

云南热区几种阔叶人工林 C 储量的研究

李江, 陈宏伟, 冯弦

(云南省林业科学院, 云南昆明 650204)

摘要: 为了研究云南热区几种主要阔叶人工林分的固碳能力, 利用实际测定生物量的方法对西双版纳的几种阔叶人工林生态系统的 C 储量进行了研究。研究发现, 山桂花纯林, 西南桦纯林, 高阿丁枫纯林, 马尖相思纯林以及西南桦+山桂花混交林和西南桦+马尖相思混交林几种 7 年生人工林生态系统的 C 密度为 109.37~136.97 t/hm²。几种人工林分的年固 C 量在 3.97~7.03 t/hm²·a 之间。表明: 这些树种都是开展以固 C 为目标的生态造林项目的适合树种。

关键词: 云南热区; 阔叶人工林; C 密度; 年固 C 量

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2003)04-0294-05

Carbon stock and rate of carbon sequestration assessment of hardwood plantations in tropical Yunnan, China

LI Jiang, CHEN Hong-wei, FENG Xian

(Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, China)

Abstract: In order to test the potential of carbon sequestration for plantations of hardwood species in tropical and subtropical Yunnan, carbon stock and rate of sequestration of six kinds of hardwood plantations were assessed through direct biomass measurement. Research results showed that carbon densities ranged from 109.37 t/hm² to 136.97 t/hm² for 7 years old plantations of *Paramichelia baillonii*, *Betula alnoides*, *Altingia excelsa*, *Acacia mangium* and mixing *Betula alnoides* with *Paramichelia baillonii*, mixing *Betula alnoides* with *Acacia mangium*. Their annual rates of carbon sequestration were tested with a range from 3.97 t/hm²·a to 7.03 t/hm²·a, which indicated these species could be good choices for carbon offsetting projects in tropical and subtropical Yunnan.

Key words: tropical and subtropical Yunnan; hardwood plantation; carbon density; annual rate of carbon sequestration

以二氧化碳为主的温室气体的排放与固定已经成为持续发展与生态环境建设研究中的一个热点。通过造林进行二氧化碳的吸收固定已被认为是技术上简单, 经济上回报高的应对全球气候变化的最佳选择。由一些发达国家或国际组织资助的旨在吸收二氧化碳的造林项目 (Carbon emission offsetting

project) 已在一些国家开展 (Dixon, 1993)。森林生态系统吸收固定二氧化碳的主要过程是, 植物从大气中吸收二氧化碳, 通过光合作用将二氧化碳转化为有机化合物, 然后固定在叶、干、枝、根等植物体上, 此外凋落物和植株死亡也在土壤中通过有机质固定大量的 C。在森林的 C 储量研究上, 国外如

收稿日期: 2002-12-02; 修订日期: 2003-02-20

基金项目: 云南省科技攻关项目“现代林业资源培育产业化试验与示范”(云计科技 98182)

作者简介: 李江 (1972-), 男, 云南昌宁人, 理学硕士, 助理研究员, 造林学专业, 从事造林及环境林业研究。

Brown 和 Lugo 等已做了很多工作, Lasco 等(2000) 人已经对菲律宾的森林固 C 进行了详细的研究。关于云南热区人工林这方面的专题研究尚未见报道。笔者利用 1998 年对云南省林业科学院西双版纳普文试验林场的几种 7 年生人工林的调查资料对它们的 C 储量(Carbon stock)及年固 C 量(Rate of carbon sequestration)进行了研究。希望为评估人工林分的固 C 效益及为吸引外资进入生态建设领域做一些基础工作。

1 研究地区概况

试验人工林位于云南省西双版纳普文试验林场, 101°6' E, 22°25' N, 海拔 840~900 m, 地貌以低山为主, 平均坡度 20°。气候属热带北缘季风类型, 干湿季明显, 11~4 月为干季, 5~10 月为雨季。年均温 20.1 °C, ≥ 10 °C 积温 7 459 °C, 最热月(7 月)均温 23.9 °C, 最冷月(1 月)均温 13.9 °C, 极端最高气温 38.3 °C, 极端最低气温 -0.7 °C。年降水量 1 655.3 mm, 雨季降水量占全年 86%。试验区代表植被类型为山地雨林和季风常绿阔叶林。试验区土壤类型为赤红壤(王达明, 2002)。

2 研究内容与方法

研究的人工林为 1991 年定植的山桂花(*Parramichelia baillonii*) 纯林, 西南桦(*Betula alnoides*) 纯林, 高阿丁枫(*Altingia excelsa*) 纯林, 马尖相思(*Acacia mangium*) 纯林以及西南桦+山桂花混交林和西南桦+马尖相思混交林。对试验人工林的各个 C 库分别进行了测定。乔木层、灌木层、草本层、地下部分及枯枝落叶层首先测定生物量, 然后转化为它们的 C 储量。土壤层利用蒋云东等对试验人工林土壤的监测资料, 根据土壤有机质与 C 含量之间的关系, 推算 0~50 cm 土壤中的 C 储量。将各个部分的 C 储量相加, 获得单位面积人工林分的 C 储量即 C 密度(Carbon density)。另外结合唐建维(1998)的数据对本区域的热带次生林的 C 储量也进行了测算。

2.1 地上部分生物物质 C 密度测定

乔木层标准地大小为 20 m×20 m, 设置于林分典型样地中。在样地内进行每木检尺, 根据平均胸径和平均树高, 在样地内选择平均木做生物量的测

定。

灌木层与草本层的标准地大小分别为 5 m×5 m 和 1 m×1 m。样方内的灌木及草本全部分别收获称重。

对各层的植物进行取样, 实验室测定含水率, 将鲜重换算为干重。根据植物有机质的含 C 量约占干生物量 50% 将生物量换算为 C 密度(Lasco, 1999; Lugo 和 Brown, 1992)。

2.2 地下部分生物物质的 C 密度测定

乔木层根系生物量通过挖出全部标准木根系进行推算。灌木层与草本层根系通过挖出 1 m×1 m×1 m 样方内的全部根系测定。C 密度的换算同上。

2.3 凋落物 C 密度的测定

在林下 5 个 1 m×1 m 小样方中, 收集全部的枯枝落叶。取回烘干称重。C 储量的换算同上。

2.4 土壤 C 密度的测定

各林分土壤中固定的 C 通过土壤有机质含量及土壤容重进行计算。资料采用蒋云东 1997 年取样测定的数据(蒋云东, 2002)。应用的换算公式(Lasco, 1999)为:

$$\text{土壤 C 密度} = \text{土壤体积} \times \text{土壤容重} \times \text{土壤有机质含量} \div 1.724$$

2.5 人工林分的总 C 密度的测定

将地上部分、地下部分生物量, 凋落物及土壤中固定的 C 相加, 即可获得单位面积人工林分的固 C 总量即 C 密度(t/hm^2)。

2.6 人工林分的年固 C 量的测定

因林龄仅为 7 a, 监测结果显示土壤有机质含量的年变化甚小, 不予考虑。用林分 7 a 平均生物量的增长来计算年固 C 量。

3 结果与分析

3.1 地上部分生物物质的 C 密度

由表 1 可见, 各林分地上部分生物物质固定的 C 密度中, 马尖相思纯林最高, 为 44.46 t/hm^2 , 其次西南桦+高阿丁混交林为 36.77 t/hm^2 , 高阿丁枫纯林为 34.66 t/hm^2 , 西南桦+山桂花混交林为 28.42 t/hm^2 , 西南桦纯林为 23.86 t/hm^2 , 山桂花纯林最低为 18.64 t/hm^2 。所有的人工林分地上部分生物物质的 C 密度都高于当地 10 年生热带次生林 17.83 t/hm^2 的水平。乔木层占地上部分 C 密度的比例最大, 达到 83.93%~99.12%。灌木层占地上

部分 C 密度的比例变化很大,西南桦+山桂花混交林最高为 14.55%,高阿丁枫纯林最低仅为 0.52%。与天然次生林相比,人工林分灌木层所占比例都较

小,这反映出人工林有更高比例的 C 被固定于乔木层中。草本层的 C 密度较小,仅占地上生物量的 0.25%~3.23%。

表 1 各林分地上部分生物质的 C 密度 (t/hm²)
Table 1 Carbon density of various aboveground components

林分类型 Type of plantation	乔木层 Arborous layer			灌木层 Understory layer			草本层 Grass layer			总计 Total		
	生物量 Biomass (t/hm ²)	C 密度 C density (t/hm ²)	百分比 Percentage (%)	生物量 Biomass (t/hm ²)	C 密度 C density (t/hm ²)	百分比 Percentage (%)	生物量 Biomass (t/hm ²)	C 密度 C density (t/hm ²)	百分比 Percentage (%)	生物量 Biomass (t/hm ²)	C 密度 C density (t/hm ²)	百分比 Percentage (%)
1	34.58	17.29	92.78	2.52	1.26	6.76	0.17	0.09	0.46	37.27	18.64	100
2	44.50	22.25	93.27	1.67	0.84	3.50	1.54	0.77	3.23	47.71	23.86	100
3	47.78	23.89	84.06	8.27	4.14	14.55	0.79	0.40	1.39	56.84	28.42	100
4	68.89	34.45	93.68	2.03	1.02	2.76	2.62	1.31	3.56	73.54	36.77	100
5	68.70	34.35	99.12	0.36	0.18	0.52	0.25	0.13	0.36	69.31	34.66	100
6	85.81	42.91	96.50	2.89	1.45	3.25	0.22	0.11	0.25	88.92	44.46	100
7	29.92	14.96	83.93	5.57	2.79	15.62	0.16	0.08	0.45	35.65	17.83	100

注: 1: 山桂花纯林 (*Paramichelia baillonii* plantation); 2: 西南桦纯林 (*Betula alnoides* plantation); 3: 西南桦+山桂花混交林 (*Betula alnoides*+*Paramichelia baillonii* plantation); 4: 西南桦+高阿丁混交林 (*Betula alnoides*+*Altingia excelsa* plantation); 5: 高阿丁枫纯林 (*Altingia excelsa* plantation); 6: 马尖相思纯林 (*Acacia mangium* plantation); 7: 热带次生林 (Tropical secondary forest)。

3.2 地下部分生物质(根系)的 C 密度

表 2 可看出,各人工林分地下部分(根系)的 C 密度最高的是西南桦+山桂花混交林为 12.64 t/hm²,其次是西南桦+高阿丁枫混交林为 10.11 t/hm²。混交林的地下部分 C 密度明显比纯林要高。在纯林中,山桂花纯林的地下部分 C 密度为 9.16 t/hm²,高阿丁枫纯林为 8.29 t/hm²,西南桦纯林为

5.37 t/hm²。马尖相思纯林有最高的地上部分 C 密度,可地下部分在几个人工林中最低为 4.75 t/hm²,其地下部分 C 密度与地上部分 C 密度的比值 (R/S) 为 0.1,是所有林分中最小的。这是由于马尖相思地上部分生物量的迅速积累造成的。其它林分地下部分 C 密度与地上部分 C 密度的比值为 0.23~0.49。

表 2 各林分地下部分,凋落物及土壤的 C 密度
Table 2 Carbon density of belowground(roots), litter and soil

林分类型 Type of plantation	地下部分生物量 Biomass of belowground (t/hm ²)	地下部分 C 密度 C density of belowground (t/hm ²)	凋落物生物量 Biomass of litter (t/hm ²)	凋落物 C 密度 C density of litter (t/hm ²)	土壤有机质 Soil organic matter (t/hm ²)	土壤有机 C 密度 Organic C density of soil (t/hm ²)
山桂花纯林 <i>Paramichelia baillonii</i>	18.32	9.16	10.15	5.08	131.87	76.49
西南桦纯林 <i>Betula alnoides</i>	10.74	5.37	10.74	5.37	151.43	87.84
西南桦+山桂花混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Paramichelia baillonii</i>	25.28	12.64	5.21	2.61	124.20	72.04
西南桦+高阿丁混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Altingia excelsa</i>	20.22	10.11	8.48	4.24	105.6	61.25
高阿丁枫纯林 <i>Altingia excelsa</i>	16.57	8.29	13.39	6.70	122.24	70.90
马尖相思纯林 <i>Acacia mangium</i>	9.5	4.75	14.26	7.13	139.00	80.63
热带次生林 Tropical secondary forest	10.96	5.48	4.69	2.35	160.78	93.26

3.3 凋落物层的 C 密度

从表 2 看出,凋落物层的 C 密度最高的是马尖相思纯林为 7.13 t/hm²,其次高阿丁枫纯林为 6.70 t/hm²,西南桦纯林为 5.37 t/hm²,山桂花纯林为 5.08 t/hm²,西南桦+高阿丁混交林为 4.24 t/hm²。人工林中西南桦+山桂花混交林凋落物层的 C 密度最低为 2.61 t/hm²。人工林凋落物 C 密度都高

于当地的热带次生林(2.35 t/hm²)。

3.4 土壤中的有机 C 密度(0~50 cm)

由表 2 可见,人工林土壤的有机 C 密度差异不大,最大的是西南桦纯林为 87.84 t/hm²,最小的是高阿丁枫纯林为 70.90 t/hm²。热区人工林土壤的 C 密度比当地热带次生林土壤的 93.26 t/hm² 要低,也低于北京暖带落叶阔叶林 96 t/hm² 的水平

(桑卫国等,2002)。这也许与营林措施特别是整地造成的水土流失对土壤的影响有关,当然热区土壤中有有机质含量普遍偏低主要是因为高温高湿条件下,有机质分解迅速的原因。

3.5 人工林分的总 C 密度

由表 3 可见,几种人工林的 C 密度在 109.37~136.97 t/hm² 之间。土壤中的 C 储量占了最大的部分,占总 C 密度的 54.51%~71.73%。这显示出土壤是本地区几种阔叶人工林生态系统中的主要 C 库,土壤中 C 储量的变化必然引起整个生态系统 C 储量的整体变化。以吸收固定 CO₂ 为主要目标的造林项目除了追求较高的生长量外,还应对林地土壤的管理给予足够的重视。几种人工林生物物质(包括地上部分和地下部分)的 C 储量在 27.8~49.21 t/hm² 之间,占总 C 密度的 27.8%~49.21%。这

个数值明显高于王效科等(2001)对黑松、油松、马尾松、杉木、柳杉、水杉和桉树的幼龄人工林的 C 密度总体估计值(<15 t/hm²)。这表明山桂花、西南桦及高阿丁枫这几个乡土阔叶树种的人工林有较高的固 C 潜力。凋落物占的比例很小,占 2.26%~5.56%,这是几种人工林中,C 密度最高的是马尖相思纯林为 136.97 t/hm²。这反应了马尖相思较高的生产力,一方面通过同化作用将 C 存储于生物物质中,另一方面通过凋落物的分解使土壤保持了较高的有机质含量。混交林与纯林的 C 密度在中幼龄阶段差异不大。山桂花纯林为 109.37 t/hm²,西南桦纯林 122.44 t/hm²,高阿丁枫纯林 120.55 t/hm²。西南桦+山桂花混交林和西南桦+高阿丁混交林的 C 密度分别为 115.71 t/hm² 和 112.37 t/hm²。

表 3 各林分系统的 C 密度及其组成(t/hm²)
Table 3 Carbon density of different sinks of the plantations

林分类型 Type of plantation	地上生物 质 C 密度 (CA)	地下生物 质 C 密度 (CB)	地上生物 质+地 下生物 质 C 密度 (CA+CB)	%	凋落物 C 密度 (CL)	%	林地土 壤 C 密度 (CS)	%	总 C 密度 Total carbon density
山桂花纯林 <i>Paramichelia baillonii</i>	18.64	9.16	27.80	25.42	5.08	4.64	76.49	69.94	109.37
西南桦纯林 <i>Betula alnoides</i>	23.86	5.37	29.23	23.87	5.37	4.39	87.84	71.73	122.44
西南桦+山桂花混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Paramichelia baillonii</i>	28.42	12.64	41.06	35.49	2.61	2.26	72.04	62.26	115.71
西南桦+高阿丁混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Altingia excelsa</i>	36.77	10.11	46.88	41.72	4.24	3.80	61.25	54.51	112.37
高阿丁枫纯林 <i>Altingia excelsa</i>	34.66	8.29	42.95	35.63	6.70	5.56	70.90	58.81	120.55
马尖相思纯林 <i>Acacia mangium</i>	44.46	4.75	49.21	35.93	7.13	5.21	80.63	58.86	136.97
热带次生林 Tropical secondary forest	17.83	5.48	23.31	19.60	2.35	1.98	93.26	78.42	118.92

注: CA 为地上部分生物质的 C 密度; CB 为地下部分(根系)的 C 密度; CL 为凋落物的 C 密度; CS 为土壤有机碳的 C 密度。 Note: CA = carbon density of aboveground biomass; CB = carbon density of belowground biomass; CL = carbon density of litter; CS = Carbon density of soil.

3.6 7 年生人工林分的年固 C 量

由表 4 可以看出,马尖相思纯林的年固 C 量最大为 7.03 t/hm²·a。两个混交林的年固 C 量也较大,西南桦+高阿丁混交林为 6.69 t/hm²·a,西南桦+山桂花混交林为 5.87 t/hm²·a。此外西南桦纯林为 4.17 t/hm²·a,山桂花纯林为 3.97 t/hm²·a。这与国际大气变化组织 IPCC 温室气体调查中使用的热带人工林年固 C 量估计值是一致的,在 3.4~7.5 t/hm²·a 之间(Houghton 等,1997)。几种阔叶人工林作为碳汇(Carbon sink)的潜力是很大的,它们每年吸收固定的 C 量明显高于当地的热带次生林(2.33 t/hm²·a),暖温带落叶阔叶林(2.19 t/hm²·a)(桑卫国等,2002)。但是与典型的

热带地区相比,云南热区人工林的年固 C 量还是偏小的。如在菲律宾马尖相思纯林的年固 C 量测定值为 20.8 t/hm²·a,石梓(*Gmelina arborea*)林为 9.8 t/hm²·a (Lasco 等,1998)。

4 讨论与结论

通过研究发现云南热区山桂花(*Paramichelia baillonii*)纯林,西南桦(*Betula alnoides*)纯林,高阿丁枫(*Altingia excelsa*)纯林,马尖相思(*Acacia mangium*)纯林以及西南桦+山桂花混交林和西南桦+马尖相思混交林几种 7 年生人工林生态系统的 C 密度在 109.37~136.97 t/hm² 之间。它们的 C

密度明显高于当地的次生林及王效科等对我国黑松、油松、马尾松、杉木、柳杉、水杉和桉树的幼龄人工林的C密度总体估计值($<15\text{ t/hm}^2$)。从林分现在的C密度可以看出云南热区的这几种人工林到中幼林阶段就可以形成相当规模的C库了。

表4 各林分系统年固C量(t/hm^2)
Table 4 Rate of carbon sequestration of plantations at age of 7 years

林分类型 Type of plantation	年固C量 Rate of carbon sequestration
山桂花纯林 <i>Paramichelia baillonii</i>	3.97
西南桦纯林 <i>Betula alnoides</i>	4.17
西南桦+山桂花混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Paramichelia baillonii</i>	5.87
西南桦+高阿丁混交林 <i>Betula alnoides</i> + <i>Altingia excelsa</i>	6.69
高阿丁枫纯林 <i>Altingia excelsa</i>	6.13
马尖相思纯林 <i>Acacia mangium</i>	7.03
热带次生林(10年生) Tropical secondary forest	2.33

研究表明山桂花(*Paramichelia baillonii*)纯林,西南桦(*Betula alnoides*)纯林,高阿丁枫(*Altingia excelsa*)纯林,马尖相思(*Acacia mangium*)纯林以及西南桦+山桂花混交林和西南桦+马尖相思混交林几种7年生人工林生态系统的年固C量在 $3.97\sim 7.03\text{ t/hm}^2\cdot\text{a}$ 之间,基本上与国际大气变化组织IPCC温室气体调查中使用的热带人工林的年固C量估计值一致,但低于典型的热带地区一些人工林的固C水平。这与云南热区的水热及土壤条件是符合的。几种人工林较高的年固C量表明了它们具有较高的固C潜力。

几种造林树种中,除马尖相思(*Acacia mangium*)外,都是当地的乡土树种,马尖相思也表现出了很好的引种适应性(杨绍增等,1996)。采用这些树种在云南热区大规模造林的风险很小。利用它们较高的固C能力在云南热区大面积的荒山草地上开展以吸固温室气体 CO_2 为项目目标的造林项目很有前景。

参考文献:

杨绍增,王瑞荣,王达明. 1996. 马尖相思利用价值的研究 [A]. 热区造林树种研究论文集[C]. 昆明: 云南科技出版社, 215-225.
Dixon RK. 1993. Forest sector carbon offset project: near

term opportunities to mitigate greenhouse gas emission[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, **70**: 561-577.
Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA. 1997. Greenhouse Gas Inventory Workbook, International Panel on Climate Change(IPCC), Organization for Economic Co-operation and Development(OECD) and the International Energy Agency(IEA)[J]. *Paris, France*, **5**: 1-54.
Jiang YD(蒋云东), Wang DM(王达明), Zhou Y(周云). 2002. Study of land capacity recovery of six kinds of plantations in Xishuangbanna(西双版纳几种人工林地力恢复趋势研究)[J]. *Yunnan Forestry Science And Technology* (云南林业科技), **21**(3): 50-54.
Lasco RD, Estrella R, Corpuz EB. 1998. Carbon dioxide sequestration potential of different landuses in Mt. Makiling. Poster paper presented at the International Conference on Tropical Forests and Climate Change, Manila, Philippines, October 19-21.
Lasco RD. 1999. Quantitative estimation of carbon storage and sequestration of tropical forest ecosystem[J]. *Professional Chair Lecture*. UPLB. College, Laguna
Lasco RD. 2000. Forest land use change in the Philippines and climate change mitigation[J]. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, **5**: 81-97.
Lugo AE, Brown S. 1992. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon[J]. *Forest Ecology and Management*, **54**: 239-255.
Sang WG(桑卫国), Ma KP(马克平), Chen LZ(陈灵芝). 2002. Preliminary study on carbon cycling in warm temperate deciduous broad-leaved forest(暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算)[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **26**(5): 543-548.
Tang JW(唐建维), Zhang JH(张建候), Song QS(宋启示). 1998. Preliminary study on biomass production of tropical secondary forest in Xishuangbanna(西双版纳热带次生林生物量的初步研究)[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **22**(6): 21-26.
Wang DM(王达明), Chen HW(陈宏伟), Liu YG(刘永刚). 2002. Study of sustainable management of plantations in Xishuangbanna(西双版纳人工林可持续经营研究)[J]. *Yunnan Forestry Science And Technology* (云南林业科技), **21**(3): 2-13.
Wang XK(王效科), Feng ZW(冯宗炜), Ouyang ZY(欧阳志云). 2001. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China(中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度的研究)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **12**(1): 13-16.