

过去 50 年中国竹林碳储量变化

陈先刚^{1,2,3,4}, 张一平¹, 张小全⁵, 郭 颖⁶

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3 中国科学院研究生院, 北京 100039;
4. 西南林学院环境科学与工程系, 昆明 650224; 5. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;
6. 贵州省林业调查规划院, 贵阳 550003)

摘要:竹林是陆地生态系统中一个重要植被类型。中国是世界竹林分布中心, 有 39 个属 500 多个竹种, 竹林面积由 20 世纪 50 年代的 2453900hm² 增长到本世纪初的 4842600hm² (未计入台湾数据), 增加了 97.34%。调研 20 世纪 80 年代以来有关中国 (竹林) 的面积、生物量、碳密度、土壤有机碳等要素的研究成果, 经统计分析得出中国竹林的平均单位面积生物量、平均单株生物量、土壤有机质含量及碳密度。在此基础上, 依据过去 6 次全国森林资源连续清查的相关数据资料, 计算出过去 50a 中国竹林碳储量及其变化。结果表明, 我国竹林碳储量在过去 50a 呈增加趋势, 其中 1950~1962 期间为 322.65 TgC; 1977~1981 期间为 431.15TgC; 1984~1988 期间为 469.30TgC; 1989~1993 期间为 499.25 TgC; 1994~1998 期间为 555.57TgC; 1999~2003 期间为 639.32TgC。越到后期增加越快。预期随着中国森林面积的增加, 竹林碳储量仍将继续增加。

关键词:竹林; 生物量; 碳密度; 碳储量

文章编号:1000-0933(2008)11-5218-10 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Carbon stock changes in bamboo stands in china over the last 50 years

CHEN Xian-Gang^{1,2,3,4}, ZHANG Yi-Ping¹, ZHANG Xiao-Quan⁵, GUO Ying⁶

1 Xishuangbanna Tropical Plants Garden of CAS, Kunming 650223, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences of CAS, Beijing 100085, China

3 Graduate School of CAS, Beijing 100039, China

4 Dept. of Environmental Science and Project of SWFC, Kunming 650224, China

5 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China

6 Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5218 ~ 5227.

Abstract: Bamboo stand is one of important vegetation types in terrestrial ecosystem. China is located in the central distribution region of the globe. There are more than 500 bamboo species of 39 genera. The area of bamboo stand in China has been increasing from 2453900 hm² in 1950s to 4842600 hm² in early this century, increased by 97.34%. Estimating the carbon stock change in bamboo stands is therefore meaningful. The data for area, biomass, carbon fraction and soil organic carbon (SOC) of bamboo stands in China were collected from published literatures. Carbon stock and carbon stock changes in living biomass and soil organic matter of bamboo stands in China in last 50 years were estimated based on the collected data and the area of bamboo stands and the number of bamboos derived from China's National Forestry Inventory that were conducted once every five years. Our estimation indicates that the carbon stocks in both living biomass and soil

基金项目: 国家“973”资助项目 (2002CB412508)

收稿日期: 2007-11-13; 修订日期: 2008-08-29

作者简介: 陈先刚 (1959~), 男, 贵州金沙人, 博士生, 副教授, 主要从事森林气象、生态环境教学与研究. E-mail: ch-x-g@vip.sina.com

Foundation item: The project was financially supported by National “973” Project (No. 2002CB412508)

Received date: 2007-11-13; **Accepted date:** 2008-08-29

Biography: CHEN Xian-Gang, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in forest meteorology and eco-environment. E-mail: ch-x-g@vip.sina.com

organic matter in bamboo stands have been increasing since 1950s. The estimated carbon stock is 322.65 TgC for inventory period 1950 – 1962, 431.15TgC for 1977 – 1981, 469.30TgC for 1984 – 1988, 499.25 TgC for 1989 – 1993, 555.57TgC for 1994 – 1998 and 639.32TgC for 1999 – 2003. With the increasing forest area in China, carbon stock in China's bamboo is expected to continuously increase.

Key Words: bamboo stand; biomass; carbon fraction; carbon stock

森林植物在其生长过程中通过同化作用吸收大气中的二氧化碳,并将其固定在森林生物质中,其总储量达 893PgC(1Pg = 10^{15} g),占全球陆地碳储量的 45.70%^[1]。另一方面,森林被采伐和利用的过程是 CO₂排放的过程。从 1850 年到 1980 年由于植被破坏而造成的碳排放量估计达 90 ~ 120Pg^[2]。在陆地植被与大气之间的 CO₂交换中,90% 以上是由森林植被来完成。然而,目前对森林碳储量和碳汇能力的估算还缺乏足够的准确性^[3,4]。解决这一问题的关键是注重对生态系统单元碳储量和碳汇能力估算的研究。竹林是地球陆地上重要的森林植被类型,也是特殊的生态系统单元。中国地处世界竹子分布的中心区,是第一大竹产国,有竹子 39 个属 500 余种^[5],竹林面积占森林面积的 3.06%。因此,研究中国竹林生态系统碳储量变化,无疑会对深入研究中国乃至全球森林生态系统碳平衡问题起重要作用。

1 研究数据

统计包括 6 次全国森林资源清查在内的现有历史竹林数据发现,近 50a 来,中国竹林面积显著增加,从 20 世纪 50 ~ 60 年代的 $245.39 \times 10^4 \text{hm}^2$ 增加到本世纪初的 $484.26 \times 10^4 \text{hm}^2$ (图 1)^[6] (未计入台湾地区数据,下同),增长了 97.34%,竹林占全国有林地面积的比例由 2.87% 增长到 2.96%,竹林资源已成为我国森林资料的重要组成部分。据第 6 次全国森林资源清查统计,在全国 $484.26 \times 10^4 \text{hm}^2$ 的竹林中有毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) $337.2 \times 10^4 \text{hm}^2$,近 7.5×10^9 株^[6],约占全国竹林面积的 70%。目前,中国的竹林分布集中于南方省份,福建、江西、浙江、湖南、广东、四川、广西、安徽、湖北、重庆等 10 省(自治区、直辖市)竹林面积占全国的 93.78%,福建、江西、浙江 3 省的竹林面积占全国的一半^[6]。同时,调研国内外近百篇有关于竹林生物量、竹子碳含量、土壤容重及有机质含量的研究文献,采集可用的相关数据样本,并进行统计分析,有关参量分别列在表 1、表 2 和表 3。

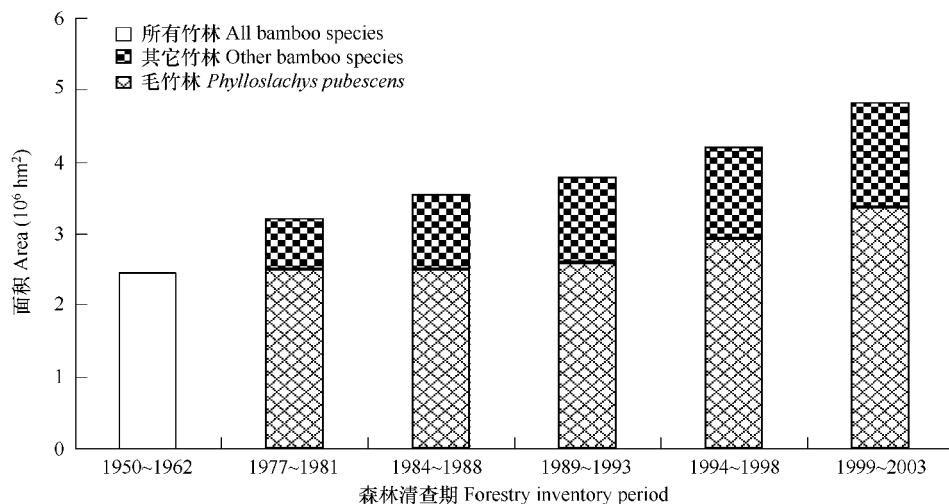


图 1 过去 50a 中国竹林面积变化

Fig. 1 Changes in area of bamboo in China in the last 50 years

2 研究方法

2.1 生物质碳储量

在森林生态系统碳循环研究中,竹林碳储量通常包括竹林生物质碳储量和竹林土壤有机碳储量两大部分。竹林生物质碳储量可根据竹林生物量计算,即:

$$C_B = B_1 \cdot CF_1 + B_2 \cdot CF_2 \quad (1)$$

式中, C_B 为竹林总碳储量(Tg C)(1Tg = 10^{12} g); B_1 和 B_2 分别为毛竹和其它竹类生物量(Tg C); CF_1 和 CF_2 分别为毛竹和其它竹类含碳率(无量纲)

全国森林资源清查分别给出了两类竹林(毛竹和其它竹类)的面积和株数,因此本研究分别基于竹林面积和株数计算两类竹林的生物量。

(1) 基于面积的方法

$$B_i = BB_i \cdot A_i \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

式中, B_i 为 i 类竹林总生物量(Tg d·m); BB_i 为单位面积竹林生物量(Mg d·m·hm⁻²)(1Mg = 10^6 g); A_i 为竹林面积(hm²)。

国内对竹林生物量,尤其是对占主导地位的毛竹生物量有许多研究报道。竹林生物量因竹子的种类、分布地区、立竹密度、立地条件、经营水平等因素而异,其中以毛竹和绿竹(*Dend. rocalamopsis oldhami*)生物量较高。根据收集到的研究文献数据,计算单位面积毛竹和其它竹类的平均生物量(表1,表2)。

表1 毛竹林生物量

Table 1 Biomass of *Phyllostachys pubescens* stands

采样地域 Sampling site	单位面积生物量 Biomass per unit area (Mg d·m·hm ⁻²)	单株生物量 Biomass per culm (kg d·m·culm ⁻¹)	数据来源 Reference
贵州 Guizhou	264.72	163.41	[7]
	260.39	126.71	
	218.73	91.71	
	271.42	70.96	
	301.64	75.6	
浙江秦石门 Qinshimen in Zhejiang	572.29		[8]
浙江安吉 Anji in Zhejiang	162.91		
浙江富阳 Fuyang in Zhejiang	120.12	44.49	[9]
	182.38	48.63	
福建南靖 Nanjing in Fujian	80.11		[10,11]
江西大岗山 Dagangshan in Jiangxi	60.98	21.87	
	86.29	22.12	[12]
	99.54	21.9	
福建建瓯 Jianou in Fujian	81.74		[13]
	341.08	149.6	
福建沙县 Shaxian in Fujian	25.29	16.86	**
	41.3	18.36	
	57.64	16.24	
福建 Fujian	37.6		[15]
福建武平 Wuping in Fujian	67.18		[16]
河南鸡公山 Jigongshan in Henan	23.7		[17]
平均值 Average	159.86	63.46	
标准差 Standard deviation	137.5	51.59	

* 计算时取平均值 Taking the average value of them for calculating; ** 内部资料 Unpublished data

(2) 基于株数的方法

$$B_i = BS_i \cdot N_i \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

式中, BS_i 为平均单株生物量(kg d·m·株⁻¹); N_i 为竹子株数(株)。平均单株生物量可通过收集到的文

献数据间接计算而得到(表 1,表 2)。

表 2 其它竹林生物量
Table 2 Biomass of other bamboo species stands

竹子种类 Species	采样地域 Sampling site	单位面积生物量 Biomass per unit area (Mg d·m·hm ⁻²)	单株生物量 Biomass per clum (kg d·m·clum ⁻¹)	数据来源 Reference
水竹 <i>Phyllostachys heteroclada</i>	安徽舒城 Shucheng in Anhui	93.67	3.12	[18]
		156.26	4.17	
		102.02	2.27	
		121.08	2.31	
绿竹 <i>Dendrocalamopsis oldhami</i>	浙江瑞安 Ruian in Zhejiang	148.19		[8]
	福建华安 Huaan in Fujian	156.04		[19]
长毛箬绿竹 <i>Dendrocalamopsis oldhami</i>	浙江温州 Wenzhou in Zhejiang	100.94		[8]
麻竹 <i>Dendrocalamus latiflorus</i>	浙江苍南 Cangnan in Zhejiang	81.61		
枪刀竹 <i>Phyllostachys nidularis</i>	浙江安吉 Anji in Zhejiang	93.97		[8]
刚竹 <i>Phyllostachys viridis</i>		114.87		
乌牙竹 <i>Phyllostachys atro-aginata</i>		296.58		
浙江淡竹 <i>Lophatherum gracile</i>	浙江萧山 Xiaoshan in Zhejiang	202.44		
花竹 <i>Bambusa albo-lineata</i>	福建绍安 Shaoan in Fujian	41.12		
		98.11		
红竹 <i>Phyllostachys iridescens</i>	浙江衡县 Hengxian in Zhejiang	370.37		
苦竹 <i>Pleioblastus amarus</i>	浙江余杭 Yuhang in Zhejiang	280.58		[8]
		102.82		[20]
	四川西部 Western Sichuan	100.96		[21]
慈竹 <i>Neosinocalamus affinis</i>	重庆缙云山 Jinyunshan in Chongqing	156.41	2.23	[22]
斑苦竹 <i>Pleioblastus maculata</i>		24.06		[23]
肿节少穗竹 <i>Oligostachyum oedogonatum</i>	福建建瓯 Jianou in Fujian	10.58	0.71	[24]
		40.62	1.35	
		70.72	1.18	
		38.76	0.43	
		30.06	0.25	
		34.63	0.41	[25]
筇竹 <i>Qiongzhusa tumidinoda</i>	云南大关 Daguan in Yunnan	48.17		[26]
毛环竹 <i>Phyllostachys meyeri</i>	福建松溪 Songxi in Fujian	52.73	4.55	[27]
井冈寒竹 <i>Gelidocalamus stellatus</i>	江西井冈山 Jingangshan in Jiangxi	16.03		[28]
桂竹 <i>Phyllostachys bambusoides</i>	河南鸡公山 Jigongshan in Henan	87		[17]
巴山木竹 <i>Arundianaria fargesii</i>	陕西镇巴 Zhenba in Shan'xi	69.09		[29]
茶秆竹 <i>Pseudosasa amabilis</i>	福建闽清 Mingqing in Fujian	30.48	4.52	[30]
		32.51	3.61	
		39.72	3.53	
		40.63	3.01	
方竹 <i>Chimonobusa quadrangularis</i>	福建南平 Nianping in Fujian	14.96		[31]
		29.60		
平均值 Average		95.36	2.35	
标准差 Standard deviation		82.21	1.50	

根据周国模等^[38]研究结果,毛竹各器官平均含碳率为 0.5。其它竹类的含碳率采用林益民等^[39]和李江等^[21]分别对绿竹和苦竹的研究结果,平均值为 0.45。

2.2 土壤有机碳储量

竹林土壤有机碳储量根据竹林面积和单位面积土壤有机碳储量计算:

$$SOC_t = SOC \cdot A \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

式中, SOC_t 为竹林土壤有机碳总储量(Tg C); SOC 为单位面积竹林土壤有机碳储量(Mg C·hm⁻²); A 为竹林面积(hm²)。

由于竹子属于浅根性植物^[40],故以 40cm 深土层作为计算碳储量的土层。单位面积土壤有机碳储量可通过文献调研获得的土壤容重和土壤有机质含量(表 3)计算:

$$SOC = 0.58 \cdot \sum (SD_i \cdot D_i \cdot SOM_i) \cdot 10^2 \quad (5)$$

式中,0.58 为 Blommestein 系数(从土壤有机质到有机碳的换算系数,无量纲量)^[41]; SOM_i 表示第 i 层土壤有机质含量(%); SD_i 表示第 i 层土壤的容重($g \cdot cm^{-3}$); D_i 表示第 i 层土壤的厚度(cm)。本研究考虑两层土壤:表层(0~20cm)和下层(20~40cm)。

表 3 毛竹林土壤容重和有机质含量

Table 3 Soil bulk density and organic matter content in *Phyllostachys pubescens* stands

采样地点 Sampling site	立地状况 Site condition	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)		有机质含量 Organic matter content(%)		数据来源 Reference
		0~20	20~40	0~20	20~40	
浙江安吉 Anji in Zhejiang	无林下植被 No understory	1.023 *		3.89		[32]
	草类林下植被 Herbal understory	1.024 *		5.07		
	竹乔混生 Mixed bamboo and arbor	1.023 *		4.04		
浙江富阳 Fuyang in Zhejiang	无林下植被 No understory	1.021 *		2.52		
	草类林下植被 Herbal understory	1.022 *		2.99		
浙江沙县 Shaxian in Zhejiang	无林下植被 No understory	1.023 *		3.69		
	草类+小灌木 Herbal + Bushes	1.024 *		4.27		
浙江富阳 Fuyang in Zhejiang	条播竹荪 Bamboo fungus planting in stripes	0.94		3.771		[33]
	块播竹荪 Bamboo fungus planting in patches	0.7		3.863		
	对照 Comparison sites	1.14		2.379		
福建建瓯 Jianou in Fujian		0.9	1.02	2.25	1.667	[14]
福建福州 Fuzhou in Fujian	深翻施肥 Deep plough and fertilizing	1.18	1.21	4.281	2.497	[34]
	深翻 Deep plough	0.98	1	3.295	1.168	
	全锄 Complete clearing of herbal	1.07	1.19	2.642	1.213	
	劈草 Grass removed	1.1	1.18	2.547	1.132	
	对照 Comparison sites	1.01	1.02	1.42	0.971	
浙江长汀 Changding in Zhejiang		1.021 *	1.066 *	2.576	1.432	[35]
浙江安吉 Anji in Zhejiang	高产 High production	1.022 *	1.055 *	3.48	1.8	[36]
	低产 Low production	1.023 *	1.061 *	3.56	1.6	
浙江诸暨山 Zhuji Mts in Zhejiang		1.193	1.087	4.16	3.23	[37]
浙江 Zhe Jiang	东北坡 NE slope		0.942		2.2	**
	西南坡 SW slope		1.139		2	
	坡下部 Lower part of slope		0.807		2.5	
	坡上部 Slope		1.139		2	
平均值 Average		1.022	1.065	3.335	1.815	
标准差 Standard deviation		0.104	0.108	0.893	0.64	

* 黑体字表示用经验公式(6)计算结果 The black figure means the calculation result using formula(6); ** 内部资料 Unpublished data

对表 3 中缺少土壤容重数据的样本,其对应的土壤容重可通过以下土壤容重与土层深度和有机质含量的拟合函数计算而得^[42,43]:

$$SD_i = a_i + b_i \cdot c_i \cdot \lg C_{fi} \quad (6)$$

式中, Z_i 是从土表到土层中心的深度; C_{fi} 是土层有机质含量; a_i 、 b_i 与 c_i 为拟合系数(对应于表层分别为 0.456, 0.056 和 0.012; 对应于下层分别为 0.484, 0.02 和 -0.113)。

其它竹林土壤有机碳密度也用毛竹林的代替。计算表明我国竹林单位面积碳储量为 $61.88 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 0~20cm 和 20~40cm 土层分别为 $39.56 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $22.32 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3 计算结果

用竹林单位面积平均生物量计算,密度得出过去 50a 来中国竹林碳储量在 6 次全国森林清查期间分别为 318.55 TgC (1950 ~ 1962 年)、427.37 TgC (1977 ~ 1981 年)、463.80 TgC (1984 ~ 1988 年)、493.00 TgC (1989 ~ 1993 年)、548.79 TgC (1994 ~ 1998 年) 和 631.58 TgC (1999 ~ 2003 年)(图 2)。其中土壤有机碳储量分别为 151.84、197.99、219.44、234.57、260.56 TgC 和 299.65 TgC;生物质碳储量分别为 166.71、229.38、244.36、258.43、288.23 TgC 和 331.93 TgC(图 3)。计算结果显示,竹林碳储量在过去 50a 呈逐渐增长,前后总量相比增长了大约 1 倍。

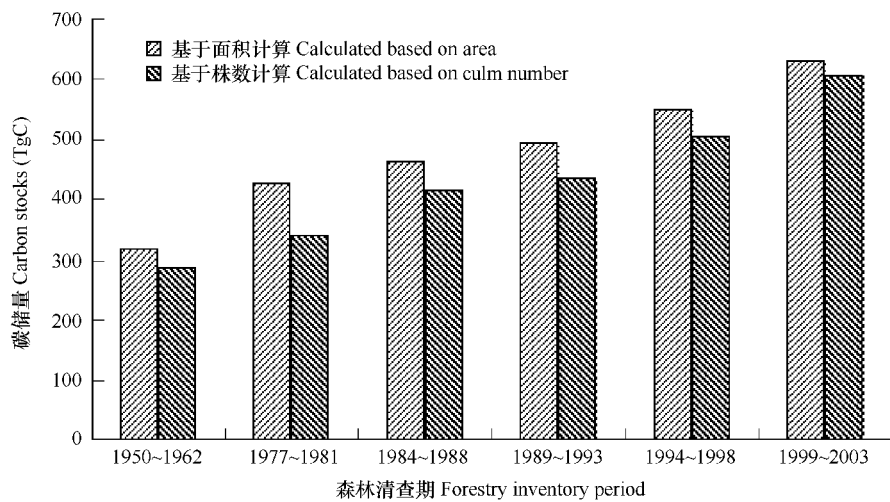


图 2 过去 50a 中国竹林的碳储量变化

Fig. 2 Changes in carbon stock of bamboo stands in China in last 50 years

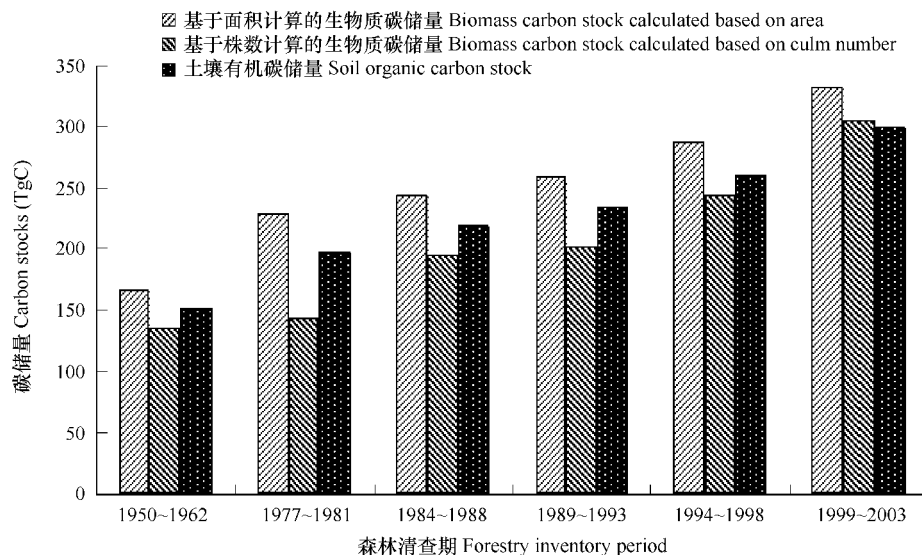


图 3 过去 50 年中国竹林土壤有机碳储量与两种方法计算的生物质碳储量对比

Fig. 3 Compare of carbon stock among soil and biomass of bamboo stands in China in the last 50 years

如果用竹子单株生物量进行计算,则得出过去 50a 来中国竹林碳储量在 6 次全国森林清查期间分别为 286.60 TgC (1950 ~ 1962 年)、341.81 TgC (1977 ~ 1981 年)、414.54 TgC (1984 ~ 1988 年)、436.28 TgC (1989 ~ 1993 年)、504.82 TgC (1994 ~ 1998 年) 和 605.51 TgC (1999 ~ 2003 年)(图 2)。其中土壤有机碳储

量分别同上,生物质碳储量分别为 134.75、143.82、195.10、201.71、244.26 TgC 和 305.85 TgC(图 3)。基于单株的计算结果小于基于面积的计算结果,但其差值自 20 世纪 70 年代以来逐渐缩小。

从第 1 次清查期至第 6 次清查期 54a 的时间跨度内,土壤有机碳储量、基于面积计算的生物质碳储量和基于株数计算的生物质碳储量均呈增长趋势,在第 1、第 2 清查期之间年增长量分别为 2.01、2.73 TgC·a⁻¹和 0.39 TgC·a⁻¹;在第 2、第 3 清查期之间分别为 3.06、2.14 TgC·a⁻¹和 7.33 TgC·a⁻¹;在第 3、第 4 清查期之间分别为 3.03、2.81 TgC·a⁻¹和 1.32 TgC·a⁻¹;在第 4、第 5 清查期之间分别为 5.20、5.96 TgC·a⁻¹和 8.51 TgC·a⁻¹;在第 5、第 6 清查期之间分别为 7.82、8.74 TgC·a⁻¹和 12.32 TgC·a⁻¹。计算值表明,过去 50a 竹林年碳汇能力在不断增加,尤其在最近的 20a 增加越来越快。(图 3)。

4 讨论

4.1 生物量比较

根据计算结果毛竹林平均生物量为 159.86 Mg d·m·hm⁻²,与亚热带几种森林类型比较仅低于成熟的天然常绿阔叶林,而高于人工常绿阔叶林、杉木中幼林和马尾松中幼林,并与亚热带落叶阔叶混交林、常绿阔叶中幼林和杉木成熟林接近(表 4)^[44]。陈礼光等^[16]在福建武平的对比试验表明,毛竹纯林生物量为 67.18 Mg d·m·hm⁻²,高于相同立地条件的 10 年生杉木纯林生物量(63.25 Mg·hm⁻²)。其它竹类林分的生物量为 107.76 Mg d·m·hm⁻²,与亚热带几种森林类型比较处于中等水平(表 4)。这说明在诸多森林类型中,竹林生物量略高于其它森林类型生物量的平均值,因而竹林有着不可忽视的固碳能力。

表 4 亚热带几种林分类型生物量比较

Table 4 Comparison of biomass of several subtropical vegetation types

森林类型 Forest types	林龄范围(a) Stand age(a)	样本数 Number of samples	乔木生物量 Biomass(Mg·hm ⁻¹)	
			范围 Range	平均值 Average
亚热带常绿阔叶林 Subtropical broadleaf evergreen forests	12 ~ 42	8	80.40 ~ 323.35	169.40
亚热带人工常绿阔叶林 Subtropical broadleaf evergreen plantations	> 100	5	334.22 ~ 491.17	388.69
亚热带落叶阔叶混交林 Subtropical mixed deciduous broadleaf forests	5 ~ 30	17	13.40 ~ 255.40	103.74
杉木林 Chinese fir forests	中龄林 Middle aged	2	147.38 ~ 194.60	170.99
	3 ~ 10	17	16.60 ~ 99.69	56.46
	10 ~ 20	34	59.30 ~ 131.68	105.00
	20 ~ 30	17	82.55 ~ 334.25	152.36
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> Lamb. forests	6 ~ 14	7	29.92 ~ 112.06	84.80
	20 ~ 30	5	33.40 ~ 155.17	106.00

4.2 碳储量变化

根据计算结果,过去 50a 中国竹林碳储量在逐步增加,尤其是自 20 世纪末以来增加比较快(图 2)。这主要是与中国竹林面积随全国森林面积增长而增长,且近期增长较快相关联。根据国家现有林业发展规划^[45],至少在今后 50a 内,中国竹林面积仍会随着森林面积的增长而增长,因而竹林碳储量也会不断增加,由此可以断定未来 50a 内中国竹林将具有稳步增长的碳汇功能。

4.3 对森林植被碳储量的贡献

根据方精云等的研究测算,在历史上第 2 至 5 次森林资源清查期,中国森林植被总碳储量分别为 4440TgC(1973 ~ 1976 年)、4380TgC(1977 ~ 1981 年)、4450TgC(1984 ~ 1988 年)、4630TgC(1989 ~ 1993 年)、4750TgC(1994 ~ 1998 年)^[46]。与此对比,中国竹林总碳储量所占比例分别为 6.5% ~ 7.2%、7.8% ~ 9.8%、9.3% ~ 10.4%、9.4% ~ 10.6%、10.6% ~ 11.6%。由此看出,中国竹林碳储量在森林总碳储量中占有相当大的份额。

4.4 不同计算方法对比

从计算结果可看出,用单位面积生物量计算出的碳储量大于用单株生物量计算出的碳储量,两者相差 26.07 ~ 85.56 TgC。在 20 世纪 50 ~ 80 年代期间,两者差值逐渐增大;自 20 世纪 80 年代中期以后,两者差值逐渐减小(图 2)。其原因是在 20 世纪 80 年代之前全国竹林的平均立竹密度是在不断减小;而在 80 年代中期以后尤其是 90 年代以来,全国竹林的平均立竹密度是在不断增大。根据计算,在 1989 ~ 1993 年、1994 ~ 1998 年和 1999 ~ 2003 年 3 次森林清查期之间,毛竹林平均立竹密度在相邻两次森林清查期间的净增加值分别是 81 株·hm⁻²和 211 株·hm⁻²,后者比前者增大了 2.6 倍。立竹密度不断增大意味着立竹总株数增长率将大于竹林面积增长率,故采用单株生物量计算出的碳储量必然会比用单位面积生物量计算出的碳储量增长得快,因而两者差距便逐渐缩小。

4.5 参量缺损

在本研究中所采用的竹林生物量样本数据,很大部分均未涉及竹林下层植被。然而有些情况下,竹林下层或多或少会有一些草灌植物。因此,势必存在对有关参量与最终结果的低估。同时,因缺乏有关于其它竹林的土壤参量与竹子含碳量的研究成果,故在本研究中采用毛竹林土壤有机质密度替代其它竹林的有机质密度,苦竹与绿竹的平均含碳量替代其它竹子含碳量,并且其它竹林的参数样本也仅涵盖近 20 个竹种,其计算结果必然会存在误差。为使今后能求得更为精确的结果,应注重对不同地区、不同竹子生物量、含碳量以及竹林下层植被生物量、土壤有机碳储量等相关参量开展更多的研究。

5 结论

5.1 通过对包括 6 次森林资源清查在内的历史竹林数据统计分析,过去 50a 中国的竹林面积随着全国森林面积的增长而增长。竹林面积以毛竹为主,大约占总面积的 70%,其它竹类面积只占约 30%。

5.2 过去 50a 中国竹林碳储量一直在不断增长,其中以近 15a 增长最快(图 2)。至少在未来的 50a 内中国竹林面积还将随着森林面积的继续增长而增长,故中国竹林的碳储量仍然会保持增长,拥有稳定的碳汇功能。

5.3 在用竹林现存生物量计算竹林碳储量时,已经剔出了常年的竹材采伐量。如果考虑到在采伐竹材利用中,绝大部分还会存留较长时间,竹林的实际固碳能力将大于其碳储量。

5.4 目前中国竹林碳储量占森林总碳储量的比例已超过 11%,成为一个举足轻重的生态系统碳库单元。随着经营水平的不断提高,中国竹林立竹密度还会增大,相应的竹林碳密度也将增大,这意味着未来竹林碳储量在整个森林碳储量中所占的比例还可能增大。

References:

- [1] Yoda K. People's role in the management of the global carbon sink and reservoirs. Global Forestry Conference, Indonesia. 1993.
- [2] Dale V H, et al. Estimating the effects of land — use changes on global atmospheric CO₂ concentrations. Can. J. For. Res., 1991, 21: 87 — 90.
- [3] Tans P P, Fung I Y, Takahashi. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ Budget. Science, 1990, 247: 1431 — 1438.
- [4] Keeling R F, Peper S C, Heimann M. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric concentration. Nature, 1996, 381: 211 — 218.
- [5] Ma N X, Zhang W Y, Lou Y P, Yang E, Huang Y C. Planting Technology of High Production Bamboo Forest. Beijing: China Forestry Press, 1996. 140.
- [6] SFA. China Forest Resources Report. Beijing: China Forestry Press, 2005.
- [7] Wu Q X. A Study on the types and structure of *Phyllostachys pubescens* stands in Guizhou province. Journal of Bamboo Research, 1983, 2(1): 112 — 124.
- [8] Wen T H. An appraisal on the productivity factors of bamboo stands. Journal of Bamboo Research. 1990, 9(2): 1 — 9.
- [9] Huang Q M, Shen Y G, Yang D D. Research on the primary productivity of *Phyllostachys pubescens* forest. Forestry Research, 1993, 6(5): 536 — 540.
- [10] Li Z J, Lin P. A study on the energy dynamics of *Phyllostachys pubescens* stand. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1993, 32(2): 236 — 240.
- [11] Li Z J, Lin P, Qiu X Z. Biomass and productivity of *Phyllostachys pubescens* in southern Fujian province. Journal of Xiamen University (Natural

- Science), 1993, 32(6): 762—767.
- [12] Nie D P. Structural dynamics of bamboo forest stands. *Scientia Silvae Sinicae*, 1994, 30(3): 201—207
- [13] Lan B, Hong W, Xu W B, Zeng S T. A study on the energy structure of *Phyllostachys pubescens* stand. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19(1): 20—22.
- [14] Zhen Y S, Li J G, Xu F L, Li X. Study on the biomass and structure of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1997, 17(3): 227—230
- [15] Zhen Y S, Chen L G, Hong W. Study on productivity and soil properties of mixed forests of Chinese fir and *Phyllostachys pubescens*. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(Special Edition1): 16—25.
- [16] Chen L G, Lian J N, Hong W, Zhen Y S, Chen K W, Yang H Z. Evaluation on silvicultural effects of mixed forests of Chinese fir and *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2000, 20(4): 309—312.
- [17] Yan M C, Yang L C, Li H T, Hu D, Zhang Z X, Du H T, Ha D L. A study on the biomass and live carbon storage of the forest vegetation in the Jigongshan mountain natural reserve. *Journal of Hunan Forestry Science and Technology*, 2004, 24(4): 2—6.
- [18] Sun T R, Tang L J, Wen Z C. Studies on the biomass structure of *Phyllostachys heteroclada* plantation. *Journal of Plant Ecology and Terrestrial Botany*, 1986, 10(3): 190—198.
- [19] Lin Y M, Lin P, Ye Y. Biomass and structure of *Dendrocalamopsis oldhami* population. *Journal of Bamboo Research*, 1998, 17(2): 119—133.
- [20] Lin X C, Fang W, Li X H, Zhou C P, Zhong X F, Hu C Z. A study on biomass structure of *Pleioblastus amarus* population. *Journal of Bamboo Research*, 2004, 23(2): 27—29.
- [21] Li J, Huang C D, Zhang G Q. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Pleioblastus amarus* forest returned from farmland. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2006, 26(4): 2—5.
- [22] Su Z X, Zhong Z C. Studies on the biomass structure of *Neosinocalamus affinis* population in Jinyunshan Mountain. *Journal of Plant Ecology and Terrestrial Botany*, 1991, 15(3): 240—252.
- [23] Liu Q, Zhong Z C. Research on the biomass structure and dynamics of cloned *P leioblastus* maculata population. *Bamboo Research (Jiangsu)*, 1996, (1): 51—56.
- [24] Zhen Y S, Chen J F. Study on density effect of *Oligostachyum oedogonatum*. *Journal of Bamboo Research*, 1998, 17(4): 40—43.
- [25] Zhen Y S, Chen M Y, Lin J G, Zhao R J. Study on the model for biomass of *Oligostachyum oedogonatum*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1998, 18(2): 159—162.
- [26] Dong W Y, Huang B L, Xie Z X, Xie Z H, Liu H Y. Studies on the structure and dynamics of biomass of *Qiongzhusa tumidinoda* clone Population. *Forest Research*, 2002, 15(4): 416—420.
- [27] Xu D W, Chen S H, Yang J M. Investigation and analysis on the biomass structure of *Phyllostachys meyeri* woods for bamboo shoot. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2004, 31(1): 67—70.
- [28] Zhou Y Q. Primary study on biomass structure of *Gelidocalamus stellatus* population. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinicae*, 2004, 13(4): 120—123.
- [29] Wang T X, Ding Y L, Liu Y J, Li J Q. Studies on the structure of biomass of *Arundinaria fargesii* clone population. *Journal of Bamboo Research*, 2005, 24(1): 20—24.
- [30] Lin C W. Reaction of *Pseudosasa amabilis* forest growth under different site bamboo densities. *Jour. of Fujian Forestry Sci. and Tech*, 2005, 32(3): 62—64.
- [31] Tong J N. Biomass structure changes of *Chimonobambusa quadrangularis* before and after reclaimed. *Jour. Of Fujian Forestry Sci. and Tech.*, 2007, 34(1): 110—113.
- [32] Jiang Y G, Hong S S. Research report on the impact of under-story vegetation on the nitrogen and organic content in the *Phyllostachys pubescens* forest. *Journal of Bamboo Research*, 1987, (2): 21—25.
- [33] Chen L Q, Pei Z D. Impacts of bamboo fungus on the chemical and physical features of soil under bamboo stands. *Forestry Science and Technology Newsletter*, 1991, (9): 29—30.
- [34] Chen Q F. Impact of different operations of Moso (*Phyllostachys pubescens*) on soil fertility. *Journal of Bamboo Research*, 1999, 18(3): 17—23.
- [35] Zhen Y S, Chen L G, Wang S F. Evaluation of the different management pattern of bamboo forest. *Journal of Bamboo Research*, 2000, 19(2): 27—29, 39.
- [36] Xu Q F, Liu L, Hong Y M. Analysis on enzyme activities of high-yield and low-yield *Phyllostachys pubescens* stands. *Journal of Bamboo Research*, 2000, 19(3): 37—40.
- [37] Huang C G. Carbon reserves in soil of *Phyllostachys pubescens* plantations and *Camellia sinensis* garden in Zhejiang Province. *Journal of Shaoxing College of Arts and Sciences*, 2001, 21(1): 55—57.
- [38] Zhou G M, Jiang P K. Density, Storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6): 20—24.
- [39] Lin Y M, Lin P, Wen W Z. Studies on dynamics of carbon and nitrogen elements in *Dendrocalamopsis oldhami* forest. *Journal of Bamboo*

Research, 1998, 17(4): 25—30.

- [40] Editorial board of flora of China. Flora of China, 1st Section of Volume 9. Beijing: Science Press, 1996.
- [41] Jenny H. Li X F, Huang R H & Tang Y X Translated. Soil Resources: Origin and Properties. Beijing: Science Press, 1988.
- [42] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.*, Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298: 156—159.
- [43] Post W M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation. In: Bouwman A F. Soils and the Greenhouse Effect. England: John Wiley & Sons, 1990. 410—416.
- [44] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and productivity of forest ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999. 241.
- [45] The Research group of China forestry sustainable development strategy (RGCFSDS), China Forestry Sustainable Development Strategy. Beijing: China Forestry Press, 2002.
- [46] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9): 967—973.

参考文献:

- [3] 马乃训, 张文燕, 楼一平, 等. 竹林丰产栽培技术. 北京: 中国林业出版社. 1996. 140.
- [6] 国家林业局. 中国森林资源报告. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [7] 巫启新. 贵州毛竹林类型与笋结构的研究. 竹子研究汇刊, 1983, 2(1): 112~124.
- [8] 温太辉. 竹林生产力因子的评价. 竹研究汇刊, 1990, 9(2): 1~9.
- [9] 黄启民, 沈允钢, 杨迪蝶. 毛竹林的初级生产力研究. 林业科学研究, 1993, 6(5): 536~540.
- [10] 李振基, 林鹏. 毛竹群落能量动态的研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 1993, 2(2): 236~240.
- [11] 李振基, 林鹏, 丘喜昭. 闽南毛竹林的生物量和生产力. 厦门大学学报: 自然科学版, 1993, 32(6): 762~767.
- [12] 聂道平. 毛竹林结构的动态特性. 林业科学, 1994, 30(3): 201~207.
- [13] 蓝斌, 洪伟, 吴承祯, 等. 毛竹林群落能量结构研究. 福建林学院学报, 1999, 19(1): 20~22.
- [14] 郑郁善, 李建光, 徐凤兰, 等. 杉木毛竹混交复层林生物量和结构研究. 福建林学院学报, 1997, 17(3): 227~230.
- [15] 郑郁善, 陈礼光, 洪伟. 毛竹杉木混交林生产力和土壤性状研究. 林业科学, 1998, 34(专刊1): 16~25.
- [16] 陈礼光, 连进能, 洪伟, 等. 2000. 杉木毛竹混交林造林效果评价. 福建林学院学报, 20(4): 309~312.
- [17] 严茂超, 杨柳春, 李海涛, 等. 鸡公山自然保护区森林植被生物量及活碳蓄积量研究. 湖南林业科技, 2004, 24(4).
- [18] 孙天任, 唐礼俊, 魏泽长. 水竹人工林生物量结构的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1986, 10(3): 190~198.
- [19] 林益明, 林鹏, 叶勇. 绿竹种群生物量结构研究. 竹子研究汇刊, 1998, 17(2): 9~133.
- [20] 林新春, 方伟, 李贤海, 等. 苦竹种群生物量研究. 竹子研究汇刊, 2004, 23(2): 27~29.
- [21] 李江, 黄从德, 张国庆. 川西退耕还林地苦竹林碳密度、碳储量及其空间分布. 浙江林业科技, 2006, 26(4): 2~5.
- [22] 苏智先, 钟章成. 缙云山慈竹种群生物量结构研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(3): 240~252.
- [23] 刘庆, 钟章成. 斑苦竹无性系种群生物量结构与动态研究. 竹类研究, 1996, (1): 51~56.
- [24] 郑郁善, 陈敬芬. 密度对笋节少穗竹生长影响的研究. 竹子研究汇刊, 1998, 17(4): 40~43.
- [25] 郑郁善, 陈明阳, 赵荣军. 笋节少穗竹各器官生物量模型研究. 福建林学院学报, 1998, 18(2): 159~162.
- [26] 董文渊, 黄宝龙, 谢泽轩, 等. 筴竹无性系种群生物量结构与动态研究. 林业科学研究, 2002, 15(4): 416~420.
- [27] 徐道旺, 陈少红, 扬金满. 毛环竹笋用林生物量结构调查分析. 福建林业科技, 2004, 31(1): 67~70.
- [28] 周玉卿. 井冈山寒竹种群生物量结构初步研究. 西北农业学报, 2004, 13(4): 120~123.
- [29] 王太鑫, 丁雨龙, 李继清等. 巴山木竹种群生物量结构研究. 竹子研究汇刊, 2005, 24(1): 20~24.
- [30] 林传文. 不同立竹密度下茶杆竹生长的响应. 福建林业科技, 2005, 32(3): 62~64.
- [31] 童建宁. 方竹林垦复前后生物量结构变化的研究. 福建林业科技, 2007, 34(1): 110~113.
- [32] 江业根, 洪顺山. 毛竹林林下植被对土壤氮素、有机质含量影响的调查研究. 竹类研究, 1987, (2): 21~25.
- [33] 陈连庆, 裴致达. 竹林间种竹荪对其土壤理化性质的影响. 林业科技通讯, 1991, 29~30.
- [34] 陈乾富. 毛竹林不同经营措施对林地土壤肥力的影响. 竹子研究汇刊, 1999, 18(3): 17~23.
- [35] 郑郁善, 陈礼光, 王舒凤. 笋竹两用丰产林不同经营模式评价. 竹子研究汇刊, 2000, 19(2): 27~29, 39.
- [36] 徐秋芳, 刘力, 洪月明. 高低产毛竹林地土壤酶活性比较分析. 竹子研究汇刊, 2000, 19(3): 37~40.
- [37] 黄承才. 浙江毛竹林和茶园土壤碳库的研究. 绍兴文理学院学报, 2001, 21(1): 55~57.
- [38] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳储量及其空间分布. 林业科学, 2004, 40(6): 20~24.
- [39] 林益明, 林鹏, 温万章. 绿竹林碳、氮动态研究. 竹子研究汇刊, 1998, 17(4): 25~30.
- [40] 中国植物志编委会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1996. 第9卷第1分册.
- [44] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 科学出版社, 1999, 241.
- [45] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究战略卷. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [46] 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.