

湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度

田大伦,方 晰,项文化
(中南林学院生态研究室,湖南 株洲 412006)

摘要:利用定位观测数据,对杉木人工林生态系统的碳素密度进行了探讨。结果表明:不同年龄的杉木枝、叶中碳素密度的季节变化规律均表现为冬季>秋季>夏季>春季。叶的碳素密度平均为 0.5044 gC·g⁻¹,变异系数 2.08%,枝的碳素密度平均为 0.4479 gC·g⁻¹,变异系数为 2.25%。不同层次的叶碳素密度的变化范围在 0.4612 gC·g⁻¹~0.5524 gC·g⁻¹之间,平均值的大小排列顺序为:上层叶>中层叶>下层叶。不同层次枝条的碳素密度在 0.3917 gC·g⁻¹~0.4965 gC·g⁻¹之间,平均值的大小次序为:中层枝>上层枝>下层枝。10 年生杉木各器官的碳素密度变化范围为 0.4529 gC·g⁻¹~0.4972 gC·g⁻¹,11 年生的为 0.4580 gC·g⁻¹~0.5022 gC·g⁻¹,14 年生的为 0.4580 gC·g⁻¹~0.5093 gC·g⁻¹之间,变异系数范围为 1.68%~8.44%。不同器官的碳素密度按高低排列基本上为树叶>树皮>树根>树干>树枝>球果。随着杉木林年龄的增长,林下植被各组分、死地被物的碳素密度变化规律不明显。同一林分中各层次植物的碳素密度高低排列顺序为:乔木层>灌木层>草本层。10 年生和 14 年生杉木林土壤各层的碳素密度随土壤深度的增加而逐渐下降。

关键词:杉木人工林生态系统;碳素密度;季节变化;空间变化;湖南会同

Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hu'nan Province

TIAN Da-Lun, FANG Xi, XIANG Wen-Hua (Research Section of Ecology, Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2382~2386.

Abstract: This study used permanent sampling plots data to investigate the carbon density of a Chinese fir plantation ecosystem. The results show that the carbon density of branches and leaves of different ages varied with the season in the following order: winter>autumn>summer>spring. The average foliar carbon density was 0.5044 gC·g⁻¹ with a coefficient of variation of 2.08%. The average carbon density for branches was 0.4479 gC·g⁻¹ with a coefficient of variation of 2.25%. The foliar carbon density in the vertical canopy profile varied from 0.4612 gC·g⁻¹ to 0.5524 gC·g⁻¹, decreasing from the top to the bottom of the canopy. The average carbon density of branches in the vertical canopy profile varied from 0.3917 gC·g⁻¹ to 0.4965 gC·g⁻¹ in the following order: middle canopy>upper >lower canopy. The carbon density of different organs varied from 0.4529 gC·g⁻¹ to 0.4972 gC·g⁻¹ for the 10 years -old plantation, form 0.4580 gC·g⁻¹ to 0.5022 gC·g⁻¹ for the 11years-old stand, and 0.4580 gC·g⁻¹ to 0.5093 gC·g⁻¹ for the 14 years-old plantation. The variation coefficient ranged form 1.68% to 8.44%. The carbon density of different organs varied in the following order: leaves>bark>roots>stems>branches>cones. No obvious trends were detected for the carbon density in different groups of under-storey of plants or the duff layer as the forest aged. The carbon density in the whole canopy profile of a stand varied in the following order: over-storey trees>shrubs>herbaceous species. The soil carbon density in the 10 and the 14 years-stands declined from the surface to deeper layers.

Key words: Chinese fir plantation ecosystem; carbon density; season variation; spatial variation; Huitong, Hu'nan Province
文章编号:1000-0933(2004)11-2382-05 中图分类号:Q143 文献标识码:A

基金项目:国家重点野外台站资助项目(2000-076);国家林业局重点科研资助项目(2001-07);湖南省教育厅资助项目(01C053)
收稿日期:2004-02-25;修订日期:2004-06-28
作者简介:田大伦(1940~),女,湖南长沙人,教授,主要从事森林生态系统定位研究。
Foundation item: the Program of National Key Field Station for Scientific Observation and Experiment (No. 2000-076); the Key Program from China State Forestry Administration (No. 2001-07) and the Program of Education Department of Hu'nan Province (No. 01C053)
Received date 万方数据 **Accepted date:** 2004-06-28
Biography: TIAN Da-Lun, Professor, mainly engaged in forest ecology and long-term located ecological research.

目前,无论是按区域、国家尺度还是按生态系统尺度估算森林的碳素贮量,大多数都是直接或间接以森林植被生物量的现存量(或土层质量)乘以生物量(或土壤)中碳素密度推算而得。可见,森林生态系统中各组分的碳素密度是估算森林碳素贮量的关键因子。国内外大多数学者在估算区域、国家尺度的森林植被碳素贮量时,通常采用 $0.5\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$ 或 $0.45\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$ 作为森林植被的平均碳素密度^[1~6]。然而许多研究表明,不同的森林类型,由于组成树种不同,其植被及同一种植物不同器官中的碳素密度明显不同^[7~17],即使是同一森林类型,在不同的气候带,林木各器官碳素密度的算术平均值也有一定的差异^[13,17]。同时,在不同的地区不同森林植被或相同森林植被下,土壤中的有机质(碳)的密度差异很大^[18]。本文主要分析杉木(*Cunninghamia lanceolata*(Lamo.)Hook.)枝和叶中碳素密度的时空变化、杉木不同器官中碳素密度的动态以及杉木林生态系统中不同组成部分碳素密度的空间分布特征。目的是为了能准确估算杉木林生态系统的碳素贮量和在区域或国家尺度上估算森林生态系统碳素贮量以及碳平衡提供基础数据。

1 试验地自然概况

试验地设于国家重点野外科学试验站、国家林业局重点森林生态系统定位观测站——中南林学院会同生态定位研究站内。该站地理位置为东经 $109^{\circ}45'$,北纬 $26^{\circ}50'$,气候属典型的亚热带湿润气候,年平均温度为 $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量约为 $1100\sim1400\text{ mm}$,年平均相对湿度约为 80% 。海拔高度 $300\sim500\text{ m}$,相对高度在 150 m 以下,为低山丘陵地貌类型。土壤系震旦纪板溪系灰绿色板岩发育的红黄壤,适合杉木的生长。地带性植被为常绿阔叶林,以壳斗科的常绿树种如栲属(*Castanopsis*)、青冈属(*Cyclobalanopsis*)、石栎属(*Lithocarpus*)为建群种,其次为樟科的樟属(*Cinnamomum*)、楠木属(*Phoebe*);山茶科的木荷属(*Schima*)、山茶属(*Camellia*)以及木兰科(*Magnoliaceae*)、金缕梅科(*Hamamelidaceae*)、杜英科(*Elaeocarpaceae*)的一些树种组成。站内设有8个面积均为 2 hm^2 试验小集水区,平均坡度为 25° ,8个小集水区相互平行且自然地理状况基本相似,彼此相距不超过 100 m ,均为1966年营造的杉木纯林。在1987年底将原有27年生杉木纯林皆伐,1988年春后陆续在原有集水区营造了第2代杉木纯林,开展了第2代杉木林生态系统定位研究。本次试验是在Ⅰ、Ⅲ号集水区进行。

2 分析样品采集和分析方法

测定杉木林各组分生物量的同时,分层按干、皮、枝(分当年生、1年生、2年生、多年生)、叶(分当年生、1年生、2年生、多年生)和根(分 $<0.2\text{ cm}$ 、 $0.2\sim0.5\text{ cm}$ 、 $>0.5\text{ cm}$ 、根头)等组分采集6株标准木的分析样品。对样品逐一进行化学分析,分别取其平均值作为各个器官中碳素密度。

在样地内按梅花形设置25个 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 的小样方,记录每个小样方内的植物种类,将同一样方内同种灌木植物(主要有杜茎山(*Maesa japonica*)、六月雪(*Serissa foetida*)、空心泡(*Rubus rosaefolius*)、格药铃(*Eurya muricata*)、梵天花(*Urena procumdens*)、寒莓(*Rubus buergeri*)等)分为叶、茎、根分别采集分析样品;同样地,草本植物(主要有芒萁(*Dicranopteris dichroma*)、乌蕨(*Stenoloma chusanum*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、华南毛蕨(*Cyclosorus parasiticus*)、荇草(*Arthraxon hispidus*)等)分为地上部分和地下部分,采集同一样方内同种植物相同器官的混合样本作分析样品;分别采集25个小样方内的死地被物 $1\sim2\text{ kg}$ 作为分析样品。土壤分层($0\sim15\text{ cm}$ 、 $15\sim30\text{ cm}$ 、 $30\sim45\text{ cm}$ 、 $45\sim60\text{ cm}$)随机3~4次采集分析样品。

2002年,另在14年生杉木林固定样地内的山坡上部、山坡中部、山麓分别选择生长中等的立木4~6株作为样木(不伐倒),当年的春季4月份、夏季6月份、秋季9月份、冬季12月份分别在山坡上部、山坡中部、山麓所选样木中各选1株(共3株)的东、西、南、北四方向的上、中、下3个层次采集枝(分当年生、1年生、2年生、多年生)、叶(分当年生、1年生、2年生、多年生)的样品,以分析杉木枝、叶中碳素密度的季节变化和空间变化。

植物、土壤样品中的碳素密度采用重铬酸钾-水合加热法^[19]测定。平均值差异显著性分析采用SPSS10.0软件包进行。

3 结果与分析

3.1 杉木枝、叶中碳素密度的季节变化

不同季节的杉木枝、叶中碳素密度的测定结果(见表1)表明,不同年龄的枝、叶中碳素密度随季节的变化规律基本一致,均表现为冬季>秋季>夏季>春季。在同一季节,不同年龄枝、叶间的碳素密度表现为多年生枝、叶普遍较高,但差别不大。从表1中还可以看出,叶的平均碳素密度明显高于枝的平均密度,叶的平均碳素密度为 $0.5044\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为 2.08% ,杉木枝的平均碳素密度为 $0.4479\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为 2.25% 。

3.2 杉木枝、叶中碳素密度的空间分布

由表2可以看出,不同层次的叶碳素密度的变化范围在 $0.4612\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}\sim0.5524\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,变异系数小于 3.78% ,叶中碳素密度随层次不同而发生变化,平均值的大小排列顺序为:上层叶>中层叶>下层叶。通过平均值差异显著性分析表明,上层叶的平均碳素密度均与下层叶、中层叶的差异显著($P<0.05$),而下层叶与中层叶之间差异不显著($P>0.05$)。这可能与叶所处的层次不同、发育阶段不同有关。

表2表明,不同层次枝的碳素密度在 $0.3917\sim0.4965\text{ gC}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间变化,变异系数小于 5.72% ,平均值的大小次序为:中层

枝>上层枝>下层枝。平均值的差异显著性分析表明,不同层次之间的枝碳素密度平均值差异均未达显著水平($P>0.05$)。

表 1 杉木枝、叶碳素密度的季节变化

Table 1 Season variation of carbon density in the branches and leaves of Chinese fir($\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$)						
器官 Organs		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均 Mean
树叶 Leaf	当年生 Current	0.4878(2.75)	0.5048(2.89)	0.5062(2.84)	0.5222(3.52)	0.5035(3.73)
	1 年生 1-year-old	0.4996(3.04)	0.5041(3.33)	0.5108(3.84)	0.5256(7.17)	0.5084(4.58)
	2 年生 2-year-old	0.4867(2.84)	0.5035(2.68)	0.5112(3.23)	0.5187(6.09)	0.5030(4.29)
	多年生 Perennial	0.4919(5.35)	0.5072(3.41)	0.5093(3.30)	0.5321(5.11)	0.5080(5.02)
	平均 Mean	0.4915(3.64)	0.5049(2.97)	0.5093(3.12)	0.5246(5.34)	0.5044(2.08)
树枝 Branch	当年生 Current	0.4297(3.61)	0.4599(1.96)	0.4536(2.01)	0.4568(3.92)	0.4490(4.03)
	1 年生 1-year-old	0.4197(4.26)	0.4445(3.53)	0.4551(3.05)	0.4699(2.49)	0.4443(5.33)
	2 年生 2-year-old	0.4401(5.48)	0.4312(4.50)	0.4586(2.22)	0.4578(3.89)	0.4447(4.90)
	多年生 Perennial	0.4416(5.14)	0.4461(4.66)	0.4648(5.29)	0.4475(2.06)	0.4488(4.75)
	平均 Mean	0.4328(4.94)	0.4454(4.29)	0.4580(3.34)	0.4580(3.47)	0.4479(2.25)

* 括号内的数据为变异系数 Date in the bracket represent variation coefficient (%)

表 2 杉木枝、叶中碳素密度的空间变化

Table 2 Spatial variation of carbon density in the branches and leaves of Chinese fir ($\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$)						
统计值 Statistical value	下层叶 Under leaf	中层叶 Middle leaf	上层叶 Upper leaf	下层枝 Under branch	中层枝 Middle branch	上层枝 Upper branch
平均值 Average value	0.4952	0.4994	0.5080	0.4436	0.4453	0.4426
变化范围 Variation range	0.4612~0.5164	0.4723~0.5275	0.4787~0.5524	0.4130~0.4871	0.3917~0.4845	0.3955~0.4965
标准差 Standard deviation	1.51	1.74	1.92	1.70	2.18	2.53
变异系数 Variation coefficient(%)	3.05	3.48	3.78	3.83	4.90	5.72

3.3 不同年龄杉木中不同器官碳素密度的动态变化

对 10 年生、11 年生和 14 年生杉木不同器官碳素密度的测定结果(表 3)表明,10 年生杉木各器官的碳素密度变化范围为 0.4529~0.4972 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,11 年生的为 0.4580~0.5022 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,14 年生的为 0.4580~0.5093 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,变异系数变化范围为 1.68%~8.44%。随着杉木林年龄的增长,各器官的碳素密度也相应地有所提高,这可能与各器官的老化程度有关;不同器官按密度高低排列基本上为树叶>树皮>树根>树干>树枝>球果。与此相比,在苏南丘陵区 27 年生杉木林的叶、枝、干、皮和根的碳素密度分别为 0.5190、0.4910、0.4740、0.5330 和 0.5100 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,18 年生国外松林的叶、枝、干、皮和根的碳素密度分别为 0.5590、0.5580、0.5490 和 0.5180 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,40 年生栓皮栎林的叶、枝、干、皮和根的碳素密度分别为 0.5210、0.4860、0.5120、0.4860 和 0.4520 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ [11]。海南岛尖峰岭热带山地雨林主是树种的叶、枝、干、皮和根的碳素密度分别为 0.4584、0.4653、0.5790、0.4562 和 0.5390 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,各组分内不同树种碳素密度变化不大,其样本变异系数为 6.5%~15%的范围内[8]。常绿季雨林的叶、茎的碳素密度分别为 0.4355、0.5381 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ [16]。显然,不同树种以及同一树种在不同地区,其各器官碳素密度有一定的差异,但它们的变化大都在 0.4500~0.5500 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ 范围之内。

据报道[17],各树种各器官的算术平均碳素密度与其林分的生物量加权平均碳素密度非常接近,两者之间相差不超过 1.2%。因此,本研究采用杉木各器官的算术平均法和其林分生物量的权重法计算杉木林的平均碳素密度。从表 3 中可以看出,两种方法的计算结果相差不超过 0.68%,同时也表明了杉木林的平均碳素密度随着林分年龄的增长而增加,10 年生杉木各器官的算术平均碳素密度为 0.4756 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,11 年生的为 0.4779 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,14 年生的为 0.4807 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 3.33%~4.20%之间。与此相比,同一林区内的 23 年生杉木各器官平均碳素密度为 0.5410 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ [13]。苏南地区 27 年生杉木各器官的平均碳素密度为 0.5100 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ [11]。北亚热带信阳林区 23 年生杉木各器官平均碳素密度为 0.4632 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ [13]。由此可见,同一种森林类型,采用同样的测定方法,但由于其所处的地理位置以及年龄阶段不同,各器官生长速度及其老化程度不同,各器官的算术平均碳素密度存在一定的差异。有研究数据或国家尺度上杉木林生物量的碳素贮量时,如果都以 0.4500 或 0.5000 $\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ 作为平均碳素密度

表 3 不同年龄杉木不同器官碳素密度

Table 3 Carbon densities in different organs of different age Chinese fir ($\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$)

器官 Organs	10 年生 10-year-old	11 年生 11-year-old	14 年生 14-year-old
树叶 Leaf	0.4811(4.01)	0.5022(3.80)	0.5093(3.12)
树枝 Branch	0.4529(4.31)	0.4580(2.77)	0.4580(3.35)
树干 Trunk	0.4729(3.70)	0.4758(2.16)	0.4764(1.68)
树皮 Bark	0.4972(5.79)	0.4905(5.12)	0.4994(7.25)
树根 Root	0.4740(7.62)	0.4708(3.23)	0.4785(8.44)
球果 Cone	—	0.4699(6.00)	0.4625(4.28)
器官平均 Mean of organs	0.4756(3.36)	0.4779(3.33)	0.4807(4.20)
林分平均 Mean of stands	0.4749	0.4812	0.4801

* 括号内的数据为变异系数. Date in the bracket represent variation coefficient (%)

来估算,都可能会造成估算结果偏低或偏高。准确的估算应该按气候带及年龄阶段而采用不同的平均碳素密度进行。

3.4 杉木林下地被物中的碳素密度

杉木林下地被物中碳素密度的测定,结果如表4所示,10年生和11年生杉木林中,灌木层的碳素密度总平均为0.4344 gC·g⁻¹,草本层为0.4009 gC·g⁻¹,死地被物层为0.4341 gC·g⁻¹,14年生杉木林中,灌木层的碳素密度总平均为0.4319 gC·g⁻¹,草本层为0.3490 gC·g⁻¹,死地被物层为0.4917 gC·g⁻¹,随着杉木林年龄的增长,林下植被各组分、死地被物的碳素密度变化规律不明显。

有研究^[17]表明,针叶树种各组分的含碳率普遍高于阔叶树种,针叶树种各组分的平均含碳率也高于阔叶树和灌木树种。从表3、表4中可以看出,林下植被各组分碳素密度明显地低于乔木层中相应组分的碳素密度,如灌木层叶片碳素密度为0.4256 gC·g⁻¹,低于乔木层树叶碳素密度(0.4811 gC·g⁻¹)。同一林分中各层次植物的平均碳素密度高低排列顺序为:乔木层>灌木层>草本层。

3.5 杉木林地土壤的碳素密度

从表5中可以看出,杉木林地土壤中的碳素平均密度并不随着林龄的增长而提高,11年生杉木林土壤的平均密度仅为0.0077 gC·g⁻¹,明显低于10年生的0.0127 gC·g⁻¹。10年生和14年生杉木林土壤各层的碳素密度随土壤深度的增加而逐渐下降,10年生和14年生杉木林土壤表土层(0~15cm)的密度分别为0.0194gC·g⁻¹和0.0206 gC·g⁻¹,亚表土层(15~30cm)分别为0.0139 gC·g⁻¹和0.0171 gC·g⁻¹。而11年生杉木林土壤各层的碳素密度明显低于10年生和14年生的,且各层分布不一,表土层(0~15cm)的密度仅为0.0060 gC·g⁻¹,亚表土层(15~30cm)为0.0118 gC·g⁻¹,表土层的密度明显低于亚表层。进一步分析其原因是:1998年(11年生)当地雨量特别多且以大强度的降雨为主,发生大洪水,造成土壤特别是表土层中的有机质大量流失。经过3a的恢复(14年生),林地土壤有机碳密度又有所提高,且以表土层的碳素密度提高最为明显。可见,任何可引起水土流失的因素均容易导致土壤碳损失,同时也反映了杉木人工林林地土壤的脆弱性。

4 结论

不同年龄的杉木枝、叶碳素密度随季节的变化规律基本一致,均表现为冬季>秋季>夏季>春季。叶平均碳素密度明显高于枝的平均密度,叶的平均碳素密度为0.5044 gC·g⁻¹,变异系数2.08%,杉木枝的平均碳素密度为0.4479 gC·g⁻¹,变异系数为2.25%。

不同层次的杉木叶的碳素密度的变化范围在0.4612~0.5524 gC·g⁻¹之间,叶中碳素密度随层次不同而发生变化,平均值的大小排列顺序为:上层>中层>下层。不同层次的杉木枝的碳素密度在0.3917~0.4965 gC·g⁻¹之间变化,平均值的大小次序为:中层>上层>下层。

10年生杉木各器官的平均碳素密度变化范围为0.4529~0.4972 gC·g⁻¹,11年生的为0.4580~0.5022 gC·g⁻¹,14年生的为0.4580~0.5093 gC·g⁻¹之间,变异系数范围为1.68%~8.44%。不同器官的碳素密度按高低排列基本上为树叶>树皮>树根>树干>树枝>球果。10年生杉木各器官碳素密度的算术平均值为0.4756 gC·g⁻¹,11年生的为0.4779 gC·g⁻¹,14年生的为0.4807 gC·g⁻¹。

随着杉木林年龄的增长,林下植被各组分、死地被物的碳素密度变化规律不明显。同一林分中各层次植物的碳素密度高低排列顺序为:乔木层>灌木层>草本层。

10年生和14年生杉木林土壤各层的碳素密度随土壤深度的增加而逐渐下降,11年生杉木林土壤各层的碳素密度却明显低于10年生和14年生的,且各层分布不一。

[1] Marland G. The prospect of solving the carbon dioxide problem forestation. U. S. Department of Energy, DOE/NBB-0082, Oak Ridge

表4 林下植被、死地被物中碳素密度

Table 4 Carbon densities in under-stratum plant, litter (gC·g ⁻¹)			
层次 Stratum	组分 Component	10年生和11年生 的平均密度 Average density of 10- year-old and 11-year-old	14年生平 均密度 Average density of 14-year-old
灌木层 Shrub stratum	叶 Leaf	0.4256(6.63)	0.4293(6.31)
	茎 Stem	0.4267(6.63)	0.4452(9.01)
	根 Root	0.4410(4.38)	0.4277(13.00)
	平均 Mean	0.4337(4.06)	0.4319(7.18)
草本层 Herb stratum	地上部分 Aboveground	0.4107(7.38)	0.4031(9.75)
	地下部分 Underground	0.3926(6.60)	0.2948(27.20)
	平均 Mean	0.4040(5.40)	0.3490(16.93)
死地被物层 Litter stratum		0.4341(4.26)	0.4917(17.59)

* 括号内的数据为变异系数 Date in the bracket represent variation coefficient (%)

表5 杉木林土壤碳素密度

Table 5 Soil carbons density in Chinese Fir plantation (gC·g ⁻¹)			
土壤深度 Soil depth(cm)	10年生 10-year-old	11年生 11-year-old	14年生 14-year-old
0~15	0.0194	0.0060	0.0206
15~30	0.0139	0.0118	0.0171
30~45	0.0101	0.0049	0.0124
45~60	0.0074	0.0081	0.0098
平均 Mean	0.0127	0.0077	0.0136

National Laboratory. TN, 1998.

- [2] Kolchugina, Tatyana P, Ted S Vinson. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomass in the former Soviet Union. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**: 207~221.
- [3] Fang J Y, Chen A P. Dynamic Forest Biomass Carbon Pools in China and Their Significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(9): 967~973.
- [4] Wang X K, Feng Z W, Yang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(1): 13~16.
- [5] Wang X K, Feng Z W. The potential sequester atmospheric carbon through forest ecosystem in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, **19**(4): 72~74.
- [6] Li Y D, Zeng Q B, Wu Z M, *et al.* Estimation of Carbon Storage in Tropical Natural Forest Vegetation in China. *Forest Research*, 1998, **11**(2): 156~162.
- [7] Guan D S, Peart M R. Environmental Effects of the Succession Vegetation of Lower Subtropical Zone in Southern China. *Environmental Science*, 2000, **21**(5): 1~5.
- [8] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, *et al.* Estimation of community productivity and net CO₂ accumulation of a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(2): 127~134.
- [9] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, HaiNan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, **21**(5): 416~423.
- [10] Fang Y T, Mo J M, Huang Z L, *et al.* Carbon accumulation and Distribution in *Pinus Massoniana* and *Schima superba* mixed forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve. *Journal of Tropical and Subtropica Botany*, 2003, **11**(1): 47~52.
- [11] Rnan 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 Province. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(6): 17~21.
- [12] Li M H, Yu M J, Chen Q C, *et al.* Dynamics of Carbon in the Evergreen Broad-Leaved Forest Dominated by *Cyclobal- Anopsis Glauca* in South- East China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(6): 645~651.
- [13] Chen C Y, Liao L P, Wang S L, *et al.* Carbon allocation and storage in Chinese fir plantation ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(supp.): 175~178.
- [14] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(3): 14~19.
- [15] Sang W G, Ma K P, Chen L Z. Primary study on Carbon Cycling in Warm Temperate Deciduous Broad- Leaved Forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(5): 543~548.
- [16] Jiang Y X, Lu J P. *Tropical Forest Ecosystems in Jian Feng-ling, HaiNan Island, China*. Beijing: Science Press, 1991. 218~234.
- [17] Ma Q Y, Chen X L, Wang J, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. *Journal Beijing Forestry University*, 2002, **24** (5/6): 96~100.
- [18] Beijing Forestry college. *Soil*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982. 98~117.
- [19] Department of National Forestry. *Forest Soil analysis methods*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000.

参考文献:

- [3] 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.
- [4] 王效科, 冯宗炜. 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.
- [5] 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. *生态学杂志*, 2000, **19**(4): 72~74.
- [6] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 等. 我国热带天然林植被C贮存量的估算. *林业科学研究*, 1998, **11**(2): 156~162.
- [7] 管东生, Peart M R. 华南南亚热带不同演替阶段植被的环境效应. *环境科学*, 2000, **21**(5): 1~5.
- [8] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳同化净增量的初步研究. *植物生态学报*, 1998, **22**(2): 127~134.
- [9] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林C素库及皆伐影响的初步研究. *应用生态学报*, 1998, **9**(4): 341~344.
- [10] 方运霆, 莫江明, 黄忠良, 等. 鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统碳素积累和分配特征. *热带亚热带植物学报*, 2003, **11**(1): 47~52.
- [11] 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.
- [12] 李铭红, 于明坚, 陈启常, 等. 青冈常绿阔叶林的碳素动态. *生态学报*, 1996, **16**(6): 645~651.
- [13] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. 杉木人工林生态系统碳素分配与贮量的研究. *应用生态学报*, 2000, **11**(增刊): 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. *林业科学*, 2002, **38**(3): 14~19.
- [15] 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. *植物生态学报*, 2002, **26**(5): 543~548.
- [16] 蒋有绪, 卢俊培, 等著. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京: 科学出版社, 1991. 218~234.
- [17] 马钦彦, 陈遐林, 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.
- [18] 北京林学院主编. *土壤学*. 北京: 中国林业出版社, 1982. 98~117.
- [19] 国家林业局, 森林土壤分析方法. 北京: 中国林业出版社, 2000.