

30个桉树无性系人工林碳储量分析

王楚彪¹, 刘丽婷², 莫晓勇*

(1. 华南农业大学, 广东 广州 510642; 2. 江西省林业科学院, 江西 南昌 330032)

摘要:通过对国营雷州林业局30个5年生桉树无性系人工林的调查、试验,旨在阐明不同桉树无性系人工林碳储量的变化规律及营建桉树碳汇林的合理措施。结果表明:30个桉树无性系人工林生态系统平均碳储量为 $148.743 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于之前学者研究的桉树人工林碳储量,其中,乔木层和土壤层分别占34.39%、61.88%;乔木层平均碳储量达 $51.948 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同无性系间差异极显著($p < 0.01$),其中,23(101-1)、25(179-1)、4(BU1)、26(184-1)号无性系表现最优;土壤层的平均碳储量为 $92.033 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同无性系土壤层碳储量差异不明显;灌木层、草本层、凋落物层碳储量分别是 2.430 、 0.731 、 $1.592 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占比例较小。营建桉树碳汇林关键在于无性系的正确选择。

关键词:桉树无性系;碳储量;碳汇林

中图分类号:S792.39 S718.55

文献标识码:A

Carbon Storage Analysis of 30 *Eucalyptus* Clonal Plantation

WANG Chu-biao¹, LIU Li-ting², MO Xiao-yong¹

(1. South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, Jiangxi, China)

Abstract: 30 five-year-old *Eucalyptus* clonal plantations belonging to Leizhou Forestry Bureau were investigated and studied to determine the variation of carbon storage of different *Eucalyptus* Clones and the reasonable measures of establishing *Eucalyptus* carbon sequestration forest. The results of the study showed: the average carbon storage of the 30 clones was $148.743 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was higher than that of the *Eucalyptus* clonal plantation studied in the past. The carbon storage of tree layer and soil layer accounted for 34.39% and 61.88% of carbon storage of the whole ecosystem; the carbon storage of tree layer was $51.948 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and significant differences were found ($p < 0.01$) among clones, in which 23 (101-1), 25 (179-1), 4 (BU₁), and 26 (184-1) were the best; the average carbon storage in soil was $92.033 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and no significant differences were found among clones; the average carbon storage of shrub layer, herb layer and forest floor layer were $2.430 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $0.731 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.592 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for small. It is concluded that the key of establishing *Eucalyptus* carbon sequestration forest is selecting the proper clones.

Key word: *Eucalyptus* clones; carbon storage; carbon sequestration forest

自人类工业革命以来,森林、草地遭到大肆破坏,造成了生物圈的固碳能力下降,这是继化工燃料使用之外使大气中CO₂含量上升最大的因素^[1-4]。CO₂是现今的最主要的温室气体,由CO₂等温室气

体引致的全球变暖已成为人类面临的最为严重的环境问题之一^[5-6]。如何降低CO₂的浓度,已是各行业专家特别是林业专家研究的热点问题之一^[4]。森林是主要的陆地生态系统,森林通过光合作用吸收

收稿日期:2012-12-13

基金项目:广东省林业科技创新专项资金项目:“桉树良种选育和高效栽培技术与示范(2008KJCX004-04)”

作者简介:王楚彪(1982—),男,硕士,从事森林经理、人工林生态研究。

* 通讯作者:莫晓勇(1962—),男,教授,主要从事森林经理、人工林培育、遗传育种研究。E-mail:motree@163.com.

大量 CO₂,降低大气中 CO₂ 的浓度,在碳固定中起重要作用^[7]。我国森林面积的增长主要体现在人工林上^[8],据 2011 年中国林学会桉树专业委员会初步统计,我国桉树人工林面积已达 368 万 hm²,占全国人工林总面积的 5.97%。桉树人工林生长特别迅速,高峰期每天可以长高 3 cm,固碳能力强,固碳效率高,是非常优良的固碳树种^[7-8]。因此,桉树人工林不仅能提供丰富的林产品和林副产品,从环境学、生态学上还是重要的碳汇林,是我国森林碳汇的重要组成部分。

为研究我国森林生态系统在碳固定、碳循环中的作用,我国学者在碳汇林、森林碳储量、森林碳密度等方面做了大量研究,并取得显著成果^[9-12],但研究多集中在天然林^[13],对于人工林碳汇功能的研究较少^[14]。目前,桉树人工林碳汇研究主要有桉树林碳储量及其分布研究^[15]、桉树林与其它树种碳汇功能比较^[16]、桉树人工林土壤碳储量研究^[17]、桉树林固碳成本的核算^[18]等,而对于桉树人工林不同无性系对碳汇功能的影响鲜有研究。本文对不同无性系的桉树人工林固碳能力进行比较研究,以期为不同无性系的桉树人工林碳汇贡献和桉树碳汇林的无性系选择提供科学依据。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究地概况

研究地设在雷州林业局所属的林场,位于广东省雷州半岛中北部,南北长 200 km,东西宽 70 km,地处热带北缘海洋性季风气候区,多台风^[19]。日照充足,年平均气温 23.0~23.5℃,1 月份平均气温 15.1℃,极端低温 3.2℃;7 月平均气温 29.2℃,极端高温 36.5℃;20℃以上持续天数达 245 d,年平均日照时数达 1 817.7~2 160.8 h^[20-22]。年平均降水量 1 864.5 mm,年平均蒸发量 1 725.5 mm,相对湿度 85%,5—9 月是雨季,降水量占全年的 85%,11 月到次年的 3 月是旱季^[20-21]。地形属台地和低丘陵地,地面坡度一般仅 3~5°;成土母质北部为砂页岩与花岗岩,中部为浅海沉积物,南部为玄武岩,土层厚 40~100 cm,土壤肥力不高,富铝化,砖红色,酸度大^[19,23]。林下植被有光叶山黄麻(*Trema cannabina* Lour.)、银柴(*Aporosa dioica* Muell. Arg.)、粪箕笃(*Stephania longa* Lour.)、飞机草(*Eupatorium odoratum* Linn.)、舞草(*Codariocalyx motorius* (Houtt.) Ohashi)、豆腐柴(*Premna microphylla*

Turcz.)、酸藤子(*Embelia laeta* (Linn.) Mez)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum* Turcz.)、阔叶丰花草(*Borreria latifolia* (Aubl.) K. Schum.)、假臭草(*Eupatorium catarium* Veldkamp)、弓果黍(*Cyrtococcum patens* (Linn.) A. Camus)、芒(*Miscanthus sinensis* Andress)等

1.2 试验设计

1999 年在雷州林业局营建无性系测定林,共 30 个无性系,所属种见表 1。该测定林面积共 6.333 hm²,3 块试验地分布在雷州林业局唐家林场草地林队 1-053 小班、北坡林场港门林队 1-020 小班、石岭林场石塘林队 3-031-1 小班。在每块试验地中,30 个无性系采用随机区组排列,每小区为 4 行 5 株的方块,株行距 1.7 m×2.7 m,并设 4 次重复,即每块试验地每个无性系有 80 株,30 个无性系共 2 400 株。3 块试验地造林和经营措施一致,对采伐迹地机械沟垦,施用雷林基肥 7.5 t·hm⁻²,在同年追施雷林 2 号肥 0.371 t·hm⁻²,在第 2、3 年各进行 1 次抚育,并施雷林 2 号肥 0.371 t·hm⁻²,第 4、5 年无抚育、无施肥。

表 1 30 个无性系所属种的情况

| 种 | 无性系 |
|----------|--|
| 尾叶桉 | 2(3405),3(B ₆₇),4(BU ₁),5(BU ₁₄),8(KU ₅),9(KU ₆),15(SH ₅),19(W ₁),21(ZU ₆),23(101-1),25(179-1) |
| 尾细桉 | 11(LH ₃),12(LH ₄),13(LP ₁),14(M ₁),16(TH ₉₂₁₂),18(UT ₇),26(184-1) |
| 尾巨桉 | 22(26-2),28(21-2),29(211-4),30(32-28) |
| 尾赤桉 | 10(LH ₂₂),24(167-1),27(201-1) |
| 刚果 12 号桉 | 1(301),20(W ₅) |
| 赤桉 | 6(CL ₁) |
| 巨尾桉 | 7(D ₂) |
| 细叶桉 | 17(TM ₆) |

注:尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake);尾细桉(*E. urophylla* S. T. Blake×*E. tereticornis* Smith);尾赤桉(*E. urophylla* S. T. Blake×*E. camaldulensis* Dehnh);刚果 12 号桉(*E. 12ABL*);赤桉(*E. camaldulensis* Dehnh);巨尾桉(*E. grandis* W. Hill ex Maiden×*E. urophylla* S. T. Blake);细叶桉(*E. tereticornis* Smith);表中数字是无性系序号,括号内代码是无性系名称。

1.3 野外调查

2004 年 4—5 月,在每块试验地分别对 30 个无性系各选取 12 株立木(调查对象只针对 4 行 5 株小区的中间 6 株)进行胸径、树高调查。在各试验地的每个无性系内设置 2 m×2 m 样方,收集林下灌木层植被,称鲜质量,取一定样品放到 85℃烘干箱烘至恒质量,称其干质量,得到灌木层的生物量;设置 1

m × 1 m 样方采用相同方法收集林下草本层和凋落物层生物量。在每个样方内挖 60 cm 的剖面,分别在 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 层用 100 cm³ 环刀取土样,测其土壤密度。

1.4 数据分析

对比温远光等^[24]2000年在广西东门林场尾叶桉生物量模型和陈婷等^[25]2005年在广西东门林场尾巨桉生物量模型,发现2个模型相差较小,故采用与本研究无性系所属树种最为接近的尾巨桉模型计算本文桉树无性系的生物量。其模型见表2。

表2 东门林场尾巨桉生物量回归方程

| 器官 | 回归方程 | R | F |
|-----|------------------------------------|--------|----------|
| 干材 | $W_s = 0.01982(D^2H)^{0.9816}$ | 0.9972 | 1408.82* |
| 干皮 | $W_b = 0.00831(D^2H)^{0.8297}$ | 0.9803 | 196.68* |
| 光枝 | $W_{br} = 0.000166(D^2H)^{1.2901}$ | 0.9363 | 56.89* |
| 叶枝 | $W_{lb} = 0.000405(D^2H)^{1.063}$ | 0.9461 | 68.31* |
| 树叶 | $W_l = 0.000208(D^2H)^{1.2180}$ | 0.9190 | 43.44* |
| 根莖 | $W_{rh} = 0.02011(D^2H)^{0.7169}$ | 0.9535 | 80.07* |
| 粗根 | $W_{tr} = 0.000154(D^2H)^{1.2740}$ | 0.9120 | 39.54* |
| 细根 | $W_{fr} = 0.000748(D^2H)^{0.8552}$ | 0.9393 | 59.93* |
| 吸收根 | $W_{ar} = 0.00642(D^2H)^{0.5930}$ | 0.8135 | 15.65* |

注: * $P \leq 0.01$; R 为回归方程的相关度; F 为表示显著性。

综合之前学者^[15,26-28]对桉树人工林碳含量的分析,各部分碳含量为:干材 47.56%,干皮 43.46%,光枝 47.76%,叶枝 47.15%,树叶 49.45%,根莖 47.49%,粗根 46.63%,细根 47.61%,吸收根 45.99%;林下灌木 44.73%,林下草本 40.74%,凋落物 42.23%;土壤层碳含量,0 ~ 20 cm 为 1.42%,20 ~ 40 cm 为 0.96%,40 ~ 60 cm 为 0.65%。通过各部分生物量和土壤质量乘以碳含量计算出桉树人工林生态系统的碳储量。土壤碳储量的计算公式为:

$$\sum_{i=1}^n C = Pb_i \times V_i \times Cd_i$$

式中: Pb_i 是第 i 层的土壤密度; V_i 是第 i 层的体积; Cd_i 是第 i 层的土壤碳含量。

采用 Microsoft Excel 2003 做比例分析,用 STATISTICA 7.0 做方差分析,用 PC Ord6.0 做聚类分析。

2 结果与分析

2.1 各层碳储量比例构成

从植物生长型分析 30 个无性系各层碳储量的平均值(图 1-a)可知:土壤层和乔木层碳储量占大部分,分别占 61.88% 和 34.93%,灌木层和凋落物

层分别占 1.63% 和 1.07%,草本层所占比例最小,只有 0.49%,这符合一般人工林的特点。变异系数(标准差/平均值)灌木层最大,达 62.40%,个体间差异明显,土壤层的平均碳储量变异系数只有 1.09%,差异不明显。

从生态系统空间结构分析(图 1-b)可知:整个植被层碳储量占 37.36%,可见即使高强度经营的人工林,其植被层碳储量也不超过 4 成;而植被层变异系数为 26.47%,维持在较高的水平。

从碳存在的形式分析(图 1-c)可知:地上部分碳储量占 38.12%,而以惰性碳存在的地下部分占 61.88%,是地上部分的 1.6 倍。

由图 2 可知:乔木层各无性系各器官平均碳储量为 51.948 t · hm⁻²,其中,干枝碳储量占乔木层的大部分,达 64.45%;细根和吸收根的碳储量最少,分别占 0.93% 和 1.07%;桉树叶枝较少,碳储量占 2.43%;树叶的碳含量比较高,但碳储量不高,只占 4.26%;其它器官碳储量所占比依次是根莖(8.80%) > 干皮(7.80%) > 光枝(5.70%) > 粗根(4.56%)。各无性系各器官碳储量的变异系数为 17.35% ~ 38.05%,总体较高,其中,光枝的变异系数最高,达 38.05%。

2.2 各无性系碳储量比较

2.2.1 各无性系乔木层碳储量比较 对各无性系碳储量的 Kruskal-Wallis 检验(图 3)结果表明:各无性系碳储量差异极显著($P < 0.01$)。无性系 19 (W_1)碳储量的平均值最大,但是其四分位距离最大,说明其各个体碳储量比较分散;无性系 30 (32-28)平均值排第 4,但出现了离群值和极端值,说明其个体碳储量很不稳定,故这 2 个无性系不适合大规模营造碳汇林。无性系 25(179-1)、23(101-1)、4 (BU_1)、26(184-1)的碳储量排在前 6 位,方差分析显示它们与无性系 19 (W_1)、30(32-28)差异不显著($P = 0.7992 > 0.05$),并且四分位距离相对较短,基本没有离群值和极端值,说明这 4 个无性系各个体碳储量相对集中,大规模营造碳汇林时各个体差异较小,表现将比较稳定。碳储量最小的是无性系 1(301)、10(LH₂₂)、6(CL₁),其碳储量只是高碳储量无性系的 1/3 左右。

对各无性系乔木层碳储量进行聚类分析(图 4)可知:在相似率 50% 的水平上,无性系被分为 4 组,碳储量依次递增,第 1 组为无性系 1、6、8、17、7、16、27、10、9 号,第 2 组为无性系 2、15、20、3、18、5、12、

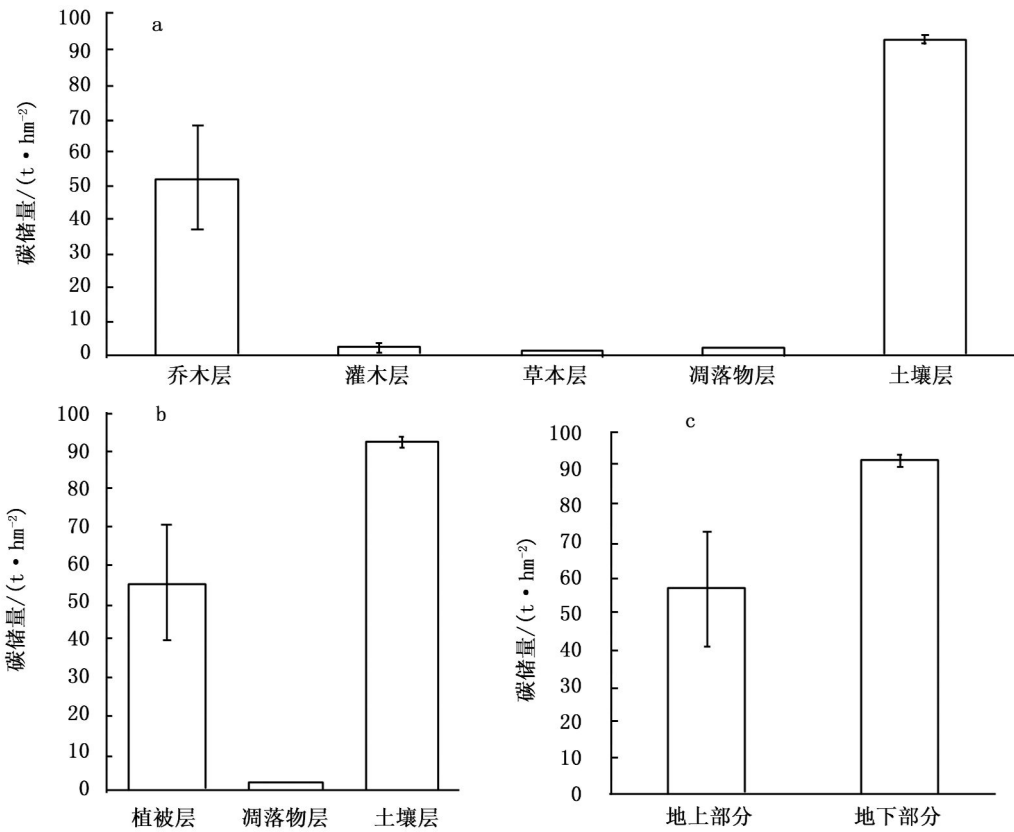


图1 30个无性系各层平均碳储量比例构成

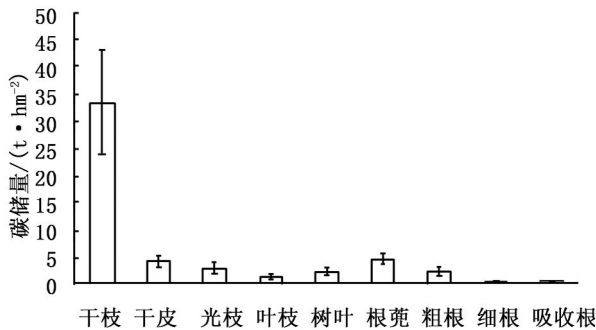


图2 30个无性系乔木层各器官平均碳储量比例构成

11、13、21号,第3组为无性系22、24号,第4组为无性系4、29、14、28、30、19、23、25、26号;第4组碳储量最高,前面选出来的25、23、4、26号都分布在第4组,其中,25、23、26号相似率达75%以上,再次证明他们具有高碳储量,而且碳储量比较相近。

2.2.2 灌木层、草本层、凋落物层碳储量分析 由表3可知:各无性系灌木层平均碳储量是 $2.430 t \cdot hm^{-2}$,变异系数是62.40%,可知各无性系林下灌木碳储量差距比较大,分布不平均。排在前三的依次是7(D_2)($5.780 t \cdot hm^{-2}$)、2(3405)($5.228 t \cdot hm^{-2}$)、6(CL_1)($4.928 t \cdot hm^{-2}$),最小的12(LH_4)只有 $0.604 t \cdot hm^{-2}$,是无性系7(D_2)的1/9左右。

表3 各无性系林下灌木层、草本层、凋落物碳储量比较

| 无性系 | 碳储量/($t \cdot hm^{-2}$) | | |
|--------|---------------------------|-------|-------|
| | 灌木层 | 草本层 | 凋落物 |
| 1 | 3.832 | 0.914 | 0.812 |
| 2 | 5.228 | 0.305 | 1.559 |
| 3 | 0.752 | 0.654 | 1.396 |
| 4 | 2.128 | 0.609 | 0.942 |
| 5 | 1.424 | 0.688 | 1.137 |
| 6 | 4.928 | 0.733 | 2.208 |
| 7 | 5.780 | 0.598 | 2.078 |
| 8 | 2.268 | 0.778 | 0.942 |
| 9 | 0.716 | 0.147 | 1.331 |
| 10 | 3.564 | 0.553 | 0.325 |
| 11 | 1.664 | 1.523 | 1.396 |
| 12 | 0.604 | 0.981 | 1.526 |
| 13 | 3.992 | 0.778 | 2.403 |
| 14 | 3.024 | 1.342 | 1.689 |
| 15 | 1.736 | 0.530 | 1.072 |
| 16 | 1.112 | 0.778 | 1.299 |
| 17 | 2.296 | 0.891 | 0.779 |
| 18 | 0.664 | 1.997 | 1.461 |
| 19 | 1.380 | 0.666 | 2.598 |
| 20 | 1.824 | 0.417 | 2.013 |
| 21 | 0.948 | 0.711 | 2.500 |
| 22 | 3.968 | 0.643 | 1.981 |
| 23 | 3.336 | 0.485 | 2.273 |
| 24 | 1.736 | 0.767 | 1.266 |
| 25 | 2.492 | 0.350 | 1.137 |
| 26 | 3.912 | 1.049 | 2.078 |
| 27 | 0.628 | 0.045 | 1.234 |
| 28 | 4.312 | 0.598 | 2.013 |
| 29 | 1.824 | 0.925 | 1.916 |
| 30 | 0.844 | 0.463 | 2.403 |
| 平均值 | 2.430 | 0.731 | 1.592 |
| 变异系数/% | 62.40 | 53.22 | 36.85 |

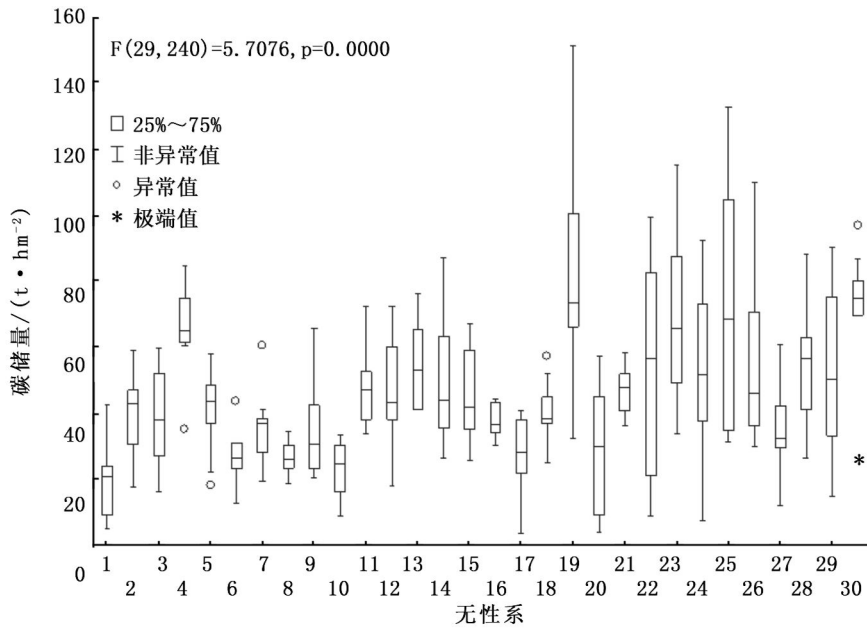


图3 各无性系乔木层碳储量差异性分析

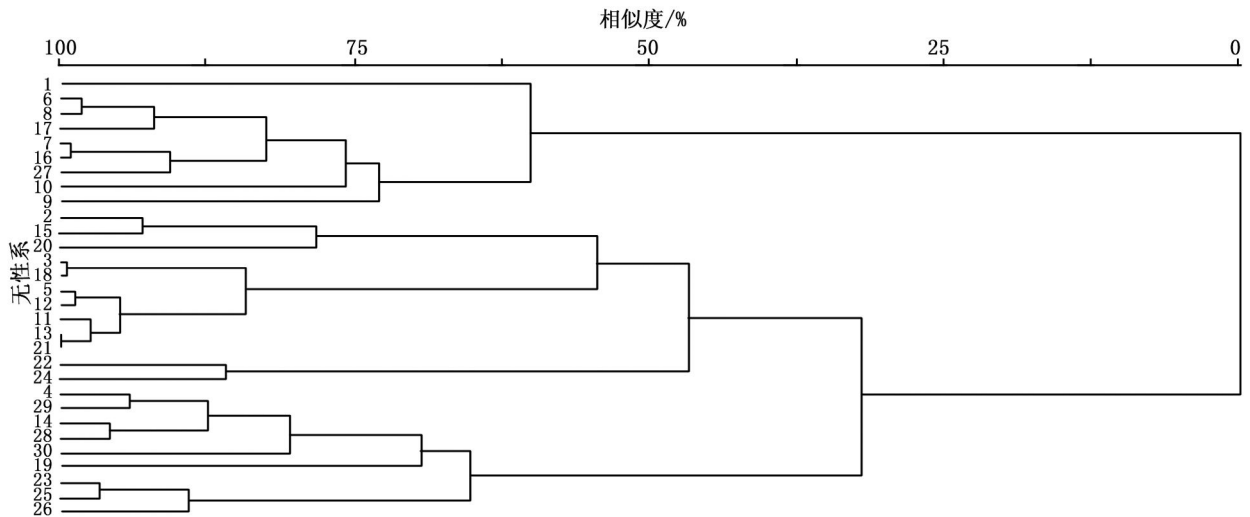


图4 各无性系乔木层碳储量聚类分析图

各无性系草本层平均碳储量是 $0.731 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数是 53.22%。草本层碳储量的差异性没有灌木层大,虽然个别无性系草本层的碳储量比较突出,如 18(UT_7) ($1.997 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、27(201-1) ($0.045 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),但多数草本层碳储量集中在 $0.5 \sim 0.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

各无性系凋落物平均碳储量是 $1.592 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数是 36.85%,其差异性没有灌木层和草本层那么大。凋落物碳储量最大的无性系是 19(W_1) ($2.598 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),最小的是 10(LH_{22}) ($0.325 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.2.3 各无性系生态系统碳储量比较 各无性系整个生态系统碳储量的平均值是 $148.734 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数是 10.06%,各无性系生态系统总碳储量差异比较明显,最小的无性系 1(301)只有 $124.796 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,最大的无性系 19(W_1)达 $186.799 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,是 1(301)的 1.5 倍。生态系统碳储量排在前 6 位的无性系依次是 19(W_1) ($186.799 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、23(101-1) ($174.170 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、25(179-1) ($171.364 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、30(32-28) ($167.315 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、4(BU_1) ($164.967 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、26(184-1) ($159.595 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),这与乔木层碳储量前 6 位是一致的,只是位

置有所调动,说明在土壤条件一致的情况下,无性系生态系统的碳储量大小基本由乔木层决定(图5)。

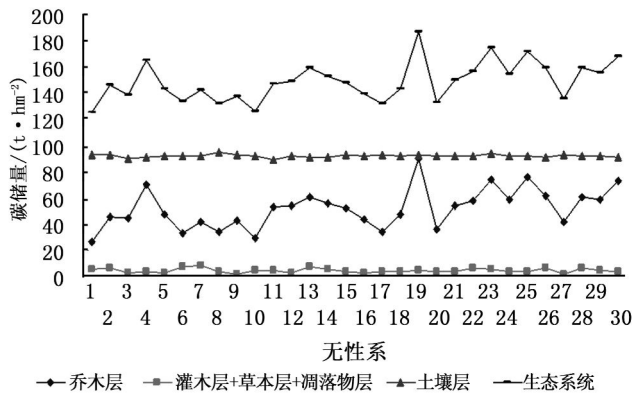


图5 各无性系生态系统碳储量比较

2.3 不同试验地土壤碳储量分析

土壤平均碳储量为 $92.033 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究试验林由南往北分别种植在唐家、北坡、石岭3块试验地,3地南北相差约130 km。雷州半岛南部的唐家土壤碳储量最高($106.892 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),其次是中部的北坡($87.454 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),最低是北部石岭($81.727 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),主要因为唐家立地条件较好,土壤有机质丰富,石岭立地条件最差。由误差线可看出:在同块试验地内,不同无性系下的土壤碳储量差异较小。

土壤碳储量沿土层由上往下逐渐减少,0~20 cm 平均碳储量为 $43.354 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占土壤碳储量的47.11%;20~40 cm 层平均碳储量为 $28.671 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占31.16%;40~60 cm 层平均碳储量为 $20.000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占21.73%。各土层碳储量的变异系数沿土层由上往下逐渐增大,由0~20 cm 层的1.78%到40~60 cm 层的2.49%,说明随着土壤层往下,各无性系土壤碳储量差异逐渐增大。

3 结论与讨论

(1)排除土壤立地条件的差异,本研究表明:不同无性系碳储量差异明显,主要是因为乔木层碳储量的差异极显著。因此,不同的无性系对生态系统的碳储量影响显著,而无性系的选择标准是无性系生长情况(胸径、树高等)优秀,而且个体之间差异相对较小。本研究中,无性系23(101-1)、25(179-1)、4(BU_1)、26(184-1)符合以上选择条件,而且不易受病虫害侵袭,聚类分析结果也表明这4个无性系处在碳储量最高的一组,它们是推广营建桉树碳汇林的首选,适合生产上应用。无性系1、6、8、17、7、16、27、10、9号碳储量较低,没必要进行下一步

试验。

(2)土壤层和乔木层碳储量占比高,二者相加占生态系统碳储量的96.80%,说明桉树人工林碳储量高度集中在乔木层和土壤层,这2层是桉树作为碳汇林需要重点经营的层次。

地下部分碳储量是地上部分的1.6倍,而我国一般森林的这个比值是3.4倍^[28]。究其原因桉树人工林经营强度大,生长迅速,土壤有机质分解能力较强;其次是桉树人工林种植密度大,林下植被少,腐殖质相对减少,土壤有机质得不到及时补充。

(3)与其他学者的研究相比,本试验乔木层碳储量较高。本研究乔木层平均碳储量为 $51.948 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比广西国有东门林场7.6年生的尾巨桉、广西钦州市巨尾桉分别高20.85%^[27]、6.56%^[15-16];而与其它树种对比,比5年生的桉木人工林、4年生的马占相思人工林、10年生的杉木人工林分别高100.73%^[29]、72.02%^[30]、48.25%^[31],说明本研究桉树无性系总体上是较好的碳汇林造林树种,能在较短时间内起到高效固碳的作用。

(4)土壤层碳储量占总碳储量的61.88%,为 $92.033 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3块试验地的土壤碳储量有差异,位于南部的唐家最高,北部的石岭最低。这一方面与土壤条件有关,南部多平地、黏土,利于有机质积累,北部多砂砾,有机质易流失;另一方面与南部多使用生态经营措施有关。各层土壤碳储量的占比由上往下分别是47.11%、31.16%、21.73%,故保护土壤层的关键在于保护0~40 cm层。

(5)灌木层、草本层、凋落物碳储量所占比例小。这是因为桉树人工林种植密度大,经营强度高,经常除草抚育。灌木层、草本层碳储量与乔木层碳储量没有正相关性,其变化规律不明显,可能更取决于水热、光线、营养、竞争等,具体需进一步研究。袁渭阳等^[32]在四川对巨桉凋落物的研究表明,凋落物层的碳储量与季节有一定关系,而华南地区桉树凋落物与季节的具体关系有待研究。

(6)针对桉树人工林碳储量的特点,在营建桉树碳汇林时应注重以下几点:

①选择合适的无性系。不同无性系碳储量的差异极显著,选择高效的无性系能明显提高桉树碳汇林的碳储量。

②合理的生态经营措施。采取正确的整地方式,平地沟垦,山地挖穴,以防止水土流失;适量施肥,尽量使用有机肥,补充土壤养分;其他经营措施

还有农林间作、营建混交林、保护林下植被、采伐物还田、伐根催腐。另外,由于干枝占了整个乔木层碳储量的大部分,故株行距可适当放宽,着力培养大径材。

③转碳源为碳汇。桉树的采伐是碳释放过程,为了减少碳源,应尽量丰富桉树碳汇林木材的使用方式,如使用桉树木材做家具和其他木制品等,将碳释放延后若干年。

参考文献:

- [1] Etheridge D M, Steele L P, Francey R J, *et al.* Atmospheric methane between 1000 A. D. and present: evidence of anthropogenic emissions and climatic variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(13): 15979
- [2] Laurent A, Carlo B, Piers R F, *et al.* Eight glacial cycles from an antarctic ice core[J]. *Nature*, 2004, 429: 623 - 628
- [3] 杨洪晓,吴波,张金屯,等. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*,2005,41(2): 172 - 177
- [4] 白雪爽,胡亚林,曾德慧,等. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响[J]. *生态学杂志*,2008,27(10):1647 - 1652
- [5] Davis M R, Allen R B, Clinton P W. Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand *Nothofagus* forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177:313 - 321
- [6] 樊登星,余新晓,岳永杰,等. 北京市森林碳储量及其动态变化[J]. *北京林业大学学报*,2008,30(增刊2):117 - 120
- [7] 冯瑞芳,杨万勤,张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. *生态学报*,2006,26(11):3870 - 3877
- [8] 胡会峰,刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用[J]. *应用生态学报*,2006,17(4):709 - 714
- [9] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京:气象出版社,2003
- [10] 胡会峰,刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算[J]. *生态学报*,2006,26(1):291 - 296
- [11] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292: 2320 - 2322
- [12] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物学报*,2001,43(9):967 - 973
- [13] 冯瑞芳,杨万勤,张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. *生态学报*,2006,26(11):3870 - 3877
- [14] 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
- [15] 郑羨,梁宏温,温远光,等. 10年生巨尾桉人工林生态系统碳贮量及其分布[C]. 北京:第二届中国林业学术大会——S4 人工林培育理论与技术,2009
- [16] 梁宏温,罗宏,温远光,等. 桉树林取代马尾松林对森林生态系统碳贮量的影响[J]. *江西农业大学学报*,2010,32(6):1168 - 1174
- [17] 李跃林,胡成志,张云,等. 几种人工林土壤碳储量研究[J]. *福建林业科技*,2004,31(4):4 - 7
- [18] 张治军,张小全,朱建华,等. 广西主要人工林类型固碳成本核算[J]. *林业科学*,2010,46(3):16 - 22
- [19] 曾天勋,刘有美,傅冠旭. 雷州短轮伐期桉树生态系统研究[M]. 北京:中国林业出版社,1995
- [20] 朱成庆,张鹏,沈海龙,等. 雷州林业局桉树混交造林模式评价[J]. *东北林业大学学报*,2006,34(5):26 - 28
- [21] 薛鹏. 雷州林业局6年生尾叶桉人工林生长量及生物量研究[J]. *桉树科技*,2009,26(1):18 - 21
- [22] 戚荣,江永,杨俊贤,等. 雷州半岛提高糖业综合竞争力的研究[J]. *中国糖料*,2007(3):35 - 39,47
- [23] 梁理勇. 雷州林业局桉树人工林地土壤微生物的分布规律[J]. *中南林学院学报*,2004,24(4):59 - 61
- [24] 温远光,梁宏温,招礼军,等. 尾叶桉人工林生物量和生产力的研究[J]. *热带亚热带植物学报*,2000,8(2):123 - 127
- [25] 陈婷,温远光,孙永萍,等. 连栽桉树人工林生物量和生产力的初步研究[J]. *广西林业科学*,2005,34(1):8 - 12
- [26] 张琼,洪伟,吴承祯,等. 巨桉碳含量的空间结构特征研究[J]. *广西植物*,2007,27(4):585 - 589
- [27] 梁宏温,温远光,温琳华,等. 连栽对尾桉短周期人工林碳贮量的影响[J]. *生态学报*,2009,29(8):4242 - 4250
- [28] Zhou Y R, Yu Z I, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 24(5): 518 - 522
- [29] 文仕知,田大伦,杨丽丽,等. 桉木人工林的碳密度、碳库及碳吸存特征[J]. *林业科学*,2010,46(6):15 - 21
- [30] 何斌,刘运华,余浩光,等. 南宁马占相思人工林生态系统碳素密度与贮量[J]. *林业科技*,2009,45(2):6 - 11
- [31] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. *林业科学*,2002,38(2):14 - 19
- [32] 袁渭阳,李贤伟,张健,等. 不同年龄巨桉人工林枯落物和细根碳储量研究[J]. *林业科学研究*,2009,22(3):385 - 389