

文章编号: 1000-5692(2004)04-0418-06

杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征

方 晰, 田大伦, 项文化, 雷丕峰

(中南林学院 生态研究室, 湖南 株洲 412006)

摘要: 以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林为研究对象, 并以不同经营方式的杉木人工林采伐迹地为对照, 研究了杉木人工林不同层次土壤中有机碳的垂直分布特征及其与土壤 pH 值、全氮、C/N 比的相关关系。结果表明: 杉木人工林土壤有机碳质量分数随着土壤深度的增加而下降, 不同层次土壤有机碳质量分数的分异表现为: 0~15 cm 土层 ($20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 15~30 cm 土层 ($17.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 30~45 cm 土层 ($12.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 45~60 cm 土层 ($9.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 60~75 cm 土层 ($8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 3 种不同经营方式杉木人工林采伐迹地土壤中平均有机碳质量分数依大小顺序排列为: 杉木林地 ($13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 经济林地 ($12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 农用后撂荒地 ($11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。杉木人工林不同层次土壤有机碳质量分数与土壤 pH 值呈线性正相关, 相关系数 $r \geq 0.40$, 与土壤全氮、C/N 比呈显著的线性正相关, 相关系数分别为 $r \geq 0.81$ 和 $r \geq 0.87$ 。图 2 表 2 参 14

关键词: 杉木人工林; 土壤有机碳; 垂直分布

中图分类号: S714; S151.9 **文献标识码:** A

土壤有机碳及其动态平衡不仅表明土壤有机质的水平, 而且是影响土壤中养分的储存与供应、土壤结构的稳定性与坚实度、土壤持水力以及土壤生物(如菌根和固氮菌等)生长的主要因子, 是评价土壤肥力和土地持续利用的主要指标之一。为此, 土壤有机质长期受到农学界的关注。近十几年来, 土壤有机碳又被赋予了新的内容, 即与全球变化紧密联系在一起, 从而引起更为广泛的关注^[1,2]。全球约有 1 500 Gt 碳以有机质形态储存于土壤中, 森林生态系统土壤碳库约占全球土壤有机碳库的 73%, 是森林生态系统地上部分有机碳库的 2~3 倍^[3]。土壤有机碳库特别是森林土壤有机碳库的微小变化可显著地引起大气中二氧化碳浓度的变化, 从而影响全球气候变化。因此, 对森林土壤中有机碳库的动态变化及调控机理的研究成为预测和控制全球气候变化的一项重要的基础性工作^[3~5]。但是由于土壤有机碳库组成的复杂性及其影响因素的多样性, 目前国内外对土壤有机碳库的储量、形态、动态过程、调控机理及其影响因素等研究仍十分薄弱^[3,6]。本文研究杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林土壤有机碳质量分数垂直分布特征及其与土壤 pH 值、全氮、C/N 比的相关关系, 将有助于进一步探讨杉木人工林林地土壤的生态功能。这对杉木人工林的可持续经营和林地生产力的恢复将有重大

收稿日期: 2004-05-17; 修回日期: 2004-06-29

基金项目: 国家科技部重点野外科学观测试验站资助项目(2000-076); 国家科技部基础研究重大项目(2102); 国家林业局重点科研项目(2001-7, 2001-29); 中南林学院青年基金资助项目(0419)

作者简介: 方晰(1968—), 女, 广西邕宁人, 副教授, 硕士, 从事生态学教学和森林生态学研究。E-mail: fangxizhang@sina.com

的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设于国家重点野外科学观测试验站、国家林业局重点森林生态系统定位观测站——中南林学院湖南会同森林生态系统定位研究站。该站地理坐标 $26^{\circ}50'N$, $109^{\circ}45'E$, 气候属典型的亚热带湿润性气候, 年平均气温为 $16.8^{\circ}C$, 年平均降水量 $1100 \sim 1400 mm$, 年平均相对湿度为 80% 以上。海拔高度 $300 \sim 500 m$, 相对高度为 $150 m$ 以下, 为低山丘陵地貌。土壤系震旦纪板溪系灰绿色板岩发育的山地黄壤, 质地介于轻壤与粘壤之间, 表土褐色至淡黄橙色, 心土为橙黄色, 非常适合杉木的生长。地带性植被为常绿阔叶林, 以壳斗科 Fagaceae 的常绿树种如栲属 *Castanopsis*, 青冈属 *Cyclobalanopsis* 和石栎属 *Lithocarpus* 为建群种, 其次为樟科 Lauraceae 的樟属 *Cinnamomum* 和楠木属 *Phoebe*, 山茶科 Theaceae 的木荷属 *Schima*, 山茶属 *Camellia* 以及木兰科 Magnoliaceae, 金缕梅科 Hamamelidaceae 和杜英科 Elaeocarpaceae 的一些树种组成。站内设有面积为 $2 hm^2$ 试验小集水区 8 个, 平均坡度为 25° , 8 个小集水区相互平行且自然地理状况基本相似, 彼此相距不足 $100 m$, 均为 1966 年营造的杉木纯林, 1987 年底将原有 22 年生杉木纯林进行采伐及干扰试验, 1988 年春后又陆续营造了第 2 代杉木纯林。

本次研究中, 已郁闭杉木人工林地设在 III 号集水区, 1987 年对该区的 22 年生杉木人工林皆伐, 年底炼山, 人工整地, 1988 年春以 $1500 \sim 2490 \text{ 株} \cdot hm^{-2}$ 营造杉木纯林。现为已郁闭的杉木人工林, 生长正常, 郁闭度为 $0.8 \sim 0.9$ 。

经济林林地设于 II 号和 III 号集水区山脚处, 均与已郁闭杉木人工林地接壤, 为 22 年生杉木人工林采伐后炼山, 人工整地, 种植板栗 *Castanea mollissima*, 柑橘 *Citrus reticulata* 等。农用后撂荒地设于杉木人工林采伐后, 开垦种植西瓜 *Citrullus lanatus*, 萝卜 *Raphanus sativus* 等农作物, 与试验站距离 $500 m$ 左右。

1.2 样品的采集与分析

为了便于比较, 在已郁闭杉木林地、经济林地和农用后撂荒地内均按 $0 \sim 15$, $15 \sim 30$, $30 \sim 45$, $45 \sim 60$, $60 \sim 75 cm$ 分层随机采集土样 3~4 次, 对土样逐一测定分析, 取其平均值作为各种林地的最终测定结果。

将土壤样品进行风干处理, 磨碎, 过筛, 测定有机碳、pH 值、全氮以及其他研究项目。有机碳采用重铬酸钾-水合加热法测定, 土壤 pH 值采用电位法测定, 全氮采用凯氏半微量定氮法测定^[7]。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林土壤有机碳质量分数的分布特征

2.1.1 已郁闭杉木人工林土壤有

机碳质量分数的分布 测定结果

(表 1) 表明, 杉木人工林土壤各层有机碳为 $12.8 \sim 14.3 g \cdot kg^{-1}$, 平均为 $13.6 g \cdot kg^{-1}$, 山坡上部和山麓下部地势比较平缓, 有机碳质量分数较高, 平均分别为 $14.3 g \cdot kg^{-1}$ 和 $13.8 g \cdot kg^{-1}$, 而山坡中部地势比较陡峭, 有机碳质量分数较低, 平均为 $12.8 g \cdot kg^{-1}$ 。杉木林地不同部位土壤平均有机碳质量分数随着土壤深度的增加而逐渐下

表 1 不同坡位杉木人工林土壤有机碳的质量分数

Table 1 Soil organic carbon concentration in Chinese fir plantation

土层深度/cm	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)				变异系数/ %
	上部	中部	下部	不同部位平均	
0~15	20.0	23.4	18.5	20.6	12.2
15~30	16.6	21.4	13.5	17.1	23.4
30~45	12.8	8.6	15.9	12.4	29.3
45~60	10.5	5.3	13.6	9.8	43.2
60~75	11.6	5.5	7.6	8.2	37.7
各土层平均	14.3	12.8	13.8	13.6	5.4
变异系数/ %	29.4	70.6	16.9	35.4	

降, 0~15 cm 土层的有机碳质量分数最高, 为 $18.5\sim23.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $20.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 60~75 cm 土层最低, 为 $5.5\sim11.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $8.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0~15 cm 土层有机碳是 60~75 cm 土层有机碳的 2.5 倍。杉木人工林林地土壤不同层次有机碳含量的分异表现为: 0~15 cm 土层>15~30 cm 土层>30~45 cm 土层>45~60 cm 土层>60~75 cm 土层, 而且以山坡中部土壤不同层次有机碳的分异最为显著, 变异系数高达 70.6%。杉木人工林土壤有机碳主要集中分布于 0~45 cm 的土层中, 该层次是杉木等植物根系的集中分布区。Jobbagy^[3] 研究指出, 植物根系的分布直接影响土壤中有机碳的垂直分布, 因为大量死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源。另一方面, 大量的地表枯落物也是表层土壤有机碳重要的碳源物质。在杉木林中, 不同立地同一层次土壤有机碳质量分数也表现出明显的变异特征, 土壤各层次有机碳质量分数变幅最大的是中下土层 (45~60 cm), 变幅为 $13.6\sim5.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 43.2%, 变幅最小的是表土层 (0~15 cm), 为 $23.4\sim18.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 变异系数为 12.2%。

2.1.2 不同经营方式的杉木林采伐迹地

土壤有机碳的分布 土壤有机碳主要来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物, 并处于不断分解与形成的动态过程中, 因此土壤有机碳是生态系统在特定条件下的动态平衡值。不同经营方式的杉木人工林采伐迹地土壤有机碳质量分数的测定结果见表 2。从表 2 可以看出, 杉木林采伐迹地的不同经营方式可引起土壤有机碳的差异。3 种不同经营方式采伐迹地土壤中有机碳质量分数的平均值依大小顺序

排列为: 杉木林地>经济林地>农用后撂荒地。在经济林地内, 由于在整地时, 人为地把林地上剩余的生物埋在土壤中, 然后挖坑种植, 加上林地内原有大量的树兜和树根腐烂, 使其土壤 0~15 cm 层中的有机碳质量分数明显高于杉木林林地, 达 $21.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但 15 cm 以下的各层土壤的有机碳质量分数却明显低于杉木林林地。农用后撂荒地 0~15 cm 土层及 15~30 cm 土层的有机碳质量分数分别为 $16.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 明显低于其他 2 种林地土壤相应的土层。由此可见, 杉木林采伐后, 如能及时造林更新, 即使营造结构简单的人工林也有利于保持林地土壤的有机碳, 但也由于在造林整地时, 采用砍杂、炼山和全垦等措施, 导致杉木林地土壤表层的有机碳明显低于经济林林地。因此, 若能在造林整地时, 把采伐剩余的生物埋在土壤中更有利于土壤碳的保持, 减少土壤碳的流失。而在杉木林采伐迹地进行农业生产活动使土壤中的有机质充分暴露在空气中, 土壤温度和湿度条件得到改善, 从而极大地促进了土壤呼吸作用, 加速了土壤有机质的分解^[5,8], 则可以造成林地 0~15 cm 土层和 15~30 cm 土层中的碳素大量流失。Mannk^[4] 根据统计得出, 森林采伐后进行农业垦殖, 在 20 a 内土壤碳平均减少 20%。森林转为农田, 土壤碳损失 25%~40%, 耕作层 (0~20 cm) 的损失量最大, 可达 40%^[9]。

2.2 已郁闭杉木人工林土壤有机碳分布与 pH 值相关性分析

土壤 pH 值是土壤的一个基本性质, 也是影响土壤理化性质的一个重要化学指标, 它直接影响着土壤中各种元素的存在形态、有效性及迁移转化^[10]。已有研究^[11,12] 表明, 随着土壤 pH 值的下降, 微生物活性减弱, 致使土壤有机碳周转下降, 表现为土壤的碳积累, 土壤有机碳质量分数与土壤 pH 值存在明显负相关。本次研究结果表明, 已郁闭杉木林林地不同层次土壤 pH 值为 4.2~6.2, 且各层土壤 pH 值自上而下呈下降趋势, 土壤呈酸性反应。从图 1 可以看出, 山坡下部, 土壤有机碳 (y) 与土壤 pH 值 (x_1) 存在明显线性正相关, 相关系数 $r=0.7721$, 方程为 $y=11.5410x_1-45.1350$; 山坡上部, 土壤有机碳也与土壤 pH 值存在线性正相关, 相关系数 $r\approx0.40$, 相关方程为 $y=1.3091x_1-4.6378$ 。

表 2 不同经营方式采伐迹地土壤有机碳的质量分数

Table 2 Soil organic carbon content in the deforested lands with different management patterns

土壤深度/cm	土壤有机碳质量分数/ (g·kg ⁻¹)		
	杉木林地	经济林地	农用后撂荒地
0~15	20.6	21.2	16.6
15~30	17.1	16.9	13.9
30~45	12.4	8.5	7.8
45~60	9.8	7.5	9.3
60~75	8.2	7.3	7.6
平均值	13.6	12.3	11.0

2.3 已郁闭杉木人工林土壤有机碳分布与土壤全氮和 C/N 比的相关性分析

在一定程度上, 土壤中的氮素大体上决定了有机碳的质量分数, 土壤碳的保持在很大程度上决定于土壤氮素的水平^[10]。两者的回归分析表明(图 2), 无论是在山坡下部还是山坡上部, 土壤有机碳(x_2)与土壤全氮(y)之间存在极为显著线性相关, 相关系数 $r \geq 0.81$ 。山坡下部、上部的方程分别为: $y = 0.0514x_2 + 0.7139$ 和 $y = 0.0427x_2 + 0.7310$ 。

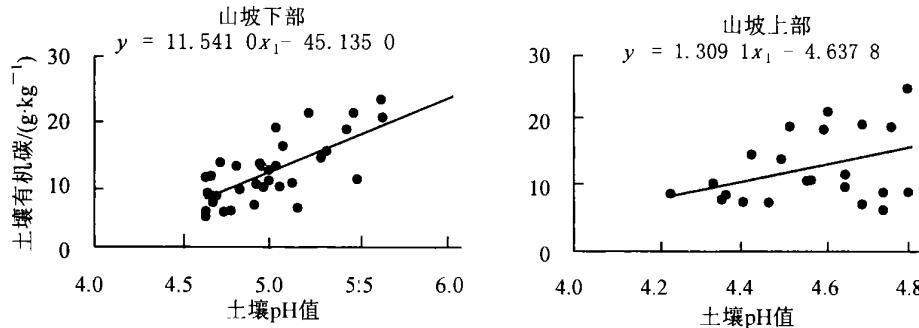


图 1 土壤有机碳与土壤 pH 值的关系

Figure 1 The relationship between soil organic carbon content and soil pH value

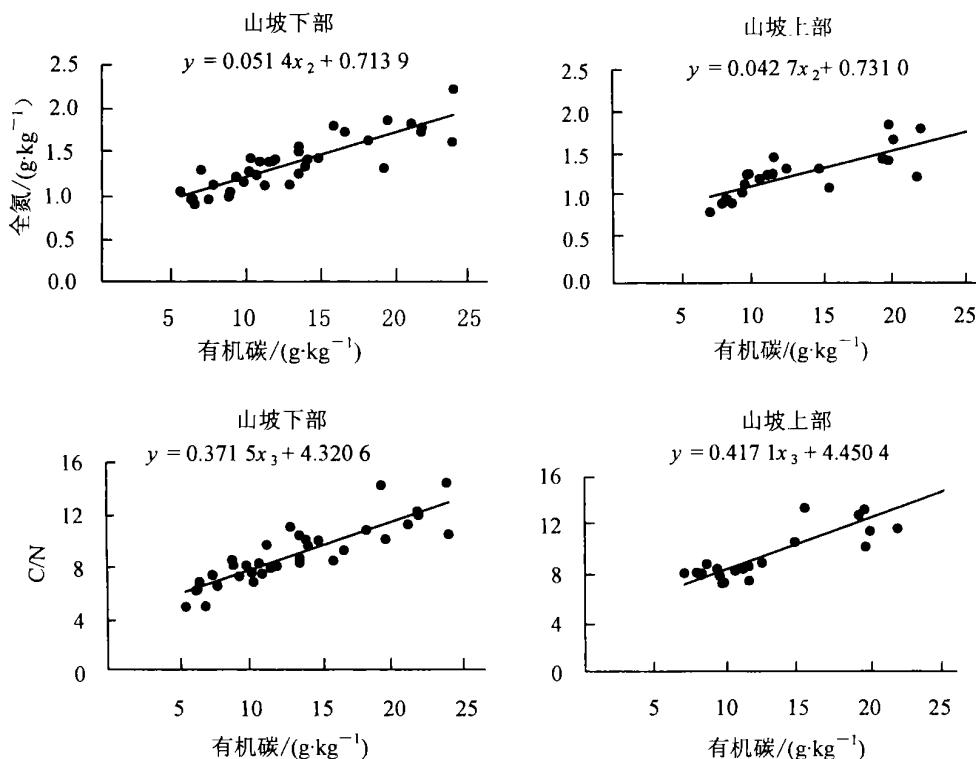


图 2 土壤有机碳与土壤全氮和 C/N 比的关系

Figure 2 The relationship between soil organic carbon content and soil N content or C/N ratio

土壤中碳和氮的相互关系是通过微生物连接起来的, 土壤微生物的活性对于土壤有机碳的分解非常重要, 其中土壤微生物量碳与土壤有机碳、全氮及有效氮是显著相关的^[13]。而土壤 C/N 比的高低对于土壤微生物的活动能力有一定促进或限制作用, 当土壤氮素增加时, 可以促进微生物的活动, 提高土壤有机质的分解速率^[14]。从图 2 中可以看出, 杉木人工林林地土壤有机碳(x_3)与土壤中的 C/N 比(y)之间的相关性极为显著, 相关系数 $r \geq 0.87$ 。山坡下部、上部的方程分别为: $y = 0.3715x_3 + 4.3206$ 和 $y = 0.4171x_3 + 4.4504$ 。

4.320 6 和 $y = 0.4171x_3 + 4.4504$ 。

3 结论

杉木林不同部位土壤平均有机碳质量分数随着土壤深度的增加而逐渐下降, 土壤表层(0~15 cm)的有机碳质量分数最高, 为 $20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 60~75 cm 土层的有机碳质量分数最低, 为 $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。杉木人工林土壤不同层次有机碳质量分数的分异表现为: 0~15 cm 土层>15~30 cm 土层>30~45 cm 土层>45~60 cm 土层>60~75 cm 土层。

杉木林采伐迹地的不同经营方式可引起林地土壤有机碳质量分数的差异。3种不同经营方式采伐迹地土壤中碳素的平均值依大小顺序排列为: 杉木林地>经济林地>农用后撂荒地, 而且林地土壤不同层次中的有机碳质量分数分布规律基本一致, 均以表层土壤的有机碳质量分数最高, 随着土壤深度的增加而下降。因此, 杉木林采伐后, 如能及时造林更新, 即使营造结构简单人工林也有利于保持林地土壤的有机碳。如进行农业生产活动则可以造成林地土壤0~15 cm 土层和15~30 cm 土层中的碳素大量流失。

杉木人工林不同层次土壤有机碳质量分数与土壤 pH 值呈线性正相关, 相关系数 $r \geq 0.40$, 与土壤全氮质量分数之间存在显著线性正相关, 相关系数 $r \geq 0.81$ 。杉木人工林林地土壤有机碳质量分数与土壤中的C/N 比之间的相关性极为显著, 相关系数 $r \geq 0.87$ 。

参考文献:

- [1] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545~551.
- [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.
- [3] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecol Appl*, 2002, 10(2): 423~436.
- [4] Mann L K. Change in soil carbon storage after cultivation[J]. *Soil Sci*, 1986, 142: 279~288.
- [5] Davison E A, Achanman I L. Change in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils[J]. *Biogeochemistry*, 1993, 20: 161~193.
- [6] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19~29.
- [7] 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, 1984.
- [8] 方晰, 田大伦. 杉木人工林林地 CO_2 释放量的研究[J]. 林业科学, 1997, 33(专刊2): 94~103.
- [9] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响[J]. 世界林业研究, 1994, (5): 26~31.
- [10] 布雷迪 N C. 土壤的本质与性状[M]. 南京农学院土化系, 译. 北京: 科学出版社, 1982.
- [11] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5~8.
- [12] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 301~307.
- [13] 姚槐应, 何振立, 陈国潮, 等. 红壤微生物量在土壤黑麦草系统中的肥力意义[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 725~728.
- [14] 廖利平, 高洪, 汪思龙, 等. 外加氮源对杉木叶凋落物分解及土壤养分淋失的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 34~39.

Vertical distribution of soil organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantation

FANG Xi, TIAN Da-lun, XIANG Wen-hua, LEI Pi-feng

(Research Section of Ecology, Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, Hunan, China)

Abstract: Taking Chinese fir plantation as the research objective, vertical distribution of soil organic carbon (SOC) and its relationship with soil pH value, total nitrogen content and soil C/N ratio in Chinese fir plantation were studied. In addition, different land use types of Chinese fir plantation were compared. The results showed that the

vertical distribution of SOC in Chinese fir plantation varied with soil depth. The differences of SOC concentration in different layers were as follows: 0—15 cm soil layer ($20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 15—30 cm soil layer ($17.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 30—45 cm soil layer ($12.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 45—60 cm soil layer ($9.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 60—75 cm soil layer ($8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Average SOC concentration with three kinds land use types was ranked as follows: the closed Chinese fir forest lands ($13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > the economic forest lands ($12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > the fallow lands after farming ($11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). SOC concentration of different layers in Chinese fir plantation had a positive linear correlation with the soil pH value ($r \geq 0.40$), and a significant positive relationship with the contents of total nitrogen ($r \geq 0.81$) and C/N ratio ($r \geq 0.87$). [Ch, 2 fig. 2 tab. 14 ref.]

Key words: Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation; soil organic carbon (SOC) concentration; vertical distribution

欢迎订阅《南京林业大学学报（自然科学版）》

CN 32-1161/S; ISSN 1000-2006; 国内外公开发行; 邮发代号: 28-16。

《南京林业大学学报（自然科学版）》由南京林业大学主办，创刊于 1958 年，是以林业为主的综合类学术期刊。办刊宗旨是鼓励学术创新，推动科技成果转化，促进学术交流和发展，培养、扶持学术人才。

主要内容 生物学、森林地学、林学基础理论、森林培育与经营管理、森林资源与环境、森林与自然保护、水土保持与荒漠化防治、木材工业与技术科学、林业机械与电子工程、林产化学与工业、园林植物与风景园林、林业经济与管理、森林工程、土木工程等以及有关边缘学科的研究成果。另设置专栏集中报道重点项目、基金项目及重大课题的研究成果。

刊物地位 国家科技部中国科技论文统计源期刊，中国科学引文数据库来源期刊，中国学术期刊综合评价数据库来源期刊，中国自然科学核心期刊，《中国学术期刊（光盘版）》首批入编期刊，万方数据（*China info*）系统科技期刊群。被国际国内著名检索刊物如 CA, FA, FPA, 《中国林业文摘》《中国生物学文摘》《竹类文摘》等数据库收录。

1992 年以来，《南京林业大学学报（自然科学版）》先后获得全国优秀科技期刊三等奖、全国高校优秀学术期刊一等奖、江苏省优秀自然科学学报一等奖等多项荣誉，2001 年入选“中国期刊方阵”，2002 年入选“江苏期刊方阵”，并获优秀期刊称号。

读者范围 大中专院校师生，科研院所研究人员。

双月刊，单月末出版。A4 开本，每期定价 6.00 元，全年 36.00 元。

全国各地邮局均可订阅。国外总发行：中国国际图书贸易总公司（北京 399 信箱），发行代号 Q552。也可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续：天津市大寺泉集北里别墅 17 号，邮政编码 300381。

如有需要近年过刊的读者请直接与本刊编辑部联系：210037 南京市龙蟠路南京林业大学学报编辑部。电话：025-5428247；E-mail：xuebao@njfu.edu.cn。