

DOI: 10.5846/stxb201410071965

李翀, 周国模, 施拥军, 周宇峰, 徐小军, 张宇鹏, 范叶青, 沈振明. 毛竹林老竹水平和经营措施对新竹发育质量的影响. 生态学报, 2016, 36(8):

Li C, Zhou G M, Shi Y J, Zhou Y F, Xu X J, Zhang Y P, Fan Y Q, Shen Z M. Effects of Old Bamboo Forests and Relevant Management Measures on Growth of New Bamboo Forests. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8):

毛竹林老竹水平和经营措施对新竹发育质量的影响

李 翀^{1,2}, 周国模^{1,2}, 施拥军^{1,2,*}, 周宇峰^{1,2}, 徐小军^{1,2}, 张宇鹏^{1,2}, 范叶青^{1,2}, 沈振明³

1 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

2 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 临安 311300

3 浙江省临安市林业技术服务总站, 临安 311300

摘要:毛竹林是我国重要的森林资源类型,在森林固碳和林业应对气候变化中具有不可替代的重要作用。由于毛竹林的持续采伐与自我更新特性,在竹林经营过程中,新竹的发育数量和质量成为评价竹林固碳功能变化的决定性因子。本文利用两因素随机区组设计,排除地形因子等影响,选取施肥和采伐留养方式这两个因素,研究老竹水平和经营措施对 2010 年和 2013 年毛竹林新竹发育质量的影响。结果表明:无论 2010 年还是 2013 年,新竹平均胸径、株数和碳储量与 3、5 年生老竹的相关性均高于 2、4 年生老竹。新竹碳储量与 3、5 年生老竹碳储量呈线性相关,建立线性回归模型 $y = 0.675x - 2.2491$, $R^2 = 0.8561$,而新竹碳储量与 2、4 年生老竹碳储量相关性较低,线性回归模型为 $y = -0.1109x + 6.7287$, $R^2 = 0.0061$ 。不同经营措施实施后,新老竹之间关系发生了很大的改变,新竹平均胸径与老竹的相关性大幅下降,新竹株数和碳储量与老竹几乎没有相关性,新竹碳储量与 3、5 年生老竹碳储量的线性回归模型为 $y = 0.1036x + 3.7539$, $R^2 = 0.0981$,新竹碳储量与 2、4 年生老竹碳储量的线性回归模型为 $y = -0.0408x + 5.9069$, $R^2 = 0.0151$ 。不同经营措施的实施对新竹的平均胸径、株数和地上碳储量产生了很大的影响。处理 A_1B_2 (大量施肥中度采伐中密度留养)、 A_2B_2 (中等施肥中度采伐中密度留养)和 A_3B_2 (不施肥中度采伐中密度留养)新竹平均胸径、新竹株数和新竹碳储量都有所增加,新竹平均胸径增幅为:处理 A_2B_2 (8.78%)> A_1B_2 (2.43%)> A_3B_2 (2.06%),新竹株数增幅为:处理 A_1B_2 (81.0%)> A_3B_2 (35.4%)> A_2B_2 (15.2%),新竹地上碳储量增幅为:处理 A_1B_2 (90.8%)> A_3B_2 (35.7%)> A_2B_2 (49.7%),而其余处理基本都会减少,说明适度采伐留养最有利于提高毛竹林新竹的发育质量。仅仅从固碳最大化的角度出发,大量施肥中度采伐中密度留养最有利于新竹碳储量的增加,而从培养大径竹材的角度考虑,中等施肥中度采伐中密度留养能收到更好的效果。

关键词:毛竹;采伐留养;施肥量;碳储量;新竹胸径;新竹株数

Effects of Old Bamboo Forests and Relevant Management Measures on Growth of New Bamboo Forests

LI Chong^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, SHI Yongjun^{1,2,*}, ZHOU Yufeng^{1,2}, XU Xiaojun^{1,2}, ZHANG Yupeng^{1,2}, FAN Yeqing^{1,2}, SHEN Zhenming³

1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

2 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University Lin'an 311300, China

3 Forestry Station of Lin'an City, Lin'an 311300, China

基金项目:国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD22B0503);国家自然科学基金重大基金(61190114);国家林业局 948 项目(2013-4-71);国家自然科学基金(31370637);浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030);浙江省大学生科技创新活动计划(2013R412045)

收稿日期:2014-10-07; 修订日期:2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syjwwh@163.com

Abstract: Moso bamboo forest, an important forest resource in China, plays an irreplaceable and important role in forest carbon sequestration and in adaptation of the forestry to climate change. Because of the special characteristics of Moso bamboo forests in continuous cutting and self-renewal, the quantity and quality of new bamboo's development become a decisive factor in evaluating functional changes of Moso bamboo forest carbon sequestration in the process of bamboo forest management. This research examined the effect of old bamboo forest and relevant management measures on growth of new bamboo forest based on the 2010 and 2013 Moso bamboo forests. A two-factor randomized block design was employed, which fertilization amount and cutting/leaving ways were selected based on the removal of topographical impacts. Results showed that the correlation coefficients of average diameter at breast height (DBH), number of culms and carbon storage between new bamboo forest and old bamboo forest of 3 and 5 years have higher values than those between new bamboo forest and old bamboo forest of 2 and 4 years either in the year of 2010 or 2013. The carbon storage between new bamboo forests and old bamboo forests of 3 and 5 years has linear relationships (e.g., $y = 0.675x - 2.2491$, $R^2 = 0.8561$); in contrast, there is no correlations between new bamboo and old bamboo of 2 and 4 years (e.g., $y = -0.1109x + 6.7287$, $R^2 = 0.0061$). After different management measures were implemented, the relationships between new and old bamboo forests changed considerably, that is, the correlation of average DBH between new and old bamboo forests decreased dramatically; no correlation in number of culms and carbon storage between new and old bamboo forests existed. The linear regression model of carbon storage between new bamboo and old bamboo forests of 3 and 5 years was $y = 0.1036x + 3.7539$, $R^2 = 0.0981$, and between new and old bamboo forest of 2 and 4 years was $y = -0.0408x + 5.9069$, $R^2 = 0.0151$. These results implied that the implementation of different management measures had a great effect on average DBH, number of culms and aboveground carbon storage of new bamboo forest. These attributes increased with treatments A_1B_2 (high fertilization with moderate-intensity cutting and leaving), A_2B_2 (intermediate fertilization with moderate-intensity cutting and leaving) and A_3B_2 (no fertilization with moderate-intensity cutting and leaving). The order of average DBH increase rate of new bamboo forest is $A_2B_2(8.78\%) > A_1B_2(2.43\%) > A_3B_2(2.06\%)$, and the increase rates of number of culms and aboveground carbon storage are $A_1B_2(81.0\%) > A_3B_2(35.4\%) > A_2B_2(15.2\%)$ and $A_1B_2(90.8\%) > A_3B_2(35.7\%) > A_2B_2(49.7\%)$. The rest of treatments result in decrease of these attributes. These situations imply that moderate-intensity cutting and leaving method was useful in improving the quality of new bamboo forest. In terms of carbon sequestration maximization, high fertilization combining with moderate-intensity cutting and leaving was useful in increasing carbon storage of new bamboo forests. On the other hand, considering cultivating large-diameter bamboo forests, intermediate fertilization combining with moderate-intensity cutting and leaving was preferable.

Key Words: Moso bamboo; cutting and leaving; fertilization amount; carbon storage; average DBH; number of new bamboo culms

随着林业应对气候变化问题成为全球关注的热点^[1],通过森林经营与管理来增加森林生产力、森林植被生物量和生态系统碳储量的有效方法也受到了广泛的关注^[2],2009年哥本哈根 COP15 大会后,森林经营项目(加强森林经营,增加碳储量)已经被国际社会认可并纳入到森林增汇减排项目的范畴^[3],开展森林经营对生态系统固碳效果影响的研究愈显重要。

竹林是亚热带地区十分重要的一种森林类型,分布广泛,具有良好的经济功能和生态功能,对保障竹材供给和平衡大气 CO_2 都具有重要作用^[4-8]。中国南方毛竹(*Phyllostachys Pubescens*)林面积巨大,2008 年全国毛竹林面积已经达到 386.83 万 hm^2 ,资源优势明显^[9],但现有竹林生产力水平普遍偏低,我省近 75% 竹林还属于低产低效林,存大很大的经营增汇空间。根据目前生产经营实践,施肥翻耕和采伐留养是现有竹林经营中主要的经营方式^[10-11],会对竹林植被碳库,甚至整个生态系统固碳效果产生重要影响。然而,以前的研究主要集中于如何通过经营提高竹材的产量上^[12-13],而基于固碳效果的竹林经营研究非常少见。在当今关注

森林生态效益,特别是固碳效益的大背景下,通过设置可靠的控制性试验,实施长期定位经营来研究毛竹林固碳效果及其影响机制具有良好的科学和实际意义。

毛竹林是非常特殊的林分,具有独特的地下鞭根系统,竹林依赖它来吸收土壤中的矿质营养和水分,输送到地上部分利用,同时通过竹鞭进行横向运输,调节竹株之间的养分平衡,正是由于鞭根系统的存在,使得老竹对新竹的发育产生关联^[14-15]。另外已有许多研究表明,毛竹个体的粗生长自笋出土后就已停止,高生长在40—45 d之内形成,在以后的生长期间主要是进行体内物质的积累,粗度和高度都不会发生变化^[16-17],但是会通过竹鞭孕育新笋,源源不断地长出新竹,促进林分的发育和质量改善。所以在评估毛竹林的固碳经营效果上,不同于普通的乔木林,乔木林经营效果主要依据现有林木胸径和树高的增长率上,而毛竹林经营效果主要体现在新竹的数量和质量上,而新竹的数量和质量一方面与老竹状况存在关系,另一方面,采取的经营措施及其强度也会对其产生重要影响,从而影响着竹林未来的固碳效果。本文设置两因素随机区组长期定位经营试验,选取施肥量和采伐留养方式这两个主要因素,着重研究老竹水平和经营措施对毛竹林新竹发育质量的影响,从而反映毛竹林固碳效果的改善状况,以便为毛竹林固碳经营提供依据。

1 试验区概况和研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省临安市板桥镇(30°10'N, 119°45'E),样地海拔为90—200 m。该区域属亚热带季风气候,年平均气温为15.9℃,年降水量2,400.0—1500.0 mm,年日照时数1774.0 h,无霜期236 d,地形地貌为低山丘陵,森林覆盖率达65%,主要树种为毛竹,土壤为微酸性红壤土类。

试验区内竹林隔年留养新竹,隔年采伐老竹,一般采伐5—6年生老竹。该竹林为花年竹林,大小年不明显。立竹密度为2400—4300株/hm²。林下少灌木,多杂草。

1.2 试验设计

2010年6月进行试验样地布设,采用两因素随机区组试验设计,选取施肥和采伐留养方式两个因素,每个因素分别设置3个可控水平,见表1。

表1 毛竹林二因素三水平随机区组试验组合

Table 1 Two factors and three levels orthogonal experiment combinations in bamboo forest

采伐留养方式 The way of bamboo cutting and leaving	施肥量 The fertilization amount		
	大量施肥 Heavy fertilization A ₁	中等施肥 Medium fertilization A ₂	不施肥 No fertilization A ₃
强度采伐 High intensity cutting B ₁	A ₁ B ₁ (1)	A ₂ B ₁ (2)	A ₃ B ₁ (3)
中度采伐 Medium intensity cutting B ₂	A ₁ B ₂ (4)	A ₂ B ₂ (5)	A ₃ B ₂ (6)
弱度采伐 Low-intensity cutting B ₃	A ₁ B ₃ (7)	A ₂ B ₃ (8)	A ₃ B ₃ (9)

括号中序号代表处理号

竹林经营随机区组试验的布设:将上述实验二因素对应的3个试验水平进行3^k正交,即可得到9种不同的实验组合。为了减少实验过程的偶然性,排除坡向、坡位等因素的影响,本实验进行3次重复试验,且各种实验组合随机交叉分布。

施肥:实验林地施肥量水平分为大量(每年施毛竹专用肥1800 kg/hm²,分两次施肥)、中等(每年施毛竹专用肥900 kg/hm²,分两次施肥)和不施肥。肥料为竹笋专用肥(N、P、K含量:N 13%、P₂O₅ 3%、K₂O 2%,氨基酸≥8%,有机质≥15%,腐殖酸≥10%),施肥采用沟施方式。

采伐留养:分为强度采伐、中度采伐、弱度采伐三类措施,留养竹分别为Ⅰ度竹(1年生毛竹)、Ⅱ度竹(2—3年生)、Ⅲ度竹(4—5年生),不留Ⅳ度竹(6年生及以上)。其中强度采伐Ⅲ度竹全部采伐,中度采伐Ⅲ度竹采一半留一半,弱度采伐Ⅲ度竹不采伐。

考虑毛竹生长的特殊性,为了减少因相邻样地毛竹鞭蔓延而产生的干扰,实验标准样地设计如图(图1):

将实验基地划分为大小相等的 27 块标准样地,每块大小设为 30 m×30 m;各样地四周各留出 5 m 宽“回”形条块作为缓冲带,不采集数据;实验取样数据采集时,以样地中心 20 m×20 m 为界,从中进行数据采集。

1.3 毛竹碳储量测定

在 27 个标准样地内首先进行每株立竹调查,记录每株毛竹的胸径、年龄(度)数据,根据单株毛竹二元生物量模型,对样地各单株生物量求和得到地上部分生物量,再利用生物量乘转换系数 0.5042 得到乔木层地上碳储量^[18]。

单株毛竹二元生物量计算模型为:

$$M = 747.787^{2.771} \left(\frac{0.148A}{0.028 + A} \right)^{5.555} + 3.772$$

式中: M 为单株毛竹生物量(kg); D 为胸径(cm); A 为年龄(度)。

样地内单位面积生物量碳储量(tC/hm^2) 计算模型为:

$$C_{AB_B} = \sum f_{AB_B}(BD, BA) \cdot CF \cdot 100000/AP$$

$$C_{BB_B} = C_{AB_B} \cdot R$$

式中:

$f_{AB_B}(BD, BA)$ 毛竹地上生物量二元异速生长

方程, t d.m.株^{-1}

CF 平均含碳率,无单位

R 生物量根茎比,比值为 0.32^[18],无单位

AP 样地面积, m^2

1.4 数据统计分析

2010 年 7 月,2013 年 7 月两期野外调研,分别测得两期 27 个标准样地每株立竹的胸径和年龄。2010 年 7 月调查数据为试验本底数据,也就是经营试验实施前数据,各样地经营方式一致。2013 年 7 月调查数据为经营试验实施后数据。

为研究新老竹之间的联系,分别建立试验前后新老竹平均胸径、株数以及碳储量之间的相关关系,分析新竹与 2、4 年生老竹和 3、5 年生老竹的相关性。利用 SPSS19.0 采用双因素方差分析法从施肥、采伐留养方式及其交互作用来分析各处理 2010 年和 2013 年新竹平均胸径、株数和地上碳储量变化量的显著性,对有显著差异的因素再进行多重比较,同时用单因素方差分析法分析各处理之间 2010 年和 2013 年新竹平均胸径、株数和地上碳储量变化量的显著性,显著部分进行多重比较,从而筛选出较为有利的经营方案。

2 结果与分析

2.1 不同经营措施实施前后新老竹间的关系

2.1.1 2010 年新老竹间的关系

经营试验前(2010 年),各经营措施样地原有新老竹数据如下表:

根据图 2(A)和图 2(B)我们发现,新竹平均胸径随着老竹平均胸径的增加而增加,呈线性相关,3、5 年生老竹与新竹平均胸径的相关性大于 2、4 年生老竹。而图 2(C)和图 2(D)显示新竹株数随 2、4 年生老竹株数的增加而减少,随 3、5 年生老竹株数的增加而增加,说明 3、5 年生老竹株数的增加积累了更多营养对新竹萌发具有促进作用,而 2、4 年生老竹株数的增加对新竹的萌发存在抑制作用。通过图 2(E)和图 2(F)可以看

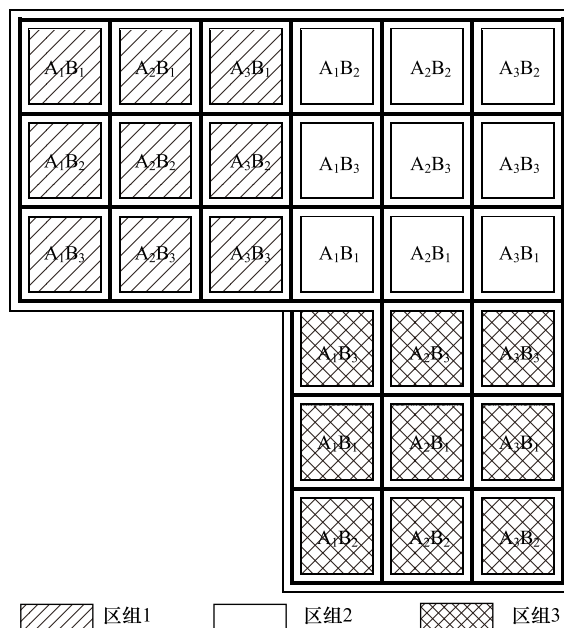


图 1 试验处理样地分布图

Fig. 1 Distribution diagram of experiment standard plot

出,新竹碳储量与 3、5 年生老竹碳储量呈线性相关, $R = 0.8561$,而新竹碳储量与 2、4 年生老竹碳储量不相关。

表 2 2010 年不同经营措施新老竹平均胸径、株数和碳储量

Table 2 The Average DBH, number of culms and carbon storage of new and old bamboo in different management measures in 2010									
经营措施 Management measures	2,4 年生老竹 平均胸径/cm Average DBH of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生老竹 平均胸径/cm Average DBH of 2, 4 years old bamboo	新竹平均 胸径/cm Average DBH of new bamboo	2,4 年生 老竹株数/株 Number of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生 老竹株数/株 Number of 3, 5 years old bamboo	新竹株数/株 Number of new bamboo	2,4 年生 老竹碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生 老竹碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of 3, 5 years old bamboo	新竹 碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of new bamboo
A ₁ B ₁	9.19±1.02	9.54±1.22	10.04±1.36	38.67±4.16	65.00±7.94	34.00±2.65	7.96±1.31	14.30±1.87	8.06±2.69
A ₁ B ₂	9.19±0.29	8.67±0.48	9.55±0.16	52.33±12.34	53.00±14.80	19.33±1.53	10.86±2.54	10.07±3.71	3.98±0.44
A ₁ B ₃	9.55±0.60	9.62±0.58	10.25±0.63	41.67±11.68	49.33±5.51	24.67±11.55	9.35±2.93	11.29±2.43	6.16±3.67
A ₂ B ₁	9.57±0.91	9.47±1.36	9.80±0.90	42.67±5.51	64.33±6.35	32.00±2.65	9.51±1.63	14.54±4.94	7.04±1.31
A ₂ B ₂	9.16±0.25	8.64±0.25	9.18±0.13	45.33±4.73	51.00±11.36	22.00±6.24	9.33±1.21	9.37±1.72	4.32±1.34
A ₂ B ₃	8.65±0.52	8.41±0.74	9.13±1.11	47.67±19.50	63.67±4.04	30.67±3.51	8.65±2.84	11.24±1.80	5.91±0.94
A ₃ B ₁	8.18±0.30	8.28±0.69	8.91±0.55	39.00±7.94	63.33±17.50	22.33±6.66	6.61±1.49	11.27±4.66	4.29±1.80
A ₃ B ₂	8.53±1.05	8.17±1.30	8.83±0.94	44.67±12.58	55.00±5.57	21.67±1.53	8.44±4.06	9.29±1.47	4.03±0.89
A ₃ B ₃	9.60±1.17	9.85±1.39	10.15±1.16	40.67±12.58	68.33±33.56	32.67±8.39	8.89±1.03	15.25±5.86	7.93±2.98

2.1.2 2013 年新老竹间的关系

经营试验后(2013 年),不同经营措施样地新老竹数据如下表:

表 3 2013 年不同经营措施新老竹平均胸径、株数和碳储量

Table 3 The Average DBH, number of culms and carbon storage of new and old bamboo in different management measures in 2013									
经营措施 Management measures	2,4 年生老竹 平均胸径/cm Average DBH of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生老竹 平均胸径/cm Average DBH of 2, 4 years old bamboo	新竹平均 胸径/cm Average DBH of new bamboo	2,4 年生 老竹株数/株 Number of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生 老竹株数/株 Number of 3, 5 years old bamboo	新竹株数/株 Number of new bamboo	2,4 年生 老竹碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of 2, 4 years old bamboo	3,5 年生 老竹碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of 3, 5 years old bamboo	新竹 碳储量 /(tC/hm ²) Carbon storage of new bamboo
A ₁ B ₁	9.26±1.46	9.66±1.43	9.25±0.79	83.33±20.13	59.00±30.32	25.33±5.77	17.56±4.65	12.62±3.43	5.01±0.63
A ₁ B ₂	8.56±0.08	9.12±0.56	9.77±0.53	69.67±3.06	83.33±11.06	35.00±10.54	12.75±0.55	16.99±2.23	7.58±1.69
A ₁ B ₃	9.80±0.55	9.81±0.47	9.94±0.99	64.67±10.02	91.00±9.17	25.00±3.61	15.28±3.97	21.57±3.46	5.70±1.25
A ₂ B ₁	9.28±0.63	9.53±1.19	9.34±0.46	51.67±19.22	65.33±46.50	23.33±2.08	10.69±3.92	13.29±7.34	4.67±0.45
A ₂ B ₂	8.95±0.07	9.34±0.21	9.96±0.28	52.67±9.07	66.33±4.73	25.33±8.50	10.34±1.91	14.03±0.61	5.86±2.40
A ₂ B ₃	9.17±0.78	8.81±0.50	9.10±0.48	74.67±17.01	99.00±17.35	25.00±10.44	15.93±5.68	18.86±1.63	4.89±2.01
A ₃ B ₁	8.65±0.41	8.54±0.95	8.76±0.37	54.33±15.31	63.00±12.29	21.67±2.52	10.25±3.25	11.84±4.00	3.84±0.42
A ₃ B ₂	8.59±1.11	8.47±1.53	9.01±1.40	49.00±14.42	77.67±22.74	29.33±8.33	9.16±3.54	13.78±2.60	6.04±2.81
A ₃ B ₃	9.93±1.60	9.72±1.36	9.70±1.28	71.33±25.01	78.00±27.22	22.00±7.00	16.89±3.29	17.27±3.11	4.72±0.60

经过不同经营处理 2013 年新老竹之间关系发生了很大的改变,从图 3(A)和图 3(B)可以看出,与 2010 年相比,新竹平均胸径与老竹平均胸径相关性大幅下降,3、5 年生老竹与新竹平均胸径的相关性大于 2、4 年生老竹。图 3(C)和图 3(D)显示,新竹株数与老竹株数相关性很低,3、5 年生老竹与新竹株数的相关性大于 2、4 年生老竹。通过图 3(E)和图 3(F)可以看出,新竹碳储量与老竹碳储量相关性也很低,3、5 年生老竹与新竹碳储量的相关性略大于 2、4 年生老竹。3、5 年生老竹碳储量的增加对新竹碳储量增加具有促进作用,而 2、4 年生老竹碳储量的增加对新竹碳储量增加存在抑制作用,但是与 2010 年相比,老竹对新竹的影响已经大幅减小。

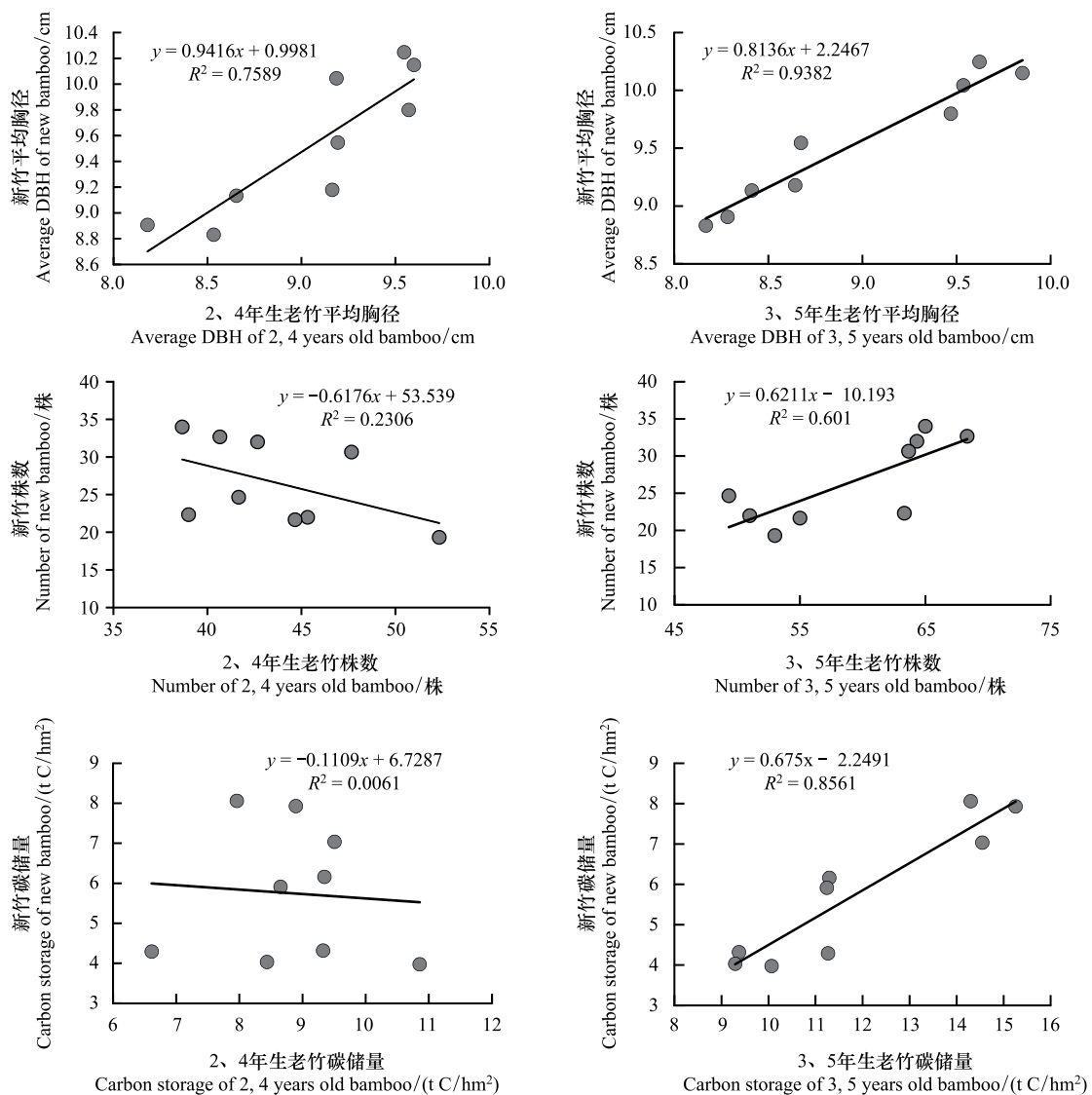


图2 2010年新老竹平均胸径、株数和碳储量的相关关系

Fig. 2 the correlation of Average DBH, number of culms and carbon storage between new and old bamboo in 2010

2.2 不同经营措施对新竹的影响

经过不同经营措施处理 2013 年新老竹之间关系发生了很大的变化,主要原因可能是不同经营措施对竹林的影响主要体现在新竹上。

2.2.1 不同经营措施对新竹胸径的影响

新竹胸径是反映竹林未来生长质量的重要因子,不同的经营措施对新竹胸径将会产生不同的影响。不同经营措施新竹平均胸径 2010—2013 年的变化量结果见图 4。单因素方差分析结果表明,两期新竹平均胸径差异不显著 ($P>0.05$)。两期新竹平均胸径变化量的双因素方差分析结果表明(表 4),不同施肥处理、采伐留养处理对新竹平均胸径变化差异都不显著,并且交互作用不明显。二因素中采伐留养处理的离差平方和大于施肥处理,说明采伐留养的影响效应较大。多重比较发现只有采伐留养处理间存在显著性差异(表 5),说明强度采伐低密度留养方式不利于新竹胸径的增加,而中度采伐中密度留养方式能促进竹林的健康生长。

各处理间两期新竹平均胸径变化量的多重比较结果(图 4)显示,只有处理 A_1B_1 和处理 A_2B_2 新竹平均胸径差异显著 ($P<0.05$),其余处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。说明经过不同经营措施新竹胸径发生了变化,中等施肥中度采伐中密度留养更有利于新竹胸径的增加,而大量施肥强度采伐低密度留养不利于新竹胸径的增

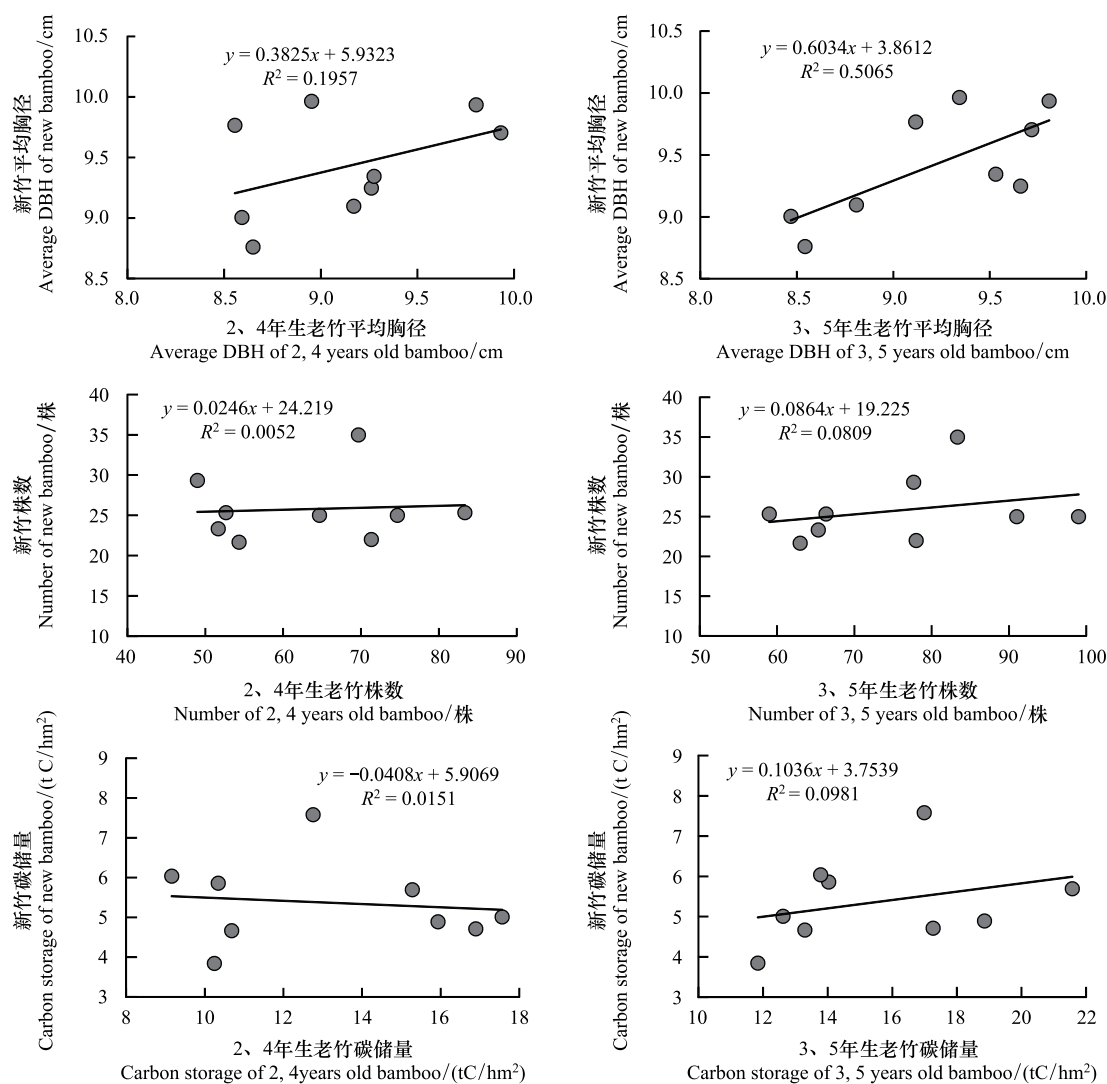


图 3 2013 年新老竹平均胸径、株数和碳储量的相关关系

Fig. 3 the correlation of Average DBH, number of culms and carbon storage between new and old bamboo in 2013

长。由图 4 可以看出,只有处理 A_1B_2 、 A_2B_2 和 A_3B_2 新竹平均胸径有所增加,而其余处理新竹平均胸径都是减少的,3 种处理的增幅为: A_2B_2 (8.78%) > A_1B_2 (2.43%) > A_3B_2 (2.06%)。说明新竹的平均胸径与采伐留养方式有关,合理的采伐留养方式可以改善竹林环境、调整林分组成结构,有利于新竹胸径的增粗。在选择合理的采伐留养方式的同时,适度的施肥能够更好地提高新竹胸径的增幅,从而提高毛竹林竹材的产量和质量。

2.2.2 不同经营措施对新竹株数的影响

新竹株数是反映竹林生长数量的重要因子,不同的经营措施对新竹株数也会产生不同的影响。不同经营措施新竹株数 2010—2013 年的变化量结果见图 5。单因素方差分析结果表明,两期新竹株数变化差异不显著 ($P > 0.05$)。两期新竹株数变化量的双因素方差分析结果表明(表 6),不同施肥处理对新竹株数变化差异不显著,而采伐留养处理对新竹株数变化差异极显著 ($P < 0.01$),两者交互作用不明显。说明新竹株数的变化与采伐留养方式密切相关。多重比较发现中度采伐中密度留养分别与强度采伐低密度留养和弱度采伐高密度留养存在极显著差异(表 7),说明中度采伐中密度留养方式有效促进了新竹株数的增加,而强度采伐低密度留养和弱度采伐高密度留养方式不利于新竹株数的增加。

各处理间两期新竹株数变化量的多重比较结果(图 5)显示,处理 A_1B_2 与 A_1B_1 、 A_2B_1 和 A_3B_3 新竹株数变化差异极显著 ($P < 0.01$);处理 A_1B_2 和 A_2B_3 新竹株数变化差异显著 ($P < 0.05$);处理 A_3B_2 和 A_3B_3 新竹株数变化

差异显著 ($P<0.05$); 其余处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。说明经过不同经营措施新竹株数发生了显著变化, 大量施肥中度采伐中密度留养更有利于新竹株数数量上的增加, 而大量施肥强度采伐低密度留养, 中等施肥强度采伐低密度留养和不施肥弱度采伐高密度留养不利于新竹株数的增加。由图 5 可以看出, 只有处理 A_1B_2 、 A_2B_2 和 A_3B_2 新竹株数增加较多, 其余处理新竹株数都是减少或不变的, 3 种处理的增幅为: A_1B_2 (81.0%) > A_3B_2 (35.4%) > A_2B_2 (15.2%)。说明新竹株数也与采伐留养方式密切相关, 合理的采伐留养方式可以改善竹林环境、调整林分组成结构, 有利于新竹株数的大幅增加。

表 4 不同经营措施新竹平均胸径变化的双因素方差分析结果

Table 4 Double factors ANOVA result of new bamboo Average DBH changes in different management measures					
源 Source	III 型平方和 Sum of squares of type III	Df	均方 Mean square	F	Sig.
校正模型 Calibration model	5.220	8	0.652	1.095	0.411
截距 Intercept	0.343	1	0.343	0.575	0.458
施肥处理 Fertilizing	0.708	2	0.354	0.594	0.563
采伐留养处理 Cutting and leaving	3.628	2	1.814	3.043	0.073
施肥处理 * 采伐留养处理 Fertilizing * Cutting and leaving	0.884	4	0.221	0.371	0.826
误差 Error	10.729	18	0.596		
总计 Total	16.291	27			
校正的总计 Correction of a total	15.948	26			

表 5 不同采伐留养处理新竹平均胸径变化的多重比较

Table 5 LSD of the changes of new bamboo Average DBH in different cutting and leaving treatments				
(I) 采伐留养处理 Cutting and leaving treatments	(J) 采伐留养处理 Cutting and leaving treatments	均值差值 Mean difference (I-J)	标准误差 Standard error	Sig.
B_1	B_2	-0.858	0.364	0.030
	B_3	-0.201	0.364	0.588
B_2	B_1	0.858	0.364	0.030
	B_3	0.657	0.364	0.088
B_3	B_1	0.201	0.364	0.588
	B_2	-0.657	0.364	0.088

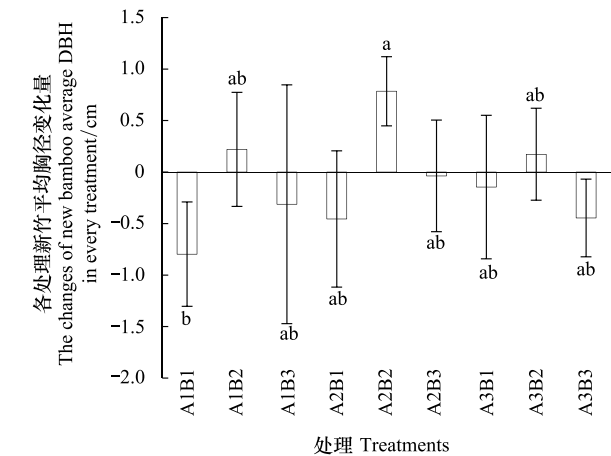


图 4 各处理 2010—2013 年新竹平均胸径的变化量
Fig. 4 The changes of new bamboo Average DBH in every treatment from 2010 to 2013

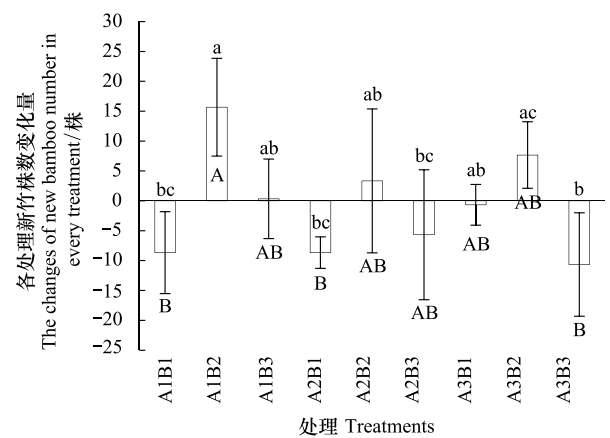


图 5 各处理 2010—2013 年新竹株数的变化量
Fig. 5 The changes of new bamboo number in every treatment from 2010 to 2013

表 6 不同经营措施新竹株数变化的双因素方差分析结果

源	III 型平方和	Df	均方	F	Sig.
Source	Sum of squares of type III		Mean square		
校正模型 Calibration model	1818.074	8	227.259	2.500	0.051
截距 Intercept	17.926	1	17.926	0.197	0.662
施肥处理 Fertilizing	170.296	2	85.148	0.937	0.410
采伐留养处理 Cutting and leaving	1273.185	2	636.593	7.004	0.006
施肥处理 * 采伐留养处理 Fertilizing * Cutting and leaving	374.593	4	93.648	1.030	0.419
误差 Error	1636.000	18	90.889		
总计 Total	3472.000	27			
校正的总计 Correction of a total	3454.074	26			

表 7 不同采伐留养处理新竹株数变化的多重比较

(I) 采伐留养处理		(J) 采伐留养处理	均值差值	标准误差	Sig.
Cutting and leaving treatments		Cutting and leaving treatments	Mean difference (I-J)	Standard error	
B ₁		B ₂	-14.889	4.494	0.004
		B ₃	-0.667	4.494	0.884
B ₂		B ₁	14.889	4.494	0.004
		B ₃	14.222	4.494	0.005
B ₃		B ₁	0.667	4.494	0.884
		B ₂	-14.222	4.494	0.005

2.2.3 不同经营措施对两期新竹地上碳储量的影响

新竹碳储量直观地反映了竹林当前的生长力,不同的经营措施对新竹碳储量的影响可以用来评价各经营措施的合理性。不同经营措施新竹地上碳储量 2010—2013 年的变化量结果见图 6。单因素方差分析结果表明,两期新竹地上碳储量差异不显著($P>0.05$)。两期新竹地上碳储量变化量的双因素方差分析结果表明(表 8),不同施肥处理对新竹地上碳储量变化差异不显著,而采伐留养处理对新竹地上碳储量变化差异极显著($P<0.01$),两者交互作用不明显。说明新竹地上碳储量也与采伐留养方式密切相关,多重比较发现中度采伐中密度留养分别与强度采伐低密度留养和弱度采伐高密度留养存在极显著差异(表 9),说明中度采伐中密度留养方式有效地促进了新竹地上碳储量的增加,而强度采伐低密度留养和弱度采伐高密度留养方式不利于竹林的长期经营。

各处理间两期新竹地上碳储量变化量的多重比较结果(图 6)显示,处理 A₁B₂与 A₁B₁、A₃B₃新竹地上碳储量变化差异极显著($P<0.01$);处理 A₁B₂与 A₂B₁、A₂B₃新竹地上碳储量变化差异显著($P<0.05$);处理 A₂B₂与 A₁B₁、A₃B₃新竹地上碳储量变化差异显著($P<0.05$);处理 A₃B₂与 A₁B₁、A₃B₃新竹地上碳储量变化差异显著($P<0.05$);其余处理之间差异不显著($P>0.05$)。说明经过不同经营措施新竹地上碳储量发生了显著变化,大量施肥中度采伐中密度留养更有利于新竹地上碳储量的增加,而大量施肥强度采伐低密度留养和不施肥弱度采伐高密度留养不利于新竹地上碳储量的增加。由图 6 可以看出,只有处理 A₁B₂、A₂B₂和 A₃B₂新竹地上碳储

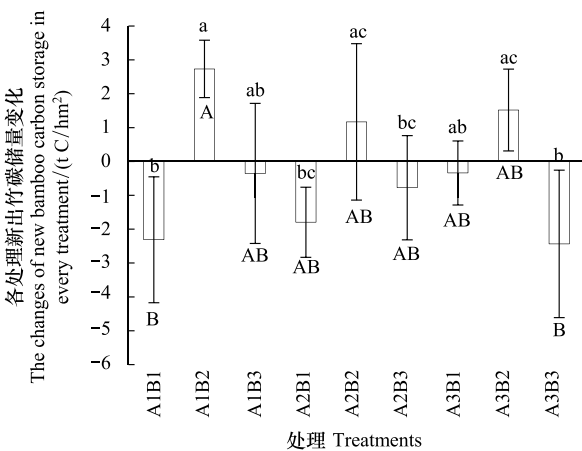


图 6 各处理 2010—2013 年新竹碳储量的变化量
Fig. 6 The changes of new bamboo carbon storage in every treatment from 2010 to 2013

量增加,其余处理新竹地上碳储量都是减少的,3种处理的增幅为: $A_1B_2(90.8\%) > A_3B_2(35.7\%) > A_2B_2(49.7\%)$ 。说明新竹地上碳储量也与采伐留养方式密切相关,合理的采伐留养方式可以大幅提高新竹的地上碳储量,从而增加毛竹林的碳汇量。

表 8 不同经营措施新竹碳储量变化的双因素方差分析结果

Table 8 Double factors ANOVA result of new bamboo carbon storage changes in different management measures

源 Source	III 型平方和 Sum of squares of type III	Df	均方 Mean square	F	Sig.
校正模型 Calibration model	77.220	8	9.653	2.379	0.060
截距 Intercept	2.236	1	2.236	0.551	0.467
施肥处理 Fertilizing	1.311	2	0.656	0.162	0.852
采伐留养处理 Cutting and leaving	59.634	2	29.817	7.348	0.005
施肥处理 * 采伐留养处理 Fertilizing * Cutting and leaving	16.275	4	4.069	1.003	0.432
误差 Error	73.037	18	4.058		
总计 Total	152.494	27			
校正的总计 Correction of a total	150.257	26			

表 9 不同采伐留养处理新竹碳储量变化的多重比较

Table 9 LSD of the changes of new bamboo carbon storage in different cutting and leaving treatments

(I) 采伐留养处理 Cutting and leaving treatments	(J) 采伐留养处理 Cutting and leaving treatments	均值差值 Mean difference(I-J)	标准误差 Standard error	Sig.
B ₁	B ₂	-3.289	0.950	0.003
	B ₃	-0.294	0.950	0.761
B ₂	B ₁	3.289	0.950	0.003
	B ₃	2.995	0.950	0.005
B ₃	B ₁	0.294	0.950	0.761
	B ₂	-2.995	0.950	0.005

3 结论与讨论

无论 2010 年还是 2013 年,新竹平均胸径、株数和碳储量与 3、5 年生老竹的相关性均高于 2、4 年生老竹。

其原因可能是毛竹竹叶每两年换一次,新竹在第二年换叶^[19]。那么,营养物质的合成、积累、转化及消耗周期也是两年,换叶期间,可供鞭芽分化和生长发育所需要的养分很少,致使竹鞭上的笋芽仍多处于休眠状态,第二年就出笋或很少出笋,而换叶后,光合能力逐渐加强,竹秆及竹鞭中干物质积累也随之增加,从而满足了部分笋芽分化(孕笋)所需的养分,为大量出笋创造了物质基础^[20]。因此,奇龄老竹不具备发笋能力,那么,新竹的平均胸径、株数和碳储量就由偶龄老竹决定。根据这个原理,对于大小年竹林我们可以采取隔年采伐老竹的经营方式,而对于花年竹林我们应该每年适当采伐偶龄老竹,采伐时间可以为当年新竹生长完成后。

经过不同经营处理 2013 年新老竹之间关系发生了很大的改变,新竹平均胸径与老竹的相关性大幅下降,新竹株数和碳储量与老竹几乎没有相关性,主要原因可能是不同经营措施的实施对新竹的平均胸径、株数和地上碳储量产生了很大的影响。

不同经营措施对新竹胸径的影响表明,处理 A_1B_2 、 A_2B_2 和 A_3B_2 使新竹平均胸径有所增加,其增幅为: $A_2B_2(8.78\%) > A_1B_2(2.43\%) > A_3B_2(2.06\%)$,而其余处理新竹平均胸径都是减少的。说明中等施肥中度采伐中密度留养效果最好,有利于大径竹材的培育,而大量施肥强度采伐低密度留养效果最差。

研究表明,新竹平均胸径的变化与采伐留养方式密切相关,强度采伐低密度留养不留Ⅲ度竹不利于新竹

胸径的增加,这与张春霞等的研究结果基本一致,随毛竹林留竹度数的增高,竹林结构渐趋良好,中龄竹子在竹林中所占比例渐高,提供给新个体生长的营养物质渐多,从而使新个体生长状况渐好,表现为成竹即新竹胸径渐高^[21]。由于老龄竹提供新个体生长所需营养物质的能力渐弱,适当的采伐Ⅲ度竹而留养Ⅱ度竹,不仅给新竹提供了生长空间,而且高比例的壮年竹又给新竹提供了大量的营养物质,从而促进新竹胸径的增加,提高竹材的质量。

不同经营措施对新竹株数的影响表明,采伐留养处理对新竹株数变化差异极显著($P<0.01$)。处理 A_1B_2 、 A_2B_2 和 A_3B_2 新竹株数增加较多,其增幅为: $A_1B_2(81.0\%)>A_3B_2(35.4\%)>A_2B_2(15.2\%)$,而其余处理新竹株数都是减少或不变的。说明大量施肥中度采伐中密度留养效果最好,大量施肥强度采伐低密度留养、中等施肥强度采伐低密度留养和不施肥弱度采伐高密度留养效果较差。

研究表明,新竹株数的变化也与采伐留养方式密切相关,中度采伐中密度留养方式有效促进了新竹株数的增加,而强度采伐低密度留养和弱度采伐高密度留养方式不利于新竹株数的增加。这与不同经营措施对新竹平均胸径的影响结果相似。但是中度采伐中密度留养不同施肥水平对新竹平均胸径的影响与对新竹株数的影响相反,中等施肥新竹平均胸径的增长大于大量施肥和不施肥,而中等施肥新竹株数的增加却小于大量施肥和不施肥。产生这种情况的原因可能是笋芽发育多、笋密度大,影响了笋的质量。这与游德龙研究立竹结构和施肥对笋用苦竹林笋生长的影响结果一致,产笋量随密度增大而增加,随一年生竹比例增加而减少,但笋个体重量却相反,产笋量越大,个体重量越小,这与出笋数量有关,出笋数量越多,单个笋体的养分占有量就越少,个体变小,质量轻^[22]。

不同经营措施对新竹地上碳储量的影响表明,采伐留养处理对新竹地上碳储量变化差异极显著($P<0.01$)。处理 A_1B_2 、 A_2B_2 和 A_3B_2 新竹地上碳储量有所增加,其增幅为: $A_1B_2(90.8\%)>A_3B_2(35.7\%)>A_2B_2(49.7\%)$,而其余处理新竹地上碳储量都是减少的,说明大量施肥中度采伐中密度留养效果最好,有利于竹林新竹碳储量的大幅增加,而大量施肥强度采伐低密度留养、中等施肥强度采伐低密度留养和不施肥弱度采伐高密度留养效果较差。

新竹碳储量是衡量竹林固碳能力的重要指标之一,周国模的研究表明,无论是集约经营还是粗放经营两种类型毛竹林新竹(1年生)毛竹积累的碳储量分别达 10.1117 tC/hm^2 、 5.6131 tC/hm^2 ,已分别占全年碳储量的 88.8% 和 92.6% ^[23],所以研究不同经营措施对新竹碳储量的变化也具有非常重要的意义。研究表明,影响新竹地上碳储量的主要因素依次是新竹株数与新竹平均胸径,无论是新竹株数还是新竹平均胸径都与采伐留养处理密切相关,也就意味着新竹地上碳储量主要是受林分密度和留养竹度数影响的,这与李海等和朱剑秋等的研究结果一致。李海等研究不同间伐强度对撑绿竹新竹生长的影响发现,撑绿竹林中度间伐有利于新生竹的生长发育和产量提高,过度间伐使竹丛内母竹大量减少,不能给新生竹提供足够的营养物质,而不间伐使竹丛老竹数量逐年增多进行光合作用的能力减弱^[24]。朱剑秋研究毛竹林不同留养度数对生长和产量的影响结果发现,不同留养度数的毛竹林、其新竹数量、新竹胸径和竹材产量的差异是显著的,而留养Ⅱ度、Ⅲ度的毛竹林,成竹率高、成竹数多^[25]。因此,合理的密度和留养竹比例是增加竹林新竹固碳能力的最重要的两个因素。此外,大量施肥能通过增加新竹株数来增加新竹地上碳储量,但是大量施肥加速了表层土壤有机质的矿化。加快有机质矿化虽然可释放出更多养分元素供竹子生长,再加上人为施肥,从某种程度上使竹笋、竹材产量增加,但在产量增加的同时,土壤总有机碳贮量却下降明显,土壤总有机碳减少,将会使林地潜在肥力下降,对竹林可持续经营产生负面影响^[26]。

参考文献(References):

- [1] 李怒云,冯晓明,陆霖. 中国林业应对气候变化碳管理之路. 世界林业研究, 2013, 26(2): 1-7.
- [2] Peng Y Y, Thomas S C, Tian D L. Forest management and soil respiration: implications for carbon sequestration. Environmental Reviews, 2008, 16(NA): 93-111.
- [3] 吴水荣,李智勇,于天飞. 国际气候变化涉林议题谈判进展及对案建议. 林业经济, 2009, (10): 29-34.

- [4] 萧江华. 我国竹业发展现状与对策. 竹子研究汇刊, 2000, 19(1): 1-5, 8-8.
- [5] 萧江华. 分类经营 定向培育 提高竹林经营效益. 竹子研究汇刊, 2001, 20(3): 1-7.
- [6] 刘恩斌, 施拥军, 李永夫, 周国模. 基于非空间结构的浙江省毛竹林固碳潜力. 林业科学, 2012, 48(11): 9-14.
- [7] Zhou G M, Jiang P K, Mo L M. Bamboo: a possible approach to the control of global warming. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2009, 10(5): 547-550.
- [8] Zhou G M, Meng C F, Jiang P K, Xu Q F. Review of carbon fixation in bamboo forests in China. The Botanical Review, 2011, 77(3): 262-270.
- [9] 张厚喜, 庄舜尧, 季海宝, 周赛, 孙波. 我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算. 土壤, 2014, 46(3): 413-418.
- [10] 马少杰, 李正才, 王斌, 刘荣杰, 格日乐图, 王刚. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异. 生态学报, 2012, 32(8): 2603-2611.
- [11] 楼一平, 李艳霞, Buckingham K. 中国竹林可持续经营认证的必要性和可行性研究. 竹子研究汇刊, 2008, 27(3): 1-7.
- [12] 吴良如, 钟浩, 高贵宾, 潘雁红. 笋竹两用毛竹林立竹密度与竹笋产量关系研究. 竹子研究汇刊, 2014, 33(2): 25-28.
- [13] 林华. 毛竹工业用竹材林高效培育技术效果分析. 竹子研究汇刊, 2008, 27(2): 42-47.
- [14] 周本智, 傅懋毅. 竹林地下鞭根系统研究进展. 林业科学研究, 2004, 17(4): 533-540.
- [15] 周本智, 傅懋毅. 粗放经营毛竹林鞭系和根系结构研究. 林业科学研究, 2008, 21(2): 217-221.
- [16] 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. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 51-55.
- [17] 施拥军, 刘恩斌, 周国模, 沈振明, 俞淑红. 基于随机过程的毛竹笋期生长模型构建及应用. 林业科学, 2013, 49(9): 89-93.
- [18] 周国模, 姜培坤, 徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化. 北京: 科学出版社, 2010: 78-79.
- [19] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. 毛竹光合动态研究. 林业科学研究, 2005, 18(5): 551-555.
- [20] 黄伯惠, 朱剑秋, 梅文钰, 蔡纫秋. 毛竹大小年形成原因探讨. 浙江林业科技, 1980, (2): 14-18.
- [21] 张春霞, 丁兴萃. 毛竹林生长量影响因子的分析研究. 竹子研究汇刊, 1997, 16(3): 31-36.
- [22] 游德龙. 立竹结构和施肥对笋用苦竹林笋生长的影响. 现代农业科技, 2012, (14): 127-129.
- [23] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [24] 李海, 郑道权, 张喜, 姜霞, 黄仕平, 穆兵, 母承毅. 不同间伐强度对撑绿竹新竹生长的影响. 林业实用技术, 2013, (5): 19-21.
- [25] 朱剑秋, 曾新宇. 毛竹林不同留养度数对生长和产量的影响. 竹子研究汇刊, 1990, 9(1): 55-62.
- [26] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. 水土保持学报, 2003, 17(4): 15-17, 21-21.