

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201502016

刘国粹,陈少雄,王志超,等. 三种整地措施下尾巨桉人工林碳储量及其分配格局 [J]. 广西植物, 2016, 36(7):768-775

LIU GC, CHEN SX, WANG ZC, et al. Carbon storage and its distribution in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations under three different soil preparation measures [J]. Guihaia, 2016, 36(7):768-775

## 三种整地措施下尾巨桉人工林碳储量及其分配格局

刘国粹, 陈少雄, 王志超, 张利丽, 杜阿朋\*

(国家林业局 桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

**摘要:** 以不炼山+人工穴垦、不炼山+机械带垦和炼山+机械全垦 3 种不同整地组合下的 2.5 年生尾巨桉人工林为对象, 对其碳储量及其分配格局进行研究。结果表明: (1) 3 种整地组合下尾巨桉各器官碳含量平均值为 44.37%~57.42%, 大小顺序为叶>干>枝>根>皮, 带垦最大(51.21%), 炼山全垦最小(49.95%); 不同整地组合尾巨桉人工林林下地被物层的碳含量均无显著差异( $P>0.05$ ); 土壤层(0~100 cm)碳含量均随土层深度的增大而减小, 各层土壤平均碳含量总体趋势表现为带垦>炼山全垦>穴垦。(2) 穴垦、带垦、炼山全垦措施下乔木层总碳储量依次为 18.01、30.49 和 23.56  $t \cdot hm^{-2}$ , 各器官碳储量大小顺序为干>根>叶>枝>皮; 除皮外, 其余器官碳储量排序均为带垦>炼山全垦>穴垦。(3) 尾巨桉人工林生态系统的总碳储量表现为带垦(197.03  $t \cdot hm^{-2}$ )>炼山全垦(161.16  $t \cdot hm^{-2}$ )>穴垦(144.77  $t \cdot hm^{-2}$ ); 不同整地措施碳储量分配格局均为土壤层>植被层>枯落物层。土壤层和乔木层碳储量均是带垦最大, 在整个生态系统碳储量中处于主导地位, 占整个系统碳储量在 93% 以上; 不同整地组合措施对枯落物层的碳储量无显著影响。因此, 从提高尾巨桉林分系统碳储量方面考虑, 在雷州半岛及相似立地条件地区进行尾巨桉人工林造林时宜采取不炼山+机械带垦的整地组合方式。

**关键词:** 整地措施, 尾巨桉人工林, 碳含量, 碳储量, 碳分配

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)07-0768-08

## Carbon storage and its distribution in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations under three different soil preparation measures

LIU Guo-Cui, CHEN Shao-Xiong, WANG Zhi-Chao, ZHANG Li-Li, DU A-Peng\*

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, China)

**Abstract:** To evaluate the carbon storages and their allocations in 2.5-year-old *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* (DH<sub>-3229</sub>) plantation in Guangdong, three kinds of soil preparation (no controlled burning and dig hole, no controlled burning and furrowing, controlled burning and full cultivation) mode were selected, field investigation and indoor analysis methods were adopted to measure the carbon content in different organs. The main results were as follow: (1) The average carbon content in different organs of DH<sub>-3229</sub> was 44.37%–57.42%, and the carbon content sequence was leaf > trunk > branch > root > bark. No significant difference ( $P<0.05$ ) was observed in carbon content among the shrub, herb

收稿日期: 2015-02-09 修回日期: 2015-06-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31300383); 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2014QB024); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行补助(2016-LYPT-DW-126) [Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Fund Project (31300383); Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Public Research of Chinese Academy of Forestry (CAFYBB2014QB024); National Positioning and Observation Research Station of Eucalyptus Forest Ecosystemrun Subsidy Project (2016-LYPT-DW-126)].

作者简介: 刘国粹(1989-), 女, 甘肃庆阳人, 硕士, 主要从事桉树人工林生长固碳研究, (E-mail) gcliu518@163.com.

\* 通讯作者: 杜阿朋, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态等研究, (E-mail) dapzj@163.com.

and litter layers of the DH<sub>-3229</sub> plantations with different soil preparation measures. Carbon content in the soil layer (0–100 cm) decreased with the increase of soil depth. (2) The carbon storage of no controlled burning and dig hole, no controlled burning and furrowing and controlled burning and full cultivation in tree layer were 18.01, 30.49 and 23.56 t · hm<sup>-2</sup>. Carbon storage in various organs showed the order: stem > root > leaf > branch > bark. Except for the bark, the order of carbon storage in other organs under three different soil preparation measures was furrowing soil preparation > all reclamation soil preparation > dig hole soil preparation. (3) The total ecosystem carbon storage of DH<sub>-3229</sub> plantations under different soil preparation measures was 144.77 t · hm<sup>-2</sup> (dig hole), 197.03 t · hm<sup>-2</sup> (burning) and 161.16 t · hm<sup>-2</sup> (all reclamation soil preparation), and the carbon storage order of different soil preparation measures in different layers appeared: soil layer > vegetable layer > litter layer. Carbon storage allocations in tree and soil layer of furrowing soil preparation were significantly larger than all reclamation soil preparation and dig hole soil preparation. The carbon storages of tree stratum and soil layer were the dominant part in carbon storage of the whole ecological system, which accounted for more than 93% of the carbon storage in the ecosystem. However, different combinations of measures on soil preparation have no significant effects on C storage allocations in the litter layer. Therefore, it appears furrowing soil preparation may be a more appropriate method to improve carbon storage of the DH<sub>-3229</sub> in the Leizhou Peninsula or other areas with similar site conditions.

**Key words:** soil preparation measures, *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations, carbon content, carbon storage, carbon allocation

全球变化及其影响已成为国际社会十分关注的政治经济和生态环境问题。森林生态系统作为陆地生态系统的主体,存储了整个陆地生态系统 2/3 以上的有机碳 (Marland & Marland, 2003),在减少大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升、减缓全球温室效应方面具有不可替代的作用。而人工林作为我国森林的主要组成部分,具有很大的碳汇潜力,为我国森林碳汇做出了重要贡献 (方精云, 2000)。人工林的碳汇研究对评价其碳汇潜力及“碳贸易”具有重要意义。

人工林碳储量的影响因素主要有自然因素 (气候、地形地势、氮沉降) 和人为因素 (土地利用方式、经营管理、人口密度) (杨晓菲等, 2011), 人类活动对人工林碳储量的影响更为显著 (Hurtt et al, 2002; 周广胜等, 2002; 吴建国等, 2004)。经营和管理水平被认为是影响人工林生态系统碳储量的最重要因素 (冯瑞芳等, 2006)。整地和采伐剩余物处理是人工林经营管理中两个重要的技术环节 (梁凤山等, 2010; 胡振宏等, 2013)。整地规格的提高可促进桉树、杉木人工林的生长,同时也会造成水土流失的加剧和造林成本的增加 (陈应彪等, 2014; 崔永忠等, 2009; 马祥庆等, 2000);凋落物是林地土壤有机碳的主要来源,采伐剩余物的处理可以增强或降低土壤有机碳转化速率,能够在短期内观察到土壤碳库和碳循环的变化 (王华等, 2010)。可见,整地措施、采伐剩余物处理方式可对林分生产力、土壤碳循环

产生影响,进而对整个人工林生态系统的碳固定、储存和排放产生重要影响。

桉树作为公认的速生丰产林树种,其固碳功能也不容小觑,在中国南方地区造林面积已达到 410 万 hm<sup>2</sup>,是华南地区重要战略树种之一。桉树轮伐期较短 (纸浆材仅 4~5 a,在 2~3 年生时生长最快)、经济效益显著,因此桉树也成为目前经营强度最大的人工林树种之一。长期的不科学、传统经营方式 (炼山、全垦整地、过量施肥、连栽等) 已对桉树林分生长和林地土壤肥力产生重要影响 (导致生长量降低、地力下降) (梁宏温等, 2009; 马祥庆等, 2000; 杨尚东等, 2013),进而影响桉树人工林生态系统的碳储量及分配格局。整地、砍杂、炼山等高强度的人为干扰,对其整个生态系统碳储量格局有很大影响。本研究在雷州半岛同一立地条件下,以传统经营的炼山+机械全垦整地组合方式的 2.5 年生尾巨桉 (*E. urophylla* × *E. grandis*) 林分为对照,对比分析其与不炼山条件下机械带垦和人工穴垦 2 种整地组合方式的相同林分在林分生长、植被碳含量和林地土壤碳含量的差异,进而揭示 3 种整地与采伐剩余物处理组合方式对尾巨桉人工林生态系统碳储量及其分布格局的影响,为合理、准确评估桉树人工林碳汇能力提供理论基础和数据参考,进一步为我国桉树人工林的固碳造林培育技术和可持续经营提供科学依据和技术支持。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区与试验地概况

研究区位于广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站(21°30' N, 111°38' E)。属北热带海洋性季风气候, 年均气温 23.1 °C, 年降水量 1 567 mm, 低丘地貌, 海拔为 80~220.8 m, 土壤主要为浅海沉积物砖红壤和玄武岩砖红壤(钟继红, 2005)。

试验林地为平地, 面积 3 hm<sup>2</sup>, 前茬为邓恩桉(*E. dunnii*)林分。2012年5月对试验林地采用3种整地模式(面积各 1 hm<sup>2</sup>)进行整地造林。①炼山+机械全垦(炼山全垦-CK): 清理刨除林地树兜, 其他采伐剩余物及杂灌烧除, 而后机械全面整地(深度 40 cm), 最后再机械开沟(宽 40 cm, 深 30 cm)造林; ②不炼山+机械带垦(带垦): 保留树头、采伐剩余物及杂灌, 利用机械开沟带垦(宽 40 cm, 深 30 cm), 开沟前人工砍杂(不移出林地); ③不炼山+人工穴垦(穴垦): 树头及林地剩余物处理同带垦, 人工挖穴种植(长 40 cm, 宽 40 cm, 深 30 cm)。造林幼苗均为尾巨桉 32-29 无性系组培苗, 株行距为 1.5 m × 4 m, 初始造林密度为 1 666 株·hm<sup>-2</sup>, 造林时未施基肥, 分别于树龄 3 月、1.5 a 时追施桉树专用肥各 1 次(3 月时 150 g·株<sup>-1</sup>, 1.5 a 时 300 g·株<sup>-1</sup>)。树龄为 2.5 a 时林分基本特征见表 1。

### 1.2 研究方法

在 3 种整地组合下的尾巨桉林分中, 分别选取 3 个标准样地(20 m × 20 m), 共 9 个样地, 对标准地内样树进行每木检尺, 测定树高、胸径等指标, 并选取 9 株平均标准木做解析木。

1.2.1 林木调查及生物量测定 将选取的 18 株标准木(炼山全垦、穴垦、带垦林分各 6 株)与地面齐平伐倒, 测量胸径、树高, 用“分层切割法”分别称取地上部分(叶、枝、皮、干)和地下部分(根)的鲜重。树冠部分将枝条和叶片全部剪下, 称取其全部鲜重。树干剥皮后, 2 m 分段称取干、皮鲜重, 按分段截取 2 cm 圆盘取样, 相同部位的皮也进行取样。根部采用人工全挖法, 整体挖出后清理干净表层土壤, 称取其鲜重, 并按根系大小均匀取样。将地上、地下各部分样品带回实验室在 80 °C 下烘干至恒重, 称取干重, 根据干物质率算出各器官的干物质量, 再测定其碳含量。

通过实测的 18 株标准木的树高、胸径数据以及

生物量数据, 建立各器官及整株的生物量(M)与变量树高与胸径的平方的乘积(D<sup>2</sup>H)之间相对生长方程(表 2)。

1.2.2 林下植被生物量和凋落物现存量的测定 在不同整地措施的 3 个 20 m × 20 m 标准样地内, 沿对角线分别选取 3 个 5 m × 5 m 小样方, 记录灌木的种类; 在样地里选取 5 个 1 m × 1 m 样方, 记录草本种类。林下灌草采取“收获法”分地上地下部分称取鲜重, 按不同植物种类比例分别取样。选取 5 个 1 m × 1 m 样方, 用“全部收获法”获取样方里全部枯落物, 称取鲜重并取样。将所有样品带回实验室在 85 °C 下烘干至恒重, 称干重并算出干物质量。

1.2.3 土壤样品的采集 在各样方选取 5 个点, 挖取 1 m 土壤剖面, 按 0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 cm 分 5 层, 环刀取土, 测量土壤容重。将同样方的相同土层混合, 自然风干后供测量含碳率用。

1.2.4 碳含量测定和碳储量计算 用重铬酸钾-水合加热法测定 85 °C 下烘干的植物样品和自然风干的土样的含碳率。各部分植物的含碳率乘以其单位面积的生物量(干物质量)得出植物碳储量。土壤层(0~100 cm)碳储量为各土层碳储量之和。各层土壤的碳储量:

$$T_i = C_i \times B_i \times D_i$$

式中,  $T_i$  为某一土层的碳储量(t·hm<sup>-2</sup>),  $i$  为某一土层,  $C_i$  为土壤含碳率(%),  $B_i$  为土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>),  $D_i$  为土层厚度(cm)。

### 1.3 数据处理

利用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 检验( $\alpha=0.05$ )。采用 Excel 软件进行作图和制表, 图表数据为平均值 ± 标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同整地措施下林分各层碳含量

2.1.1 桉树乔木层各器官碳含量 3 种整地组合下尾巨桉各器官碳含量平均值在 44.37%~57.42%之间波动(表 3), 带垦最大(51.21%), 炼山全垦最小(49.95%)。除叶差异不显著外, 其它均存在一定差异, 干和根碳含量均是带垦显著大于炼山全垦和穴垦( $P<0.05$ ), 炼山全垦的枝碳含量(49.36%)显著小于穴垦和带垦( $P<0.05$ ); 对于皮而言, 带垦碳含量(46.59%)显著大于炼山全垦(44.37%), 但二者

表 1 不同整地措施的尾巨桉人工林地概况

Table 1 Situation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* (DH<sub>3229</sub>) plantations with different soil preparation measures

整地措施 Soil preparation measures	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average tree height (m)	保存率 Survival (%)	现实密度 Existing density (ind · hm <sup>-2</sup> )	林下主要植物种类 Main understory plant species
穴垦 Dig hole	9.11±0.13	11.50±0.11	73.58	1226	盐肤木 ( <i>Rhus chinensis</i> )、马樱丹 ( <i>Lantana camara</i> )、飞扬草 ( <i>Euphorbia hirta</i> )、飞机草 ( <i>Eupatorium odoratum</i> )、白花鬼针草 ( <i>Herba Bidentis Pilosa</i> )、胜红蓟 ( <i>Ageratum conyzoides</i> )、五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> )
带垦 Furrowing	11.03±0.18	12.19±0.16	74.43	1240	鹅掌柴 ( <i>Schefflera octophylla</i> )、龙船花 ( <i>Ixora chinensis</i> )、野芍药 ( <i>Paeonia obovata Maxim</i> )、白花鬼针草 ( <i>Herba Bidentis Pilosa</i> )、飞扬草 ( <i>Euphorbia hirta</i> )、飞机草 ( <i>Eupatorium odoratum</i> )
炼山全垦 Burning and full cultivation	10.44±0.22	11.37±0.17	70.24	1170	蟛蜞菊 ( <i>Wedelia chinensis</i> )、胜红蓟 ( <i>Ageratum conyzoides</i> )、飞扬草 ( <i>Euphorbia hirta</i> )、马樱丹 ( <i>Lantana camara</i> )、苎草 ( <i>Arthraxon hispidus</i> )

表 2 尾巨桉人工林生物量方程

Table 2 Individual biomass regression model of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations

器官 Organ	回归方程 Regression equation	R <sup>2</sup>	F	P 值 P-Value
树叶 Leaf	$M = 0.0009(D^2H)^{1.1292}$	0.713	17.371	0.004
树枝 Brank	$M = 0.0004(D^2H)^{1.2682}$	0.840	26.221	0.004
树皮 Bark	$M = 0.0032(D^2H)^{0.9496}$	0.830	24.443	0.004
树干 Stem	$M = 0.0069(D^2H)^{1.1167}$	0.974	257.569	<0.001
树根 Root	$M = 0.0004(D^2H)^{1.4096}$	0.713	17.425	0.004
全株 Whole tree	$M = 0.0083(D^2H)^{1.1836}$	0.909	69.583	<0.001

均与穴垦无显著差异 ( $P > 0.05$ )。3 种整地组合措施下的各器官碳含量大小顺序基本一致,不同器官间碳含量除树干和树枝之间差异不显著外,其余器官均差异显著 ( $P < 0.05$ ),树皮最小,树叶最大,各器官总体大小顺序为叶 > 干 > 枝 > 根 > 皮。3 种整地组合下尾巨桉地上部分平均碳含量分别为穴垦 50.42%、带垦 51.21%、炼山全垦 50.33%,与地下部分(根)相比,炼山全垦和穴垦均是地上部分显著大于地下部分 ( $P < 0.05$ ),带垦地上、地下部分碳含量差异不大。

2.1.2 林下植被、枯落物层及土壤层碳含量 3 种整地组合方式下的林下地被物层的碳含量彼此均无显著差异。从表 3 看出灌木层、草本层和凋落物层碳含量分别在 48.72% ~ 51.82%、43.77% ~ 54.27% 和 50.29% ~ 51.55% 之间,灌木层和草本层的地上部分平均碳含量分别为 51.64% 和 53.97%,均高于地下部分(灌木层 48.91%,草本层 44.02%)。3 个地被物层次相比,凋落物层平均碳含量最高(50.95%),

表 3 不同整地方式下尾巨桉人工林植被各组成层次碳含量

Table 3 Carbon content of each layer of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures (%)

层次 Layer	器官 Organ	整地方式 Soil preparation measures		
		穴垦 Dig hole	带垦 Furrowing	炼山全垦 Burning and full cultivation
乔木层 Tree layer	树叶 Leaf	54.10± 0.73Aa	55.30± 0.58Aa	57.42± 0.93Aa
	树干 Stem	50.48± 0.33Bb	52.09± 0.34Ba	50.16± 1.13Bb
	树枝 Brank	51.49± 0.19Ba	50.84± 0.21Ca	49.36± 0.29BCb
	树皮 Bark	45.62± 0.57Dab	46.59± 0.29Da	44.37± 0.50Db
	树根 Root	48.44± 0.35Cb	51.22± 0.35BCa	48.43± 0.27Cb
	灌木层 Shrub layer	地上 Aboveground	51.67± 0.97a	51.44± 0.93a
地下 Belowground		48.94± 0.91a	48.72± 0.88a	49.08± 0.58a
草本层 Herb layer	地上 Aboveground	54.27± 0.54a	53.67± 1.73a	53.97± 2.16a
	地下 Belowground	44.27± 0.44a	43.77± 1.41a	44.02± 1.77a
凋落物层 Litter layer		51.01± 0.59a	51.55± 0.65a	50.29± 0.48a

注: 同一行统计数字后的小写字母不同表示整地方式间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 同一列统计数字后大写字母不同表示器官间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 数据表示方式为平均值±标准误。下同。

Note: Means±SE followed by different small letters in the same line mean significant differences among different soil preparation measures ( $P < 0.05$ ), and different capital letters in the same column meant significant difference among different organs ( $P < 0.05$ ). The same below.

灌木层次之(50.28%),草本层最低(49.00%)。

3 个尾巨桉林地的土壤碳含量均呈现随土层加



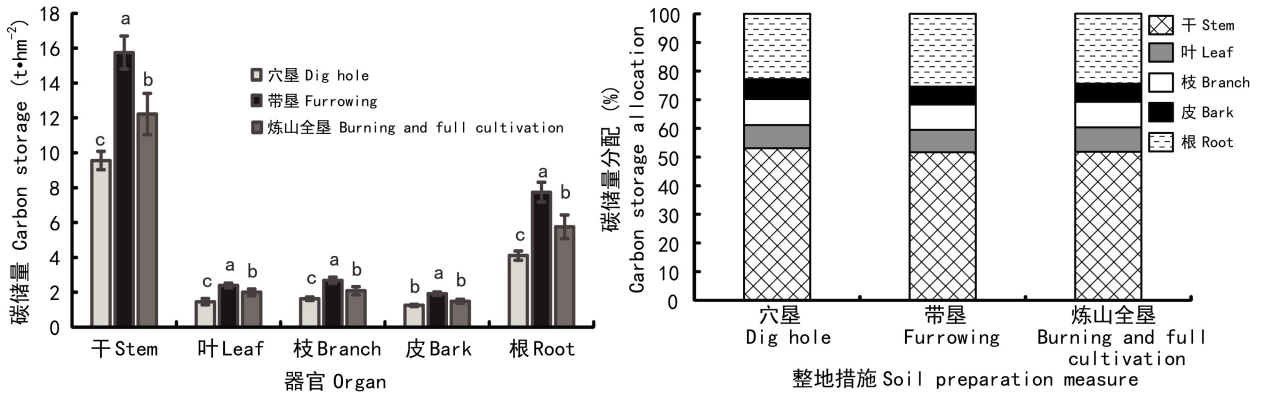


图1 不同整地措施下尾巨桉人工林乔木层各器官碳储量及其分配 不同小写字母表示整地方式间差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 1 Carbon storages and allocations in different organs of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures Different small letters meant significant differences among different soil preparation measures ( $P<0.05$ ). The same below.

表4 不同整地方式桉人工林各土层土壤碳含量

Table 4 Carbon contents of different soil layers in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

土层 Soil layer (cm)	整地前 Pre-cultivation	整地方式 Soil preparation measures		
		穴垦 Dig hole	带垦 Furrowing	炼山全垦 Burning and full cultivation
0~10	23.92± 0.51	19.48± 2.17Ab	24.86± 0.45Aa	23.66± 0.30Aab
10~20	19.91± 0.56	17.67± 1.05ABa	21.09± 2.69ABa	18.90± 0.75Ba
20~40	17.23± 0.22	14.30± 1.19Ba	19.46± 1.53Ba	15.38± 1.58Ba
40~60	11.89± 0.11	9.30± 0.98Ca	14.26± 1.83Ca	11.48± 1.97Ca
60~100	9.86± 0.15	7.77± 0.28Cb	10.21± 0.19Ca	7.80± 0.34Cb

深土壤碳含量降低的趋势(表4)。穴垦尾巨桉土层10~20、20~40、40~60和60~100 cm碳含量分别比土层0~10 cm降低了9.29%、26.59%、52.26%和60.11%，带垦尾巨桉则相应降低了15.16%、21.72%、42.64%和58.93%，全垦尾巨桉则分别降低了20.12%、35.00%、51.48%和67.03%。各土层土壤含碳量在7.77~24.86  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间变化，0~10 cm土层土壤碳含量显著大于其它土层( $P<0.05$ )，10~20和20~40、40~60和60~100 cm无显著差异。同一土层不同整地组合措施下土壤碳含量存在一定差

异，各层土壤平均碳含量总体趋势表现为带垦>炼山全垦>穴垦，但仅有0~10 cm和60~100 cm土层的带垦与炼山全垦、穴垦有显著差异( $P<0.05$ )，其余3个土层不同整地组合方式间均无显著性差异。

## 2.2 不同整地措施下林分各层碳储量及其分配

2.2.1 乔木层碳储量及其分配 3种整地+采伐剩余物处理组合方式下2.5年生尾巨桉林分乔木层的碳储量有显著差异( $P<0.05$ )，3种组合下以带垦的乔木层总碳储量最大，为(30.49±1.93)  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，炼山全垦次之，为(23.56±2.41)  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，穴垦最小，为(18.01±1.05)  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；3种组合下乔木层的各器官除皮外，其余器官排序均为带垦>炼山全垦>穴垦。各器官碳储量在乔木层的比率均以树干最高，3种组合下乔木层树干碳储量在乔木层总碳储量的比率分别为53.08% (穴垦)、51.65% (带垦)和51.86% (炼山全垦)。树皮碳储量所占比例最小，比率均不足7%，分别为6.94% (穴垦)、6.30% (带垦)和6.32% (炼山全垦)。3种不同整地措施下各器官碳储量占乔木层比例相当，各器官碳储量分配大小顺序均为树干>树根>树枝>树叶>树皮(图1)。

2.2.2 林下地被物碳储量及其分配 由图2可见，3种整地组合下灌木层无论是地上还是地下部分的碳储量均差异显著( $P<0.05$ )，其大小排序均为穴垦>带垦>炼山全垦。可见，随着整地规格的提高，灌木层(地上和地下)碳储量呈减小趋势。而3种整地组合下草本层和凋落物层碳储量彼此差异均不显著。在灌木层和草本层中，地上部分碳储量均大于

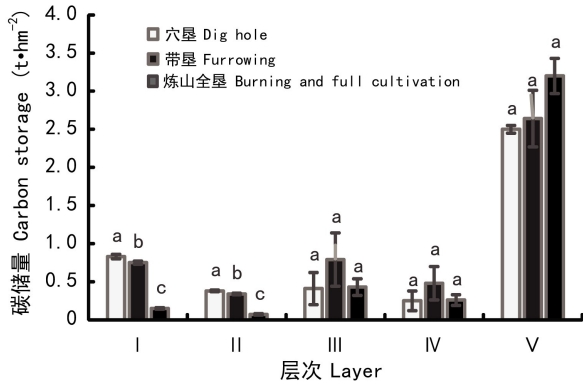


图 2 不同整地措施下尾巨桉人工林林下植被碳储量

I. 灌木层地上部分; II. 灌木层地下部分; III. 草本层地上部分; IV. 草本层地下部分; V. 凋落物层。

Fig. 2 Carbon storages of understory vegetations in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures I. Shrub layer aboveground; II. Shrub layer belowground; III. Shrub layer aboveground; IV. Shrub layer belowground; V. Litter layer.

表 5 不同整地措施下尾巨桉人工林各土层土壤碳储量

Table 5 Carbon storages in different soil layers in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures (t 瘠藪 hm<sup>-2</sup>)

土层 Soil layer (cm)	整地方式 Soil preparation measures		
	穴垦 Dig hole	带垦 Furrowing	炼山全垦 Burning and full cultivation
0~10	20.26±2.26b	25.11±0.45a	22.95±0.29ab
10~20	19.26±1.14a	22.56±2.89a	20.60±0.81a
20~40	29.46±2.45b	43.19±3.39a	33.23±3.41ab
40~60	19.52±2.06a	30.24±3.87a	24.57±4.23a
60~100	33.88±1.22b	40.43±0.77a	32.12±1.41b
合计 Total	122.39±7.12b	161.54±3.67a	133.48±7.74b

地下部分。3 个层次的碳储量大小顺序为凋落物层>灌木层>草本层。

2.2.3 土壤碳储量及其分配 穴垦、带垦和炼山全垦整地措施下尾巨桉林分的土壤碳储量分别为 122.39、161.54、133.48 t · hm<sup>-2</sup>, 带垦显著高于炼山全垦和穴垦。整地措施对土层 0~10、20~40、60~100 cm 有一定影响, 带垦的土壤碳储量均比炼山全垦和穴垦高; 整地措施对土层 10~20、40~60 cm 的土壤碳储量无明显影响。在不同整地措施下均是表层土壤碳储量最大, 随着土层的加深碳储量呈不断

表 6 不同整地措施尾巨桉人工林

生态系统碳储量及其分配

Table 6 Carbon storages and allocation of ecosystem in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different soil preparation measures (t · hm<sup>-2</sup>)

指标 Item	层次 Layer	整地方式 Soil preparation measures			
		穴垦 Dig hole	带垦 Furrowing	炼山全垦 Burning and full cultivation	
碳储量 Carbon storage (t · hm <sup>-2</sup> )	乔木层 Tree	18.01±1.05c	30.49±1.93a	23.56±2.41b	
	灌木层 Shurb	1.21±0.04a	1.09±0.04b	0.22±0.01c	
	草本层 Herb	0.66±0.34a	1.27±0.57a	0.69±0.17a	
	凋落物层 Litter	2.50±0.05a	2.64±0.77a	3.21±0.23a	
	土壤层 Soil	122.39±7.12b	161.54±3.67a	133.48±7.74b	
	分配比 Allocation proportion (%)	乔木层 Tree	12.44±0.28	15.47±0.65	14.62±0.73
		灌木层 Shurb	0.84±0.02	0.55±0.02	0.14±0.01
		草本层 Herb	0.46±0.23	0.64±0.39	0.43±0.09
		凋落物层 Litter	1.73±0.03	1.34±0.45	1.99±0.18
		土壤层 Soil	84.54±5.23	81.98±3.14	82.82±2.46

减小趋势(表 5)。

### 2.3 桉树人工林生态系统碳储量及其分配

由表 6 可知, 穴垦、带垦、炼山全垦整地措施下尾巨桉人工林生态系统的碳储量分别为 144.77、197.03、161.16 t · hm<sup>-2</sup>。3 种整地组合下尾巨桉人工林生态系统碳储量分配格局中的 0~100 cm 土壤层的碳储量和比例均是最大的, 所占比例均超过 81%; 乔木层次之, 所占比例均超过 12%; 再次是凋落物层, 所占比例均超过 1.34%。灌木层和草本层的碳储量及比例虽均排序靠后但在 3 种整地组合中存在一定差异: 带垦和炼山全垦林分均是草本层>灌木层, 穴垦林分则为灌木层>草本层。这可能是由于带垦和炼山全垦下的尾巨桉林分生长明显优于穴垦, 这使得其林下灌木受到的压制程度较穴垦要高, 导致了在灌木层与草本层在分配比例排序上的差异。3 个林地的林下植被(灌木、草本、凋落物)碳储量所占比例均很小(穴垦 3.02%、带垦 2.53%、炼山全垦 2.56%), 这是人工林生态系统碳储量格局的

相似之处,主要是由于人工林的密度和人为对林下植被干扰(如炼山、整地和抚育除杂等)造成的。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同整地措施尾巨桉林各层碳含量

本研究得到3种整地措施下尾巨桉各器官含碳量在 $(44.37 \pm 0.50)\%$ ~ $(57.42 \pm 0.93)\%$ 之间,除叶外,带垦尾巨桉其它器官碳含量均大于另2种整地措施,而穴垦和全垦差异不显著。带垦尾巨桉各器官的碳含量较大,可能是因为带垦采伐剩余物的保留和整地的适度改变土壤的理化性质(贾奎忠等,2011;Nilsen & Strand,2008),进而促进了林木生长,导致其碳分配格局发生改变。乔木层各器官间碳含量差异较大,其大小顺序为树叶>树干>树枝>树根>树皮,这与邓力等(2013)对短轮伐期桉树人工林的研究结果一致;3种整地措施尾巨桉各器官碳含量普遍大于张治军等(2009)在广西白南林场(3年生和6年生桉树41.47%~49.78%)和东门林场(43.15%~49.34%)测定的桉树各器官碳含量,这可能是由于样品测定方法(张治军等采用的是干烧法,本研究采用的是湿烧法)、林分林龄及立地(广西白南林场为坡地,本研究林地为平地)等差异造成的。本研究得到林下各植物层平均含碳量分别为灌木48.72%~51.82%、草本43.77%~54.27%、枯落物50.29%~51.55%,整地组合措施对林下各植被层碳含量无显著影响。枯落物层主要来源是乔木层枯枝,木质化程度和碳含量都较高,使其碳含量高于灌木层和草本层(明安刚等,2014);植物木质化程度不同,也是灌木层碳含量高于草本层的原因。

本研究表明整地组合措施对土壤碳含量有一定影响。带垦的平均土壤碳含量最大,分别为穴垦和炼山全垦的1.31和1.16倍。机械整地在一定程度上改善土壤的理化性质(贾奎忠等,2011),尤其是在雨水多土壤易板结的地区,整地显得尤为重要。因此,过低强度的穴垦整地措施土壤碳含量较低。但整地前的炼山使得林地采伐剩余物的养分流失(马祥庆等,2000),不利于土壤有机质的积累;将采伐剩余物留在林地内可增加土壤碳含量(Nilsen & strand,2008),这使得炼山全垦的土壤碳含量低于带垦。不炼山+机械带垦既满足了林地土壤整地要求又最大程度增加了土壤有机碳的来源,故其土壤碳含量较大。

#### 3.2 不同整地措施尾巨桉林各层碳储量

本研究表明整地组合措施对乔木层碳储量影响显著,其大小顺序为带垦>炼山全垦>穴垦,对各器官碳储量分配格局无显著影响。植物层碳储量以乔木层为主导,其碳储量占植被层的80.47%~85.91%。3种整地措施下尾巨桉乔木层碳储量均以干和根为主,占乔木层碳储量比例分别为51.66%~53.08%、22.82%~25.39%。但对银合欢(*Leucaena glauca*)、山合欢(*Albizia kalkora*)、赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)、大叶相思(*Acacia mangium*)和杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)的研究表明(崔永忠等,2009;马祥庆等,2000),机械全垦林分生长量比局部整地的高,与本研究结果不太一致,这是由于上述两个林分研究中仅比较了整地对林分的影响而未考虑采伐剩余物处理方式差异带来的影响。

本研究表明整地组合措施对灌木层和草本层碳储量有一定影响,而对枯落物层无显著影响。本研究中3种整地组合方式下林分灌木层碳储量差异显著:穴垦>带垦>炼山全垦,整地规格越高,灌木层碳储量越小。这是由于机械全垦和机械带垦整地时较大程度破坏了灌木的根系,使其不容易再生,数量急剧减少,导致了灌木层的碳储量明显降低。

本研究表明整地组合对土壤总碳储量有显著影响,但对不同层次土壤碳储量分配格局基本无影响。3种整地组合方式下的尾巨桉林地0~100 cm土壤碳储量均是表层(0~10 cm)土壤碳储量最大,随着土层的加深不断减小。这是由于土壤有机碳具有明显的表聚现象(王棣等,2014),深层土壤有机碳分解矿化速率较表层土壤显著降低(Gill & Burke,2002)。3块林地0~100 cm总土壤碳储量也存在差异,不炼山+机械带垦林地土壤碳储量显著最高 $(161.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$ ,分别是炼山全垦和不炼山+人工穴垦林地的1.21和1.32倍,后者差异不显著。主要原因是炼山+机械带垦一方面通过整地改善了土壤理化性质,促进植物的生长,增加了有机碳的来源(贾奎忠等,2011);另一方面采伐剩余物的保留又最大程度地保留了土壤碳的来源。

#### 3.3 不同整地措施尾巨桉林生态系统总碳储量及分配

3种整地组合下尾巨桉人工林生态系统碳储量分配均以土壤层碳储量最高,植被层次之,枯落物层最小,这与前人对格木、刺槐等人工林的研究结果相一致(明安刚等,2014;申家朋和张文辉,2014)。3种整地组合下尾巨桉林分总碳储量大小顺序为带垦



( $197.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > 炼山全垦 ( $161.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > 穴垦 ( $144.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。与同样采取传统炼山造林方式的江西(刘文飞等, 2013)和桂东南(文丽等, 2014)两年生尾巨桉人工林总碳储量( $152.88$  和  $165.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )相比, 本研究中的炼山全垦与之相当; 带垦 ( $197.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 明显较大, 分别是江西地区和桂东南地区的 1.29 倍和 1.19 倍, 但同样不炼山的穴垦却明显较小。这是整地与保留枯落物两者相互作用的结果。因此, 从提高桉树林分碳储量与改善土壤条件防止土壤肥力下降的角度考虑, 在雷州半岛及相似立地条件地区进行桉树人工林造林时, 宜采取不炼山+机械带垦的整地与采伐剩余物处理组合方式。

## 参考文献:

CHEN YB, YANG ZJ, JIANG H, et al, 2014. The growth effects of *Eucalyptus* plantations at site types and soil preparation modes [J]. Trop For, 42(1): 23-26. [陈应彪, 杨曾奖, 蒋虎, 等, 2014. T 地形因子及整地方式对桉树人工林生长的影响 [J]. 热带林业, 42(1): 23-26.]

CUI YZ, LI K, SUN YY, et al, 2009. Report on afforestation result under different measures of soil preparation in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. SW Chin J Agric Sci, 22(5): 1 300-1 305. [崔永忠, 李昆, 孙永玉, 等, 2009. 元谋干热河谷不同整地措施造林成效研究 [J]. 西南农业学报, 22(5): 1 300-1 305.]

DENG L, LI K, WU QB, et al, 2013. Potential effects on carbon and nitrogen accumulation of *Eucalyptus* plantation ecosystem under short rotation management [J]. J Anhui Agric Sci, 41(9): 3 961-3 964. [邓力, 李况, 吴庆标, 等, 2013. 短轮伐期经营对桉树人工林生态系统碳氮积累的潜在影响 [J]. 安徽农业科学, 41(9): 3 961-3 964.]

FANG JY, 2000. Forest productivity in China and its response to global climate change [J]. J Plant Ecol, 24(5): 513-517. [方精云, 2000. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 24(5): 513-517.]

FENG RF, YANG WQ, ZHANG J, 2006. Artificial forest management for global change mitigation [J]. Acta Ecol Sin, 26(11): 3 870-3 877. [冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 2006. 人工林经营与全球变化减缓 [J]. 生态学报, 26(11): 3 870-3 877.]

GILL RA, BURKE IC, 2002. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe [J]. Plant Soil, 241(2): 233-242.

HU ZH, HE ZM, FAN SH, et al, 2013. Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir plantation [J]. Acta Ecol Sin, 33(13): 4 205-4 213. [胡振宏, 何宗明, 范少辉, 等, 2013. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应 [J]. 生态学报, 33(13): 4 205-4 213.]

JIA ZK, GONG NN, YAO K, et al, 2011. Effects of preparation mode on the productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba [J]. For Resour Manag, 10(5): 71-78. [贾奎忠, 公宁宁, 姚凯, 等, 2011. 整地方式对塞罕坝华北落叶松人工林生产力的影响 [J]. 林业资源管理, 10(5): 71-78.]

LIANG FS, ZHANG B, LI YZ, et al, 2010. Influence of soil preparation pattern on the growth of crossbreed Larch [J]. For Sci & Technol, 35(1): 4-6. [梁凤山, 张博, 李亚洲, 等, 2010. 整地方式对杂种落叶松生长的影响 [J]. 林业科技, 35(1): 4-6.]

LIANG HW, WEN YG, WEN LH, et al, 2009. Effects of continuous cropping on the carbon storage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* short-rotations plantations [J]. Acta Ecol Sin, 29(8): 4 242-4 249. [梁宏温, 温远光, 温琳华, 等, 2009. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳储量的影响 [J]. 生态学报, 29(8): 4 242-4 249.]

LIU WF, WU JP, FAN HB, et al, 2013. Carbon pools in an age sequence of *Eucalyptus* plantation forests [J]. Ecol Environ Sci, 22(1): 12-17. [刘文飞, 吴建平, 樊后保, 等, 2013. 连续年龄序列桉树人工林碳库 [J]. 生态环境学报, 22(1): 12-17.]

MA XQ, LIU AQ, HE ZY, et al, 2000. Effects of site preparations on ecosystem of Chinese fir plantations [J]. J Mount Sci, 18(3): 237-243. [马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 等, 2000. 整地方式对杉木人工林生态系统的影响 [J]. 山地学报, 18(3): 237-243.]

MARLAND E, MARLAND G, 2003. The treatment of long-lived, carbon containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere [J]. Environ Sci Pol, 6(2): 139-152.

MING AG, JIA HY, TIAN ZW, et al, 2014. Characteristics of carbon storage and its allocation in *Erythrophleum fordii* plantations with different ages [J]. Chin J Appl Ecol, 25(4): 940-946. [明安刚, 贾宏炎, 田祖为, 等, 2014. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征 [J]. 应用生态学报, 25(4): 940-946.]

NILSEN P, STRAND LT, 2008. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies*(L.) Karst.) stand after 33 years [J]. For Ecol Manag, 256(3): 201-208.

SHENG JP, ZHANG WH, 2014. Characteristics of carbon storages and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau region [J]. Acta Ecol Sin, 34(10): 2 746-2 754. [申家朋, 张文辉, 2014. 黄土沟壑区退耕还林地刺槐人工林碳储量及其分配规律 [J]. 生态学报, 34(10): 2 746-2 754.]

WANG H, HUANG Y, WANG SL, et al, 2010. Carbon and nitrogen storage under different forest ecosystems in mid-subtropical regions [J]. Chin J Eco-Agric, 18(3): 576-580. [王华, 黄宇, 汪思龙, 等, 2010. 中亚带几种典型森林生态系统碳、氮储存功能研究 [J]. 中国生态农业学报, 18(3): 576-580.]

WANG L, GENG ZC, SHE D, et al, 2014. Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qinling Mountains [J]. Chin J Appl Ecol, 25(6): 1 596-1 577. [王棣, 耿增超, 余雕, 等, 2014. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征 [J]. 应用生态学报, 25(6): 1 596-1 577.]

WEN L, WANG KL, ZENG FP, et al, 2014. Carbon storage and its distribution in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different stand ages [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 34(8): 1 676-1 684. [文丽, 王克林, 曾馥平, 等, 2014. 不同林龄尾巨桉人工林碳储量及分配格局 [J]. 西北植物学报, 34(8): 1 676-1 684.]

WU JG, ZHANG XQ, XU DY, 2004. Impact of land-use change on soil carbon storage [J]. Chin J Appl Ecol, 15(4): 593-599.