

桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局*

莫德祥¹ 吴庆标^{1**} 林 宁² 卓 宇²

(¹ 广西大学林学院, 南宁 530005; ² 广西六万林场, 广西玉林 537800)

摘 要 以广西六万林场 31 年生 3 种密度柳杉(*Cryptomeria fortunei*)人工林为对象, 对其碳、氮储量以及碳、氮分配格局进行研究。结果表明: 低、中、高 3 种密度的柳杉人工林生态系统碳储量分别为 355.72、417.21 和 378.71 t · hm⁻², 氮储量分别为 17.91、22.13 和 19.99 t · hm⁻², 均表现为中密度 > 高密度 > 低密度; 低、中、高密度植被层碳储量分别为 127.71、101.98 和 100.12 t · hm⁻², 分别为土壤层碳储量的 56.01%、32.35%、35.94%, 表现为低密度 > 中密度 > 高密度; 植被层氮储量分别为 1048.85、674.26 和 705.69 kg · hm⁻², 为土壤层氮储量的 6.22%、3.14%、3.66%, 则表现为低密度 > 高密度 > 中密度。充分说明桂东南柳杉人工林生态系的碳、氮储量受林分密度的影响, 且碳、氮储量主要分布在土壤层。

关键词 柳杉; 密度效应; 碳储量; 氮储量

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)4-0794-06

Carbon and nitrogen storage and their allocation pattern in *Cryptomeria fortunei* plantations in southeastern Guangxi of South China. MO De-xiang¹, WU Qing-biao^{1**}, LIN Ning², ZHUO Yu² (¹ Forestry College, Guangxi University, Nanning 530005, China; ² Liuwan Forest Farm of Guangxi Province, Yulin 537800, Guangxi, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 794-799.

Abstract: Taking the 31-year-old *Cryptomeria fortunei* plantations with low, medium and high stand densities in the Liuwan Forest Farm in southeastern subtropical region of Guangxi as test objects, this paper studied their carbon and nitrogen storage and allocation pattern. The total ecosystem carbon storage in the plantations with low, medium and high densities was 355.72, 417.21 and 378.71 t · hm⁻², and the total ecosystem nitrogen storage was 17.91, 22.13 and 19.99 t · hm⁻², respectively, both with the order of medium density > high density > low density. The carbon storage in the vegetation layer of the plantations was 127.71, 101.98 and 100.12 t · hm⁻², accounting for 56.01%, 32.35% and 35.94% of the soil carbon storage in 0-100 cm layer, respectively, and showing the order of low density > medium density > high density. The nitrogen storage in the vegetation layer of the plantations was 1048.85, 674.26 and 705.69 kg · hm⁻², and occupied 6.22%, 3.14% and 3.66% of the soil nitrogen storage in 0-100 cm layer, respectively, following the order of low density > high density > medium density. Our study indicated that the carbon and nitrogen storage of *C. fortunei* plantation ecosystems in the southeastern Guangxi was affected by stand density, and most of the carbon and nitrogen storage was sequestered in soil.

Key words: *Cryptomeria fortunei*; density effect; carbon storage; nitrogen storage.

在整个大气碳循环系统中, 森林生态系统是陆地生态系统最主要的碳库, 保存着陆地生态系统中 60% 的碳元素 (Ceulemans *et al.*, 1999; Reich *et al.*,

2006), 而森林生态系统的碳在循环过程中会受到其他养分元素的制约, 其中氮是主要的制约因素之一 (Hungate *et al.*, 2003)。碳、氮在生态系统物质循环过程中相互作用, 对生态系统的生产力、固碳潜力以及稳定性都具有关键的影响作用 (Reich *et al.*, 2006), 其在植物体内的分配格局也反映了树木对环境资源的利用能力 (梅莉等, 2009)。研究表明,

* 广西“十一五”林业科技研究项目(桂林科字[2009]第23号)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205)资助。

** 通讯作者 E-mail: wuqb2003@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-10-03 接受日期: 2011-12-19

植物生活环境中氮素偏低可能降低植物对大气中 CO_2 的吸收能力 (Luo *et al.*, 2004), 而过量的氮素输入将会打破植物体内元素平衡, 影响植物光合作用, 使光合速率下降 (周薇等, 2010), 从而降低森林生态系统的固碳能力。过去关于植被的密度研究也主要集中在植被自疏 (Osawa *et al.*, 1989; Zeide *et al.*, 1991)、植树造林 (黄宝灵等, 2000; 谌红辉等, 2004) 和林木管理 (黄宝灵等, 2000) 等方面。但密度因子也同样关系到植被对土壤养分的吸收强度、凋落物的分解、养分归还, 以及生态系统碳汇及养分循环各环节。因此, 在有关生态系统的研究中, 对不同密度人工林碳、氮储量及其分配格局的相关研究是十分必要的。

柳杉 (*Cryptomeria fortunei*), 属杉科 (Taxodiaceae) 常绿大乔木, 也是我国亚热带地区优良速生用材林的主要造林树种之一。树木材质较好, 木材用途广, 生长迅速, 适生区域大, 尤其适合在中、低山的高海拔地区或湿润地区发展 (谢巧银, 2008)。柳杉的天然林仅见于中国东南的天目山、武夷山、日本本州岛及九州岛等地。普遍认为, 中国东南部、日本是柳杉分布中心 (王江等, 2007)。到目前为止, 国内对于柳杉生物量的相关研究大多是在四川川西盆地地区 (段文霞等, 2008, 2009) 和福建地区 (陈继祥, 2007; 余美惠, 2008)。但对于南亚热带气候区的柳杉生物量、碳储量的研究少见报道, 也未见关于不同密度柳杉人工林碳、氮格局方面的研究报道。

本文对桂东南地区 3 个不同密度柳杉人工林的碳、氮储量及其分配格局进行研究, 试图揭示植物体碳氮储存、分配格局与林分密度之间相互关系, 为探索人工林生态系统生产力、固碳潜力与氮等养分元素吸存之间相互关系以及人工碳汇林的林分密度管理提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

试验地位于广西玉林市六万林场莲花山分场内, $22^{\circ}33'N$, $109^{\circ}51'E$ 。属南亚热带季风气候区, 年平均气温为 21.5°C , 极端最高气温 39.4°C , 极端最低气温 -2.3°C , 年平均日照维持在 1800 h 以上, 年均降雨量在 1462.0 ~ 1847.7 mm, 且多集中在 6—9 月。林地平均海拔 820 m, 平均坡度 35° , 土壤以赤红壤、红壤为主, 林地土层平均厚度在 80 ~ 110 cm, 土壤 pH 值为 4.6 ~ 5.2。

表 1 不同密度 31 年生柳杉人工林林分特征

Table 1 Characteristics of 31 years old *Cryptomeria fortunei* plantation

密度组	密度 (株 · hm^{-2})	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	郁闭度
高密度 I	2650	12.9	9.1	0.9
中密度 II	2075	14.9	9.4	0.7
低密度 III	1740	20.0	15.6	0.7

试验地柳杉人工林标准地前茬为杉木纯林, 六万林场于 1980 年采用良种柳杉实生苗造林 (高密度初植密度为 $2850 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$; 中密度初植密度为 2200 ; 低密度初植密度为 2000), 调查时保留密度分别为 2650、2075 和 1740 株 · hm^{-2} (表 1)。林下草本植物主要有狗脊 (*Woodwardia japonica*)、扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellulatum*)、卷柏 (*Selaginella tamariscina*)、荇草 (*Arthraxon hispidus*) 和金毛狗 (*Cibotium barometz*) 等; 灌木有酸藤子 (*Embelia laeta*)、玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*)、藤构 (*Broussonetia kaempferi*)、路边青 (*Geum aleppicum*) 和小叶女贞 (*Ligustrum quihoui*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 植物样品采集及 C、N 含量测定 于 2010 年 12 月在柳杉人工林内选择立地条件相近、面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的 6 块标准地 (每个密度 2 块), 对标准地内每株树木进行编号并测定树高和胸径。根据测定结果, 以 4 cm 为一个径阶单位, 分 6 个径阶分别选取各径阶平均木各 1 株。采用 Monsic 分层切割法和全根挖掘法, 将平均木以 2 m 分段称重, 测定乔木层生物量; 并分别在树干的上、中、下部位取约 5 cm 厚度的圆盘样品, 用以测定树干的含水率和树皮率; 收集乔木层叶、枝、皮、干, 以及地下根系部分 (细根 (根直径 $d < 0.5 \text{ cm}$)、中根 ($0.5 \sim 2.0 \text{ cm}$)、粗根 ($\geq 2.0 \text{ cm}$)、根莖) (秦武明等, 2008) 分别称重, 并采集样品; 同时, 采用样方收获法 (标准地内随机设置 5 个面积为 1×1 的小样方), 测定林下植被和凋落物生物量。所有样品经烘干、粉碎、过筛后采用中国科学院生态环境研究中心的元素分析仪 (Vario EL III) 测定碳、氮含量, 每个样品 2 个重复。

1.2.2 土壤层样品采集与测定 在标准地中分别设置 8 个代表性采样点, 按 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 分层采集土壤样品, 把同一层次土壤按重量比例混合, 带回实验室于室内自然风干和粉碎过筛后采用中国科学院生态环境研究中心的元素分析仪 (Vario EL III) 测定碳、氮含量, 每个

样品2个重复。同时用环刀(100 cm³)采集各层土壤的原状土,带回实验室用环刀法测定土壤密度。

1.3 生物量及碳储量的计算方法

1.3.1 生物量的计算方法 采用标准木法,在样地内进行每木检尺,根据测定的胸径、树高以及林木径级分配确定几株标准木,按比例从各径级中选择出标准木,用标准木各器官组成(干、枝、叶、根)的全株生物量乘以该样地的树木株数得到人工林总生物量(罗辑等,2000)。灌草层和凋落物层采取实地收获生物量通过换算获得。

1.3.2 植被层碳、氮储量的计算方法 植物碳、氮含量采用元素分析仪器获得,根据对应器官的平均碳、氮含量乘以对应林分器官的总生物量就可得到各器官的总碳、氮储量,相加得到人工林总碳、氮储量。

1.3.3 土壤层碳、氮储量的计算方法 土壤碳、氮储量用土壤碳、氮含量乘以土层厚度和土壤密度。具体公式为: $C_s = \sum 0.1H_i \times B_i \times O_i$ 。式中, C_s 为土壤有机碳、氮储量(t·hm⁻²); H_i 为第*i*层土壤的平均厚度(cm), B_i 为第*i*层土壤的平均容重(g·cm⁻³); O_i 为第*i*层土壤的平均有机碳、氮含量(g·kg⁻¹),0.1为单位换算系数。

原始实验数据均采用 Excel 2003 软件进行分析整理和图表制作,采用 SPSS 11.5 软件进行单因素及双因素方差分析比较其显著性差异性。

2 结果与分析

2.1 不同密度柳杉人工林碳含量

由图1可见,柳杉人工林不同密度林分乔木层各器官平均碳含量由高密度到低密度分别在499.8~532.7、500.0~531.9和476.9~519.6 g·kg⁻¹,变异系数分别在0.66%~2.66%、0.88%~2.04%

和0.66%~2.23%。方差分析表明,不同密度林分以及各器官之间碳含量差异均为极显著($P < 0.01$)。其中高密度林分各器官碳含量由高到低分别为:树叶>树干>根莖>树皮>中根>树枝>细根>粗根;中密度林分各器官碳含量分别为:树叶>树干>根莖>树枝>细根>中根>粗根>树皮;低密度林分各器官碳含量分别为:树叶>树干>根莖>树枝>粗根>中根>细根>树皮。从整体上来看,人工林乔木层地上部分的碳含量大于地下部分,低密度的碳含量略低于中、高密度。

2.2 不同密度柳杉人工林氮含量

从图2可以看出,不同密度林分乔木层各器官氮含量由高密度到低密度分别在0.8~13.9、0.8~13.3和0.96~15.34 g·kg⁻¹,并且不同密度林分以及各器官之间差异均为极显著($P < 0.01$)。植物各器官氮含量有较大差异,从图2可以看出,不同密度林分植株各个器官氮含量最高都是叶,最低都是树干,高密度林分各器官氮含量排序为:叶>细根>树皮>中根>粗根>树枝>根莖>树干;中密度林分各器官氮含量排序为:叶>细根>树皮>中根>树枝>粗根>根莖>树干;低密度林分各器官氮含量排序为:叶>细根>树皮>中根>树枝>粗根>根莖>树干。各密度林分器官之间氮含量变化基本一致,新生器官(例如:叶、细根)中的氮含量都比较大,老化的植物器官(例如:树干、根莖)氮含量较低。

2.3 不同密度柳杉人工林土壤层碳、氮含量

土壤有机碳、氮含量主要是受动植物残体、植物根系和微生物分解作用的影响。由表2可以看出,3种不同密度柳杉人工林各层土壤有机碳、氮含量在0~20 cm层最高,并且均表现为随土壤层深度增加而减小。不同林分土壤碳、氮含量大小依次为:中密

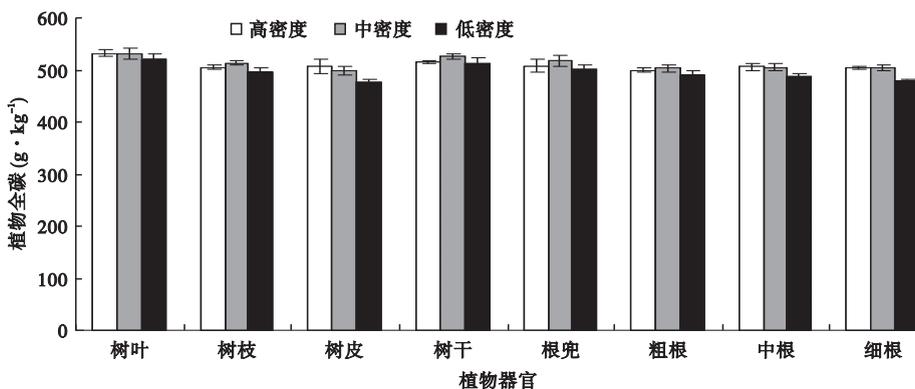


图1 柳杉不同密度人工林乔木层碳元含量

Fig. 1 Carbon content in tree layers of *Cryptomeria fortunei* plantation

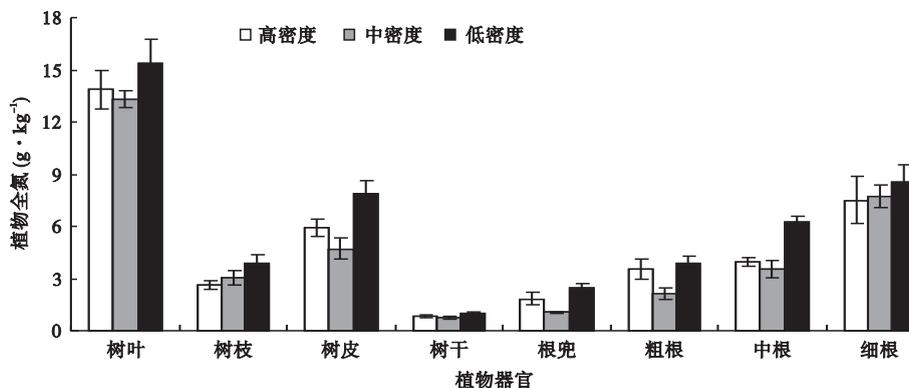


图2 柳杉不同密度人工林乔木层氮元含量

Fig. 2 Nitrogen content in tree layers of *Cryptomeria fortunei* plantation

度 > 高密度 > 低密度,碳、氮含量变化保持一致。柳杉的植物根系主要集中在土壤表层,加上枯落物和腐殖质层的影响,使土壤碳、氮含量随土壤深度的增加而降低。C/N 可反映碳、氮的耦合关系,也是评价土壤质量的一个重要指标(许泉等, 2006)。一般而言,当 C/N 比 15 ~ 25 内,土壤有机质供肥状况优越,C/N 较小时,微生物分解活动能力增强而使土壤有效养分增加(文启孝等, 1984)。柳杉不同密度人工林在 0 ~ 20 cm 层的 C/N 均 > 15,而 20 ~ 100 cm 略低,3 种林分土壤 C/N 差异不显著($P > 0.05$)。可见,浅层土壤具有很好的养分供应,深层土壤有利于微生物分解活动增加土壤有效养分。

2.4 柳杉人工林 3 种密度林分碳、氮储量

2.4.1 植被层碳、氮储量比较

研究表明,高密度柳杉人工林的植被碳、氮储量分别为 $100.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $705.69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;中密度植被碳、氮储量分别为 $101.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $674.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;低密度植被碳、氮储量分别为 $127.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1048.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3)。高密度柳杉人工林的植被碳储量与中密度林相比差别不大,氮储量比中密度林分高 4.66%;而低密度林分碳氮储量比中、高密度林分高出许多。

从各林分空间分布来看(表 3),植被碳、氮储量

主要集中在乔木层。3 种林分中乔木层碳、氮含量都占整个植被层 97% 以上,而乔木层的地上部分又是乔木层碳、氮储量的主体,占植被碳、氮储量的 75% 以上。从植被碳储量空间分布来看,各个器官中,树干的碳储量最高,占乔木的 46.56% ~ 49.26%;从各林分氮储量空间分布来看,乔木层氮储量占植被氮储量的 88.88% ~ 93.72%,3 种林分乔木层各个器官中,树叶的氮储量最大,中根的氮储量最小。

2.4.2 林下层碳、氮储量

灌草以及凋落物对森林土壤的理化性质和活性具有重要调节作用(杨玉盛等, 2004)。可见,森林的林下植被和凋落物现存量的变化对土壤碳、氮储量的影响较大。从表 3 可以看出,林下植被和凋落物碳储量从高密度到低密度分别为 2.81 、 2.89 和 $2.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,所占比例较小,分别占 2.81%、2.83% 和 1.79%;氮储量从高密度到低密度分别为 57.17 、 75.00 和 $65.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,所占比例分别为 8.10%、11.12% 和 6.28%,其中凋落物层碳、氮储量相对较大。可见,柳杉人工林的灌草以及凋落物的碳储量较少,但氮储量相对较大,特别是凋落物。

2.4.3 土壤层碳、氮储量

3 种密度柳杉人工林土壤碳储量分别为 278.59 、 315.23 和 $228.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;氮储量分别为 19.28 、 21.46 和 $16.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3),碳、氮储量均为中密度 > 高密度 > 低密度,可见柳杉人工林不同密度林分会可能对土壤碳、氮含量存在一定的影响。

2.4.4 不同密度柳杉人工林生态系统碳氮储量分配格局

由表 3 可以看出,柳杉人工林生态系统碳储量随林分密度由高到低分别为: 378.71 、 417.22 和 $355.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;氮储量别为 19.99 、 22.13 和

表 2 柳杉人工林土壤层碳、氮含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 2 Carbon and nitrogen storage in soil layers of *Cryptomeria fortunei* plantation

土壤层 (cm)	高密度林		中密度林		低密度林	
	N	C	N	C	N	C
0 ~ 20	3.6	58.8	4.2	66.8	2.6	44.7
20 ~ 40	1.4	19.8	2.1	30.4	1.5	19.4
40 ~ 60	1.1	13.6	1.4	18.5	1.1	11.5
60 ~ 80	1.0	12.0	0.7	9.3	0.8	8.5
80 ~ 100	0.8	10.0	0.7	9.4	0.7	7.0

表3 不同密度柳杉人工林林分碳、氮储量

Table 3 Carbon and nitrogen storage of *Cryptomeria fortunei* plantation

层次	器官	高密度林			中密度林			低密度林			
		碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)	氮储量 ($kg \cdot hm^{-2}$)	C/N	碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)	氮储量 ($kg \cdot hm^{-2}$)	C/N	碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)	氮储量 ($kg \cdot hm^{-2}$)	C/N	
乔木层	地上部分	树干	45.36	72.84	622.80	46.13	66.71	691.61	61.78	115.69	533.99
		树皮	4.55	53.25	85.51	4.74	44.73	105.90	5.72	95.03	60.19
		树枝	7.51	39.10	192.08	7.69	46.01	167.23	11.61	90.76	127.91
		树叶	13.38	348.30	38.42	13.74	342.89	40.07	16.15	477.03	33.86
		枯枝	3.61	21.63	166.66	2.71	19.84	136.40	2.45	31.67	77.47
	地下部分	小计	74.41	535.11	139.06	75.01	520.17	144.20	97.71	810.18	120.60
		根兜	18.48	66.79	276.77	19.73	39.29	502.20	22.67	110.96	204.33
		粗根	1.76	12.36	142.06	1.81	7.76	233.65	2.27	17.86	127.33
		中根	0.75	5.77	129.13	0.82	5.77	141.92	1.03	13.21	78.17
		细根	1.91	28.49	67.15	1.72	26.27	65.43	1.72	30.81	55.89
	合计	22.90	113.41	201.91	24.08	79.09	304.47	27.7	172.84	160.27	
	灌草层合计	0.18	4.67	38.54	0.16	4.12	82.19	0.37	14.29	26.09	
	凋落物层合计	2.63	52.50	50.10	2.73	70.88	38.52	1.92	51.53	37.28	
植被层合计	100.12	705.69	141.87	101.98	674.26	151.25	127.71	1048.85	121.76		
土壤层	278.59	19283.55	14.45	315.23	21459.98	14.69	228.01	16859.36	13.52		
生态系统合计	378.71	19989.24	18.95	417.22	22134.24	18.85	355.72	17908.21	19.86		

17.91 $t \cdot hm^{-2}$,大小排列均为中密度 > 高密度 > 低密度。其中,土壤层碳储量分别占总碳储量的73.56%、75.56%、64.10%,为植被层的2.78倍、3.09倍和1.79倍;土壤层氮储量分别占总氮储量的96.47%、96.95%、94.14%。由此可见,桂东南低山区不同密度的柳杉人工林碳氮储量主要集中在土壤层。

3 结论与讨论

研究表明,桂东南低山区3种密度柳杉人工林生态系统碳储量根据密度由低到高分别为:355.72、417.21和378.71 $t \cdot hm^{-2}$;氮储量分别为17.91、22.13和19.99 $t \cdot hm^{-2}$,大小排列均为中密度 > 高密度 > 低密度。由此可见,柳杉人工林碳、氮储量具有一定的相关性,并且适度的密度控制更有利于柳杉的生物量增加和碳积聚。同样,土壤层碳、氮储量占主要部分,其次是乔木层,这与中亚热带常绿阔叶林不同,其空间分布为乔木层最大,其次是土壤层(宫超等,2011)。此外,3种密度柳杉人工林生态系统碳含量均高于我国森林生态系统平均碳储量258.82 $t \cdot hm^{-2}$ (周玉荣等,2000),说明其固碳能力较高。

单从植被层固碳能力来看,低、中、高林分密度的植被层碳储量分别为127.71、101.98和100.12 $t \cdot hm^{-2}$,表现为低密度 > 中密度 > 高密度。相比而言,四川盆地地区26年生柳杉人工林植被层生物量为550 $t \cdot hm^{-2}$,估算碳储量为275 $t \cdot hm^{-2}$ (段文霞

等,2007),其生物量和碳储量都大于桂东南地区柳杉人工林,其原因可能是不同气候带条件差异引起,这说明桂东南亚热带区柳杉人工林分的生长和碳积聚显著低于纬度较高中亚热带湿润气候区的。另外可能也与林地坡度大小有较大关系,坡度较大的林地养分容易被雨水冲走,坡度低的易于堆积土壤养分。然而,相似海拔高度的中亚热带气候区28年生秃杉人工林植被层碳储量为124.48 $t \cdot hm^{-2}$ (何斌等,2009);中亚热带季风型气候26年生杉木人工林纯林植被层碳储量为105.199 $t \cdot hm^{-2}$,杉木观光木混交林植被层碳储量为135.759(杨玉盛等,2003);多年生马尾松林植被碳贮量为80.798 $t \cdot hm^{-2}$ (方运霆等,2002);而在阔叶林中,南亚热带季风气候区27年生观光木林植被碳储量为49.18 $t \cdot hm^{-2}$ (黄松殿等,2011)。可见,在亚热带针叶人工林中,柳杉人工林分在南亚热带低山区具有较好的植被固碳能力。

3种密度人工林植被层氮储量分别为705.69、674.26和1048.85 $kg \cdot hm^{-2}$ 。仅占人工林生态系统氮储量的3.53%、3.05%和5.86%。可见,土壤中的氮明显高于植被层中的氮,但土壤层氮储量均低于中国森林土壤层的平均氮密度34.64 $t \cdot hm^{-2}$ (张春娜等,2004)。在乔木层中,叶的氮含量明显高于其他器官,达到13.3~15.3 $g \cdot kg^{-1}$,并且略高于杉木的叶氮含量9.98 $g \cdot kg^{-1}$ (何斌等,2009)、巨尾桉12.79 $g \cdot kg^{-1}$ (李志辉等,2000)和马尾松11.96 $g \cdot kg^{-1}$ (刘文飞等,2008)。

从C/N来看,老器官的C/N均大于幼嫩器官,说明植物幼嫩器官中的氮含量高于老化器官,可见氮素对幼嫩器官生长具有重要作用。整个人工林生态系统中,土壤0~20 cm层C/N分别为:高密度16.5、中密度15.8、低密度17.5,并且随深度增加而递减。从空间分布来看,在碳、氮含量都正常的情况下,浅层土壤C/N>15,具有较好的养分供应,深层土壤C/N<15,则有利于微生物分解活动增加土壤有效养分(文启孝等,1984)。

综上所述,不同密度柳杉人工林的生态系统的碳、氮空间分布基本一致,并且适当的密度能够有利于柳杉生长和碳氮积累。在桂东南低山区,柳杉人工林碳、氮储量具有明显相关性,其中土壤层占主要部分,其次是乔木层以及林下植被。

参考文献

陈继祥. 2007. 柳杉与火力楠、湿地松混交林分结构和生物量的研究. 亚热带水土保持, **19**(2):10-12,32.

湛红辉, 丁贵杰. 2004. 马尾松造林密度效应研究. 林业科学, **40**(1): 92-98.

段文霞, 卢静惠, 肖猛, 等. 2009. 川西盆周山地几种人工林的碳聚积效应研究. 四川环境, **28**(2): 1-7,11.

段文霞, 朱波, 卢静惠, 等. 2008. 川西山地人工柳杉-杉木混交林碳聚积效应研究. 四川环境, **23**(5): 57-63.

段文霞, 朱波, 刘锐, 等. 2007. 人工柳杉林生物量及其土壤碳动态分析. 北京林业大学学报, **29**(2): 55-59.

方运霆, 莫江明. 2002. 鼎湖山马尾松林生态系统碳素分配和贮量的研究. 广西植物, **22**(4): 305-310.

宫超, 汪思龙, 曾掌权, 等. 2011. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征. 生态学杂志, **30**(9): 1935-1941.

何斌, 黄寿先, 招礼军, 等. 2009. 秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征. 林业科学, **45**(9): 251-257.

何斌, 罗柳娟, 梁机, 等. 2009. 速生阶段秃杉与杉木人工林营养元素积累及其分配特征. 福建林学院学报, **30**(1): 77-81.

黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 2000. 不同造林密度对尾叶桉生长、产量及材性影响的研究. 林业科学, **36**(1): 81-90.

黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 2000. 尾叶桉人工林种群密度的研究. 应用生态学报, **11**(1): 30-32.

黄松殿, 吴庆标, 廖克波, 等. 2011. 观光木人工林生态系统碳储量及其分布格局. 生态学杂志, **30**(11): 2400-2404.

李志辉, 李跃林, 谢耀坚. 2000. 巨尾桉人工林营养元素积累、分布和循环的研究. 中南林学院学报, **20**(3): 11-19.

刘文飞, 樊后保, 谢友森, 等. 2008. 闽西北马尾松人工林营养元素的积累与分配格局. 生态环境, **17**(2): 708-712.

罗辑, 杨忠, 杨清伟. 2000. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究. 植物生态学报, **24**(2): 191-196.

梅莉, 张卓文, 谷加存, 等. 2009. 水曲柳和落叶松人工林乔木层碳、氮储量及分配. 应用生态学报, **20**(8): 1791-1796.

秦武明, 何斌, 韦善华, 等. 2008. 厚荚相思人工幼林生态系统碳贮量及其分布研究. 安徽农业科学, **36**(32): 14089-14092.

王江, 刘军, 黄永强, 等. 2007. 柳杉起源及天然分布. 四川林业科技, **28**(4): 92-94.

文启孝, 杜丽娟, 张晓华, 等. 1984. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社.

谢巧银. 2008. 柳杉优良种源选择试验. 农林科学苑, (4): 315-316.

许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 2006. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异. 生态与农村环境学报, **22**(3): 57-60.

杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 2004. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, **24**(2): 359-367.

杨玉盛, 谢锦升, 王义祥, 等. 2003. 杉木观光木混交林C库与C吸存. 北京林业大学学报, **25**(5): 10-14.

余美惠. 2008. 沿海山地柳杉人工林生物量研究. 福建林业科技, **35**(4): 1-3.

张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 2004. 中国森林土壤氮储量估算. 西南农业大学学报(自然科学版), **26**(5): 572-575, 579.

周薇, 王兵, 李钢铁. 2010. 大气氮沉降对森林生态系统影响的研究进展. 中央民族大学学报(自然科学版), **19**(1): 34-40.

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

Ceulemans R, Janssens IA, Jach ME. 1999. Effects of CO₂ enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. *Annals of Botany*, **84**: 577-590.

Hungate BA, Dukes JS, Shaw MR, et al. 2003. Atmospheric science: Nitrogen and climate change. *Science*, **302**: 1512-1513.

Luo YQ, Currie WS, Dukes JS, et al. 2004. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bioscience*, **54**: 731-739.

Osawa A, Sugita S. 1989. The self-thinning rule: another interpretation of Weller's results. *Ecology*, **70**: 279-293.

Reich PB, Hobbie SE, Lee T, et al. 2006. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, **440**: 922-925.

Zeide B. 1991. Self-thinning and stand density. *Forest Science*, **37**: 517-523.