

# 尾叶桉与马占相思人工复层林 碳储量及分布特征研究

叶绍明, 龙滔, 蓝金宣, 覃连欢

(广西大学 林学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**应用相对生长法和样方收获法研究3年生尾叶桉与马占相思不同混交比例人工林的碳素含量、碳储量以及空间分配特征。结果表明:林分各器官、草本层、灌木层、枯落物层的碳素含量分别介于433.6~491.5 g/kg, 412.9~437.3 g/kg, 430.6~437.3 g/kg, 458.6~465.3 g/kg。在相同混交比例下,乔木层碳储量随林分密度的增加而上升,灌木层、草本层和枯落物层碳储量随林分密度的增加而下降,土壤层在不同处理下碳储量无明显变化。当尾叶桉与马占相思混交比例为1:1时,林分密度为1050株/hm<sup>2</sup>和1320株/hm<sup>2</sup>的生态系统碳储量分别为55.247 t/hm<sup>2</sup>和67.396 t/hm<sup>2</sup>;当尾叶桉与马占相思混交比例为2:1时,林分密度810株/hm<sup>2</sup>和1170株/hm<sup>2</sup>的生态系统碳储量分别为69.106 t/hm<sup>2</sup>和83.446 t/hm<sup>2</sup>;当林分密度同为1727株/hm<sup>2</sup>时,尾叶桉纯林、尾叶桉与马占相思以1:1.6比例混交林的生态系统碳储量分别为76.356 t/hm<sup>2</sup>和95.502 t/hm<sup>2</sup>。在相同混交比例下,灌木层、草本层、枯枝落叶层碳储量随林分密度的增加而下降;在相同密度下,尾叶桉纯林灌木层、草本层、枯枝落叶层碳储量均比混交林高。在6个林分更新处理中,当尾叶桉与马占相思混交比例为1:1.6时,混交林的成层性最明显,林分总碳储量最高,且与其他各处理间的差异达到极显著水平,是固碳能力较佳的一种混交比例。

**关键词:**人工复层林;碳储量;尾叶桉;马占相思

中图分类号:S714 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2010)04-0735-08

## Carbon Storage and Spatial Distributions Characteristic of Stratified Mixed Stands of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*

YE Shao-ming, LONG Tao, LAN Jin-xuan, QIN Lian-huan

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The carbon storage and spatial distributions characteristic of the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed proportion were studied by sample plot harvesting method and allometric dimension analysis. The results showed that carbon content of different organs, herb layer, shrub layer, litter layer were ranged from 433.6-491.5 g/kg, 412.9-437.3 g/kg, 430.6-437.3 g/kg and 458.6-465.3 g/kg. In the stratified mixed stands of *E. urophylla* and *A. mangium* at the same mixed proportion, with the increasing of forest density, carbon storage in tree layer increased while the carbon storage of shrub layer, herb layer and litter layer decreased. In addition, the carbon storage of soil depth shows little change in different treatments. In two stands with density of 1050 trees/hm<sup>2</sup> and 1320 trees/hm<sup>2</sup> at the mixed proportion of 1:1, respectively, the carbon storage of total ecosystem were 55.247 t/hm<sup>2</sup> and 67.396 t/hm<sup>2</sup>,

收稿日期:2010-06-20 修回日期:2010-08-04

基金项目:国家林业局“948”创新项目(2005-4-03)、广西自然科学基金项目(桂科字0991035)、广西林业“十一五”科技项目(林科字2006-0009)和广西大学博士科研基金项目

作者简介:叶绍明(1965-),男,博士,副教授,主要从事林业与生态科学研究, E-mail: yshaoming@163.com。

In another two stands with density of 810 trees/hm<sup>2</sup> and 1 170 trees/hm<sup>2</sup> at the mixed proportion of 2:1, respectively, the carbon storage of total ecosystem were 69.106 t/hm<sup>2</sup> and 83.446 t/hm<sup>2</sup>; When the stand density is 1 727 trees/hm<sup>2</sup> in the pure stand and the mixed stand with proportion of 1:1.6 with *E. urophylla* to *A. mangium*, the carbon storage of total ecosystem were 76.356 t/hm<sup>2</sup> and 95.502 t/hm<sup>2</sup>. The carbon storage of shrub layer, herb layer and litter layer decreased with the increasing of stand density at the same mixed proportion and these terms in the pure stand are higher than that in the mixed stand. As a conclusion, in the six treatments of stand regeneration patterns, the mixed proportion of 1:1.6 with *E. urophylla* × *A. mangium* has obvious layers and highest total ecosystem carbon storage, is the more rational pattern and it is extremely significant to the other treatments.

**Key words:** stratified mixed stands; carbon storage; *Eucalyptus urophylla*; *Acacia mangium*

随着人类社会的发展,二氧化碳浓度的增加以及气温的上升问题越来越严峻。联合国人类环境大会的召开和《京都协定书》的出台,使得各国政府和组织密切关注气候问题,并采取了许多措施试图缓解气候的变暖,许多科学家都在致力于碳汇、碳源的研究以期最大限度减轻本国履行《京都协议书》的压力<sup>[1-7]</sup>。大量的研究表明<sup>[8-9]</sup>:森林破坏(尤其是热带雨林的破坏)已成为继化石燃料燃烧之后,大气中CO<sub>2</sub>浓度增加的第二大来源。森林在减少碳收支平衡中起着关键作用,对现在及未来的气候变化和碳平衡都具有重要影响。近几十年来,随着“绿化工程”和“退耕还林工程”的实施,我国人工林面积在森林总面积中的比重快速增加,人工林在CO<sub>2</sub>的吸收和固定及减缓全球气候变化等方面的作用也随之得到重视<sup>[10]</sup>。但是,我国在森林资源管理和造林等行为带来的碳吸收支探讨这一方面的报道并不多<sup>[11-13]</sup>,且大部分集中在人工纯林和原生性天然林上<sup>[12-14]</sup>,混交林尤其是针叶混交林,因其多样性和不稳定性,对其研究报道很少<sup>[15]</sup>。

尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)自然分布于印度尼西亚附近的帝汶岛(Timor)及其周围一带的岛屿,我国于20世纪80年代引种改良尾叶桉成功,90年代开始大面积推广造林,是目前广西、广东、福建及海南等省区桉树造林的主要树种之一。马占相思(*Acacia mangium*)原产澳大利亚等地,由于其速生耐瘠,被广泛用于集约经营的短轮伐期工业用材林、四旁绿化树和水源涵养林,成为我国热带和南亚热带地区的主要造林树种之一。目前,无论是对尾叶桉人工纯林还是对马占相思人工纯林碳储量及分布格局的研究都鲜有报道,对尾叶桉和马占相思人工复层林碳储量及分布格局的研究几乎没有。本文以尾叶桉与马占相思人工复层林为对象,研究不同混交比例、不同种植密度的尾叶桉与马占相思人工复层混交林生态系统碳储量及分布格局,为今后人工混交林生态效益评价提供理论依据,并为森林生态系统碳储量的估算提供基础数据。

## 1 研究地概况

研究地点位于广西壮族自治区国营高峰林场,地处北纬22°49′~23°15′,东经108°08′~108°53′。实验区地势以低丘、台地为主,海拔为150~400 m,坡度一般为20°~30°;属南亚热带气候,夏长冬短,光热充足,雨量充沛,以赤红壤为主,质地为中壤土或轻粘土。森林植被主要有桉树(*Eucalyptus* spp.)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、马占相思(*Acacia mangium*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*)、八角(*Illicium verum*)等树种,林下植被主要包括桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、野香茅(*Cymbopogon tortilis*)、野古草(*Arundinella hirta*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地的设置和乔木层碳储量调查

试验林位于高峰林场银岭分场,为2003年6月造林的尾叶桉纯林及其与马占相思的混交林。采用随机区组设计方法设置试验小区,面积为40 m×40 m,按不同混交比例和林分密度设置6个处理,每个处理重复5次。6个处理分别为:处理1—尾叶桉与马占相思比例为1:1,林分密度均为525株/hm<sup>2</sup>;处

理2—尾叶桉与马占相思比例为1:1,林分密度均为660株/hm<sup>2</sup>;处理3—尾叶桉与马占相思比例为1:1.6,林分密度分别为676、1051株/hm<sup>2</sup>;处理4—尾叶桉与马占相思比例为2:1,林分密度分别为540、270株/hm<sup>2</sup>;处理5—尾叶桉与马占相思比例为2:1,林分密度分别为780、390株/hm<sup>2</sup>;处理6—尾叶桉纯林,林分密度为1727株/hm<sup>2</sup>。2003年6月清理林地后挖坎,规格为60cm×60cm×40cm,定植前施复合基肥0.5kg/坎,定植3个月后追复合肥0.5kg/株,第2年5月份追复合肥0.5kg/株。实验林除不同处理差异外,林地坡度、坡位、坡向、土层厚度等立地条件基本相同。

2006年5月进行林分调查,在不同处理林分中设置标准地,每种处理标准地重复3次,标准地面积为667m<sup>2</sup>(25.8m×25.8m),对标准地进行每木检尺,测定胸径、树高、枝下高和冠幅。根据标准地林木径级分布,按2cm为径级选取径级标准木,每径级选取3株。将标准木伐倒,地上部分采用2m区分段“分层切割法”测定干、皮、枝、叶的鲜重,地下部分沿根系分布范围采用全挖法测定根兜、大根(≥15mm)、中根(10~15mm)、小根(5~10mm)、细根≤5mm的鲜重。采集各器官鲜质量样品500g在85℃恒温下烘干至恒重,计算出各器官的含水率和干重即生物量。利用林木各器官生物量(W)与测树因子(D<sup>2</sup>H)之间的函数关系建立相对生长方程,把样地各径级的平均胸径和树高代入各器官生物量方程,算出各径级平均木的器官生物量,再乘以该径级林木株数得径级器官生物量,将各径级的器官生物量累加,得到林分的生物量<sup>[16]</sup>。

## 2.2 林下植被和凋落物碳储量调查

采用样方收获法测定,即在标准地内沿对角线分别设置3个样方,面积为3m×3m。在样方内分别收集灌木、草本测定鲜重量,各部分均采集500g样品在85℃恒温下烘干至恒重,测定各部分干物质质量。

## 2.3 植被层碳储量计算

采用重铬酸钾氧化-外加法<sup>[17]</sup>测定不同植物器官(或组分)样品的碳素密度,将乔木层、灌木层、草本层的生物量分别乘以相应碳素含量计算植被层碳储量。

$$C = B \times O \quad (1)$$

式中:C为碳储量(t/hm<sup>2</sup>);B为生物量(t/hm<sup>2</sup>);O为碳素含量。

## 2.4 土壤层碳储量调查计算

在各样地内沿对角线分别挖取土壤剖面3个,每个剖面分为a层(0~20cm)、b层(21~40cm),分别在各层内采集土壤样品,用环刀法<sup>[17]</sup>及重铬酸钾氧化-外加法<sup>[17]</sup>测算样品容重和有机碳含量,进而估算土壤层有机碳储量<sup>[18]</sup>:

$$C_2 = \sum 0.1H_i \times B_i \times O_i \quad (2)$$

式中:C<sub>2</sub>为土壤有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>);H<sub>i</sub>是第i层土壤的平均厚度(cm);B<sub>i</sub>是第i层土壤的平均容重(g/cm<sup>3</sup>);O<sub>i</sub>是第i层土壤的平均有机碳含量(g/kg);0.1为单位换算系数。

# 3 结果与分析

## 3.1 不同处理林分生长、生物量及其分配

不同处理林分生长、生物量及其分配结果见表1。从表1中可以看出,尾叶桉与马占相思不同混交比例林分均可形成较明显的垂直空间复层林冠结构,上层林为尾叶桉,林分平均高在10.2~16.0m,次层林为马占相思,林分平均高在7.6~11.3m。当尾叶桉与马占相思混交比例为1:1.6(密度分别为676、1051株/hm<sup>2</sup>)时成层最明显,其次为混交比例2:1(密度分别为540、270株/hm<sup>2</sup>)的林分,上层林与次层林平均高和平均胸径的差值分别为7.3m和5.9cm、5.5m和3.6cm;同时也可以看出这2种混交比例下尾叶桉与马占相思的树高与胸径值也比其他混交比例下的大。这表明不同的混交比例与种植密度对各混交树种的生长因子均产生影响,本研究中尾叶桉:马占相思为1:1.6时为较好的混交比例。当尾叶桉与马占相思混交比例为1:1,总密度为1050株/hm<sup>2</sup>和1320株/hm<sup>2</sup>时,乔木层生物量分别为22.100t/hm<sup>2</sup>和42.182t/hm<sup>2</sup>,较高林分密度下生物量提高了近1倍,而2种林分密度下尾叶桉的生物量均是马占相思的2倍,可见,在此混交比例下,林分密度增加会提高乔木层生物量,却未影响2个树种间的生物量分配。当尾叶桉与马占相思混交比例为2:1,总密度为810株/hm<sup>2</sup>时,乔木层生物

量为 44.340 t/hm<sup>2</sup> ,其中尾叶桉的生物量是马占相思的 4 倍 ,总密度为 1 170 株/hm<sup>2</sup> 时 ,乔木层生物量为 72.733 t/hm<sup>2</sup> 2 个树种的生物量水平相差不大 ,林分密度增加 ,生物量水平上升了约 0.6 倍 ,并且 2 个树种间的生物量分配也发生变化 ,同时也可以看出 ,林分密度的增加对尾叶桉生物量的影响不大 ,而马占相思的生物量则提高了近 5 倍 ,表明此混交密度下 ,尾、马混交林较好地利用了林地营养空间 ,形成上层林冠的尾叶桉又可为下层林的马占相思创造更好的生长条件 ,合成的有机物质增多。当林分总密度相同 ,均为 1 727 株/hm<sup>2</sup> 时 ,尾叶桉纯林生物量为 73.942 t/hm<sup>2</sup> ,尾叶桉和马占相思以 1:1.6 比例混交乔木层生物量为 101.480 t/hm<sup>2</sup> ,混交林生物量比纯林生物量高出 37.2% ,不同生态位树种的混交林比桉树纯林对林地资源的利用更为充分。

表 1 尾叶桉与马占相思不同混交比例乔木层生物量及其分配

Tab.1 The tree layer biomass and distribution of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* in different mixed plantations

| 处理<br>Treatment | 树种<br>Tree species | 样本数<br>Sample number | 胸径/cm DBH     |                    | 树高/m Height   |                    | 器官生物量及分配/(t·hm <sup>-2</sup> ) Biomass and distribution |       |        |       |        |         |
|-----------------|--------------------|----------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---|-------|--------|-------|--------|---------|
|                 |                    |                      | 平均值           | 标准差                | 平均值           | 标准差                | 干材  | 干皮    | 枝      | 叶     | 根      | 合计      |
|                 |                    |                      | Average value | Standard deviation | Average value | Standard deviation | Stem  | Bark  | Branch | Leaf  | Root   | Total   |
| 1               | 尾叶桉                | 175                  | 8.5           | 1.853              | 10.2          | 1.046              | 8.361   | 1.308 | 1.481  | 0.600 | 3.335  | 15.085  |
|                 | 马占相思               | 175                  | 6.4           | 0.938              | 7.6           | 0.709              | 2.818   | 0.447 | 1.662  | 0.608 | 1.480  | 7.015   |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 11.179  | 1.755 | 3.143  | 1.208 | 4.815  | 22.100  |
| 2               | 尾叶桉                | 220                  | 9.8           | 3.135              | 11.3          | 2.167              | 15.451  | 2.353 | 3.564  | 1.043 | 5.768  | 28.179  |
|                 | 马占相思               | 220                  | 6.9           | 1.746              | 7.8           | 1.498              | 5.621   | 0.736 | 1.958  | 1.180 | 4.508  | 14.003  |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 21.072  | 3.089 | 5.522  | 2.223 | 10.276 | 42.182  |
| 3               | 尾叶桉                | 225                  | 13.5          | 1.144              | 16.0          | 1.026              | 32.730  | 4.836 | 9.715  | 2.060 | 11.316 | 60.657  |
|                 | 马占相思               | 350                  | 7.6           | 1.684              | 8.7           | 1.464              | 15.432  | 1.747 | 3.420  | 3.171 | 17.053 | 40.823  |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 48.162  | 6.583 | 13.135 | 5.231 | 28.369 | 101.480 |
| 4               | 尾叶桉                | 180                  | 11.0          | 2.453              | 14.5          | 2.143              | 19.366  | 2.908 | 5.012  | 1.266 | 6.976  | 35.528  |
|                 | 马占相思               | 90                   | 7.4           | 1.459              | 9.0           | 1.765              | 3.616   | 0.449 | 0.959  | 0.754 | 3.034  | 8.812   |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 22.982  | 3.357 | 5.971  | 2.020 | 10.010 | 44.340  |
| 5               | 尾叶桉                | 260                  | 10.1          | 0.970              | 13.4          | 1.147              | 18.567  | 2.840 | 3.987  | 1.265 | 6.998  | 33.657  |
|                 | 马占相思               | 130                  | 8.2           | 2.003              | 11.3          | 2.330              | 13.812  | 1.317 | 1.616  | 2.776 | 19.555 | 39.076  |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 32.379  | 4.157 | 5.603  | 4.041 | 26.553 | 72.733  |
| 6               | 尾叶桉                | 575                  | 9.3           | 1.281              | 14.5          | 1.089              | 40.816  | 6.259 | 8.583  | 2.798 | 15.486 | 73.942  |
|                 | 马占相思               |                      |               |                    |               |                    |   |       |        |       |        |         |
|                 | 合计                 |                      |               |                    |               |                    | 40.816  | 6.259 | 8.583  | 2.798 | 15.486 | 73.942  |

### 3.2 乔木层不同器官、草本层、灌木层和枯落物层的碳素含量

从表 2 可看出 ,乔木层各器官、草本层、灌木层、枯落物层的碳素含量分别介于 433.6 ~ 491.5 g/kg , 412.9 ~ 419.6 g/kg , 430.6 ~ 437.3 g/kg , 458.6 ~ 465.3 g/kg。乔木层平均碳素含量最大 ,灌木层的平均碳素含量高于草本层的平均碳素含量 ,枯落物层的平均碳素含量高于草本层和灌木层的平均碳素含量。不同植物器官之间 ,碳素含量不同 ,尾叶桉的碳素含量大小依次排序为:干材 > 叶 > 枝条 > 根系 > 干皮;马占相思的碳素含量大小依次排序为:干材 > 枝条 > 根系 > 叶 > 干皮;两树种的器官碳素含量大小排序略有不同。这也与其他林木器官的碳素含量排序有所不同 ,如速生阶段杉木不同器官的碳素密度大小排序为:叶 > 干材 > 根系 > 枝条<sup>[14]</sup>。

表 2 尾叶桉与马占相思不同混交比例植被层碳素含量

Tab.2 Carbon content in vegetation layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 处理<br>Treatment | 尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> |        |          |        |        | 马占相思 <i>Acacia mangium</i> |        |          |        |        | 草本    | 灌木    | 枯落物    |
|-----------------|---------------------------------|--------|----------|--------|--------|----------------------------|--------|----------|--------|--------|-------|-------|--------|
|                 | 干 Trunk                         | 皮 Bark | 枝 Branch | 叶 Leaf | 根 Root | 干 Trunk                    | 皮 Bark | 枝 Branch | 叶 Leaf | 根 Root | Grass | Shrub | Litter |
| 1               | 485.7                           | 440.3  | 466.0    | 477.7  | 460.6  | 488.6                      | 471.7  | 466.7    | 455.5  | 462.6  | 419.6 | 437.3 | 465.3  |
| 2               | 479.0                           | 433.6  | 459.3    | 471.0  | 453.9  | 489.8                      | 472.9  | 467.9    | 456.7  | 463.8  | 412.9 | 430.6 | 458.6  |
| 3               | 481.1                           | 435.7  | 461.4    | 473.1  | 456.0  | 486.1                      | 469.2  | 464.2    | 453.0  | 460.1  | 415.0 | 432.7 | 460.7  |
| 4               | 485.2                           | 439.8  | 465.5    | 477.2  | 460.1  | 491.5                      | 474.6  | 469.6    | 458.4  | 465.5  | 419.1 | 436.8 | 464.8  |
| 5               | 480.4                           | 435.0  | 460.7    | 472.4  | 455.3  | 490.0                      | 473.1  | 468.1    | 456.9  | 464.0  | 414.3 | 432.0 | 460.0  |
| 6               | 479.2                           | 433.8  | 459.5    | 471.2  | 454.1  |                            |        |          |        |        | 413.1 | 430.8 | 458.8  |

### 3.3 土壤层的碳素含量和土壤容重

从表 3 可以看出, 表层土土壤有机碳含量比深层土土壤的有机碳含量高, 土壤层有机碳含量随土层厚度的加深而减少。这是因为植物根系主要集中分布在土壤表层, 而枯落物和腐殖质对土壤有机碳的积累的影响也会随着土壤深度的增加而降低, 因而土壤表层的有机碳含量高。与土壤碳素含量随土层变化情况相反, 土壤容重随着土壤深度的增加而增加。经方差分析结果表明, 同一土层不同处理间土壤碳素含量和容重都无明显差异。在 0 ~ 20 cm 土层中, 土壤容重在 1.02 ~ 1.15 g/cm<sup>3</sup>; 在 21 ~ 40 cm 土层中, 土壤容重在 1.13 ~ 1.28 g/cm<sup>3</sup>。

表 3 尾叶桉与马占相思不同混交比例土壤层碳素含量

Tab. 3 Carbon content in soil layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 处理 Treatment | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| 0 ~ 20 cm    | 14.1 | 14.4 | 14.7 | 14.7 | 15.0 | 14.8 |
| 21 ~ 40 cm   | 5.8  | 6.1  | 6.4  | 6.4  | 6.7  | 6.5  |

### 3.4 乔木层碳储量及其分配

碳储量在不同器官的分配, 与生物量在各器官的分配成正比例关系。从表 4 可以看出, 当尾叶桉与马占相思混交比例为 1:1, 总密度为 1 050 株/hm<sup>2</sup> 和 1 320 株/hm<sup>2</sup> 时, 乔木层碳储量分别为 10.474 t/hm<sup>2</sup> 和 19.814 t/hm<sup>2</sup>, 密度为 1 320 株/hm<sup>2</sup> 的林分碳储量较密度为 1050 株/hm<sup>2</sup> 的林分碳储量提高了近 1 倍, 而 2 个树种混交比例均为 1:1 的不同密度林分中, 尾叶桉的碳储量均是马占相思的 2 倍。可见, 在此混交比例下, 林分密度增加会提高乔木层碳储量, 却未影响 2 个树种间的碳储量分配。当尾叶桉与马占相思混交比例为 2:1, 总密度为 810 株/hm<sup>2</sup> 时, 乔木层碳储量为 20.040 t/hm<sup>2</sup>, 其中尾叶桉、马占相思的碳

表 4 尾叶桉与马占相思不同混交比例乔木层碳储量及其分配

Tab. 4 Carbon storage and allocation in arbor layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 处理 Treatment | 树种 Species | 器官碳储量及分配 Carbon content and allocation in different compartment |         |          |        |        |          |
|--------------|------------|---|---------|----------|--------|--------|----------|
|              |            | 干材 Truck  | 干皮 Bark | 枝 Branch | 叶 Leaf | 根 Root | 合计 Total |
| 1            | 尾叶桉        | 4.061   | 0.576   | 0.690    | 0.287  | 1.536  | 7.149    |
|              | 马占相思       | 1.377   | 0.211   | 0.776    | 0.277  | 0.685  | 3.325    |
|              | 合计         | 5.437   | 0.787   | 1.466    | 0.564  | 2.221  | 10.474   |
| 2            | 尾叶桉        | 7.400   | 1.020   | 1.637    | 0.491  | 2.618  | 13.167   |
|              | 马占相思       | 2.753   | 0.348   | 0.916    | 0.539  | 2.091  | 6.647    |
|              | 合计         | 10.153  | 1.368   | 2.553    | 1.030  | 4.709  | 19.814   |
| 3            | 尾叶桉        | 15.745  | 2.107   | 4.483    | 0.975  | 5.160  | 28.469   |
|              | 马占相思       | 7.501   | 0.820   | 1.588    | 1.436  | 7.846  | 19.190   |
|              | 合计         | 23.246  | 2.927   | 6.071    | 2.411  | 13.005 | 47.659   |
| 4            | 尾叶桉        | 9.396   | 1.279   | 1.354    | 0.604  | 3.209  | 15.842   |
|              | 马占相思       | 1.777   | 0.213   | 0.450    | 0.346  | 1.412  | 4.198    |
|              | 合计         | 11.173  | 1.492   | 1.804    | 0.950  | 4.622  | 20.040   |
| 5            | 尾叶桉        | 8.919   | 1.235   | 1.837    | 0.598  | 3.186  | 15.775   |
|              | 马占相思       | 6.767   | 0.623   | 0.757    | 1.268  | 9.073  | 18.488   |
|              | 合计         | 15.686  | 1.858   | 2.593    | 1.866  | 12.259 | 34.263   |
| 6            | 尾叶桉        | 19.557  | 2.715   | 3.944    | 1.318  | 7.032  | 34.566   |
|              | 马占相思       |   |         |          |        |        |          |
|              | 合计         | 19.557  | 2.715   | 3.944    | 1.318  | 7.032  | 34.566   |

储量分别为 15.842 t/hm<sup>2</sup> 和 4.842 t/hm<sup>2</sup> ,尾叶桉的碳储量是马占相思的 4 倍。当尾叶桉与马占相思混交比例为 2:1 总密度为 1 170 株/hm<sup>2</sup> 时,乔木层碳储量为 34.263 t/hm<sup>2</sup> ,密度分别为 780 株/hm<sup>2</sup> 和 390 株/hm<sup>2</sup> 的尾叶桉和马占相思碳储量水平相差不大。当林分总密度相同,均为 1 727 株/hm<sup>2</sup> 时,尾叶桉纯林碳储量为 34.566 t/hm<sup>2</sup> ,尾叶桉和马占相思之间的比例以 1:1.6 混交乔木层碳储量为 47.659 t/hm<sup>2</sup> ,混交林碳储量比纯林碳储量要高出 37.9%。显然,不同生态位树种的混交林比桉树纯林固碳能力更强。

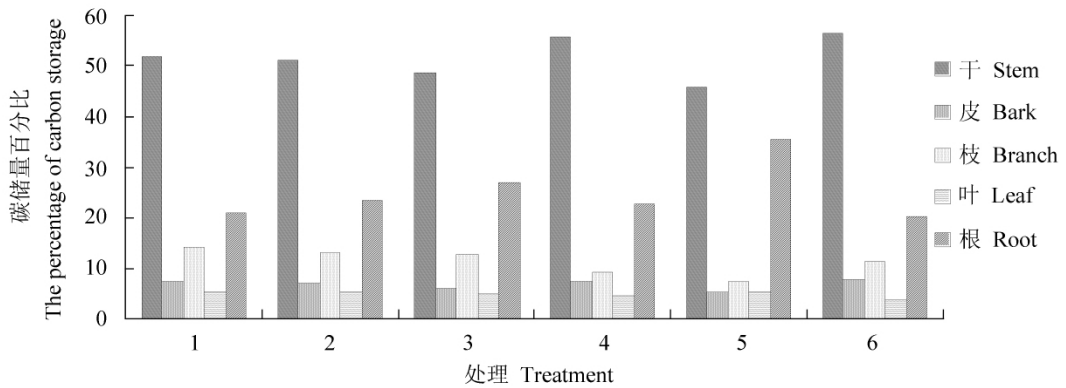


图 1 尾叶桉马占相思不同混交模式乔木层器官碳储量分配

Fig. 1 Carbon storage of different organs in arbor layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed proportion

尾叶桉与马占相思不同混交比例乔木层各器官碳储量的分配比例见图 1。纯林及不同混交比例林分各器官的碳储量大小排序为:干材 > 根系 > 枝条 > 干皮 > 叶,表现了 2 个树种的速生特性,即光合作用强烈有利于干材部分的迅速积累,根系发达,吸收养分和水分的能力强,从而促进林木的迅速生长;而且不同混交比例中尾叶桉干材、干皮部分的碳储量水平均比马占相思高,进一步说明尾叶桉具有上层林木的优势,在积累干物质方面与马占相思产生时间和空间上的互补,以形成良好的复层林结构。

随着林分密度增加,干材、干皮、枝占林分总碳储量的比重下降,但叶、根系碳储量比重增加。在相同密度条件下,尾叶桉纯林干材、干皮碳储量比例比混交林高,而枝、叶、根系碳储量占林分总碳储量的比例比混交林低。

### 3.5 草本层、灌木层和枯落物层碳储量

采用小样方调查平均结果推算不同尾叶桉与马占相思混交林群落灌木层、草本层和枯落物层的碳储量(表 5)。当尾叶桉与马

表 5 尾叶桉与马占相思不同混交比例草本层、灌木层和枯落物层碳储量

Tab.5 Carbon storage in grass, shrub, and litter layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*

| 处理 Treatment | with different mixed plantations |           |             | t/hm <sup>2</sup> |
|--------------|----------------------------------|-----------|-------------|-------------------|
|              | 灌木层 Shrub                        | 草本层 Grass | 枯落物层 Litter |                   |
| 1            | 0.825                            | 0.457     | 1.619       |                   |
| 2            | 0.676                            | 0.320     | 1.525       |                   |
| 3            | 0.081                            | 0.177     | 2.216       |                   |
| 4            | 0.216                            | 0.672     | 1.415       |                   |
| 5            | 0.130                            | 0.339     | 1.244       |                   |
| 6            | 0.496                            | 0.483     | 3.819       |                   |

占相思混交比例为 1:1 且总密度由 1 050 株/hm<sup>2</sup> 增加到 1 320 株/hm<sup>2</sup> 时,灌木层、草本层和枯落物层碳储量分别由 0.825、0.457 和 1.619 t/hm<sup>2</sup> 减少到 0.676、0.320 和 1.525 t/hm<sup>2</sup>;当尾叶桉与马占相思混交比例为 2:1 且总密度由 810 株/hm<sup>2</sup> 增加到 1 170 株/hm<sup>2</sup> 时,灌木层、草本层和枯落物层碳储量分别由 0.216、0.672 和 1.415 t/hm<sup>2</sup> 减少到 0.130、0.339 和 1.244 t/hm<sup>2</sup>。由此可见,在相同混交比例下,林分密度增加,灌木层、草本层和枯落物层碳储量却下降,主要原因是林分密度增大,郁闭度增大,林内光照强度减小,抑制了灌木层和草本层的生长。林分密度为 1 727 株/hm<sup>2</sup> 的尾叶桉纯林的灌木层、草本层和枯落物层碳储量分别为 0.496、0.483 和 3.819 t/hm<sup>2</sup>,而林分密度为 1 727 株/hm<sup>2</sup> 且混交比例为 1:1.6 的混交林的灌木层、草本层和枯落物层碳储量分别为 0.081、0.177 和 2.216 t/hm<sup>2</sup>。由此可见,

在相同密度下,尾叶桉纯林灌木层、草本层碳储量均比混交林高,主要原因是混交林分形成复层林冠,郁闭度增大,林内光照强度比纯林低,灌木层和草本层植被的生长受到影响,因而碳储量随之减小。灌木、草本,特别是枯落物虽然自身储存的碳较少,但它却是土壤有机碳的主要来源,也是土壤植被系统碳循环的联结库,而且因其覆盖于地面,有效地减少或防止了土壤的碳流失。

3.6 土壤层碳储量

从表 6 可看出 6 个处理下土壤层碳储量分别为 41.872、45.061、45.369、46.763、47.167 和 50.723 t/hm<sup>2</sup>,方差分析结果表明,不同处理对土壤层的碳储量没有显著的影响,但不同的土层深度土壤的碳储量出现梯度差异,即表现为随土层厚度的加深土壤的碳储量逐渐变小。植物的根系主要集中在土壤表层,而枯落物和腐殖质层对土壤有机碳积累的影响也会随着土壤深度的增加而降低,因而表层土壤的碳储存能力较强。

表 6 尾叶桉与马占相思不同混交比例土壤层碳储量

Tab. 6 Carbon storage in soil layer for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 处理 Treatment | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 ~ 20 cm    | 28.764 | 30.624 | 30.478 | 31.36  | 31.40  | 34.04  |
| 21 ~ 40 cm   | 13.108 | 14.437 | 14.891 | 15.403 | 15.767 | 16.683 |
| 合计 Total     | 41.872 | 45.061 | 45.369 | 46.763 | 47.167 | 50.723 |

3.7 人工林生态系统碳储量

尾叶桉与马占相思人工复层林生态系统碳库主要包括 3 个部分:乔木层、林下层和土壤层。6 个处理中碳储量空间分布序列均为土壤层 > 乔木层 > 林下层,可见森林土壤是森林生态系统最主要的碳库之一。6 个处理尾叶桉与马占相思人工复层林生态系统碳储量分别为 55.247、67.396、95.502、69.106、83.446 和 76.356 t/hm<sup>2</sup>,其中当尾叶桉与马占相思以 1:1.6 混交,林分密度分别为 676、1 051 株/hm<sup>2</sup> 时,人工复层林生态系统碳储量为 95.502 t/hm<sup>2</sup>,在所有处理中碳储量最大。

将不同处理复层林生态系统碳储量进行方差分析和多重比较,结果表明(表 7、表 8),处理 4 和处理 2 之间生态系统碳储量差异不显著,其它各处理间生态系统碳储量差异均达到显著水平。

表 7 尾叶桉与马占相思不同混交比例人工林生态系统碳储量方差分析

Tab. 7 Variance analysis of carbon storage for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 差异源                 | SS             | df                 | MS          | F        | P - value  |
|---------------------|----------------|--------------------|-------------|----------|------------|
| Source of variation | Sum of squares | Degrees of freedom | Mean square |          |            |
| 组间 Between groups   | 3 514.704      | 5                  | 702.941     | 320.652* | 2.44E - 12 |
| 组内 Within groups    | 26.307         | 12                 | 2.192       |          |            |
| 总计 Total            | 3 541.011      | 17                 |             |          |            |

\* 为在 0.05 水平下显著。

表 8 尾叶桉与马占相思不同混交比例人工林生态系统碳储量多重比较结果

Tab. 8 Multiple comparison of carbon storage for the stratified mixed forest of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* with different mixed plantations

| 处理 Treatment     | 处理 3        | 处理 6        | 处理 5        | 处理 4        | 处理 2        |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Treatment 3 | Treatment 6 | Treatment 5 | Treatment 4 | Treatment 2 |
| 处理 1 Treatment 1 | 40.400*     | 35.014*     | 28.091*     | 15.029*     | 12.295*     |
| 处理 2 Treatment 2 | 28.105*     | 22.719*     | 15.796*     | 2.734       |             |
| 处理 4 Treatment 4 | 25.371*     | 19.985*     | 13.062*     |             |             |
| 处理 5 Treatment 5 | 12.309*     | 6.923*      |             |             |             |
| 处理 6 Treatment 6 | 5.386*      |             |             |             |             |

\* 为在 0.05 水平下显著。

## 4 结论与讨论

(1) 研究表明,在尾叶桉与马占相思人工复层混交林中,乔木层平均碳素含量大于灌木层的碳素含量,灌木层的碳素含量高于草本层的碳素含量,表现出随植物个体高度或组织木质化程度的降低,其碳素含量相应减少的趋势,而土壤的碳素含量远低于复层林群落各层的碳素含量。

(2) 在 6 个处理中,碳储量大小空间分布序列均为土壤层 > 乔木层 > 林下植被层。尾叶桉与马占相思人工复层林植被层碳储量主要取决于乔木层的生物量。在植被层中,尾叶桉对碳储量的贡献较大,而在人工复层林生态系统的碳储量中,土壤层碳储量所占比例最大。这说明森林土壤是森林生态系统最大的有机碳库。

(3) 在 6 个处理中,当尾叶桉与马占相思混交比例为 1:1.6,两树种密度分别为 676,1 051 株/hm<sup>2</sup> 时,混交林的成层性最明显,乔木层碳储量也最大。马占相思具有改良土壤理化性状的作用,有助于提高桉树的生长量,但同时也与桉树存在着对林地营养资源、空间资源的竞争,而处于上层林冠的桉树对于林分的光照、温度、湿度等方面起到重要的调节作用,从而影响下层马占相思的生长。只有当 2 个树种合理配置,形成协调的生态互作关系,才能构成稳定的复层混交林,改善林分的固碳能力。

(4) 尾叶桉与马占相思人工复层林乔木层碳储量大小排序为:干材 > 根系 > 枝条 > 干皮 > 叶,这充分说明了 2 个树种的速生特效,即具有强烈的光合作用和发达的根系。在土壤层碳储量方面,本研究土壤有机碳含量及其与植被碳贮量的比值均低于全国平均水平,这是因为亚热带土壤呼吸速率较大,加之这两种速生树种对土壤中养分的大量吸收,造成土壤碳贮量相对较低。

(5) 不同的混交比例和林分密度对复层林生态系统碳储量产生影响,这种现象表明尾叶桉与马占相思的种间关系受到密度效应的调控。研究表明,随林分密度的增大,人工林生态系统植被和土壤碳储量量会持续增长<sup>[19]</sup>。因此营造混交林时,在不同的混交比例下确定合理的种植密度可以提高生态系统的碳储量。

(6) 人工林普遍存在树种单一、结构和功能较差、病虫害频繁发生等特点,这是造成人工林固碳能力低的一个重要原因<sup>[20]</sup>。采取适合的树种构建人工混交林是提高森林碳吸存潜力的有效的途径。通过对 3 年生的尾叶桉与马占相思复层混交林的研究,分析得出混交林的固碳能力大于尾叶桉纯林,在混交林中,又以尾叶桉与马占相思混交比例为 1:1.6 时的固碳能力最大。除了林分密度和不同的混交比例对人工林的碳储量产生影响外,土壤理化性质以及造林前的土地利用方式等因素也会对人工林生态系统的碳储量产生影响。此外,人工林在各个发育阶段往往会呈现出不同的变化特征,因其结构和功能的差异,其碳储量变化也会表现出独特的规律<sup>[21]</sup>,本研究将继续监测和探讨尾叶桉和马占相思不同发育阶段的碳储量变化情况,为确定尾叶桉混交林不同发育时期的合理的混交方式提供参考。

综上所述,在相同立地条件,合理的混交比例和种植密度的尾叶桉与马占相思人工混交林可以提高资源的利用率,提高林分生长量,增加生态系统碳储量。同时,尾叶桉与马占相思复层林在固碳方面要强于尾叶桉纯林,从固碳能力的角度看,尾叶桉与马占相思人工混交林是一种比尾叶桉纯林更加优良的经营模式,可以有效地改善林分的固碳能力,为缓解全球气候变化作出贡献。

### 参考文献:

- [1] 耿元波,董云社,孟维奇. 陆地碳循环研究进展[J]. 地理科学进展, 2000, 19(4): 297-306.
- [2] Oliver L P, Yadvinder M, Niro H, et al. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots[J]. Science, 1998, 282: 439-442.
- [3] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests plant[J]. Cell and Environment, 1999, 22: 715-740.
- [4] Schllze E D, Wirth C, Heimann M. Climate change: Managing forests after kyoto[J]. Science, 2000, 289: 204-205.
- [5] Brown S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges[J]. Environment Pollution, 2002, 116: 363-372.
- [6] Lawbe, Sun O J, Campbell J, et al. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine[J]. Global Change Biology, 2003, 9: 510-524.

(下转第 758 页)



- [5] 黄建辉 陈灵芝 韩兴国. 几种常微量元素在辽东栎枝条分解过程中的变化特征[J]. 生态学报 2000 20(2): 229 - 234.
- [6] 郭家文 张跃彬 刘少春. 滇西南6县蔗区的土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的分布特征研究[J]. 土壤通报 2009 40(1): 179 - 183.
- [7] 史文娇 汪景宽 魏丹 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J]. 土壤学报 2009 46(2): 342 - 347.
- [8] 北京农业大学. 农业化学(总论) [M]. 北京: 农业出版社, 1998: 12 - 14, 173 - 176.
- [9] 江西森林编委会. 江西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [11] 张福锁 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报 1992 29(8): 239 - 250.
- [12] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere: A critical review[J]. Plant and Soil 1998 205(1): 25 - 44.
- [13] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere[J]. Plant and Soil 1990 129(1): 1 - 10.
- [14] Mench M, Martin E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L. *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustical* [J]. Plant and Soil 1991 132(2): 187 - 196.
- [15] Merckx R, Vanginkel J H, Sinnaeve J et al. Plant - induced changes in the rhizosphere of maize and wheat ( II ): Complexation of cobalt zinc and manganese in the rhizosphere of maize and wheat [J]. Plant and Soil 1986 96(1): 95 - 107.
- [16] 曾清如 周细红 廖柏寒 等. 低分子有机酸对茶园土壤中 Al、F、P、Cu、Zn、Fe、Mn 的活化效应[J]. 茶叶科学 2001 21(1): 48 - 52.
- [17] 张树人 赵协哲 宋钢 等. 吉林省土壤微量元素含量与分布规律研究——土壤中的铜和锌[J]. 吉林农业科学 1987, 12(3): 50 - 57.
- [18] 张树人 赵协哲 宋钢 等. 吉林省土壤微量元素含量与分布规律研究——土壤中的铁和锰[J]. 吉林农业科学 1988, 13(2): 51 - 57.
- [19] 陆继龙 周永昶 周永轩. 吉林黑土某些微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报 2002 33(5): 365 - 368.
- [20] 李德军 莫江明 方运霆 等. 鼎湖山自然保护区不同演替阶段森林土壤中有效微量元素状况研究[J]. 广西植物, 2004 24(6): 529 - 53, 182.

(上接第742页)

- [7] Kurt S P, Eugenie S E. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biology 2004 10: 2052 - 2077.
- [8] Houghton R A. Land - use change and the carbon cycle [J]. Global Change Biology 1995 1: 275 - 287.
- [9] Detwiler R P, Hall C S. Tropical forests and the global carbon cycle [J]. Science 1988 239: 426 - 471.
- [10] Winjum J K, Schroeder P E. Forest plantations of the world: Their extent, ecological attributes and carbon storage [J]. Agricultural and Forest Meteorology 1997 84: 153 - 167.
- [11] 王效科 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力 [J]. 生态学杂志 2000 19(4): 72 - 74.
- [12] 李意德 曾庆波. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究 [J]. 应用生态学报 1998 9(4): 341 - 344.
- [13] 陈楚莹 廖利平 汪思龙 等. 杉木人工林生态系统碳素分配与贮量的研究 [J]. 应用生态学报 2000 11: 175 - 178.
- [14] 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(3): 14 - 19.
- [15] 延晓冬 赵士洞. 温带针阔混交林分碳贮量动态的模拟模型 [J]. 生态学杂志 1995 14(2): 6 - 12.
- [16] 叶绍明 郑小贤 杨梅 等. 尾叶桉马占相思人工复层林生物量及生产力研究 [J]. 北京林业大学学报, 2008 30(5): 37 - 43.
- [17] Post W M, Emanuel W R, Zinke P et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature 1982 298(8): 156 - 159.
- [18] 方晰 田大伦 项文化 等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累和分配 [J]. 浙江林学院学报 2003 20(4): 374 - 379.
- [19] 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.
- [21] 黄从德 张国庆. 人工林碳储量影响因素 [J]. 世界林业研究 2009 22(2): 34 - 38.