[10]。

3 结论与讨论

(1) 不同植被条件下,由于受土壤母质、气候条件、土壤微生物、凋落物分解转化程度、根系分布以及人为活动的影响,土壤有机碳含量差异较大,不同林分下土壤有机碳含量的变化趋势为:栓皮栎林>侧柏、油松林>侧柏林>刺槐林。

(2) 不同林分类型土壤有机碳在剖面中的含量具有明显的层次性,表层(0~10 cm)含量最高,这说明林地土壤有机碳含量也具有“表聚作用”。随着剖面深度的增加,有机碳含量逐渐降低。

(3) 不同林分下,土壤有机碳密度差别较大,在 3.78~7.85 kg·m⁻²之间变化,四种林分土壤有机碳密度的变化趋势和土壤有机碳含量的变化趋势一致,而且在同一林分土壤中,单位深度土壤各土层平均有机碳密度均以表土层最大,并且随土壤深度的增加而降低,这与目前大部分研究结果一致^[11-14]。林地土壤有机碳富集在土壤表层意味着不合理的人为活动破坏地表从而引发的水土流失极易造成土壤有机碳储量的减少。

4种植被 0~20 cm 土壤有机碳密度在 1.67~4.01 kg·m⁻²之间,低于我国森林土壤 0~20 cm 土壤平均碳密度 4.24 kg·m⁻²^[15],主要因为北京山区森林植被树种组成单一、林分结构简单,林下植被稀少,凋落物现存量不足且分解转化程度缓慢等因素所致,因此,合理经营,改善森林结构,提高森林产出量是提高森林生态系统服务功能,发挥碳汇功能的重要举措。

参考文献:

- [1] POST W M, IZAURRALDE R C, MANN L K, et al. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil[J]. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 73-99.
- [2] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.

- SU Yongzhong, ZHAO Halin. Advances in Researches on Soil Organic Carbon Storages, Affecting Factors and Its Environmental Effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [3] POST W M, EMANUEL W R. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [4] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川科学出版社, 2006: 1-2.
YANG Wanqin, ZHANG Jian, HU Tingxing, et al. *Forest Soil Ecology*[M]. Chengdu: Sichuan Science Press, 2006: 1-2.
- [5] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. *土壤学报*[J], 2007, 44(2): 327-337.
PAN Genxing, ZHOU Ping, LI Lianqing, et al. Core issues and research progresses of soil science of csequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-337.
- [6] 史瑞和, 秦怀英, 安战士, 等. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京: 农业出版社, 1988: 33-36.
SHI Ruihe, QIN Huaiying, AN Zhanshi, et al. *Soil Agrochemical Analysis(the second edition)*. Beijing: Agriculture Publishinghouse, 1988: 33-36.
- [7] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875-2882.
YANG Jinyan, WANG Chuankuan. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [8] 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.
ZHOU Yurong, YU Zhenliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [9] 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.
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.
- [10] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
ZHOU Li, LI Baoguo, ZHOU Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 99-105.
- [11] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 362-367.
WU Yaqiong, LIU Guohua, FU Bojie, et al. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 362-367.
- [12] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. *地理学报*, 2000, 24(5): 518-522.
TAO zhen, SHEN Chengde, GAO Quanzhou, et al. Soil Organic Carbon Storage and Vertical Distribution of Alpine Meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [13] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2382-2386.
TIAN Dalun, FANG Xi, XIANG Wenhua. Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hu'nian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2382-2386.
- [14] 季志平, 苏印泉, 贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2006, 21(6): 54-57.
JI Zhiping, SU Yinquan, HE Liang. Vertical Distribution Characteristic of Soil Organic Carbon of Plantation in Hilly Loess Region[J]. *Journal*

of Northwest Forestry University, 2006, 21(6): 54-57.
[15] 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): 687-699.

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): 687-699.

Study on soil organic carbon density of different forest types

LIANG Qipeng, YU Xinxiao, PANG Zhuo, WANG Chen, LU Xizhi

Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education//

Soil and Water Conservation Academy, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: In the context of global climate change, as a component of soil carbon pool the forest soil organic carbon(SOC) has become one of the important issues in the study of forest ecosystem carbon cycle; moreover, forest SOC differed significantly in soil profile and research of content of SOC in various soil layers according to the process of soil genesis has great significance for accurate determination of forest soil carbon storage. In July 2008, 3 soil profiles were selected under four forest types(*Platycladus orientalis* forest, *Robinia pseudoacacia* forest, *Quercus variabilis* forest and Mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*.) in miaofengshan forest farm of Beijing, and each profile was divided into 4 soil layers (0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm) to measure soil bulk density with soil ring sampler and to collect 1 000-gram soil sample using cloth-bag, for measuring of SOC content and calculating of SOC density, after purification, air drying and sifting. The results showed that the different SOC content and its density under four forest types decreased with the soil depth and the highest values appear in the soil surface layer (0~10 cm). The order of its SOC density was *Quercus variabilis* forest> Mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*>*Platycladus orientalis* forest > *Robinia pseudoacacia* forest. For unit area of the 4 forest types, the percentage of SOC storage in the top-20 cm layer were as follows: 51.1% in *quercus variabilis* forest, 44.2% in *Robinia pseudoacacia* forest, 43.0% in *Platycladus orientalis* forest, 37.7% in Mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*, and the average was 44.0%.

Key words: soil organic carbon content; soil organic carbon density; vertical distribution