

杉木林地不同更新方式土壤有机碳垂直分布及储量

徐桂林^{1,2}, 方 晰^{1,2}, 田大伦^{1,2}, 唐志娟^{1,2}, 张铸三^{1,2}

(1. 中南林业科技大学 生态教研室, 湖南 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学 亚热带森林生态湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 比较研究了湖南会同第1代杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林采伐迹地经不同更新方式转变为第2代杉木林地、自然更新灌木林地、板栗 *Castanea mollissima* 林地、柑橘 *Citrus reticulata* 林地、芒草 *Andropogon chinensis* 地的土壤 (0 ~ 75 cm) 有机碳质量分数的垂直分布及其储量。结果表明, 林地土壤 (0 ~ 75 cm) 有机碳质量分数随着土壤深度的增加而逐渐下降。除了板栗林地 30 ~ 45 cm 土层土壤有机碳(SOC)质量分数显著高于芒草地同一土层 ($P = 0.049$) 外, 其余不同林地同一土层 SOC 质量分数差异不显著 ($P > 0.05$), SOC 平均质量分数大小排序为: 板栗林地 ($14.759 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 12 年生杉木林地 ($13.537 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 20 年生杉木林地 ($12.807 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 自然更新灌木林地 ($11.656 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 柑橘林地 ($10.727 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 芒草地 ($10.088 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。土壤碳氮比随着土壤深度的增加而趋于下降, 芒草地各土层的碳氮比最低。杉木林采伐后无论是转变为杉木人工林地还是经济林地或者转变为经济林地后因管理不善再转变成芒草地, 林地土壤有机碳储量均处于亏损状态, 年均降幅最小的是板栗林地, 其次为 12 年生杉木林地和 20 年生杉木林地。表明在杉木林采伐迹地更新过程中, 选择落叶根深型植物更有利于土壤有机碳质量分数和储量的保持。图 2 表 6 参 26

关键词: 森林土壤学; 杉木林; 更新方式; 土壤有机碳; 土壤碳氮比; 有机碳储量

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2009)03-0333-08

Soil organic carbon: distribution and storage with five regeneration patterns in *Cunninghamia lanceolata* forests

XU Gui-lin^{1,2}, FANG Xi^{1,2}, TIAN Da-lun^{1,2}, TANG Zhi-juan^{1,2}, ZHANG Zhu-san^{1,2}

(1. Research Section of Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Forest Ecology, Colleges and Universities of Hunan Province, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: The vertical distribution and storage of soil organic carbon (SOC) in the depth of 0 – 75 cm were contrasted and discussed by sampling and laboratory analysis under forests of primary *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir) forests converted with regeneration patterns of a) secondary Chinese fir forests (Chinese fir 12 years and 20 years), b) natural woods, c) *Castanea mollissima* tree plantations, d) *Citrus reticulata* plantations and e) *Andropogon chinensis* grass in Huitong County, Hunan Province. The results showed SOC and C/N in vertical directions decreased generally with depth under different regeneration patterns. In 30 – 45 cm soil depth, the SOC content in the *C. mollissima* field was significantly higher than that in *A. chinensis* grass ($P = 0.049$, t test), but difference of SOC content was not significant in other layers among other regeneration patterns ($P > 0.05$, t test). The sequence of mean SOC content of 0 – 75 cm was *C. mollissima* > Chinese fir 12 years > Chinese fir 20 years > natural woods >

收稿日期: 2008-10-07; 修回日期: 2009-01-06

基金项目: 科学技术部国家野外科学观测研究站资助项目(20070822); 科学技术部公益性研究项目(2007415); 国家林业局资助项目(2007R23); 湖南省教育厅资助项目(06C923); 中南林业科技大学青年基金资助项目(05044B)

作者简介: 徐桂林, 从事森林生态系统定位研究。E-mail: guilin_xu2006@yahoo.com.cn。通信作者: 方晰, 教授, 博士, 从事森林生态学研究。E-mail: fangxizhang@sina.com

Citrus reticulata > *A. chinensis* grass. The five regeneration patterns resulted in loss of SOC storage (0 – 60 cm), with mean annual decrease being *C. mollissima* ($2.201 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) < Chinese fir 12 years ($2.666 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) < Chinese fir 20 years ($2.837 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) < natural woods ($3.207 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) < *A. chinensis* grass ($3.278 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) < *Citrus reticulata* ($3.565 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). Thus, for Chinese fir stands, regeneration with leaf-fall and deeper rooted trees will have a greater potential for SOC storage. [Ch, 2 fig. 6 tab. 26 ref.]

Key words: forest pedology; Chinese fir forest; regeneration pattern; soil organic carbon; soil C/N ratio; soil organic carbon storage

土壤作为陆地生态系统中二氧化碳(CO_2)的源或汇,在全球碳收支方面起到十分重要的作用。据估计,全球 1 m 土壤深度有机碳储量($1\ 394 \sim 1\ 576 \text{ Pg}$)^[1-2],约是大气碳储量(750 Pg)的 2 倍^[3],是陆地植物碳储量的 3 倍^[4]。土壤与大气之间的碳通量约占整个陆地生态系统碳通量的 $2/3$ ^[2]。因此,土壤有机碳微小的变化都可能对大气 CO_2 和全球碳循环产生明显的影响^[5],进而加剧或减缓全球变暖趋势。研究表明,至少从 1970 年开始,由人类对土地的利用所诱导的气候变化正在全球范围内影响着生态系统^[6]。土壤有机碳(SOC)是土壤养分循环转化的核心,对土壤结构的形成及其稳定性具有重要的意义,易受到气候和土地利用的影响^[7],而国际上关于土地利用对土壤碳源或汇的功能影响仍存在着争议与不确定性。因而,影响 SOC 库的研究仍是当前全球气候变化研究的一个热点。土地利用类型和经营管理措施影响着陆地生态系统凋落物输入和分解的速率以及土壤的矿化过程,从而影响 SOC 库的稳态,成为了影响 SOC 库的一个重要因子^[8]。研究表明,由森林转变为经济林地或牧草地^[9-11],由牧草地转变为经济林地^[9]或农田^[8]引起 SOC 质量分数和储量的降低。也有研究表明由森林转变为草地^[12]、农田转变为草地^[13]或林地^[14-15]以及由草地转变为农田^[16-17]提高了 SOC 的质量分数及储量,还有研究报道由森林转变为草地对 SOC 没有显著的影响^[18]。可见,不同土地利用方式引起的植被变化对 SOC 的影响表现出了不一致性。目前,关于一种林地或非林地转变成另一种林地或非林地过程中 SOC 质量分数及储量变化的研究不断涌现^[8-13],但对由同一种林地同时转变为多种不同更新方式林地土壤 SOC 质量分数及储量进行比较研究仍很少见,尤其在空间一致性、时间连续性的动态研究就更为缺乏。为此,作者对湖南会同杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林中心产区由第 1 代杉木人工林采伐迹地转变为第 2 代杉木人工林地、自然恢复灌木林地、板栗 *Castanea mollissima* 林地、柑橘 *Citrus reticulata* 林地和芒草 *Andropogon chinensis* 地土壤有机碳质量分数分布及其储量进行研究,为弄清不同更新方式下林地 SOC 质量分数与储量的变化特征,科学地认识土地利用变化对大气碳循环的影响,为评价我国土地利用变化对气候的影响提供理论参考。

1 研究地概况

研究地设于国家野外科学观测研究站——湖南会同杉木林生态系统定位研究站。该站地理坐标为 $26^{\circ}50'N$, $109^{\circ}45'E$,属于典型的亚热带湿润季风气候,年平均气温为 16.8°C ,年降水量为 $1\ 100 \sim 1\ 500 \text{ mm}$,年平均相对湿度 80%以上,为低山丘陵,海拔 $270 \sim 400 \text{ m}$,相对高度为 150 m 以下。地层古老,母岩以震旦纪板溪系灰绿色变质板页岩为主,土壤为山地黄壤。地带性植被为常绿阔叶林,气候、土壤等都利于杉木的生长。站内设有面积为 2.0 hm^2 试验小集水区 8 个(图 1),相互平行且自然地理状况基本相似,彼此相距不超过 100 m ,在 1987 年底对试验小集水区内 1966 年营造第 1 代杉木人工林进

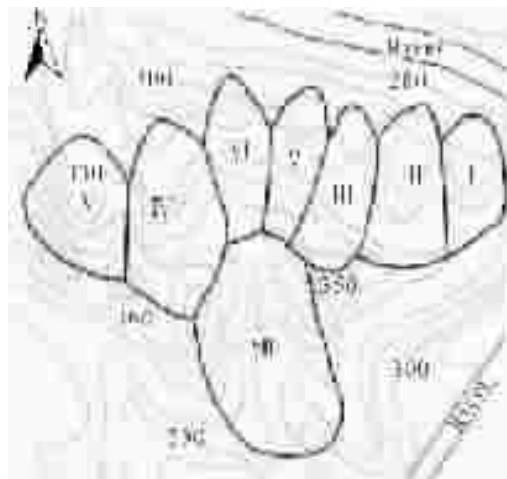


图 1 实验集水区分布示意图

Figure 1 A sketch map for position of study site

行人为干扰试验。1988 年春后又陆续在原有集水区营造了第 2 代杉木人工林,开展了第 2 代杉木林生态系统定位研究。

本研究选取Ⅱ号、Ⅲ号和Ⅶ号集水区内的第 2 代杉木人工林地(12 年生杉木林和 20 年生杉木林)、自然恢复灌木林地、板栗林地、柑橘林地和芒草地为研究对象。各林地基本情况如表 1。

表 1 样地分布与特征

Table 1 Position and characteristics for different regeneration fields

样地	集水区	更新 年限/a	平均 坡度/(°)	林分特征
12 年生杉木 林地	Ⅱ号	21	27	1990 年第 1 代杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> 林皆伐后,1996 年春皆伐所有杉木萌芽条及其他乔木、灌木和草本植物并堆烧,人工挖坑造林,栽植密度为 $1\ 500 \sim 2\ 130$ 株 $\cdot$ hm $^{-2}$,1996 – 1998 年期间,全林抚育 2 次 $\cdot$ a $^{-1}$,郁闭度为 0.7 ~ 0.8。
20 年生杉木 林地	Ⅲ号	21	25	1987 年第 1 代杉木林皆伐后,1988 年春炼山、整地,以 $1\ 500 \sim 2\ 490$ 株 $\cdot$ hm $^{-2}$ 营造杉木纯林。1988 – 1990 年间,每年进行 2 次(5 月和 8 月)全林抚育,郁闭度 0.8 ~ 0.9。
自然更新灌木 林地	Ⅶ号	21	29	1987 年按 50%强度对第 1 代杉木人工林进行间伐,持续到 1989 年进行皆伐后,任其自然演替恢复。林地内树种繁多,没有明显的优势木,形成了针阔叶混交灌木林,主要有:杉木萌芽条,白栎 <i>Quercus fabri</i> ,木姜子 <i>Litsea cubeba</i> ,枫香 <i>Liquidambar formosana</i> ,樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> ,糠皮树 <i>Mallotus barbatus</i> ,千年桐 <i>Vernicia montana</i> ,木荷 <i>Schima superba</i> ,杜茎山 <i>Maesa japonica</i> ,冬青 <i>Ilex purpurea</i> 。
板栗林地	Ⅱ,Ⅲ号交界处	21	26	均为 1987 年第 1 代杉木人工林采伐后经炼山、人工整地梯田式后栽植,每年采
柑橘林地	Ⅳ号山脚处	21	29	果后进行施用农家肥,春、夏季除草覆盖在地面上让其自行腐烂。
芒草地	Ⅲ,Ⅶ号交界处	21	10	1987 年对第 1 代杉木人工林采伐后炼山、人工整地梯田式后种植柑橘,因缺乏管理,现以芒草丛为优势种,几乎被芒草丛所覆盖。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集和分析方法

2008 年 1 月上旬,分别在 12 年生杉木林地、20 年生杉木林地和自然更新灌木林地的 2 个坡面的山麓、山坡和山脚各设置了 1 个采样点,在板栗林地、柑橘林地和芒草地内分别按上、中、下等 3 个部位各设置了 3 个采样点,共计 27 个采样点,均按 0 ~ 15, 15 ~ 30, 30 ~ 45, 45 ~ 60, 60 ~ 75 cm 分层采集土壤样品,同时用环刀法测定土壤容重。每层采约 1.0 kg 带回实验室,按各测定指标的要求进行土壤样品的处理,用重铬酸钾-水合加热法测定土壤有机碳(SOC);用半微量凯氏定氮法测定土壤总氮^[19]。

2.2 数据处理及土壤有机碳储量计算

数据处理采用 JMP7.0 统计软件,图表用 Excel 软件绘制。SOC 储量计算见式(1)。

$$S_{\text{SOD}} = \sum_{i=1}^n (C_i \times p_i \times T_i) \times 10^{-1}. \quad (1)$$

式(1)中, S_{SOD} 为特定深度的土壤有机碳储量(t $\cdot$ hm $^{-2}$), C_i 为第 i 层 SOC 质量分数(g $\cdot$ kg $^{-1}$), P_i 为第 i 层土壤容重(g $\cdot$ cm $^{-3}$), T_i 为第 i 层土层厚度(cm); n 为土层数。

3 结果与分析

3.1 不同更新方式林地土壤有机碳质量分数的垂直分布特征

不同更新方式林地土壤有机碳(SOC)质量分数的垂直分布如表 2 所示,各土层 SOC 质量分数单因素方差分析结果见表 3。由表 2 可知,不同更新方式林地的 SOC 质量分数均随着土壤深度的增加而下降,且 12 年生杉木林地、20 年生杉木林地在 0 ~ 15 cm 土层 SOC 质量分数均显著高于该林地相邻土

层($P<0.05$), 而其他林地相邻土层间 SOC 质量分数差异均不显著($P>0.05$)。这表明了杉木林枯枝落叶和根系在整个土体中对表土层 SOC 的贡献率高于其他林地。

以土壤深度拟合各地各层土壤 SOC 质量分数并进行成对 t 检验分析结果(表 3)表明, 除板栗林地在 30 ~ 45 cm 土层 SOC 质量分数显著高于芒草地($P = 0.049$)外, 不同更新方式林地间同一土层 SOC 平均质量分数虽存在一定的差异, 但均未达到显著水平($P>0.05$)。不同更新方式林地在 0 ~ 75 cm 土层 SOC 平均质量分数大小排序为: 板栗林地>12 年生杉木林地>20 年生杉木林地>自然更新灌木林地>柑橘林地>芒草地。

表 2 不同更新方式林地土壤有机碳质量分数

Table 2 Soil organic carbon content under different regeneration patterns

土壤深度/ cm	不同更新方式林地土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)					
	12 年生杉木林地 ^a	20 年生杉木林地 ^a	自然更新林地 ^a	板栗林地 ^b	柑橘林地 ^b	芒草地 ^b
0 ~ 15	18.656 ± 1.672 aA	20.460 ± 7.803 aA	15.358 ± 3.862 aA	21.746 ± 5.636 aA	14.747 ± 4.075 aA	15.878 ± 5.360 aA
15 ~ 30	14.654 ± 3.376 bA	14.693 ± 4.669 bA	14.284 ± 3.785 aA	16.759 ± 2.764 abA	14.646 ± 1.662 aA	12.650 ± 5.074 abA
30 ~ 45	12.177 ± 4.081 bcAB	12.484 ± 2.960 bcAB	11.564 ± 2.982 abAB	15.132 ± 3.334 abA	11.299 ± 1.916 abAB	9.180 ± 5.268 abB
45 ~ 60	9.929 ± 2.009 cdA	11.709 ± 3.329 bcA	9.299 ± 3.397 bcA	10.965 ± 4.742 bA	7.436 ± 1.802 bcA	6.852 ± 4.762 bA
60 ~ 75	8.509 ± 4.057 dA	8.342 ± 1.762 cA	6.997 ± 1.479 cA	9.195 ± 4.663 bA	5.507 ± 2.052 cA	5.882 ± 2.173 bA
平均值	13.537 ± 5.908	12.807 ± 4.667	11.656 ± 4.321	14.759 ± 5.882	10.727 ± 4.398	10.088 ± 5.519

说明:a 为 6 次重复的平均值,b 为 3 次重复的平均值。同一行不同大写字母、同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.2 不同更新方式林地土壤有机碳质量分数与全氮质量分数比值(C/N)

表 4 为不同更新方式林地土壤各土层土壤有机碳(SOC)质量分数与全氮质量分数比值(C/N)的变化。由表 4 可知, 不同更新方式林地土壤(0 ~ 75 cm)C/N 随着土壤深度的增加而逐渐降低, 且除 20 年生杉木林地在 0 ~ 15 cm 土层的 C/N 显著高于该林地相邻土层之外($P<0.05$), 其他林地相邻土层差异均不显著($P>0.05$)。

不同更新方式林地间同一土层 C/N 的大小不同: 0 ~ 15 cm 土层, 20 年生杉木林地最高, 芒草地最低, 且 20 年生杉木林地与 12 年生杉木林地、自然更新林地、柑橘林地和芒草地存在显著差异($P<0.05$); 15 ~ 30 cm 和 30 ~ 45 cm 土层, 板栗林地最高, 芒草地最低; 45 ~ 60 cm 和 60 ~ 75 cm 土层, 12 年生杉木林地最高, 芒草地最低, 但不同更新方式地间均没达到显著差异水平($P>0.05$)。

3.3 不同更新方式林地 SOC 储量

图 1 显示, 不同更新方式林地 0 ~ 15, 0 ~ 30, 0 ~ 45, 0 ~ 60, 0 ~ 75 cm 土层 SOC 储量从高到低排序均呈现为板栗林地>12 年生杉木林地>20 年生杉木林地>芒草地>自然更新林地>柑橘林地。0 ~ 15 和 0 ~ 30 cm 土层中, 不同更新方式林地 SOC 储量的差异未达到显著水平($P>0.05$); 0 ~ 45 cm 土层, 板栗林地 SOC 储量显著高于自然更新林地和柑橘林地 (P 值分别为 0.044 和 0.036), 0 ~ 60, 0 ~ 75 cm 土层 SOC 储量显著高于柑橘林地(P 值分别为 0.039 和 0.037), 其他不同更新方式林地间 SOC 储量差异不显著($P>0.05$)。0 ~ 30 cm 的土壤层中的碳储量占总碳储量的 57.62%以上, 保存

表 3 不同更新方式各土层土壤有机碳质量分数单因素方差分析

Table 3 One way ANOVA analysis of SOC content in soil layers under different regeneration patterns

土壤深度/cm	均方差		F 值	显著性检验
	处理间	处理内		
0 ~ 15	33.590	26.057	1.289	0.306
15 ~ 30	7.736	15.223	0.508	0.767
30 ~ 45	11.499	12.220	0.941	0.475
45 ~ 60	13.999	10.955	1.278	0.310
60 ~ 75	6.837	6.145	1.113	0.387

说明: 处理间自由度为 5, 处理内自由度为 21, 总自由度为 26。

表 4 不同更新方式土壤各层次 C/N 变化

Table 4 Changes of soil C/N ratio in each layer under different regeneration patterns

土壤深度/ cm	不同更新方式土壤各层次碳氮比					
	20 年生杉木林地 ^a	12 年生杉木林地 ^a	自然更新林地 ^a	板栗林地 ^b	柑橘林地 ^b	芒草地 ^b
0 ~ 15	12.947 ± 3.977 aA	9.855 ± 1.731 aB	10.019 ± 1.707 aB	10.178 ± 1.172 aAB	9.794 ± 1.995 aAB	9.166 ± 1.062 aB
15 ~ 30	8.974 ± 1.325 bA	9.012 ± 1.421 abA	8.847 ± 1.586 abA	9.340 ± 1.283 abA	9.267 ± 0.133 aA	7.756 ± 1.312 abA
30 ~ 45	8.071 ± 2.378 bcA	8.590 ± 1.338 abA	8.189 ± 1.618 abcA	8.938 ± 0.663 abcA	8.452 ± 1.320 abA	6.783 ± 3.170 abA
45 ~ 60	7.562 ± 1.270 bcA	7.702 ± 1.075 bcA	7.444 ± 2.004 bcA	7.267 ± 2.026 bcA	6.585 ± 1.928 bcA	5.865 ± 2.080 abA
60 ~ 75	5.839 ± 1.150 cA	6.736 ± 1.036 cA	6.482 ± 1.376 cA	6.517 ± 1.442 cA	5.455 ± 0.827 cA	5.592 ± 1.377 bA

说明：a 为 6 次重复的平均值，b 为 3 次重复的平均值。同一行不同大写字母、同一列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

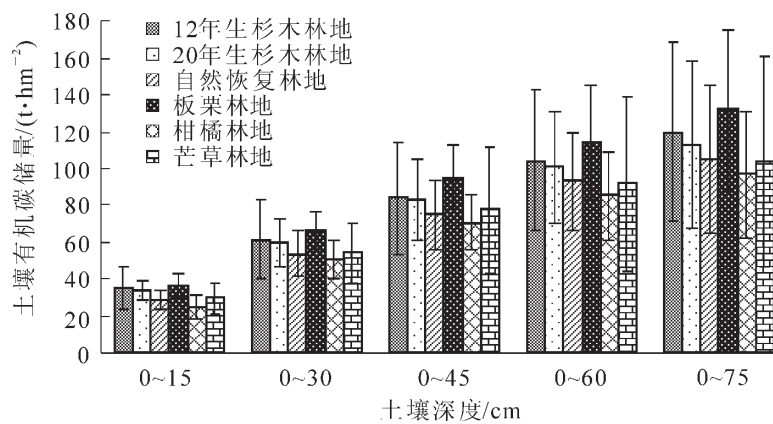


图 2 不同更新方式地土壤有机碳储量

Figure 2 SOC storage under different regeneration patterns

了绝大部分的碳。

以第 1 代 22 年生杉木林采伐时的 SOC 储量^[20]为对比，计算不同更新方式下各地 SOC 储量的年变化量和年均变化率。结果(表 5)表明，杉木林采伐后无论是转变为杉木人工林地还是经济林地或者转变为经济林地后因管理不善再转变成芒草地，林地 SOC 储量均处于亏损状态。在 0 ~ 15，0 ~ 30，0 ~ 45，0 ~ 60 cm 不同深度林地土壤每年亏损的 SOC 量不同。在 0 ~ 60 cm 土壤深度，杉木林地转变为 20 年生杉木林地、12 年生杉林地、自然更新林地、板栗林地、柑橘林地和芒草地后，SOC 储量的平均损失量分别为 2.837，2.666，3.207，2.201，3.565 和 3.278 t·hm⁻²·a⁻¹，年均降幅分别为 1.769%，

表 5 5 种更新方式林地与第 1 代 22 年生杉木林地土壤有机碳储量的比较

Table 5 Comparison of annual SOC storage in primary Chinese fir aged 22 years with five regeneration patterns

更新方式	SOC 储量的年变化量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)				SOC 储量的年变化率/%			
	0~15	0~30	0~45	0~60 cm	0~15	0~30	0~45	0~60 cm
20 年生杉木林地	- 0.906	- 1.817	- 2.672	- 2.837	1.717	1.880	1.925	1.769
12 年生杉木林地	- 0.857	- 1.810	- 2.603	- 2.666	1.624	1.819	1.876	1.666
自然更新林地	- 1.170	- 2.187	- 3.044	- 3.207	2.217	2.197	2.194	2.000
板栗林地	- 0.809	- 1.573	- 2.083	- 2.201	1.533	1.581	1.501	1.373
柑橘林地	- 1.358	- 2.354	- 3.242	- 3.565	2.572	2.365	2.337	2.223
芒草地	- 1.106	- 2.173	- 2.924	- 3.278	2.095	2.183	2.107	2.044

说明：6 种更新方式林地的使用年限均以 21 a 计算。

1.666%, 2.000%, 1.373%, 2.223%和 2.044%。

4 结论与讨论

4.1 不同更新方式林地土壤有机碳质量分数空间差异

土壤有机碳(SOC)是生态系统在特定条件下的动态平衡值,其主要来源于植物、动物、微生物残体及其排泄物和分泌物,并处于不断分解与合成的动态过程^[20]。杉木林采伐迹地不同更新方式引起了植被类型、林地的外界环境条件以及土壤特性等发生了变化,导致不同更新方式林地 SOC 质量分数的不同,林地 SOC 质量分数随着土壤深度的增加而逐渐下降,但不同更新方式林地 SOC 质量分数随着土壤深度变化程度存在一定的差异性, SOC 平均质量分数大小依次排序为:板栗林地>12 年生杉木林地>20 年生杉木林地>自然更新林地>柑橘林地>芒草地,表明采用不同的方式进行林地更新对 SOC 质量分数产生一定的影响。

不同更新方式间同一土层除了板栗林地 30 ~ 45 cm 土层 SOC 质量分数显著高于芒草地 ($P = 0.049$) 外,其余差异均不显著,但板栗林地各土层 SOC 质量分数均高于杉木林地,0 ~ 15 cm 土层表现比较明显。原因可能是板栗为落叶阔叶树种,地表枯枝落叶较多,而杉木为常绿针叶树种,枯枝落叶能够在树干宿存数年(约 4 a)而不凋落^[21],地表枯枝落叶少。但同样是由杉木林采伐迹地转变为柑橘林地各土层 SOC 质量分数却低于杉木林地,其原因可能是柑橘为矮小树种,林地稀疏,通风状况好,受光照条件好,经常性人为经营管理锄去杂草和修枝,破坏了柑橘林土壤表层结构,增加了土壤有机质的氧化分解。与其他林地相比,由杉木林采伐迹地转变为柑橘林地,由于缺乏管理,柑橘林地转为芒草地,芒草丛生,根系浅,地表上枯死物极少,在雨季,雨水多,加速了土壤养分及 SOC 的流失,从而导致 SOC 质量分数降低。

有研究表明,自然更新灌木林地受到人为干扰较小,凋落物数量和质量均优于人工林,有利于养分的储存和转化,比人工林含有更多的有机碳^[22]。本研究中自然更新灌木林地各土层 SOC 质量分数却低于杉木人工林地,原因可能是在自然更新过程中,植物群落恢复缓慢,早期以草本植物为主,现虽多为灌木,但地表凋落物仍很少,地下根系生物量较低,在雨季,雨水多,不利于土壤养分及 SOC 的保持。同一栽植代数 2 个不同年龄的杉木林地各土层 SOC 质量分数没有显著的差异,但 0 ~ 60 cm 土层,12 年生杉木林地 SOC 质量分数均高于 20 年生杉木林地,可能是由于杉木连栽造成 SOC 下降^[21,23],而 20 年生杉木林根系发达,所以在 60 cm 以下的 SOC 质量分数更高。

4.2 不同更新方式林地土壤有机碳质量分数、土壤全氮和 C/N 相关系数

土壤中的 C/N 对土壤中有机质分解具有重要作用。在某一特定土壤中的 C/N 基本上为一常数,这意味着 SOC 质量分数水平在某种程度上取决于土壤中能够同化成腐殖质的有效氮的质量分数水平^[24]。有机物 C/N 越高,分解速率越慢,相反,有机质有较快的矿化作用,土壤有机层有较高的有效氮^[25]。本研究中,土壤 C/N 随着土壤深度的增加而逐渐降低,不同更新林地各土层的 C/N 以芒草地最低。

表 6 显示,不同更新方式林地 SOC 与土壤全氮存在极显著正相关性($P < 0.01$), R 最大值达到 0.966;除了 20 年生杉木林地土壤全氮与 C/N 为负相关性外($R = -0.092$, $P > 0.05$),其余更新方式林地土壤全氮与 C/N 呈显著或极显著正相关性,表明 20 年生杉木林地土壤氮素主要以无机氮的形式存在,其他更新林地土壤中氮素主要以有机氮的形式存在于

表 6 不同更新方式林地土壤有机碳、土壤全氮与 C/N 相关系数

Table 6 Correlation coefficient of SOC, TN and C/N under different regeneration patterns

植被类型	样本数/个	相关系数 R		
		SOC 与土壤全氮	SOC 与 C/N	土壤全氮与 C/N
12 年生杉木林地	30	0.922**	0.838**	0.585**
20 年生杉木林地	30	0.501**	0.805**	-0.092
自然更新林地	30	0.804**	0.885**	0.451*
板栗林地	15	0.966**	0.931**	0.831**
柑橘林地	15	0.891**	0.901**	0.623*
芒草地	15	0.924**	0.941**	0.886**

说明: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

有机质中, 说明了不同更新方式林地土壤 C/N 存在着一定的差异。

4.3 不同更新方式林地土壤有机碳储量的差异

本研究中, 采伐迹地的不同更新方式可引起林地土壤碳储量的差异, 不同更新方式林地 SOC 储量从高到低排序均呈现为板栗林地>12 年生杉木林地>20 年生杉木林地>芒草地>自然更新林地>柑橘林地, 但除了板栗林地与芒草地土壤碳积累差异显著外, 其他林地与芒草地土壤碳积累差异不大, 柑橘林地的 SOC 储量甚至低于芒草地。板栗林地受人为活动的影响, 林地光照、温度等气候条件较好, 土壤有机质质量分数较高, 土壤容重较小, 且杉木林连栽引起土壤容重明显增加^[21], 导致板栗林地 SOC 储量与杉木林地差异不显著。芒草的根系较浅, 根生物量较低, 难以向土壤中输入足够的有机物质, 尤其是深层土壤中草本根系更少, SOC 储量难以与乔木林地相比^[26]。另一方面, 芒草地是因柑橘林管理不善而被优势种芒草入侵并建群而演变来的, 也表明了适当撂荒有利于 SOC 储量的保持。

0 ~ 15 和 0 ~ 30 cm 土层中, 不同更新方式林地 SOC 储量的差异未达到显著水平。各地土壤中 57.62% 的碳分布在土壤表层(0 ~ 30 cm), 而人类的各种经营活动也主要发生土壤表层。因此, 人类的经营方式对土壤中的碳也就产生巨大的影响, 这也往往决定了森林土壤中的碳库是“源”或“汇”的作用。

杉木林采伐后无论是转变为杉木人工林地还是经济林地或者转变为经济林地后因管理不善再转变成芒草地, 林地 SOC 储量均处于亏损状态。年均降幅最小的是板栗林地, 其次为 12 年生杉木林地和 20 年生杉木林地。可见, 森林采伐后, 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中的碳。在进行杉木林采伐迹地更新过程中, 选择落叶根深经济作物更有利于 SOC 质量分数和储量的保持, 经济作物地适当的撂荒也有利于 SOC 储量的保持, 但不是因为土壤 SOC 质量分数的增加而增加, 而是土壤容重增大的缘故。

参考文献:

- [1] ESWARAN H, VAN DEN BERG E, REICH P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1993, **57**: 192 – 194.
- [2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, **298**: 156 – 159.
- [3] GARDI C, SCONOSCIUTO F. Evaluation of carbon stock variation in Northern Italian soils over the last 70 years[J]. *Sustain Sci*, 2007, **2** (2): 237 – 243.
- [4] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. *Nature*, 1990, **348**: 232 – 234.
- [5] SCHOMEL D S, BRASWELL B H, HOLLAND E A, *et al.* Climate, epahic, and biotic control over storage and turnover in carbon in soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, **8**: 279 – 293.
- [6] ROSENZWEIG C, KAROLY D, VICARELLI M, *et al.* Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change [J]. *Nature*, 2008, **453**: 353 – 358.
- [7] HOUGHTON J T. *IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC 2001*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [8] SCHLESINGER W H. An overview of the carbon cycle [M]//LAL R. *Soils and Global Change Advances in Soil Science*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995: 9 – 25.
- [9] POWERS J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica[J]. *Ecosystems*, 2004, **7**: 134 – 146.
- [10] HUGHES R F, KAUFFMAN J B, CUMMINGS D L. Dynamics of aboveground and soil carbon and nitrogen stocks and cycling of available nitrogen along a land-use gradient in Rondônia, Brazil [J]. *Ecosystems*, 2002, **5** (3): 244 – 259.
- [11] GARCÍA-OLIVA F, GALLARDO LANCHO J F, MONTAÑO N M, *et al.* Soil carbon and nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico [J]. *Agrofor Syst*, 2006, **66**: 93 – 100.
- [12] OSHER L J, MATSON P A, AMUNDSON R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii[J]. *Biogeochemistry*,

- 2003, **65**: 213 – 232.
- [13] MENSAH F, SCHOENAU J J, MALHI S S. Soil carbon changes in cultivated and excavated land converted to grasses in east-central Saskatchewan[J]. *Biogeochemistry*, 2003, **63**: 85 – 92.
- [14] BASHKIN M A, BINKLEY D. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii[J]. *Ecology*, 1998, **79** (3): 828 – 833.
- [15] COMPTON J E, BOONE R D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment [J]. *Ecology*, 2000, **81** (1): 88 – 98.
- [16] COCHRAN R L, COLLINS H P, KENNEDY A, *et al.* Soil carbon pools and fluxes after land conversion in a semiarid shrub-steppe ecosystem [J]. *Biol Fertil Soils*, 2007, **43**: 479 – 489.
- [17] GUO Lanbin, WANG Mengben, GIFFORD R M. The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change from a native pasture to a pine plantation [J]. *Plant Soil*, 2007, **299**: 251 – 262.
- [18] CONANT R T, SIX J, PAUSTIAN K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States (II) changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence[J]. *Biol Fertil Soils*, 2004, **40**: 194 – 200.
- [19] 田大伦. 杉木林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 方晰. 杉木人工林生态系统碳贮量与碳平衡的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2004.
- FANG Xi. *Carbon Storage and Balance in Chinese Fir Plantation Ecosystem* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2004.
- [21] 盛炜彤, 范少辉. 杉木人工林长期生产力保持机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [22] 陈爱玲, 游水生, 林德喜. 阔叶林地不同更新方式下土壤理化性质的变化[J]. 浙江林学院学报, 2001, **18** (2): 127 – 130.
- CHEN Ailing, YOU Shuisheng, LIN Dexi. Soil physical and chemical properties under different regeneration of broad leaved forest land [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2001, **18** (2): 127 – 130.
- [23] 罗云建, 张小全. 杉木连栽地力退化和杉阔混交林的土壤改良作用[J]. 生态学报, 2007, **27** (2): 715 – 724.
- LUO Yunjian, ZHANG Xiaoquan. The assessment of soil degradation in successive rotations of Chinese fir plantation and the soil amelioration of mixed plantation of Chinese fir and broad-leaved[J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (2): 715 – 724
- [24] BRADY A C, WEIL R R, KEENEY D R. *The Nature and Properties of Soils*[M]. 13ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 21 – 526.
- [25] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28** (8): 3938 – 3948.
- WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen, and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 3938 – 3948.
- [26] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. 中国农业科学, 2005, **38** (3): 544 – 550.
- JIANG Yong, ZHANG Yuge, LIANG Wenju, *et al.* Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquatic brown soil as affected by land use [J]. *Sci Agric Sin*, 2005, **38** (3): 544 – 550.