

四川省及重庆地区森林植被碳储量动态

黄从德, 张 健*, 杨万勤, 唐 宵, 赵安玖

(四川农业大学林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要:四川省及重庆市地区森林植被是我国第二大林区-西南林区的主体,位于“世界第三极”——青藏高原东缘。在建立森林乔木层生物量与蓄积量回归模型的基础上,按林分类型测定含碳量,结合四川 4 次森林资源清查数据,估算了不同时段碳储量。各林分类型含碳量在 46.75% ~ 54.89% 之间,平均含碳量为 51.09%,针叶林平均含碳量(52.82%)大于阔叶林(49.37%);四川森林植被碳储量从 1988 年的 383.04TgC 增加到 2003 年的 523.57TgC,增加了 140.53TgC,年均增长率 2.11%,比全国年均增长率高出 0.22%,表明四川森林植被是 CO₂ 的一个汇。4 次调查的森林植被平均碳密度分别为 38.93、38.68、39.17、41.66 MgC/hm²,呈现增加趋势,表明森林植被的碳汇功能不断加强;成熟林碳储量占同期的 64.15%、63.89%、65.33%、60.82%,但所占比重呈下降的趋势,幼中林碳储量的比重不断上升,表明森林植被的碳吸存潜力大;森林植被碳储量主要分布在天然林中,占同期碳储量的 90% 以上,但人工林的碳储能力正在逐步提高,人工林碳年均增长率(7.17%)明显大于天然林(1.83%),表明人工林将在研究区域森林植被碳汇功能中扮演重要的角色。研究区森林植被碳储量占同期全国碳储量的比例呈增加趋势,可见,研究区森林植被在全国森林碳汇中具有重要的作用和地位。

关键词:森林生物量;含碳量;碳储量;碳密度;碳动态

文章编号:1000-0933(2008)03-0966-10 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City

HUANG Cong-De, ZHANG Jian*, YANG Wan-Qin, TANG Xiao, ZHAO An-Jiu

Sichuan Provincial Key Lab of Forestry Ecological Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0966 ~ 0975.

Abstract: Forest in Sichuan (including Chongqing) locate in the eastern of Tibet Plateau honored by the third pole in the world. As a principal part of SW forest region, the second largest forest region in China, the forest carbon stock plays an important role in global carbon cycle, implying that it is important for forest carbon stock evaluation to understand the role of the forest in mitigating climate change. Therefore, carbon stocks in Sichuan (including Chongqing) forest at different phases were evaluated to understand the contribution of Sichuan forest to mitigate climate change, employing the methods of establishing the model of forest biomass and volume, measuring carbon content in different stands and integrating four provincial forest inventory data in Sichuan (including Chongqing). Mean carbon content of the studied forest stands was 51.09%, ranging from 46.75% to 54.89%, and depending on the forest stands. On average, carbon content was 52.82% in the coniferous forest, which was significantly higher than that in the broadleaved forest (49.37%). Forest carbon stock

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAC01A11);四川科技攻关资助项目(05SG023-009)

收稿日期:2007-08-15; **修订日期:**2008-01-20

作者简介:黄从德(1969~),男,四川内江人,博士生,副教授,主要从事林业生态工程研究. E-mail: lyxq100@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: auldkgk@sicau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Jointly supported by Key Technologies R&D Program, China (No. 2006BAC01A11), and Program of Sichuan S & T Research (No. 05SG023-009)

Received date: 2007-08-15; **Accepted date:** 2008-01-20

Biography: HUANG Cong-De, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in forestry ecological engineering. E-mail: lyxq100@yahoo.com.cn

in Sichuan increased 140.53 Tg C from 383.04 TgC in 1998 to 523.57 TgC in 2003 and by 2.11% annually during the study period, which was more 0.22% than that of the mean increment in China, implying that Sichuan (including Chongqing) forest is carbon sink in atmospheric carbon dioxide, and contributes to climate change mitigation. Correspondingly, average carbon density in the forest was 38.93, 38.68, 39.17 MgC/hm², and 41.66 MgC/hm², respectively, and showed the increasing trend during the period of four forestry inventories, implying that the potential of carbon sink in Sichuan (including Chongqing) forest was increasing. Carbon stock in mature forest showed the declining trend in the study period, which accounted for 64.15%, 63.89%, 65.33%, and 60.82% of the total in the corresponding phase, respectively, while that in young and middle-aged forest showed the opposite, showing that the study forest has a strong potential of carbon sequestration. Meanwhile, the potential of carbon sequestration in the plantation increased continuously although natural forest stored carbon more than 90% for the same stage, resulting that annual increment of carbon stock in the plantation was 7.17% in comparison with 1.83% in natural forest. The results showed that man-made forest played an important role in enhancing forest carbon sequestration in the study region. Furthermore, the results also showed that Sichuan the study forest played an important and irreplaceable role in enhancing national forest carbon sequestration due to higher carbon sequestration in the forest in comparison with national level.

Key Words: forest; biomass; carbon content; carbon stock; carbon density; dynamics

森林是陆地生态系统的主体,在减缓全球气候变化中起着重要的和不可替代的作用^[1]。过去 20 多年中,各国学者围绕森林生态系统的碳储量、碳密度和碳汇功能做了大量的研究工作,取得了显著的成就^[2~7]。但迄今为止,有关 CO₂“失汇”之谜仍然无法回答(Missing sink)^[8~10]。这可能是由于对陆地生态系统,尤其是森林生态系统的碳动态缺乏精确的了解^[8,11]。因此,为了正确评估森林在全球碳平衡中的作用,在国家(或地区)尺度上利用森林清查资料对森林的碳动态进行更为细致的研究也日益成为人们关注的重点^[7]。我国对森林植被碳储量的研究起步较晚,且大尺度森林植被碳储量的研究多,而对于区域范围内的小尺度森林碳储量的研究较少,仅限于我国中南部个别地区^[12~14]。现在的问题是,利用文献数据所建立的森林乔木层生物量-蓄积量模型在准确度及可靠性上存在较大缺陷;在已有的区域和国家尺度的森林植被碳储量估算中,大多采用 45.00% 或 50.00% 作为所有森林植被类型的平均含碳量,只有极少数根据不同森林植被类型采用了不同的含碳量^[12]。因此,使得目前对森林生态系统碳储量及碳汇能力的估算无论是在区域尺度上还是国家尺度上都存在极大的不确定性^[3~7]。

四川(含重庆市)森林是西南林区的主体,地处“世界第三极”——青藏高原东缘,是全球气候变化的敏感响应区^[15]。同时,四川森林绝大部分分布于长江的上游地区,具有重要的水源涵养的防护功能,是维系长江流域生态平衡的主要天然屏障。但目前对该区森林植被的碳储量以及动态变化研究以及在缓解大气 CO₂ 浓度等方面研究甚少。本文以四川(含重庆市)森林植被为例,按林分类型进行含碳量测定,用平均木法测定森林乔木层生物量,利用实测生物量和蓄积量数据建立回归模型,并结合该省 4 次森林资源清查资料,分析了近 15a 来四川森林植被碳储量及其动态,旨在为我国森林生态系统碳储量和生态补偿提供基础数据。

1 资料来源和研究方法

1.1 研究区概况

四川(含重庆市)位于我国西南部长江上游地区,处于我国大陆地势三大阶梯中的第一级和第二级,即处于第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡带,高差悬殊,西高东低的特点特别明显,地理坐标为东经 92°21′~108°12′和北纬 26°03′~34°19′之间。在我国三大地域格局中,属于东部季风湿润区和青藏高原区,而且紧邻西北内陆干燥区,实为三大地域的接合部,这种地理位置必然导致境内自然地理景观的错综复杂和过渡交替现象。在地理分布上表现出成分复杂、种类繁多、类型丰富等特点。在空间分布上则具有纬向、经向和垂直方向的“三向地带性”特征,对全球气候变化十分敏感。

1.2 资料来源

本研究所使用的森林资源数据是 1984 ~ 1988 年、1989 ~ 1993 年、1994 ~ 1998 和 1999 ~ 2003 年 4 次四川(含重庆市,下同)森林资源连续清查资料。

1.3 研究方法

1.3.1 森林乔木层生物量测定

在各林分类型中设置 30m × 30m 的标准地,选取 1 ~ 2 株平均木伐倒后采用分层切割法,直接测定各段干、枝、叶鲜重,地下根系采用随机 1/4 挖法,去土后测定鲜重,同时收集各器官样品。将样品带会实验室在 80℃ 恒温下烘干至恒重,求出各器官含水率,推算出平均木各器官生物量。以标准地平均木生物量乘以株数计算单位面积生物量,整理各林分类型的生物量和蓄积量数据,采用换算因子连续函数法,对生物量进行多目标函数拟合,而后从模型参数的相关系数、残差平方和以及差异性检验($P < 0.01$)综合考虑,确定 $w = av^b$ 为最优模型(表 1),用以计量森林乔木层生物量。

1.3.2 含碳量的测定

林分优势树种各器官含碳量采用重铬酸钾-硫酸氧化法进行测定。假定处于不同生长阶段以及生长在不同区域的同一树种各器官的含碳量基本相同,应用标准地各器官生物量实测数据和各器官含碳量,计算了各林分类型平均含碳量^[16]。

表 1 森林乔木层生物量与蓄积量关系模型
Table 1 Relationship between biomass and volume in tree layer of forest

林分类型 Forest types	生物量(w)-蓄积量 (v)回归方程 RQ of biomass-volume	样本数(N) Number of sample	相关系数(R) Correlation coefficient	残差平方和(Q^2) Residual Square Sum
冷、云杉 <i>Abies</i> and <i>Picea</i>	$w = 2.137v^{0.7532}$	25	0.9793 **	3872.1
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$w = 0.1807v^{1.2771}$	11	0.9847 **	1456.3
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$w = 1.0513v^{0.9373}$	20	0.9773 **	803.7
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	$w = 0.8569v^{0.8564}$	16	0.9841 **	34.7
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	$w = 1.2237v^{0.8592}$	15	0.9905 **	883.9
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	$w = 0.8707v^{1.0239}$	14	0.9986 **	31.9
其它松类 Other pines and conifer forests	$w = 0.5272v^{1.0793}$	19	0.9978 **	32.5
桉属 <i>Eucalyptus</i>	$w = 2.5878v^{0.6261}$	16	0.9635 **	57.7
杨属 <i>Populus</i>	$w = 0.7629v^{0.9505}$	39	0.9885 **	121.9
楠、樟 <i>Phoebe</i> and <i>Cinnamomum</i>	$w = 1.0726v^{1.0128}$	21	0.9835 **	217.9
栎类、硬阔 <i>Quercus</i> and <i>Hardwood</i>	$w = 0.6573v^{1.0502}$	11	0.9823 **	68.0
软阔 <i>Softwood</i>	$w = 2.1529v^{0.6085}$	14	0.9503 **	30.3

** $P < 0.01$

1.3.3 森林植被碳储量计算

森林植被碳储量由乔木层、灌木层、草本层和枯落物层的碳储量组成。森林植被碳储量为森林生物量乘以含碳量^[7]。本文计算的森林植被碳储量是指乔木层碳储量,未包括灌木层、草本层以及枯落物层碳储量。

1.4 数据分析

数据统计、回归分析、差异性检验采用 SPSS10.0 软件和 Excel 进行。

2 结果与分析

2.1 林分平均含碳量

各林分类型平均含碳量为 51.09%,变化范围在 46.75% ~ 54.89% 之间(表 2)。水杉林具有最大的平均含碳量(54.89%),青冈林的平均含碳量最低,为 46.75%,两者相差了 8.14%。各林分类型平均含碳量中,针叶林平均含碳量为 52.82%,阔叶林平均为 49.37%,针叶林普遍高于阔叶林,平均高出 3.45%,这与其他人的研究结果基本一致^[16,17]。可见,采用 45.00% 或 50.00% 作为统一值来计算森林植被碳储量,可能导致较大误差。

表 2 林分按生物量加权的平均含碳量

Table 2 Carbon content in stand weighted by biomass

林分类型 ^① Forest types	含碳量 (C%)	样本数 Number of sample (N)	林分类型 Forest types	含碳量 (C%)	样本数 Number of sample (N)	林分类型 Forest types	含碳量 (C%)	样本数 Number of sample (N)	林分类型 Forest types	含碳量 (C%)	样本数 Number of sample (N)
A	52.59(1.21) *	11	G	53.14(1.58)	12	M	51.60(2.20)	13	S	50.05(3.88)	14
B	52.62(1.49)	13	H	52.11(3.17)	15	N	49.56(1.57)	20	T	46.75(1.14)	11
C	54.37(1.97)	12	I	53.65(1.25)	12	O	50.41(1.85)	19	U	50.50(0.65)	10
D	51.44(4.06)	20	J	54.79(1.98)	14	P	49.38(0.21)	14	V	49.14(1.60)	11
E	52.16(2.00)	12	K	54.89(2.69)	14	Q	50.19(2.70)	16			
F	52.81(1.89)	16	L	50.50(1.10)	12	R	48.32(0.43)	11			
针叶平均 Mean of conifer		52.82(2.51)		阔叶平均 Mean of broadleaf				49.37(2.43)			
总体平均 Overall Mean		51.09(4.19)									

① A 落叶松 *Larix masteriana*, B 火炬松 *Pinus taeda*, C 华山松 *Pinus armandii* Franch, D 马尾松 *Pinus massoniana*, E 湿地松 *Pinus elliottii*, F 云南松 *Pinus yunnanensis*, G 油松 *Pinus tabulaeformis*, H 柏木 *Cupressus funebris*, I 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, J 柳杉 *Cryptomeria fortunei*, K 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, L 冷杉 *Abies georgei*, M 云杉 *Picea asperata*, N 杨属 *Populus*, O 枫树 *Liquidambar formosana*, P 桦木 *Betula* spp, Q 桉树 *Eucalyptus*, R 栎类 *Quercus* spp, S 栎木 *Alnus cremastogyne*, T 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, U 润楠 *Machilus nanmu*, V 香樟 *Cinnamomum camphora*.

* 括号内数字为变异系数(%) Data in the bracket represent variation coefficient (%)

2.2 各时期的森林植被碳储量

四川森林植被碳储量从 1988 年的 383.04TgC 增加到 2003 年的 523.57TgC(表 3),增加了 140.53TgC,年均增加(15a)9.37TgC,年均增长率 2.11%。从 1988 年到 1993 年的 5a 中,森林植被碳储量增加 17.20TgC,占碳增量的 12.24%,年均增长率为 0.88%,从 1993 年到 1988 年的 5a 中,森林植被碳储量增加了 68.86TgC,占碳增量的 49.00%,年均增长率 3.23%,从 1999 年 2003 年 5a 中,碳储量增加了 54.47TgC,占碳增量的 38.76%,年均增长率为 2.22%。可见,从 1988 年到 2003 年的 15a 中四川森林植被起着碳汇的作用。四川森林植被的这种变化趋势与同时期中国森林植被碳储量的总体变化趋势相同,70 年代末以来,中国森林植被起着碳汇作用,且碳汇功能越来越强^[14]。

2.3 不同林分类型碳储量动态

所有林分类型中,冷、云杉林、栎类及硬阔林的碳储量在各调查期均较高(表 3)。在 4 次森林资源清查中,它们的碳储量分别占到同期碳总量的 60.06%、66.03%、67.61%、64.89%,这与这些林分面积较大和林分年龄密切相关。4 次森林资源清查中,冷杉林、云杉林、栎林及硬阔林的面积分别占同期总面积的 42.65%、41.53%、39.84%、40.18%,成熟林面积分别占其总面积的 59.93%、61.72%、60.60%、56.11%。研究还表明,从 1988 年到 2003 年冷杉林、云杉林、栎林及硬阔林的碳储量共增加 86.72TgC,占全省森林植被碳增量的 61.71%,表明这几种森林植被类型在全省森林植被中占有重要的地位。因此,这些森林植被类型碳的动态变化将极大地影响到全省整个森林的碳源汇功能。

2.4 不同龄级的森林植被碳储量动态

由表 4 可见,在 4 次森林资源清查中,成熟林中的碳储量最高,但所占比重呈现下降趋势,分别占同期碳储量的 64.15%、63.89%、65.33%、60.82%,而幼、中林碳储量比重呈上升趋势,分别占同期碳储量的 35.85%、36.11%、34.67%、39.18%;成熟林在各时期的碳增量中的比重呈下降的趋势,分别为 58.14%、73.69%、21.98%,而幼、中林呈上升的趋势,分别为 41.86%、26.31%、78.02%;成熟林的碳年均增长率呈下降趋势,分别为 0.80%、3.69%、0.77%,幼、中林呈上升趋势,分别为 1.03%、2.39%、4.75%。这与森林的年龄结构有关。在 4 次森林清查中,四川森林幼中林面积占到同期森林面积的 60% 以上,且呈上升趋势,它们正在逐步发挥其主导作用。随着幼中林的发展,这种作用将进一步加强,可见四川森林植被将是一个潜在的巨大碳库。研究还表明,从 1988~2003 年的 15a 间,以 1999~2003 年幼中林碳增量的贡献量和年均增长率

表 3 四川及重庆市地区不同时期各林分类型碳储量^①

Table 3 Carbon stock of the main forests stands in different period in Sichuan and Chongqing

林分类型 Forest types	1984 ~ 1988			1989 ~ 1993		
	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density
	(10^2 hm^2)	(TgC)	(MgC/hm^2)	(10^2 hm^2)	(TgC)	(MgC/hm^2)
冷、云杉 <i>Abies</i> and <i>Picea</i>	27374	207.33	75.74	28089	213.11	75.87
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	4152	5.24	12.62	4714	6.61	14.02
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	11174	16.18	14.48	12080	18.31	15.16
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	8541	24.41	28.58	8740	25.20	28.83
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	8711	12.39	14.22	10579	15.17	14.34
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	400	0.59	14.75	927	1.54	16.61
其它松类 Other pines and conifer forests	7652	28.53	37.28	7420	27.23	36.70
桉属 <i>Eucalyptus</i>	64	0.04	6.25	128	0.12	9.38
杨属 <i>Populus</i>	1541	3.60	23.36	1735	3.97	22.88
楠、樟 <i>Phoebe</i> and <i>Cinnamomum</i>	886	3.13	35.33	820	2.94	35.85
栎类、硬阔 <i>Quercus</i> and Hardwood	14589	45.72	31.34	14884	51.17	34.38
软阔 Softwood	13301	35.88	26.98	13348	34.87	26.12
合计 Total	98385	383.04	38.93	103464	400.24	38.68
林分类型 Forest types	1994 ~ 1998			1999 ~ 2003		
	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density
	(10^2 hm^2)	(TgC)	(MgC/hm^2)	(10^2 hm^2)	(TgC)	(MgC/hm^2)
冷、云杉 <i>Abies</i> and <i>Picea</i>	31622	225.62	71.35	30637	221.74	72.38
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	5638	8.07	14.31	5808	10.91	18.78
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	13661	23.18	16.97	14114	31.07	22.01
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	9615	22.70	23.61	9126	25.44	27.88
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	13647	26.30	19.27	15770	36.76	23.31
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	1479	2.45	16.57	1716	3.87	22.55
其它松类 Other pines and conifer forests	9277	39.35	42.42	9705	47.32	48.76
桉属 <i>Eucalyptus</i>				243	0.29	11.93
杨属 <i>Populus</i>	2221	6.16	27.74	1794	2.79	15.55
楠、樟 <i>Phoebe</i> and <i>Cinnamomum</i>	1042	2.51	24.09	824	1.96	23.79
栎类、硬阔 <i>Quercus</i> and Hardwood	16100	91.55	56.86	19868	118.03	59.41
软阔 Softwood	15470	21.21	13.71	16077	23.39	14.55
合计 Total	119772	469.10	39.17	125682	523.57	41.66

表 4 四川及重庆市地区不同时期森林植被各龄组碳储量

Table 4 The carbon stock of the main forests at different age class in different period in Sichuan and Chongqing

调查时间 Inventory time	合计 Total			幼龄林 Young		
	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density
	($\times 10^2 \text{ hm}^2$)	(TgC)	(MgC/hm^2)	($\times 10^2 \text{ hm}^2$)	(TgC)	(MgC/hm^2)
1984 ~ 1988	98385	383.04	38.93	27527	28.59	10.38
1989 ~ 1993	103464	400.24	38.68	25459	25.13	9.87
1994 ~ 1998	119772	469.10	39.17	24226	23.79	9.82
1999 ~ 2003	125682	523.57	41.66	26932	34.68	12.88
调查时间 Inventory time	中龄林 Middle-aged			成熟林 Mature		
	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density	面积 Area	碳储量 Carbon stock	碳密度 Carbon density
	($\times 10^2 \text{ hm}^2$)	(TgC)	(MgC/hm^2)	($\times 10^2 \text{ hm}^2$)	(TgC)	(MgC/hm^2)
1984 ~ 1988	34176	108.72	31.81	36682	245.73	66.99
1989 ~ 1993	39914	119.38	29.91	38091	255.73	67.14
1994 ~ 1998	51150	138.84	27.14	44396	306.47	69.03
1999 ~ 2003	54242	170.45	31.42	44508	318.44	71.55

最大,而这期间正是我国大规模实施退耕还林、天保工程的时期,可见这两大林业生态工程在缓解 CO_2 浓度上升方面具有重要的作用。

2.5 天然林和人工林植被碳动态差异

在 4 次森林资源清查中(表 5),人工林碳储量分别占同期碳储量的 3.58%、4.12%、4.84%、7.41%,碳储量比例呈增加趋势,天然林占同期碳储量的 96.42%、95.88%、95.16%、92.59%,碳储量比例呈减少趋势;在研究期间人工林碳储量增加 25.08TgC,占全省碳增量的 17.85%,而天然林碳储量增加 115.45TgC,占全省碳增量的 82.15%。究其原因与它们所占的面积有关。在调查期,天然林面积占到同期森林面积的 80% 以上,相应碳储量就大;人工林在各时期的面积呈现增加趋势,分别占同期总面积的 14.82%、17.54%、16.20%、18.00%,因而碳储量比重呈现增加的趋势。以上分析表明,四川森林植被碳储量主要分布在天然林中,天然林是四川森林植被碳汇功能的主要贡献者,说明天然林在全省森林植被碳汇功能中具有重要作用;同时人工林的碳储能力正在逐步提高。

研究还表明,人工林碳年均增长率(7.17%)明显大于天然林(1.83%),而且人工林碳年均增长速度呈增加的趋势,天然总体呈现减少的趋势(图 1)。其原因是在调查期各项林业工程新增加的森林大多是人工林,处于中、幼龄阶段,碳密度低,因而固碳潜力大。在研究期人工林和天然林碳密度总体呈现增加的趋势,但人工林碳密度明显小于天然林碳密度(表 5)。这意味着随着人工林的进一步发展,人工林的碳汇功能将更加突出,将在全省森林碳汇功能中扮演重要的角色。

表 5 四川及重庆市地区人工林和天然林在不同时期的碳储量

Table 5 The carbon stock of the artificial forest and natural forest in different period in Sichuan and Chongqing

调查时间 Inventory time	起源 Origin	面积 Area(10^2 hm^2)	碳储量 Carbon stock(TgC)	碳密度 Carbon density (MgC/hm^2)
1984 ~ 1988	人工 Artificial forest	14577	13.73	9.42
	天然 Natural forest	83808	369.31	44.07
1989 ~ 1993	人工	18146	16.47	9.08
	天然	85318	383.77	44.98
1994 ~ 1998	人工	19401	22.72	11.71
	天然	100371	446.38	44.47
1999 ~ 2003	人工	22627	38.81	17.15
	天然	103055	484.76	47.04

2.6 森林植被碳密度动态

在 4 次森林资源调查中(表 3),森林植被平均碳密度分别为 38.93、38.68、39.17、41.66 MgC/hm^2 ,呈现增加趋势;各森林植被类型碳密度介于 6.25 ~ 75.74 MgC/hm^2 、9.38 ~ 75.87 MgC/hm^2 、13.71 ~ 71.35 MgC/hm^2 、11.93 ~ 72.38 MgC/hm^2 ,变动幅度呈现减小的趋势;各时期大于全省森林植被平均碳密度的面积比例呈增加趋势(分别为 27.82%、27.15%、47.59%、47.91%);碳密度随着年龄的增加而增大(表 4),表现为成熟林 > 中龄林 > 幼龄林。这主要是 20 世纪 80 年代中后期,重视对森林的保护(如天然林保护工程等),并采取了封育措施,使得森林得到保护,各森林植被类型的质量在不断提高。同时也说明随着森林植被的生长,以及各项林业保护政策的进一步实施,其碳固定能力将不断提高。

3 讨论与结论

3.1 含碳量和区域生物量模型对碳储量估算的影响

由于获取各种植被类型的含碳量比较困难,国内外研究者在估算碳储量及碳通量时大多采用的含碳量为 45.00% 和 50.00%^[12]。但不同林型^[16,17]、同一树种的不同器官的含碳量^[16,18,19]、同一林型的不同生长阶段^[18,19]、不同起源的同一树种^[20],差异可能较大,从而对森林植被碳储量的估算产生不同程度的影响。本研究在假定处于不同生长阶段以及生长在不同区域的同一树种各器官的含碳量基本相同的基础上,测定林分优

势树种各器官含碳量,再根据各器官生物量的权重来计算林分平均含碳量,结果表明各林分类型含碳量在 46.75%~54.89% 之间,平均含碳量为 51.09%,大于 45.50% 和 50.00%。这意味着,以 45.00% 作为平均含碳量转换系数来估算森林乔木层的碳储量或碳通量时可能带来较大的误差,以 50.00% 作为转换系数,其结果优于以 45.00% 作为转换系数的估算结果。可见,为了更准确的估算区域和国家尺度上的森林植被碳储量,应该根据不同的林分类型采用不同的含碳量作为转换系数。

森林植被生物量是森林固碳能力的重要指标,因此,准确估算区域森林植被生物量对研究陆地生态系统的生产力和碳循环具有重要的意义^[21]。方精云等运用

生物量转换因子连续函数法,利用已发表的生物量文献数据,建立了生物量-蓄积量的线性模型,估算了我国森林植被生物量和碳储量^[22]。但王效科等认为上述的估计没有充分考虑林龄对林木蓄积量与生物量之间关系的影响、林下植物生物量和对我国森林生态系统碳密度的分布规律和影响因素的分析^[23]。赵敏等利用近 300 组生物量和蓄积量数据,建立了各森林植被类型生物量-蓄积量的双曲线模型,并估算出全国森林植被碳储量,并指出所建模型克服了将森林植被生物量与其蓄积量之比作为常数的不足^[24]。王玉辉等以我国落叶松林为例,分人工和天然建立了落叶松林的双曲线模型,所建模型也克服了将森林植被生物量与其蓄积量之比作为常数的不足,并考虑了林龄和起源对于森林生产力的影响^[25]。杨昆等从区域角度出发,利用 69 组不同龄级的样地实测生物量数据,拟合了珠江三角洲主要森林植被类型的生物量和蓄积量之间的回归模型,计算结果比用全国森林植被生物量的估算方程低 34%^[21]。但无论如何,以上研究仅从模型方面考虑对碳储量估算的影响,对不同林分 and 不同器官含碳量差异对碳储量估算的影响重视不够。本文从区域角度出发,建立蓄积量与生物量的回归模型,并按林分类型采用不同的含碳量估算了四川森林植被不同时期的碳储量。若本研究采用通用转换系数 45.00% 和 50.00% 进行计算(仅以 1989~1993 年为例,下同),得到四川森林植被碳储量分别为 349.83、388.70TgC,比本研究结果分别低了 12.59% 和 2.88%,这可能是造成碳丢失的一个重要原因之一;若采用方精云等建立的全国尺度生物量与蓄积量模型^[5],转化系数分别用 45.00% 和 50.00% 进行计算,得到四川森林植被碳储量分别为 488.79、543.10TgC,比本研究结果分别高了 22.12% 和 35.69%,这可能是模型的尺度转换问题所引起的。可见,基于实测的林分含碳量与区域生物量-蓄积量模型相结合的方法对于精确估算区域森林植被碳储量具有重要意义,但仍需深入研究。

3.2 人工林经营管理与人工林碳储量

通过植树造林和人工林经营等增强陆地碳汇功能是清洁发展机制(Clear development mechanism, CDM)中最主要的途径之一。Lal 将提高人工林的经营和管理水平,增强人工林土壤汇功能称之为一种“双赢策略(Truly win-win strategy)”和“减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择”^[26]。目前,许多欧美国家正在将大面积的弃耕地恢复成森林植被,而且加大了造林碳吸收、碳有效储存时间和碳增汇对策技术研究力度,以面对国际碳贸易和履行《京都协议》(Kyot Protocol)^[27~30]。方精云等研究表明,由于森林面积的扩大和森林的再生长,中国森林植被碳库从 20 世纪 70 年代后期的 4.38PgC 增加到 1998 年的 4.75PgC,平均每年积累量为 0.021PgC,这表明中国的森林植被起着—个 CO₂“汇”的作用,并指出中国森林植被碳蓄积量增加的主要贡献者是人工林^[5]。FAO 发布的《2005 年全球森林资源评估报告》指出,2000~2005 年期间,世界森林面积仍在减少,但净损失在减少,这与中国大规模的植树造林有关,对于减缓全球变化具有积极的贡献^[31]。本研究表明,人工林碳储量仅占同期碳储量的 3.58%、4.12%、4.84%、7.41%。这主要是由于人工林面积小,同

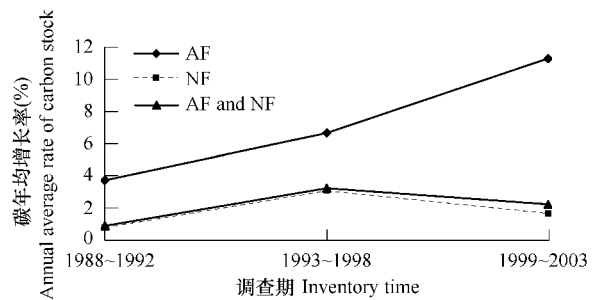


图1 不同时期人工林和天然林碳的年均增长速度

Fig. 1 Annual average rate of carbon stock of the artificial forest and natural forest in different period

AF: 人工林 Artificial forest; NF: 天然林 Natural forest; AF and NF: 人工林和天然林 Artificial forest and Natural forest

时人工林中幼、中林所占的比重过大所造成的,到 2003 年幼中林所占比重高达 88.63%,而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,也是导致人工林植被碳储量较低的一个重要原因^[32]。研究还表明,四川人工林碳储量年均增长率为 7.17%,明显大于天然林(1.83%),但直至 2003 年,四川人工林碳密度仅为 17.15MgC/hm²,明显低于全国人工林碳密度(31.11MgC/hm²)^[5]。这一方面意味着四川人工林碳储量较低,但同时也意味着提高现有人工林的经营与管理水平,有助于进一步增强四川森林的碳汇功能。

3.3 四川森林植碳储量在全国碳储量中的贡献

以大气 CO₂ 浓度增加和温度升高为主要特征的全球气候变化正在深刻地改变着陆地生态系统的结构和功能,威胁着人类的生存安全和健康,成为各国政府和科学家最为关注的全球性重大生态与环境科学问题^[1~3]。森林作为陆地生态系统的主体,其碳储量能够消减大气中日益增加的 CO₂,在稳定全球气候变化、减缓温室效应等方面发挥重要的作用^[1,22]。同时《京都议定书》又使碳减排增汇成为与国家的政治、经济、外交等密切相关的生态与环境科技问题^[1,32]。我国学者对我国的森林植被碳储量及其变化进行了研究,结果表明我国森林植被碳汇功能明显^[5,7,23]。本研究表明,四川森林植被碳储量从 1988 年到 2003 年增加了 140.53TgC,占全国森林植被在同期碳增加量(1440TgC)的 9.76%(表 6),各时期碳储量占同期全国碳储量的比例呈增加趋势(分别为 8.61%、8.64%、9.88%、8.89%),而森林面积比例呈减小趋势(分别为 9.63%、9.52%、11.32%、8.80%)。同时,四川森林植被碳储量年均增长率(2.11%)比全国年均增长率(1.89%)高 0.22%。而我国第一大林区的重要省份黑龙江省在相同时间内,森林植被碳储量增加了 35.0TgC,仅占全国森林植被在同期碳增加量的 2.43%,森林植被碳年均增长率(0.40%),比全国年均增长率低 1.49%。研究还表明,四川森林植被各时期的平均碳密度呈增加趋势(分别为 38.93、38.68、39.17、41.66MgC/hm²)。这种变化趋势意味着四川森林植被碳汇作用不断增强,储碳能力将继续提高,同时也说明四川森林植被在全国森林碳储量和提高全国森林碳汇功能方面扮演着重要的角色。

表 6 全国和四川(含重庆)森林面积和碳储量^①

Table 6 Forest area and total carbon stock with different periods in China and Sichuan (including Chongqing)

区域 Area	清查期 Inventory time	面积 Area (×10 ⁴ hm ²)	碳储量 Carbon stock (TgC)	碳密度 Carbon density (MgC/hm ²)	文献 Reference
全国 China	1984 ~ 1988	10219	4450	43.53	[5]
	1989 ~ 1993	10863	4630	42.58	
	1994 ~ 1998	10582	4750	44.91	
	1999 ~ 2003	14279	5890	41.27	
	平均 Mean			43.07	
四川(含重庆) Sichuan (including Chongqing)	1984 ~ 1988	984	383.04	38.93	本文 This paper
	1989 ~ 1993	1035	400.24	38.68	
	1994 ~ 1998	1198	469.10	39.17	
	1999 ~ 2003	1257	523.57	41.66	
	平均 Mean			39.61	
黑龙江 Heilongjiang	1984 ~ 1988	1555	566.1	36.40	[12]
	1989 ~ 1993	1611	588.0	36.50	
	1994 ~ 1998	17560	621.6	35.41	
	1999 ~ 2003	1798	601.1	33.44	
	平均 Mean			35.44	

①1999 ~ 2003 年全国碳储量采用文献[5]中方法进行估算 Carbon stock during the period of 1999 to 2003 in China was evaluated by the method of the reference [5]

References:

- [1] Yang W Q, Zhang J, Hu T X, *et al.* Forest Soil Ecology. Chengdu: Sichuan S & T Press, 2006. 1—2.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem. Science, 1994, 263: 185—190.
- [3] Fang J Y. Forest productivity in china and its response to global climate change. Acta Phytocool Sin, 2000, 24(5): 513—517.
- [4] Fang J Y. Forest biomass carbon pool of the middle and high latitudes in North Hemisphere is probably much smaller than present estimates. Acta

- Phytoecol Sin, 2000, 24(5): 635—638.
- [5] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. Acta Bot Sin, 2001, 43(9): 967—973.
- [6] Wang X K, Feng Z W. The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China. Chin J Ecol, 2000, 19(4): 72—74.
- [7] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733—740.
- [8] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. Science, 1990, 247: 1431—1438.
- [9] Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric dioxide and the ocean. Nature, 1993, 365: 119—125.
- [10] IPCC. Spacial Report for the UN Framwork Convention on Climate Change on Radiative Forcing of Climate Change, 1994. 1—13.
- [11] Keeling R F, Piper S C, Heimann M. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric CO₂ concentration. Nature, 1996, 381: 218—2211.
- [12] Jiao Y, Hu H Q. Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(12): 2248—2252.
- [13] Jiao X M, Xiang W H, Tiang D L. Carbon Storage of Forest Vegetation and Its Geographical Distribution in Hunan Province. Journal of Central South Forestry Universtiy, 2005, 25(1): 4—8.
- [14] Cao J, Zhang Y L, Liu Y H. Changes in forest biomass carbon storage in Hainan Island over the last 20 years. Geogr Res, 2002, 21(5): 551—560.
- [15] Zhang X S, Zhang D A. Allocation and study on global change transects in China. Quaternary Sciences, 1995, (1): 43—52.
- [16] Ma Q Y, Chen X L, Wang J, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. Journal of Beijing Forest University, 2002, 24(5/6): 96—100.
- [17] Fang Y T, Mo J M, Peng S L, *et al.* Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1685—1694.
- [18] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density storage and distribution of carbon Chinese fir plantation at fast growing stage. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 14—19.
- [19] Ruan H H, Jiang Z L, Gao S M. Preliminary Studies of Carbon Cycling in Three Types of Forests in the Hilly Regions of Southern Jiangsu Provlnce. Chin J Ecol, 1997, 16(6): 17—21.
- [20] Liu H, Lei R D. Estimating forest carbon storage and carbon density at Huoditang forestry region in the Qinling Mountains. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3): 138—142.
- [21] Yang K, Guan D S. Forest biomass and its dynamics in Pearl River Delta. Chin J Appl Ecol, 2007, 18(4): 705—712.
- [22] Yu G R. Globle Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003. 1—460.
- [23] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. Chin J Appl Ecol, 2001, 12(1): 13—16.
- [24] Zhao M, Zhou G S. Garbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(1): 50—53.
- [25] Wang Y H, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Estimating biomass and NPP of *Larix* forests using forest inventory data(FID). Acta Phytoecol Sin, 2001, 25(4): 420—425
- [26] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220: 242—258.
- [27] IGBP. Terrestrial Carbon Working Group. CLIMATE: The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. Science, 1998, 280: 1393—1394.
- [28] Silver W L, Ostertang R, Lugo A E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. Rest. Ecol, 2000, 8: 394—407.
- [29] Walker B H, Steffen W L, Canadell J eds. The Terrestrial Biosphere and Global Change, IGBP book series 4. Cambridge University Press, 1999. 1—18.
- [30] Fearnside P M. Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the “development mechanism”. Biomass and Bionenergy, 1999, 16: 171—189.
- [31] FAO. Production Yearbook. Food & Agric. Organization, Rome, Italy, 2006. 1—348.
- [32] Feng R F, Yang W Q, Zhang J. Artificial forest management for global change mitigation. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3870—3877.

参考文献:

- [1] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学. 四川: 四川科学出版社, 2006. 1~2.
- [3] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. 植物生态学报, 2000, 24(5): 513~517.

- [4] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算. 植物生态学报, 2000, 24(5): 635 ~ 638.
- [5] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967 ~ 973.
- [6] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统植物固定大气碳的潜力. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72 ~ 74.
- [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. 生态学报, 2000, 20(5): 733 ~ 740.
- [12] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. 应用生态学报, 2000, 16(12): 2248 ~ 2252.
- [13] 焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律. 中南林学院学报, 2005, 25(1): 4 ~ 8.
- [14] 曹军, 张懿铨, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551 ~ 560.
- [15] 张新时, 张奠安. 中国全球变化样带的设置与研究. 第四纪研究. 1995, (1): 43 ~ 52.
- [16] 马钦彦, 陈退林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 96 ~ 100.
- [17] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. 生态学报, 2003, 23(9): 1685 ~ 1694.
- [18] 方晰, 田大伦, 项文华. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14 ~ 19.
- [19] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究—含量与分布规律. 生态学杂志, 1997, 16(6): 17 ~ 21.
- [21] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲地区森林生物量及其动态. 应用生态学报, 2007, 18(4): 705 ~ 712.
- [22] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003. 1 ~ 460.
- [23] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13 ~ 16.
- [24] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50 ~ 53.
- [25] 王玉辉, 周广胜, 蒋延玲, 等. 基于森林资源清查资料的落叶松生物量和净生长量估算模式. 植物生态学报, 2001, 25(4): 420 ~ 425.
- [32] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, 2006, 26(11): 3870 ~ 3877.