

不同经营措施对毛竹林碳储量 及碳分配影响

唐晓鹿¹, 范少辉^{1*}, 漆良华¹, 刘广路¹, 官凤英¹, 杜满义¹, 沈楚新²

(1. 国际竹藤中心/竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; 2. 湖北省丁母山林场, 湖北 赤壁 437300)

摘要: 以无经营毛竹纯林为对照(Ⅰ), 以垦复(Ⅱ)、施用除草剂(Ⅲ)、劈草毛竹纯林(Ⅳ)为研究对象, 研究不同经营措施对毛竹林碳储量及碳分配影响。结果表明: (1) 与对照相比, 垦复、施用除草剂、劈草均增加了植被层碳储量; 各林分植被碳储量分别为 30.98、33.04、33.19、31.21 t/hm², 地上乔木层碳储量占主体, 分别为 23.68、25.01、26.34、25.21 t/hm²。(2) 施用除草剂增加毛竹林生态系统碳储量及土壤碳储量, 垦复、劈草降低了毛竹林生态系统碳储量和土壤碳储量; 毛竹林生态系统碳储量分别为 113.15、98.13、131.90、112.59 t/hm², 土壤碳储量占主体, 分别为 86.17、65.09、98.71、80.39 t/hm²。(3) 毛竹林植被碳素(CO₂)年固定量分别为 9.33、11.29、9.94、9.95 t/(hm²·a), 相当于固定 CO₂ 34.21、41.38、36.47、36.48 t/(hm²·a), 地上乔木层碳固定量的增加是毛竹林植被碳素年固定量增加的主要原因。

关键词: 碳储量; 碳分配; 毛竹林; 经营措施

中图分类号: S718.55+6 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)04-0736-07

Effect of Different Managements on Carbon Storage and Carbon Allocation in Moso Bamboo Forest (*Phyllostachys pubescens*)

TANG Xiao-lu¹, FAN Shao-hui^{1*}, QI Liang-hua¹,
LIU Guang-lu¹, GUAN Feng-ying¹, DU Man-yi¹, SHEN Chu-xin²

(1. International Centre for Bamboo and Rattan/Key Laboratory of Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 2. Administration Bureau of Dingmushan Farm of Hubei Province, Chibi 437300, China)

Abstract: Carbon storage in forest ecosystems is a basic parameter to predict the carbon exchange between forest ecosystems and atmosphere, and it plays a critical role in mitigating global climate change. The fast-growing and expanding growing area of Moso bamboo indicate that its carbon storage is increasing. Application of management in Moso bamboo forest is one of the most important measures to improve yield, thus, in this research, pure Moso bamboo forest with no management was selected as the control (Ⅰ) and managements of reclamation (Ⅱ), herbicide application (Ⅲ) and grass-chopping (Ⅳ) forests were selected as research stand. The carbon stock and allocation were analyzed and the results showed: (1) Compared with control stand, managements of reclamation, herbicide application and grass-chopping increased vegetational carbon stock; total vegetational carbon stock were 30.98, 33.04, 33.19, 31.21 t/hm², respectively, and above-

收稿日期: 2012-04-10 修回日期: 2012-05-14

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201104008)、国际竹藤中心基本业务专项(1632008005、1632010005)和江西省财政林业重大专项(2011511101)。

作者简介: 唐晓鹿(1986—), 男, 硕士, 主要从事竹林生态研究, E-mail: lxt2010@163.com; * 通讯作者: 范少辉, 研究员, 博士生导师, 主要从事竹林培育和竹林生态的研究, E-mail: fansh@icbr.ac.cn。

ground carbon storage was the main part, which explained by 23.68, 25.01, 26.34 and 25.21 t/hm². (2) Herbicide application increased both ecosystem carbon storage and soil carbon storage, however, management of reclamation and grass-chopping decreased both ecosystem carbon storage and soil carbon storage. Ecosystem carbon storage of each stand was 13.15, 98.13, 131.90 and 112.59 t/hm², and soil carbon stock was the main part with an amount of 86.17, 65.09, 98.71, 80.39 t/hm². (3) The annual carbon sequestration of each stand was 9.33, 11.29, 9.94, 9.95 t C(hm² · a), equaling to 34.21, 41.38, 36.47, 36.48 t CO₂ / (hm² · a). Application of management in Moso bamboo forest could increase vegetation carbon sequestration.

Key words: carbon storage; carbon distribution; Moso bamboo forest (*Phyllostachys pubescens*); management

以 CO₂ 浓度增加和地球表面温度升高为主要特征的气候变化正深刻影响着陆地生态系统的结构与功能,并威胁着人类的生存与安全,成为近年来科学家研究的热点与重点^[1]。森林生态系统作为陆地生态系统主体,储存了陆地生态系统地上部分 80% 和地下 70% 的有机碳^[2],其微小变化就会导致大气 CO₂ 较大改变^[3]。据 IPCC^[4] 报道,森林经营与管理是增加森林生态系统碳储量重要措施,在很多地区得到应用^[5-6],并得出森林生态系统是碳源还是碳汇主要依靠具体的干扰和管理措施^[7]。周国模^[8]与李正才等^[9]研究表明,集约经营能显著增加竹林植被碳储量,但集约经营对土壤扰动较大,导致土壤微生物呼吸作用增强,加速了土壤有机碳的分解,降低了土壤有机碳储量,且强烈的人为干扰也会降低生态系统碳储量^[10]。也有研究表明,土壤开垦变成人工林和农田生态系统后,降低生态系统碳输入,导致碳储量显著降低^[11],但施肥是林业管理的一项基本措施,施用有机肥和矿质肥能提高土壤有机碳储量^[12]。林地覆盖、采伐剩余物处理也会对生态系统碳储量产生影响^[12-13]。

竹林是我国南方重要的森林资源,自上世纪 90 年代以来,不同区域、不同混交模式毛竹林生态系统碳分配、碳储量和碳循环已有较多研究^[14-18]。但毛竹林在我国南方分布较为广泛,经营方式存在较大差异。不同经营措施对毛竹林生态系统碳分配、碳储量会产生重要影响,也会影响毛竹林生态系统碳汇/源功能,现阶段缺乏同一区域不同经营措施对毛竹林生态系统碳储量的对比研究。因此,本研究以无经营毛竹纯林为对照(Ⅰ),以垦复(Ⅱ)、施用除草剂(Ⅲ)、劈草毛竹纯林(Ⅳ)为研究对象,研究不同措施对毛竹林生态系统碳储量及碳分配格局的影响,为实现毛竹林多目标经营提供基本的理论依据和技术支持。本研究区域位于我国毛竹林北缘分布区,开展不同区域尺度的毛竹林碳储量及碳分配研究为克服因区域和植被差异导致难以精确估算全球森林生态系统碳库提供重要的参考和基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省赤壁市丁母山林场(E113°32′~114°13′,N29°28′~29°55′),属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均降雨量 1 251~1 608 mm,最大降雨量 2 677.6 mm,最小降雨量 910.22 mm,降雨多集中在 5—8 月。年平均气温 16.9°,无霜期 247~261 d。土壤主要为黄棕壤,由石灰岩、碳质页岩发育而来。研究区主要是毛竹纯林,面积约 666.67 hm²,林下植被主要有马褂木(*Liriodendron chinense*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、土茯苓(*Smilax glabra*)、毛板栗(*castanea mollissima*)、钩栲(*Castanopsis tibetana*)、野板栗(*Astanea mollissima* var. *pollicarpa*)及一年生草本植物等。

1.2 样地设置

2011 年 3 月 25 日,根据毛竹林经营现状,以无任何经营毛竹纯林作为对照(Ⅰ),选取立地条件基本一致的典型经营措施毛竹纯林—垦复(Ⅱ)、施用除草剂(Ⅲ)和劈草(Ⅳ)林分为研究对象,每种经营措施样地规格为 20 m × 20 m 3 次重复,共 12 块样地。垦复林分每 3 年进行一次全垦,始于 20 世纪 90 年代,夏初进行,垦复深度为 30 cm,垦复时清除林分内的杂草、灌木等,最近一次垦复时间为 2011 年 5 月;每年 7 月晴天,向除草剂样地喷施除草剂—农达(有效浓度为 41%)和加利佳,喷施浓度为 5%,喷施后,林分内灌木杂草在 2 天内就死亡;劈草样地每年 5 月和 9 月进行两次劈草,劈除样地内所有的杂草与灌木。施用除草剂和劈草措施始于 2000 年。20 世纪 90 年代前,毛竹林属于集体管理,各林分密

度无显著差异,但后期分到农户后,毛竹林经营造成了林分密度、胸径的差异。采用便携式 GPS、罗盘仪、皮尺等对样地立地因子和植被状况进行调查,主要指标包括:海拔、坡度、胸径、林分密度、树高和郁闭度等。样地的基本情况如表 1 所示。

表 1 样地基本情况

Tab.1 Brief description of standard plots

经营措施 Management	平均海拔/m Average altitude	坡度/° Gradient	平均树高/m Average height	平均胸径/cm Average diameter	平均密度/hm ² Average density	郁闭度 Canopy density
对照 Control(I)	161	16	11.1	8.2	2 908 ± 431	0.7 ~ 0.8
垦复 Managements of redamation(II)	158	25	12.6	9.1	3 167 ± 216	0.8 ~ 0.9
除草剂施用 Herbicide application(III)	112	5	13.1	8.3	4 017 ± 138	0.9
劈草 Gress-chopping(IV)	168	17	12.3	8.8	3 142 ± 356	0.8 ~ 0.9

1.3 碳储量及年生长量测定

因本研究区内,毛竹地上部分全部被利用,故将地上部分作为一个整体研究,采用毛竹单株理论生物量进行估算^[19]。每木检尺测定毛竹胸径和年龄后,查出每株毛竹生物量,求和得出样地总生物量。毛竹生物量年生长量可分为二个部分:一个部分是 1 度新竹生长量,二是老竹生物量积累。新竹生物量积累查单株理论生物量表估算,老竹生物量积累则通过估算同一胸径,不同年龄生物量差异估算。样地里所有毛竹生物量积累之和即为毛竹林年生长量。碳储量估算均采用 0.5 作为换算系数^[18]。由于林下植被到 12 月时都枯萎了,故并作凋落物处理,因此本研究并未单独列出林下植被碳储量。

1.4 样品采集及碳储量测定

根样品采集采用根钻法(直径为 8 cm,深度为 40 cm)。因毛竹 4—9 月生长活跃,11 月后逐渐停止生长,故本研究 12 月中旬采集样品进行能更加准确的测量毛竹地上和地下生物量。毛竹根系分布在 40 cm 以内,大部分分布在 0 ~ 30 cm,故本研究 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 分层采集根样品,每个样地随机选取 5 个点,取样后同一层次 5 个点混合。将样品带回实验室用水清洗干净,根据根径大小,分为粗根(>2 mm)和细根(<2 mm)^[20]。根生物量计算公式为^[16]。

$$W_r = m \times 100 / \pi \times (D/2)^2 \tag{1}$$

式中 W_r 为根系生物量(g/m²), m 为平均每个土芯根干质量(g), π 为圆周率, D 为土钻直径(cm)。

鞭、笋采用收获法,在每块样地内,随机选取 3 个 1 m × 1 m 的小样方,挖出所有竹鞭。同时,在每块样地内,随机选取 5 个标准竹笋,挖出后用自来水清洗净。同时各取 400 g 鞭、笋新鲜样品带回实验室备用。所有植物样品均在 65 °C 烘至恒重测定生物量,并粉碎用于测定植物碳素含量。

凋落物收集:2011 年 12 月,在每块样地内,随机布设 3 个 1 m × 1 m 小样方,收集现存凋落物量,带回实验室烘干,65 °C 烘至恒重测定生物量,并取部分样品粉碎后测定碳素含量。2011 年 3 月,每块样地内随机安置 3 个 1 m × 1 m 凋落物收集器,以后每个月中旬收集凋落物,用于估算年凋落物量,收集持续时间为 2011 年 4 月 13 日至 2012 年 3 月 15 日。毛竹根、鞭、笋、凋落物碳素含量均采用重铬酸钾-外加加热法测量。碳储量即为生物量乘以含碳素含量。

土壤样品采集:因植物对土壤有机质的影响主要集中于 40 cm 内^[21],因此本研究采用土壤剖面法分层采集 0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm 土壤样品。每个样地内随机选取 3 个采集点,将同一样地,同一层次土样混合,共获取 24 个土样。土壤在室内风干后研磨粉碎,分别过 0.149 mm 和 2 mm 筛后用于测量土壤有机碳等。同时,环刀法分层取土壤原状土测定土壤容重等。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加加热法测量。

土壤总碳储量采用以下公式计算^[22]:

$$S_i = D_i \times E_i \times C_i \times S \tag{2}$$

其中 S_i 为土壤碳储量 (t/hm^2) , C_i 为有机质含量 (%) , D_i 为土壤密度 (g/cm^3) , E_i 为土层深度 (cm) S 为面积 hm^2 。

1.6 数据处理

数据统计分析在 SPSS 17.0 和 Excel 2003 软件下完成 ,采用单因素方差(One-way ANOVA) 分析根、秆、地上碳储量 ,土壤密度及土壤碳储量差异 ,采用最小显著差数法(LSD) 比较不同参数间的显著性差异 ,显著水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 植被层碳储量

不同经营措施毛竹林植被碳储量分别为 30.98、33.04、33.19、31.21 t/hm^2 (表 2)。地上乔木层碳储量是植被碳储量的主体 ,林分 I、II、III、IV 分别为 14.29、18.28、20.33、17.11 t/hm^2 ,分别占整个植被层碳储量的 46.13%、55.33%、61.25% 和 54.82% ,各林分依次排列为 III > II > IV > I。

不同经营措施地下碳储量排列顺序为 I > IV > II > III ,而地上碳储量和地上与地下碳储量比例排列顺序相反 ,为 III > II > IV > I ,与对照相比 ,垦复、施用除草剂和劈草能降低毛竹林地下碳储量分配 ,增加地上碳分配。凋落物层碳储量排列顺序为 II > I > III > IV。

表 2 植被层碳储量及空间分布
Tab.2 Carbon storage and its spatial distribution t/hm^2

项目 Item	对照 Control (I)	垦复 Managements of reclamation (II)	除草剂施用 Herbicide application (III)	劈草 Gress-chopping (IV)		
地上 Aboveground	14.29 ± 1.14a(46.13)	18.28 ± 2.88b(55.33)	20.33 ± 0.38b(61.25)	17.11 ± 1.49ab(54.82)		
地下 Belowground	0 ~ 20 cm	细根 Fine root	2.30 ± 0.60d(7.42)	1.78 ± 0.62c(5.39)	0.57 ± 0.01a(1.72)	1.27 ± 0.48b(4.07)
		粗根 Coarse root	1.05 ± 0.30c(3.39)	0.36 ± 0.06a(1.09)	0.46 ± 0.07a(1.39)	0.77 ± 0.43b(2.48)
	20 ~ 40 cm	细根 Fine root	0.62 ± 0.13b(2.00)	0.65 ± 0.04b(1.97)	0.51 ± 0.03a(1.54)	0.71 ± 0.27b(2.27)
		粗根 Coarse root	0.93 ± 0.33d(3.00)	0.45 ± 0.11b(1.36)	0.26 ± 0.04a(0.78)	0.72 ± 0.12c(2.31)
竹根小计 Sum of root	4.90(15.81)	3.24(9.81)	1.80(5.43)	3.47(11.13)		
秆 Sheath	4.49 ± 0.38b(14.49)	3.49 ± 0.08a(10.56)	4.21 ± 0.46ab(12.68)	4.63 ± 0.43b(14.82)		
笋 Rhizome	3.99 ± 0.35c(12.89)	4.35 ± 0.21b(13.17)	3.87 ± 0.89a(11.66)	4.10 ± 0.74ab(13.14)		
乔木层小计 Sum of tree layer	27.67 (89.32)	29.36(88.87)	30.21 (91.02)	30.31 (93.91)		
凋落物 Litter	3.31 ± 0.0.29b(10.68)	3.68 ± 0.77b(11.13)	2.98 ± 0.39b(8.98)	1.90 ± 0.0.59a(6.09)		
地上: 地下 Above -: below - ground	0.86	1.24	2.26	1.21		
总计 Total	30.98(100)	33.04(100)	33.19(100)	31.21(100)		

表中数据为平均值 ± 标准偏差 ($n = 3$, t/hm^2) ,同一列中 ,不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。括号里面数字为百分数(%)。

The data in the table is Mean ± SD ($n = 3$ t/hm^2) . In the same volume , the data with different letters indicate significant difference at level of 0.05. Data in the bracket represent percentage (%) .

不同经营措施毛竹林的碳储量分配格局不同。林分 I 碳储量排列顺序依次为地上 > 竹根 > 竹秆 > 竹笋 > 凋落物 ,地上/地下为 0.86; 林分 II 碳储量排列顺序依次为地上 > 竹笋 > 凋落物 > 竹秆 > 竹根 ,地上/地下为 1.24; 林分 III 碳储量排列顺序依次为地上 > 竹秆 > 竹笋 > 凋落物 > 竹根 ,地上/地下为 2.26; 林分 IV 碳储量排列顺序依次为地上 > 竹秆 > 竹笋 > 竹根 > 凋落物 ,地上/地下为 1.21。表明竹林经营能显著提高地上碳储量的分配比例。

2.2 土壤碳储量

在生物和气候等因素相互作用下 ,林地土壤形成了不同的土壤层次结构 ,有机碳含量和碳储量随土壤深度变化而变化。从土壤碳储量空间分布来看 ,不同经营措施毛竹林生态系统有机碳含量和碳储量均随着深度增加而降低 ,均以 0 ~ 20 cm 较高 ,20 ~ 40 cm 较低(表 3)。林分 I 0 ~ 20 cm 土壤有机质为碳储量为 59.07、42.62、65.67、52.66 t/hm^2 ,分别占土壤总碳储量的 68.66%、65.47%、66.53%、65.50%。土壤总碳储量排列为 III > I > IV > II ,分别为 98.71、86.17、80.39、65.09 t/hm^2 。表明 ,垦复、劈草降低土壤碳储量 ,改变了毛竹林生态系统的碳分配格局。

土壤密度随土壤深度增加而增加,但不同林分差异不大。0~20 cm 与 20~40 cm 均以Ⅳ最低,Ⅲ最高,且两者差异达到显著水平,表明施用除草剂能增加土壤密度,使土壤板结。不同经营类型毛竹林 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳含量均为Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ,林分Ⅱ 0~20 cm 层土壤有机碳含量均显著低于其它三种经营措施,表明垦复加速了有机质分解,不利于土壤有机碳积累。

表 3 土壤有机碳含量与碳储量
Tab.3 Soil SOC content and carbon storage

林分 Stand	土壤密度/(g·cm ⁻³)		有机质含量/(g·kg ⁻¹)		碳储量/(t·hm ⁻²)		总计 /(t·hm ⁻²) Total
	Bulk density		SOC content		Carbon storage		
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	
I	1.27±0.07b	1.31±0.05ab	23.30±0.20b	10.31±1.50ab	59.17±0.50bc(68.66)	27.00±3.92ab(31.34)	86.17
II	1.19±0.01ab	1.22±0.12a	17.91±1.93a	9.21±0.58a	42.62±4.59a(65.47)	22.47±1.41a(34.53)	65.09
III	1.27±0.01b	1.32±0.03b	25.86±0.84b	12.52±1.78b	65.67±1.78c(66.53)	33.04±4.69b(33.47)	98.71
IV	1.11±0.13a	1.18±0.06a	23.72±1.88b	11.75±1.55ab	52.66±4.18b(65.50)	27.74±3.65ab(34.50)	80.39

同一列中,不同字母表示差异显著(P<0.05)。

In the same volume, the data with different letters indicate significant difference at level of 0.05.

2.3 毛竹林生态系统碳储量

林分 I、II、III、IV 生态系统碳储量分别为 113.15、98.13、131.90 和 112.59 t/hm²(表 4)。其中土壤层碳储量最大,分别占总碳储量的 76.16%、66.34%、74.84% 和 71.40%,约是植被层碳储量的 2~3 倍;其次为乔木层,分别占 20.91%、29.91%、22.90% 和 30.31%;凋落物层最小,仅占 2.92%、3.75%、2.26% 和 1.68%。

表 4 各组分碳储量
Tab.4 Carbon storage in each component

项目 Item	对照 Control (I)	垦复 Managements of reclamation (II)	除草剂施用 Herbicide application (III)	劈草 Gress-chopping (IV)
乔木层 Tree layer	23.67(20.91)	29.36(29.91)	30.21(22.90)	30.31(26.92)
凋落物层 Litter layer	3.31(2.92)	3.68(3.75)	2.98(2.26)	1.89(1.68)
土壤层 Soil layer	86.17(76.61)	65.09(66.34)	98.71(74.84)	80.39(71.40)
地上:地下 Above: below ground	1:3.19	1:1.97	1:2.97	1:2.50
总计 Total	113.15	98.13	131.90	112.59

2.4 植被层碳素年固定量

碳素年固定量能够很好指示森林生态系统生产力。由表 5 知,林分 I、II、III、IV 乔木层碳素(CO₂)年固定量分别为 5.31、6.60、6.10、7.49 t/(hm²·a),相当于固定 CO₂ 量 19.48、24.19、22.36、27.46 t/(hm²·a);凋落物碳素(CO₂)年固定量分别为 4.02、4.69、3.84、2.46 t/(hm²·a),相当于固定 CO₂ 量 14.73、17.19、14.11、9.02 t/(hm²·a)。林分 II、III、IV 碳素总固定量均高于对照林分 I,分别是对照林分的 1.21、1.06 和 1.06 倍,说明,垦复、施用除草剂、劈草能提高毛竹林植被层碳固定能力。

3 结论与讨论

3.1 乔木层碳储量

经营措施的差异,导致不同经营措施毛竹林植被碳储量存在差异。植被碳储量 30.98~33.19 t/hm²,依次排列为 III>II>IV>I,表明,垦复、施用除草剂、劈草均能提高毛竹林植被碳储量,主要体现在地上乔木层碳储量增加。地上乔木层碳储量分别为 14.29、18.28、20.33、17.11 t/hm²,经营林分显著高于对照林分,可能因为是垦复,施用除草剂,劈草增加了毛竹平均胸径及林分立竹度(表 1);也可能因为竹林经营减少了毛竹与杂草竞争,增强毛竹养分与光照利用能力。

表5 碳素年固定量
Tab.5 Net annual carbon sequestration

林分 Stand		年固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Annual net carbon sequestration	固定CO ₂ 量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Annual net CO ₂ sequestration
对照 Control(I)	乔木层 Tree layer	5.31 ± 0.08a	19.48 ± 0.29a
	凋落物层 Litter layer	4.02 ± 0.35bc	14.73 ± 1.29bc
	总计 Total	9.33	34.21
垦复 Managements of redamation (II)	乔木层 Tree layer	6.60 ± 1.15ab	24.19 ± 4.22ab
	凋落物层 Litter layer	4.69 ± 0.61c	17.19 ± 2.34c
	总计 Total	11.29	41.38
除草剂施用 Herbicide application (III)	乔木层 Tree layer	6.10 ± 0.24ab	22.36 ± 0.90a
	凋落物层 Litter layer	3.84 ± 0.23b	14.11 ± 0.85b
	总计 Total	9.94	36.47
劈草 Gress-chopping (IV)	乔木层 Tree layer	7.49 ± 1.52b	27.46 ± 5.59b
	凋落物层 Litter layer	2.46 ± 0.12a	9.02 ± 0.43a
	总计 Total	9.95	36.48

3.2 土壤层碳储量

森林土壤碳来源主要有植被层枯枝落叶、动、植物遗体等^[23],碳库大小主要受碳输入、输出量以及气候、人为干扰等影响^[24]。本研究表明,不同经营措施毛竹林土壤碳储量(65.13~98.49) t/hm²,排列为Ⅲ>Ⅰ>Ⅳ>Ⅱ,其主要原因是受不同经营措施干扰所致。本研究中,林分Ⅱ垦复深度为30 cm,主要集中在土壤表层,对土壤干扰剧烈,改变了土壤结构,增加土壤透气与透热性,导致土壤呼吸作用增强,另一方面垦复增强微生物活性,促进呼吸作用,导致土壤有机质分解加速,故林分Ⅱ土壤碳储量最低。相反,林分Ⅲ,由于除草剂药性能够加速凋落物分解和老根死亡,加速根周转,所以增加了林地碳输入速率。另外,除草剂会抑制微生物活性,导致土壤有机质分解速率降低,利于土壤有机碳积累,故林分Ⅲ土壤碳储量最高。林分Ⅳ进行劈草后,减少林下草本生长,降低土壤碳输入,且劈草增加了阳光直射土壤表面,导致地表温度升高,也会加速有机质分解,故林分Ⅳ土壤碳储量低于对照林分Ⅰ。因此,减少人为对森林剧烈的干扰、加强森林经营与管理、维持并增加土壤碳储量对缓解全球气候变化具有重要的现实意义^[3]。

3.3 毛竹林生态系统碳储量

生态系统碳储量由植被碳储量和土壤碳储量组成。本研究表明,林分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ生态系统碳储量分别为116.95、98.17、131.68和112.18 t/hm²。一方面,垦复、施用除草剂、劈草均能增加植被碳储量,另一方面,不同经营措施对林分干扰不同,导致施用除草剂增加了土壤碳储量,而垦复、劈草均降低了土壤碳储量。由于植被碳储量与土壤碳储量的叠加效应,尽管植被碳储量均增加,但垦复、劈草还是降低了生态系统碳储量。由于土壤碳储量是植被层碳储量的2~3倍,因此,维持土壤碳储量稳定性对维持生态系统碳稳定具有重要意义。故从长期竹林经营来看,适度林地管理与施肥对维持生态系统碳稳定和保持竹材与竹笋产量具有重要的现实意义。

3.4 毛竹林生态系统碳素年固定量

不同经营措施毛竹林植被碳素固定量分别为9.33、11.29、9.94、9.95 t CO₂/(hm²·a)相当于34.21、41.38、36.47、36.48 t/(hm²·a)均高于湖南会同杉木人工林26.69 t/(hm²·a)^[15],高于尖峰岭热带山地雨林31.59 t/(hm²·a)^[26]。说明,毛竹林是一个固碳能力较强的树种。垦复、施用除草剂、劈草引起地上乔木层碳固定量的增加是毛竹林植被碳素年固定量增加的主要原因。

致谢:感谢丁母山林场叶志宏书记对野外实验的帮助,感谢许庆标师弟、Fidel对室内分析帮助!

参考文献:

- [1] Dixon R K, Solomon A, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185.

- [2] Batjes N. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [4] Parry M L. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]. Cambridge Univ Pr, 2007: 135-141.
- [5] Tyree M C, Seiler J R, Fox T R. The effects of fertilization on soil respiration in 2-year-old *Pinus taeda* L. Clones [J]. *Forest Science*, 2008, 54(1): 21-30.
- [6] Sampson D A, Waring R H, Maier C A et al. Fertilization effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production: A new hybrid process model for stand management [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1/3): 91-109.
- [7] Masera O R, Garza-Caligaris J, Kanninen M, et al. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO₂FIX V. 2 approach [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2/3): 177-199.
- [8] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳贮量的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(8): 51-55.
- [9] 李正才, 杨校生, 蔡晓郡, 等. 竹林培育对生态系统碳储量的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(1): 24-28.
- [10] 李家永, 袁小华. 红壤丘陵区不同土地资源利用方式下有机碳储量的比较研究 [J]. *资源科学*, 2006, 23(5): 73-76.
- [11] 李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 365-370.
- [12] 李正才, 傅懋毅, 杨校生. 经营干扰对森林土壤有机碳的影响研究概述 [J]. *浙江林学院学报*, 2005, 22(4): 469-474.
- [13] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响 [J]. *林业科学*, 2002, 38(6): 6-11.
- [14] 漆良华, 刘广路, 范少辉. 不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳贮量与碳格局的影响 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1482-1488.
- [15] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamialanceolata*) 人工林生态系统碳贮量及其分配特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [16] 肖复明. 毛竹林生态系统碳平衡特征的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [17] 杨清培, 王兵, 郭起荣, 等. 大岗山毛竹扩张对常绿阔叶林生态系统碳储特征的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(3): 529-536.
- [18] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布 [J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 20-24.
- [19] 周国模, 姜培坤, 徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 98-115.
- [20] 张小全, 吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述 [J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 875-883.
- [21] Tolbert V, Todd D, Mann L, et al. Changes in soil quality and below-ground carbon storage with conversion of traditional agricultural crop lands to bioenergy crop production [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 97-106.
- [22] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 湖南会同毛竹林土壤碳循环特征 [J]. *林业科学*, 2009, 45(6): 11-15.
- [23] 李跃林, 彭少麟, 赵平, 等. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究 [J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 548-552.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应 [J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
- [25] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量 [J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [26] 李意德, 吴仲民, 普庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究 [J]. *生态学报*, 1998, 18(4): 371-378.