

# 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究<sup>\*</sup>

尉海东<sup>1</sup>, 马祥庆<sup>2</sup>

(1 临沂师范学院 地理与旅游学院, 山东 临沂 276005;

2 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

[摘 要] 对福建马尾松幼龄林、中龄林和成熟林生态系统中各组分的含碳率和碳贮量进行了比较研究。结果表明, 不同发育阶段马尾松乔木层和凋落物层的含碳率为 48.12%~52.59%, 表现为成熟林最大、中龄林次之、幼龄林最小; 0~100 cm 土壤层含碳率亦表现出同样的规律, 而林下植被层含碳率则表现为中龄林最大、幼龄林次之、成熟林最小; 随林龄增大, 马尾松林乔木层、凋落物层和土壤层碳贮量均逐渐增加, 决定了生态系统总碳贮量亦逐渐增加, 成熟林生态系统碳贮量为 183.94 t/hm<sup>2</sup>, 分别是幼龄林和中龄林的 1.72 倍和 1.20 倍, 这种差异主要是由乔木层碳贮量的差异引起的。

[关键词] 马尾松; 发育阶段; 含碳率; 碳贮量

[中图分类号] S718.55<sup>+</sup>4.2; S791.248.02 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2007)01-0171-04

## Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* Lamb plantation ecosystem at different growing stages

WEI Hai-dong<sup>1</sup>, MA Xiang-qing<sup>2</sup>

(1 School of Geography and Tourism, Linyi Normal University, Linyi, Shandong 276005, China;

2 School of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** *Pinus massoniana* Lamb is one of the most important tree species of timber plantations in South China, playing an important role in mitigating the rise of atmospheric CO<sub>2</sub>. The carbon content and carbon storage of *Pinus massoniana* Lamb at different growing stages were measured. The results were showed as follows: The carbon contents of the tree, litter and soil for 100 cm depth were in the sequence of MP (mature-plantation) > MAP (middle-aged plantation) > YP (young plantation), whereas the carbon content of understory layer was in the sequence of MAP > YP > MP. The carbon storage of *Pinus massoniana* Lamb plantation ecosystem increased with the increment of age, of which the MP was 1.72 times as that of YP, and 1.20 times as that of MAP respectively, and most of the differences among forest ecosystems occurred in the tree layer.

**Key words:** *Pinus massoniana* Lamb; growing stage; carbon content; carbon storage

因石化燃料的大量使用和对森林的过度采伐所引起的温室效应, 已严重影响了人类的生存环境。CO<sub>2</sub> 是最主要的温室气体, 对温室效应的贡献率占到了 50%<sup>[1-2]</sup>。森林作为陆地生物圈的主体, 其维持的碳库对于调节全球碳平衡及降低大气 CO<sub>2</sub> 含量具有不可替代的作用, 准确估算森林碳贮量对于预

测气候变化具有重要意义。但目前国内外对全球不同森林类型碳贮量的研究缺乏足够的实测数据, 致使研究结果存在很大的不确定性<sup>[3-4]</sup>。

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) 是我国南方主要的乡土造林和工业原料树种, 不仅具有经济意义、防护效能及美学价值, 而且在维护生态系统平衡

\* [收稿日期] 2006-01-12

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (30371153); 福建省科技厅重大科学基金项目 (2003J004)

[作者简介] 尉海东 (1980-), 男, 山东肥城人, 讲师, 硕士, 主要从事森林生态系统碳循环研究。E-mail: weihaidong2005@126.com

方面亦具有明显的作用。因此,本研究测定了立地条件相似的马尾松幼龄林、中龄林和成熟林的林分生物量和含碳率,对不同发育阶段马尾松人工林的含碳率和碳贮量进行了比较研究,以期为准估算马尾松人工林的碳贮量提供科学依据,同时也为我国森林生态系统碳平衡的估算和动态模拟提供参考数据。

## 1 试验地概况

试验地位于福建省顺昌埔上国有林场,地理位

置为东经  $117^{\circ}30' \sim 118^{\circ}14'$ , 北纬  $26^{\circ}29' \sim 27^{\circ}12'$ , 属于中亚热带海洋气候区,年平均降雨 1 568 mm, 年积温为 5 388~5 695  $^{\circ}\text{C}$ , 气候湿润,雨量充沛。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择

选择立地条件相似的不同发育阶段(幼龄林、中龄林、成熟林)的马尾松人工林,在每种类型林分内建立 3 个  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  的标准地,共建立 9 个标准地。马尾松人工林样地概况见表 1。

表 1 马尾松人工林样地概况

Table 1 General condition in *Pinus massoniana* Lamb plantations at different growing stages

| 林分发育阶段<br>Growing stage    | 林龄/a<br>Age | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> )<br>Density | 平均树高/m<br>Average height | 平均胸径/cm<br>Average DBH |
|----------------------------|-------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 幼龄林 Young plantation       | 7           | 1 590                               | 5.2                      | 6.4                    |
| 中龄林 Middle-aged plantation | 20          | 1 068                               | 13.9                     | 15.1                   |
| 成熟林 Mature plantation      | 30          | 813                                 | 16.5                     | 19.2                   |

### 2.2 生物量测定

2.2.1 乔木层生物量 对每个样地内的林木进行每木调查和树高测定;采用分层切割法按 2 m 分段,分别称取树干、树皮、树枝和树叶的鲜重,并用挖掘法测定根系生物量,随机抽取 30% 样品带回室内,烘干测定后换算成干物质重。

2.2.2 林下植被生物量及现存凋落物量 在每个类型的样地内设置 4 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的小样方,采用样方收获法测定林下植被生物量和凋落物现存量,即在调查样方内所有植被种类及数量基础上,收集样方内所有的灌木、草本,带回室内烘干测定。

### 2.3 含碳率测定

在测定生物量的同时,采集乔木层不同器官(叶、枝、干、皮和根)、林下植被层和凋落物层样品,经烘干、粉碎、过筛后用重铬酸钾加热法测定含碳率<sup>[5]</sup>。

在样地中按“S”形随机设定土壤取样点 5 个,每个取样点按 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 分层取样。土样在室内自然风干后过 0.149 mm 土壤筛,采用重铬酸钾加热法测定土壤含碳率;同时用环刀法测定土壤容重。

### 2.4 马尾松人工林生态系统各组分碳贮量计算

根据乔木层各器官(干、枝、叶、皮、根)、林下植被层以及凋落物层的生物量及相应含碳率,计算其相应碳贮量,其中乔木层碳贮量为乔木层各器官碳贮量之和。

本研究对土壤碳贮量的估算限定在表土层 100

cm 深度范围以内,不包括地表枯落物,具体采用下面的公式:

$$S_d = \sum_{i=1}^d D_i C_i H_i$$

式中:  $S_d$  表示土壤表层  $d$  深度内单位面积土壤碳贮量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ),  $D_i$  表示第  $i$  土层的容重( $\text{t}/\text{m}^3$ ),  $C_i$  表示第  $i$  土层的含碳率(%),  $H_i$  表示第  $i$  土层的厚度(m)。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同发育阶段马尾松人工林生态系统各组分的含碳率

3.1.1 乔木层各器官 由表 2 可知,马尾松幼龄林、中龄林和成熟林乔木层平均含碳率分别是 49.69%、52.31% 和 52.59%, 表现为成熟林最大,中龄林次之,幼龄林最小,且成熟林与幼龄林间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。但不同器官含碳率在不同发育阶段间的差异程度有所不同,其中幼龄林的叶含碳率与中龄林的差异达到了显著水平,幼龄林的干含碳率与成熟林的差异亦达到了显著水平。同一发育阶段,马尾松人工林乔木层各器官含碳率均表现为干 > 根 > 皮 > 枝 > 叶,幼龄林、中龄林、成熟林各器官含碳率变异系数分别为 2.86%、1.07% 和 3.25%, 这与方运霆等<sup>[6]</sup>对鼎湖山马尾松各器官含碳率大小顺序的测定结果一致,但本研究所测含碳率数值普遍偏低。

表 2 不同发育阶段马尾松林乔木层各器官的含碳率

| Table 2 Carbon content of <i>Pinus massoniana</i> Lamb organs in plantation of different growing stages |              |             |              |            |            |              | % |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|--------------|------------|------------|--------------|---|
| 林分发育阶段<br>Growing stage                                                                                 | 叶<br>Leaf    | 枝<br>Branch | 干<br>Stem    | 皮<br>Bark  | 根<br>Root  | 平均值<br>Mean  |   |
| 幼龄林 Young plantation                                                                                    | 48.25±0.24 a | 48.95±0.26  | 50.26±1.02 a | 49.56±0.46 | 49.65±0.42 | 49.69±1.42 a |   |
| 中龄林 Middle-aged plantation                                                                              | 51.03±0.29 b | 51.26±0.31  | 52.63±0.29   | 51.76±0.36 | 52.56±0.27 | 52.31±0.56   |   |
| 成熟林 Mature plantation                                                                                   | 50.19±0.34   | 50.68±0.31  | 53.29±0.37 b | 52.26±0.30 | 52.38±0.31 | 52.59±1.71 b |   |

注: 同列数据后标不同小写字母者表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。  
Note: Values in same column with different letters differ significantly ( $P < 0.05$ ). The following tables are the same

3.1.2 马尾松林下植被层和凋落物层 由表 3 可知, 不同发育阶段马尾松林下植被层含碳率表现为中龄林最大、幼龄林次之、成熟林最小, 其中中龄林林下植被层含碳率分别是幼龄林和成熟林的 1.03 和 1.04 倍; 而凋落物层含碳率表现为成熟林> 中龄林> 幼龄林, 成熟林凋落物层含碳率分别是幼龄林和中龄林的 1.08 和 1.01 倍, 成熟林与幼龄林间差异达到了显著水平 ( $P < 0.05$ )。综合表 2 和表 3 可知, 马尾松林各组分含碳率表现为乔木层> 凋落物层> 林下植被层。

表 3 不同发育阶段马尾松林下植被层和凋落物层的含碳率

| Table 3 Carbon content of understory and litter layer in <i>Pinus massoniana</i> Lamb plantation of different growing stages |                           |                      |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|--|
| 林分发育阶段<br>Growing stage                                                                                                      | 林下植被层<br>Understory layer | 凋落物层<br>Litter layer |  |
| 幼龄林 Young plantation                                                                                                         | 41.25±0.31                | 48.12±0.34 a         |  |
| 中龄林 Middle-aged plantation                                                                                                   | 42.35±0.31                | 50.6±0.34            |  |
| 成熟林 Mature plantation                                                                                                        | 41.1±0.28                 | 51.3±0.26 b          |  |

3.1.3 不同发育阶段马尾松林土壤层 由表 4 可知, 不同发育阶段的马尾松人工林土壤层含碳率在垂直分布上均表现为随土壤深度增加而降低的趋势, 不同土层含碳率两两间差异均达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 且相邻土层以 0~20 cm 土层含碳率与 20~40 cm 的差异最为显著 ( $P < 0.05$ ), 在成熟林中表现得尤为明显。这与方运霆等<sup>[6]</sup>对鼎湖山自然保护区土壤含碳率的研究结论及田大伦等<sup>[5]</sup>对湖南会同杉木人工林土壤含碳率的研究结论是一致的。

由表 4 还可知, 不同发育阶段马尾松人工林同一土层的土壤含碳率存在差异, 表现为成熟林> 中龄林> 幼龄林, 而这种差异主要体现在表层 0~20 cm 土壤中, 随土层深度增加, 差异逐渐减小, 到 60~100 cm 土层时差异基本消除。马尾松成熟林 0~20 cm 土层的土壤含碳率为 2.221%, 分别是幼龄林和中龄林的 1.21 和 1.16 倍, 差异均达到了显著水平 ( $P < 0.05$ )。

表 4 不同发育阶段马尾松林各土壤层的含碳率

| Table 4 Carbon content of soil in <i>Pinus massoniana</i> Lamb plantation at different growing stages |                   |               |               |               |               | % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---|
| 林分发育阶段<br>Growing stage                                                                               | 土壤层/cm Soil layer |               |               |               | 平均值<br>Mean   |   |
|                                                                                                       | 0~20              | 20~40         | 40~60         | 60~100        |               |   |
| 幼龄林 Young plantation                                                                                  | 1.832±0.31 Aa     | 1.113±0.056 b | 0.599±0.052 c | 0.140±0.014 d | 0.765±0.039 A |   |
| 中龄林 Middle-aged plantation                                                                            | 1.991±0.24 Aa     | 1.126±0.047 b | 0.612±0.041 c | 0.141±0.021 d | 0.802±0.141 A |   |
| 成熟林 Mature plantation                                                                                 | 2.221±0.41 Ba     | 1.163±0.17 b  | 0.626±0.074 c | 0.143±0.025 d | 0.859±0.041 B |   |

注: 同列数据后标不同大写字母者差异显著 ( $P < 0.05$ ); 同行数据后标不同小写字母者差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Note: Values in same column with different capital letters differ significantly ( $P < 0.05$ ); Values in same line with different small letters differ significantly ( $P < 0.05$ ).

3.2 马尾松人工林生态系统的碳贮量及分配 马尾松人工林生态系统碳贮量主要由土壤层、乔木层、林下植被层和凋落物层的碳贮量 4 部分组成。根据不同层次的生物量及相应含碳率, 计算出马尾松人工林生态系统不同层次碳贮量的结果见表 5。

表 5 结果表明, 马尾松幼龄林、中龄林和成熟林生态系统碳贮量分别是 107.19、152.87 和

183.94 t/hm<sup>2</sup>, 表现出随林龄增大而增加的趋势, 且两两间差异均达到了显著水平 ( $P < 0.05$ )。但不同组分碳贮量在不同发育阶段间的差异程度有所不同。乔木层、凋落物层和土壤层碳贮量均表现出随林龄增加而增大的趋势, 且乔木层和凋落物层碳贮量在幼龄林、中龄林和成熟林间两两差异均达到了显著水平, 而土壤层碳贮量只是在幼龄林和成熟林间差异显著; 林下植被层碳贮量表现为中龄林最大、幼

龄林次之、成熟林最小。

表 5 马尾松人工林生态系统的碳贮量及分配

| Table 5 Carbon storage and its distribution in <i>Pinus massoniana</i> Lamb plantation ecosystem |                   |                           |                      |                   |                |                |               |  |                | t/hm <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|--|----------------|-------------------|
| 林分发育阶段<br>Growing stage                                                                          | 乔木层<br>Tree layer | 林下植被层<br>Understory layer | 凋落物层<br>Litter layer | 土壤层/cm Soil layer |                |                |               |  | 小计<br>Subtotal | 合计<br>Total       |
|                                                                                                  |                   |                           |                      | 0~ 20             | 20~ 40         | 40~ 60         | 60~ 100       |  |                |                   |
| 幼龄林<br>Young plantation                                                                          | 16 62±<br>2 16 A  | 2 2±<br>0 37 A            | 0 58±<br>0 46 A      | 33 34±<br>2 14 A  | 29 09±<br>2 16 | 16 89±<br>2 14 | 8 47±<br>1 02 |  | 87. 8 A        | 107. 19 A         |
| 中龄林<br>Middle-aged plantation                                                                    | 50 28±<br>3 47 B  | 2 38±<br>0 46 A           | 1 61±<br>0 57 B      | 42 05±<br>4 38    | 30 42±<br>3 56 | 17 45±<br>3 14 | 8 67±<br>0 71 |  | 98 6           | 152 87B           |
| 成熟林<br>Mature plantation                                                                         | 73 01±<br>2 2 C   | 0 99±<br>0 46 B           | 2 85±<br>0 51 C      | 48 33±<br>2 1 B   | 31 82±<br>2 58 | 17 97±<br>2 19 | 8 97±<br>1 02 |  | 107. 09 B      | 183 94 C          |

在马尾松幼龄林、中龄林和成熟林生态系统的总碳贮量中, 乔木层碳贮量的比重分别是 15. 51%, 32. 89% 和 39. 69%, 土壤层碳贮量的比重分别是 81. 91%, 64. 5% 和 58. 22%。可见, 土壤层是马尾松人工林生态系统碳贮量的主体, 但土壤层碳贮量在人工林生态系统总碳贮量中的比重表现出随林龄增大而降低的趋势, 而乔木层碳贮量在总碳贮量中的比重表现出与之相反的趋势。这说明随林龄增大, 林分乔木层碳贮量在生态系统总碳贮量中占有越来越重要的地位。由此可见, 森林植被不仅是陆地生态系统最为重要的生物基因库, 也是大气 CO<sub>2</sub> 的一个重要汇, 是影响全球气候变化的重要因子之一。

由表 5 还可知, 马尾松幼龄林、中龄林和成熟林生态系统的碳贮量差异主要体现在乔木层碳贮量的差异上。马尾松成熟林生态系统的碳贮量分别较幼龄林和中龄林的多 76. 75 和 31. 07 t/hm<sup>2</sup>, 其中成熟林乔木层碳贮量分别较后两者多 56. 39 和 22. 73 t/hm<sup>2</sup>, 占总差异的 73. 47% 和 72. 15%。因此, 在大尺度上估算马尾松人工林碳贮量时, 应划分不同发育阶段分别估算乔木层碳贮量, 这样才能得出准确客观的结果。

由表 5 还可知, 马尾松人工林生态系统凋落物层碳贮量与 0~ 100 cm 土壤层碳贮量具有较好的线性相关关系, 其中与表土层 0~ 20 cm 碳贮量的相关系数达到了 0. 989。

4 结论与讨论

研究表明, 福建顺昌埔上国有林场马尾松幼龄林、中龄林和成熟林乔木层碳贮量分别是 16. 62, 50. 28 和 73. 01 t/hm<sup>2</sup>, 平均为 46. 64 t/hm<sup>2</sup>, 低于我国森林植被(57. 78 t/hm<sup>2</sup>) 的平均碳贮量, 且其生态系统碳贮量亦低于我国森林生态系统的平均碳贮量(258. 83 t/hm<sup>2</sup>[4]), 原因是本研究得到的马尾松林土壤碳贮量为 87. 8~ 107. 09 t/hm<sup>2</sup>, 远小于周玉荣等[4]报道的我国森林生态系统的土壤碳贮量

(201. 76 t/hm<sup>2</sup>)。这是由于中亚热带气候区温度较高, 降雨量较大, 凋落物分解后以 CO<sub>2</sub> 形式释放到大气中的量较多, 而转移到土壤中的量相对较少, 体现了中亚热带气候区土壤碳积累的特点。

森林凋落物是森林生态系统物质循环的重要组成部分, 是大气层和土壤 C 素交换的介层之一[7-8]。本研究表明, 凋落物层碳贮量随林龄增大而增加, 这是因为幼龄林处于速生阶段, 林分凋落物少, 但随着林龄增大, 林木间竞争剧烈, 自然整枝强烈, 林分凋落物逐渐增多[9-10]。本研究还得到凋落物层碳贮量与 0~ 100 cm 土壤层碳贮量具有较好的相关关系。可见, 森林凋落物作为土壤- 植物系统碳循环的联结库, 对土壤碳贮量具有较大影响, 进而对森林生态系统碳循环起到重要作用。因此, 凋落物层在森林生态系统碳循环中的作用是不可忽略的。

[参考文献]

[1] Dixon R. K, Brown S, Houghton R. A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 262: 185-190

[2] Yadavinder M alhi, John Grace. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide[J]. Tree, 2000, 15(8): 332-337.

[3] Fan S M, Gloor M, Mahman J. Large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic CO<sub>2</sub> data and models[J]. Science, 1998, 282: 442-446

[4] 周玉荣, 余振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522

[5] 田大伦, 方 晰. 湖南会同杉木人工林生态系统的碳素含量[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(2): 1-5

[6] 方运霆, 莫江明, Sandra Brown, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142

[7] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740

[8] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 731-738

[9] 桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 543-548

[10] 唐旭利, 温达志, 闫俊华. 鼎湖山亚热带季风长绿阔叶林碳储量分布[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 90-97