

# 巨尾桉人工林养分循环研究

李跃林<sup>1</sup>, 李志辉<sup>2</sup>, 谢耀坚<sup>3</sup>

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; 2. 中南林学院, 湖南 株洲 412006; 3. 中国桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

**摘要:**对湘南低山丘岗区密度为 900、1125 和 1500 株/hm<sup>2</sup> 的 6 年生巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *urophglla*) 丰产示范林营养元素积累、分布和生物循环进行了研究。结果表明:不同组分的营养元素含量差异较大,以树叶营养元素含量最高,树干最低。各组分中大量元素以 K 和 N 的含量最高,P 的含量最低。微量元素以 Mn、Fe 的含量高,Cu 最低。单株林木营养元素积累量随林分密度的增加而明显减小,低密度林分是高密度林分的 1.44 倍,不同组分营养元素积累量的多少不受林分密度制约,单株林木各种营养元素积累量依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu;林分营养元素积累量随林分密度的增加而增加,乔木层营养元素积累量占整个林分养分总积累量的 75.3% 以上。在草本层各种不同密度林分均以 N 素积累量最高,K、Ca 较高,Cu 的积累量最低。年净积累量随林分密度的增加而提高。3 种密度林分年净积累量分别达到 239.4548、264.1148 和 270.2648 kg/(hm<sup>2</sup> · a),大量元素占总量的 95.20% 以上。各种元素的年净积累量以 Ca 为最大,占 41.08%~41.42%;Cu 的年净积累量最小,仅占 0.66%。林分大量元素的吸收量达 351.1961~373.7767kg/(km<sup>2</sup> · a);微量元素的吸收量达 15.9549~18.9697kg/(hm<sup>2</sup> · a)。以中等密度林分为高。各种元素吸收量依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu。大量元素归还给林地以低密度林分为高,达 124.8640kg/(hm<sup>2</sup> · a),微量元素归还给林地以中低密度林分高,达 6.7098kg/(hm<sup>2</sup> · a)。营养元素的循环速率,随着林分密度的增大而逐步下降。各种营养元素循环速率依次为:N>Mg>P>K>Zn>Mn>Ca>Cu>Fe。

**关键词:**巨尾桉人工林;营养元素;生物循环;林分密度

## Nutrient cycle in *Eucalyptus grandis* × *urophglla* plantation

LI Yue-Lin<sup>1</sup>, LI Zhi-Hui<sup>2</sup>, XIE Yao-Jian<sup>3</sup> (1. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, China, 3. China Eucalyptus Research and Development Center, Zhangjiang 524022, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1734~1740.

**Abstract:** The accumulation, distribution and biocycle of nutrients of 6-years *Eucalyptus grandis* × *urophglla* high yield exemplary forest with the densities of 900, 1125, and 1500 trees/hm<sup>2</sup> were studied in the low hilly area of south Hunan. The results showed that the nutrient contents were different in various components, highest in the leaves and lowest in the stems. The contents of K and N were the highest, and those of P were the lowest in macro-elements, and Mn and Fe were the highest and Cu was lowest in microelements. Nutrient accumulation of single tree decreased distinctly with the increase of the standing density, and that of single tree of the low density stand was 1.44 times as those with high densities. Otherwise, the high or low of nutrient accumulation quantity were not conditioned by standing density in variable components. The nutrients accumulation of single tree were reduced in abundance in turn: Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu. The standing nutrient accumulation raised with the increase of the standing density. Nutrient accumulation quantities of arbor layer were over 75.3% in total those of the stands. The accumulation of N was the highest, then the K and Ca, and Cu the lowest. Annual net accumulation raised with the increase of the standing density and reached 239.4548, 264.1148 and 270.2648 kg/(hm<sup>2</sup> · a) with the three densities, respectively, and that of macro-elements were over 95.20% in total those of the stands. Annual net accumulation of Ca the highest, accounting for 41.08%~41.42% of all elements, and that of Cu was lowest, accounting for 0.66%. The absorption of macro-

基金项目:国家自然科学基金重大基金(编号:39899370)中国科学院知识创新项目(编号:KZCX2-407)和国家“九五”林业科技攻关研究(编号:96-011-01-03)资助项目

本文得到彭少麟教授的悉心指导及任海博士的帮助,特此致谢。

收稿日期:2000-06-25;修回日期:2000-08-10

作者简介:李跃林(1970~),男,湖南邵阳人,博士。主要从事植被生态,土壤生态及生态系统,全球变化研究。

elements reached 351.1961~373.7767 kg/(hm<sup>2</sup>·a) in the stands, that of microelements 15.9549~18.9697kg/(hm<sup>2</sup>·a), which was highest in the stand with medium density. The absorption of nutrient elements were ranked in turn:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu. The restitution of macro-elements reached 124.8640kg/(hm<sup>2</sup>·a), occurring in the stand with low density, and that of microelements reached 6.7098kg/(hm<sup>2</sup>·a), which were in the stand with middle density. The cycling velocity of nutrient element reduced as the increase of the standing density, that of the elements were ranked in turn:N>Mg>P>K>Zn>Mn>Ca>Cu>Fe.

**Key words:** *Eucalyptus grandis* × *urophglla* plantation; nutrient element; biocycle; standing density

文章编号:1000-0933(2001)10-1734-07 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

巨尾桉是一种优良的纸浆材树种,在我国桉树引种北缘区的湖南南部低山丘陵区引种栽培已有 6a 的时间。但是,对巨尾桉人工林生态系统养分循环的研究,还是一个空白。本文在获得大量调查数据的基础上,开展了巨尾桉人工林生态系统养分含量、积累、分布及生物循环的研究。这为进一步研究巨尾桉造林初植密度的确定、中幼林施肥和防止地力衰退提供了科学依据,其理论价值和生产实际意义重大。

## 1 试验区及林分概况

试验地位于资兴市黄草镇丰林村和高码乡高塘村,地理位置为东经 113°09′~113°35′,北纬 25°34′~26°10′,属中亚热带季风湿润气候区。地貌类型属低山丘岗类型,坡度在 15°~25°,土壤为板岩发育的紅壤,土层深厚,在 80cm 以上。土壤肥力中等,属中上立地类型。3 种林分密度分别为 900、1125 和 1500 株/hm<sup>2</sup> (下称低、中、高密度),林分平均胸径依次分别为 16.4、15.7 和 14.5cm,林分平均树高分别为 16.2、15.8 和 14.6m。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与林分调查

在 3 种不同密度的巨尾桉试验林中设置样地 6 个(试验固定样地 3 个,即每种密度各 1 个,临时样地 3 个),面积为 667m<sup>2</sup>。样地内做每木调查,然后按径级选取 24 株样木,结合树干解析和生物量调查测定<sup>[1]</sup>, (细)根生物量测定采用收获法<sup>[2~4]</sup>,凋落物测定见文献<sup>[4]</sup>。

### 2.2 分析测定方法

微量凯氏法测定 N,钼锑抗比色法测定 P,原子吸收法测定 Ca、Mg、Fe、Zn、Mn,火焰光度法测定 K<sup>[5]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 巨尾桉各组分及草本和地被物营养元素含量与分布

从表 1 可知,巨尾桉不同组分的营养元素含量按其大小依次为:树叶>树皮>果实>树根>树枝>树干。这表明了元素在不同植物组分中的积累存留的差异。叶是有机物合成的场所,是代谢最活跃的器官,积累的营养元素含量最高。树干以木质为主,其生理功能最弱,元素含量最低。

巨尾桉各组分中大量元素以 K、N 的含量最高,其次为 Ca,P 的含量最低。微量元素以 Mn、Fe 的含量高,Cu 最低,Zn 在各组分中差异不大。具体说来,N、Mg 和 Mn 元素在树叶中含量最高,P 和 K 在果实中含量最高,Ca 在树皮中含量最高。

巨尾桉人工林下草本和地被物营养元素含量较为丰富,仅次于树叶中。N、K 和 Ca 在草本植物中含量高于地被物,而其它元素含量低于地被物,这表明林分归还给土壤的养分比较丰富。

### 3.2 平均单株林木营养元素的积累和分布

由表 2 可知,巨尾桉 3 种不同密度林分的平均单株林木大量元素和微量元素积累量分别为:1.6833、1.4992、1.1767kg 和 80.3127、71.3519、55.6795g,这表明低密度有利于单木的养分积累。

单株林木营养元素的积累量随密度的增大而减小,低密度林分单株营养元素积累量是高密度林分的 1.44 倍。同时,营养元素积累量的多少不受密度制约,大量元素排列顺序依次为:树干>树根>树皮>树枝>树叶>果实,微量元素排列顺序依次为:树干>树根>树枝>树皮>树叶>果实。不同密度单株

林木各营养元素积累量同样不受密度影响,依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu。

表 1 巨尾桉平均木各组分及草本和地被物营养元素含量表

Table 1 Average nutrient contents of components in forest tree of *E. grandis* × *urophylla*, herb and litter

组分 Component	N(%)	P(%)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Cu (×10 <sup>-6</sup> )	Fe (×10 <sup>-6</sup> )	Zn (×10 <sup>-6</sup> )	Mn (×10 <sup>-6</sup> )
树干 Stem	0.097	0.019	0.264	0.151	0.012	6.111	91.661	9.402	206.998
树枝 Branch	0.235	0.044	0.591	0.571	0.035	12.348	36.231	10.724	692.238
树叶 Leaf	1.279	0.087	0.972	0.841	0.226	8.462	84.423	22.918	1186.745
树皮 Bark	0.241	0.035	0.615	1.831	0.098	8.226	78.819	11.504	995.835
果实 Fruit	0.571	0.109	1.073	0.881	0.104	6.588	37.107	19.304	875.619
树根 Root	0.237	0.041	0.616	0.998	0.099	8.598	69.558	10.587	789.996
草本 Herb	1.256	0.071	1.062	0.885	0.165	10.556	78.663	22.568	782.669
地被物 Litter	1.201	0.095	1.005	0.856	0.237	16.874	84.568	23.698	957.332

### 3.3 林分营养元素的空间分布

从表 3 可知,3 种不同密度的巨尾桉林分营养元素积累总量随林分密度的增加而增加,乔木层从低密度到高密度,大量元素为:1514.9436、1686.5715 和 1765.0326kg/hm<sup>2</sup>,微量元素为:72.2814、80.2709 和 83.5192kg/hm<sup>2</sup>。各组分营养元素积累总量,不受林分密度制约,表现出同单株林木一致的变化规律。在不同密度林分中,各种营养元素积累量也同样不受林分密度的影响,表现出与单株林木同样的变化规律。

在该巨尾桉人工林中,林木生存空间的养分元素总积累量达 2108.6664~2406.5219kg/hm<sup>2</sup>,其中乔木层是有机物的主要生产,所积累的营养元素占整个林分的大部分。3 种密度从低至高的顺序,乔木层养分含量分别为 1587.2250、1766.8424、1848.5518kg/hm<sup>2</sup>,分别占林分养分总积累量的 75.3%、76.5%和 76.8%。从乔木层各种营养元素的积累量看,各种不同密度林分均以 Ca 为高,分别达到 638.8876、833.4447 和 865.0203kg/hm<sup>2</sup>。

从表 3 还可知,草本层的生物量要比乔木层少得多,所积累的营养元素也少得多。3 种密度从低至高的顺序,草本层养分含量分别为 88.5640、81.5071、68.8047kg/hm<sup>2</sup>,分别占林分养分总积累量的 4.2%、3.5%和 2.9%。草本层营养元素积累量随密度的增大而减小,这是因为林分密度大,郁闭度高,草本层生物小之缘故。从草本层各种营养元素的积累量看,各种不同密度林分均以 N 最高,K 和 Ca 较高。

地被物这一层次包括死地被物和粗腐殖质。这一层次所积累的营养元素甚为可观。3 种密度林分分别达到 432.8774、461.3259 和 489.1654kg/hm<sup>2</sup>,占整个林分养分积累总量的 20.5%、20.0%和 20.3%。这表明林分归还给土壤的养分比较丰富,保证了整个生态系统能够有效地按照其自然的功能运转,有助于整个生态系统物质与能量的良性循环。从而为桉树人工林生态系统维持其本身的稳定和平衡奠定了基础,同时也说明了桉树人工林生态系统良性循环不能打破其循环中凋落物物质归还这一重要环节<sup>[6,7]</sup>。

### 3.4 林分养分积累速率

林分的养分积累速率,即年净积累量,是养分平衡公式中不可缺少的存留量定量指标。从表 4 可以看出,年净积累量随林分密度的增加而提高。3 种密度林分年净积累量分别为 239.4548、264.1148 和 270.2648kg/(hm<sup>2</sup>·a),其中大量元素分别占总量的 95.35%、95.36%和 95.2%。微量元素分别为 11.1227、12.2599 和 12.5262kg/(hm<sup>2</sup>·a),由于草本层地上部分及大部分叶所含养分当年形成,又当年归还,故没有计算在净积累量中,而列入归还量中。巨尾桉人工林系统中各元素的年净积累量以 Ca 为最大,占整个系统总量的 41.08%、41.20%和 41.42%,占大量元素年净积累量的 43.09%、43.20%和 43.44%。而 Cu 的年净积累量最小,仅占整个系统总量的 0.67%、0.67%和 0.66%。由表 4 计算可得,3 种密度下树干生物量约占林分生物量的 65%左右,而养分积累百分比相对低,约 33%。这对维持地力有利,因为巨尾桉作为纸浆材,伐走的是木材,故耗费的养分不会太大。

### 3.5 营养元素的生物循环

按照生物循环公式<sup>[8]</sup>:吸收=存留+归还,对 3 种不同密度的 6 年生巨尾桉人工林营养元素的吸收、存留、归还及其养分数据等特点进行了定量研究。由表 5 可知,3 种不同密度的 6 年生巨尾桉林分大量元素及微量元素的吸收量均以中等密度林分为高。各种元素吸收量依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn

表 2 巨尾桉单株林木平均元素积累与分布表  
Table 2 Accumulation and distribution of nutrient elements in single tree of *E. grandis* × *uropophylla*

林分密度 Stand density (Tree/hm <sup>2</sup> )	组分 Component	单株木平均生物量 Single biomass (kg)	大量元素 Macro-element (kg)				微量元素 Micro-element (g)				微量元素 合计 (g) Total		
			N	P	K	Ca	Mg	Total	Cu	Fe		Zn	Mn
900	树干 Stem	95.68	0.0928	0.0182	0.2526	0.1445	0.0115	0.5195	0.5847	8.7701	0.8996	19.8056	30.0600
	树枝 Branch	16.87	0.0396	0.0074	0.0997	0.0963	0.0059	0.2490	0.2083	0.6112	0.1809	11.6781	12.6785
	树叶 Leaf	4.73	0.0605	0.0041	0.0460	0.0398	0.0107	0.1611	0.0400	0.3993	0.1084	5.6133	6.1611
	树皮 Bark	10.27	0.0248	0.0036	0.0632	0.1880	0.0101	0.2896	0.0845	0.8095	0.1181	10.2272	11.2893
	果实 Fruit	1.14	0.0065	0.0012	0.0122	0.0100	0.0012	0.0312	0.0075	0.0423	0.0220	0.9982	1.0700
	树根 Root	21.74	0.0515	0.0089	0.1339	0.2170	0.0215	0.4328	0.1869	1.5122	0.2302	17.1745	19.1038
合计 Total	150.43	0.2757	0.0435	0.6076	0.6956	0.0608	1.6833	1.1119	12.1446	1.5592	65.4969	80.3127	
1125	树干 Stem	83.56	0.0811	0.0159	0.2206	0.1262	0.0100	0.4537	0.5106	7.6592	0.7856	17.2968	26.2522
	树枝 Branch	15.01	0.0353	0.0066	0.0887	0.0857	0.0053	0.2215	0.1853	0.5438	0.1610	10.3905	11.2806
	树叶 Leaf	4.58	0.0586	0.0040	0.0445	0.0385	0.0104	0.1559	0.0388	0.3867	0.1050	5.4353	5.9657
	树皮 Bark	9.14	0.0220	0.0032	0.0562	0.1674	0.0090	0.2577	0.0752	0.7204	0.1051	9.1019	10.0027
	果实 Fruit	0.94	0.0054	0.0010	0.0101	0.0083	0.0010	0.0257	0.0062	0.0349	0.0181	0.8231	0.8823
	树根 Root	19.31	0.0458	0.0079	0.1189	0.1927	0.0191	0.3845	0.1660	1.3432	0.2044	15.2548	16.9685
合计 Total	132.54	0.2481	0.0386	0.5391	0.6187	0.0547	1.4992	0.9821	10.6881	1.3793	58.3024	71.3519	
1500	树干 Stem	62.70	0.0608	0.0119	0.1655	0.0947	0.0075	0.3405	0.3832	5.7471	0.5895	12.9788	19.6986
	树枝 Branch	11.71	0.0275	0.0051	0.0692	0.0669	0.0041	0.1728	0.1446	0.4243	0.1256	8.1061	8.8005
	树叶 Leaf	4.28	0.0547	0.0037	0.0416	0.0360	0.0097	0.1457	0.0362	0.3613	0.0981	5.0796	5.5749
	树皮 Bark	7.15	0.0172	0.0025	0.0440	0.1309	0.0070	0.2016	0.0588	0.5636	0.0823	7.1202	7.8248
	果实 Fruit	0.62	0.0035	0.0007	0.0067	0.0055	0.0006	0.0170	0.0041	0.0230	0.0120	0.5429	0.5819
	树根 Root	15.02	0.0356	0.0061	0.0925	0.1499	0.0149	0.2990	0.1291	1.0447	0.1590	11.8657	13.1987
合计 Total	101.48	0.1994	0.0301	0.4195	0.4838	0.0438	1.1767	0.7560	8.1640	1.0664	45.6930	55.6795	

Table 3 Accumulation and distribution of nutrient elements in the stands of *E. grandis* × *uropigilla*

林分密度 Stand density (Tree/hm <sup>2</sup> )	组分 Component	林分生物量 Stand biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	大量元素 Macro-element (kg)							微量元素 Macro element (kg)					微量元素 合计(kg) Total
			N	P	K	Ca	Mg	Total	Cu	Fe	Zn	Mn			
900	树干	86112	83.5286	16.3613	227.3357	130.0291	10.3334	457.5882	0.5262	7.8931	0.8096	17.8250	27.0540		
	树枝	15183	35.6801	6.6805	89.7315	86.6949	5.3141	224.1011	0.1875	0.5501	0.1628	10.5102	11.4106		
	树叶	4257	54.4470	3.7036	41.3780	35.8014	9.6208	144.9509	0.0360	0.3594	0.0976	5.0529	5.5449		
	树皮	9243	22.2756	3.2351	56.8445	169.2393	9.0581	260.6526	0.0760	0.7285	0.1063	9.2045	10.1154		
	果实	1026	5.8585	1.1183	11.0090	9.0391	1.0670	28.0919	0.0068	0.0381	0.0198	0.8984	0.9630		
	实根	19566	46.3714	8.0221	120.5266	195.2687	19.3703	389.5591	0.1682	1.3610	0.2071	15.4571	17.1934		
	小计	135387	248.1612	39.1208	546.8252	626.0725	54.7638	1514.9436	1.0008	10.9302	1.4033	58.9472	72.2814		
	草本	2510	31.5256	1.7821	26.6562	22.2135	4.1415	86.3189	0.0265	0.1974	0.0565	1.9645	2.2451		
	地被物	12360	148.4436	11.7420	124.2180	105.8016	29.2932	419.4984	0.2086	1.0453	0.2929	11.8326	13.3790		
	合计	150257	428.1304	52.6449	562.6994	638.8876	88.1985	2020.7609	1.2359	12.1729	1.7629	72.7443	87.9055		
1125	树干	94005	91.1849	17.8610	248.1732	141.9476	11.2806	510.4472	0.5745	8.6166	0.8838	19.4588	29.5337		
	树枝	16886	39.6827	7.4300	99.7977	96.4205	5.9102	249.2411	0.2085	0.6118	0.1811	11.6893	12.6907		
	树叶	5152	65.9005	4.4827	50.0823	43.3325	11.6447	175.4426	0.0436	0.4850	0.1181	6.1147	6.7114		
	树皮	10282	24.7808	3.5989	63.2374	188.2726	10.0769	289.9865	0.0846	0.8105	0.1183	10.2397	11.2530		
	果实	1057	6.0383	1.1527	11.3470	9.3166	1.0998	28.9544	0.0070	0.0392	0.0204	0.9260	0.9926		
	实根	21723	51.4853	8.9067	133.8183	216.8030	21.5065	432.5199	0.1868	1.5111	0.2300	17.1617	19.0895		
	小计	149107	279.0725	43.4319	606.4559	696.0927	61.5186	1686.5715	1.1049	12.0241	1.55147	65.5902	80.2709		
	草本	2310	29.0136	1.6401	24.5322	20.4435	3.8115	79.4409	0.0244	0.1817	0.0521	1.8980	2.0652		
	地被物	13210	158.6521	9.3791	140.2902	116.9085	21.7965	447.0264	0.2229	1.1171	0.3131	12.6164	14.2895		
	合计	164627	466.7382	44.5511	771.2783	833.4447	87.1266	2213.0388	1.3522	13.2207	1.9169	80.0445	96.6305		
1500	树干	94050	91.2285	17.8695	248.2920	142.0155	11.2860	510.6915	0.5747	8.6207	0.8843	19.4682	29.5479		
	树枝	17565	41.2778	7.7286	103.8092	100.2962	6.1478	259.2594	0.2169	0.6364	0.1884	12.1592	13.2008		
	树叶	6420	82.1118	5.5854	62.4024	53.9922	14.5092	218.6010	0.0543	0.5420	0.1471	7.6189	8.3624		
	树皮	10725	25.8473	3.7538	65.9588	196.3748	10.5105	302.4450	0.0882	0.8453	0.1234	0.8143	0.8729		
	果实	930	5.3103	1.0137	9.9789	8.1933	0.9672	25.4634	0.0061	0.0345	0.0180	0.8143	0.8729		
	实根	22530	53.3961	9.2373	138.7848	224.8494	22.3047	448.5723	0.1937	1.5671	0.2385	17.7986	19.7980		
	小计	152220	299.1717	45.1883	629.2260	725.7213	65.7254	1765.0326	1.1340	12.2461	1.5996	68.5385	83.5192		
	草本	1950	24.4920	1.3845	20.7080	17.2575	3.2175	67.0605	0.0206	0.1534	0.0440	1.5262	1.7442		
	地被物	13790	173.2024	9.7909	146.4498	122.0415	22.7535	474.2381	0.2327	1.1662	0.3268	13.2016	14.9273		
	合计	167960	496.8661	56.3637	796.3848	865.0203	91.6964	2306.3312	1.3873	13.5657	1.9704	83.2673	100.1907		

表 4 巨尾桉林分元素净积累量

林分密度 Stand density (tree/hm <sup>2</sup> )	组分 Component	林分生物量 Stand biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	元素净积累量 (kg/hm <sup>2</sup> ·a)											元素合计 Total (kg)
			大量元素 Macro-element											
			N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn			
900	树干 Stem	14352	13.9214	2.7269	37.8893	21.6715	1.7222	0.0877	1.3155	0.1349	2.9708	82.4404		
	树枝 Branch	2531	5.9467	1.1134	14.9553	14.4492	0.8857	0.0312	0.0917	0.0271	1.7517	39.2520		
	树皮 Bark	1541	3.7126	0.5392	9.4741	28.2066	1.5097	0.0127	0.1214	0.0177	1.5341	45.1280		
	果实 Fruit	171	0.9764	0.1864	1.8348	1.5065	0.1778	0.0011	0.0063	0.0333	0.1497	4.8425		
	树根 Root	3261	7.2286	1.3370	20.0878	32.5448	3.2284	0.0280	0.2268	0.0345	2.5762	67.7921		
	合计 Total	21855	32.2857	5.9028	84.2412	98.3785	7.5238	0.1608	1.7618	0.2176	8.9825	239.4548		
1125	树干 Stem	15688	15.1975	2.9768	41.3622	23.6579	1.8801	0.0957	1.4361	0.1473	3.2431	89.9968		
	树枝 Branch	2814	6.1338	1.2383	16.6330	16.0701	0.9850	0.0348	0.1020	0.0302	1.9482	43.6553		
	树皮 Bark	1714	4.1301	0.5998	10.5396	31.3788	1.6795	0.0141	0.1351	0.0197	1.7066	50.2033		
	果实 Fruit	176	1.0064	0.1921	1.8912	1.5228	0.1833	0.0012	0.0065	0.0034	0.1543	4.9911		
	树根 Root	3621	8.5809	1.4845	22.3031	36.1338	3.5844	0.0311	0.2518	0.0383	2.8603	75.2682		
	合计 Total	23992	35.5287	6.4915	92.7289	108.7934	8.3123	0.1769	1.9315	0.2389	9.9126	264.1148		
1500	树干 Stem	15675	15.2048	2.9783	41.3820	23.6693	1.8810	0.0958	1.4368	0.1474	3.2447	90.0399		
	树枝 Branch	2928	6.8796	1.2881	17.3015	16.7160	1.0246	0.0361	0.1061	0.0314	2.0265	45.4100		
	树皮 Bark	1788	4.3079	0.6256	10.9931	32.7291	1.7518	0.0147	0.1409	0.0206	1.7801	52.3637		
	果实 Fruit	155	0.8851	0.1690	1.6632	1.3656	0.1612	0.0010	0.0058	0.0030	0.1357	4.3894		
	树根 Root	3755	8.8994	1.5396	23.1308	37.4749	3.7175	0.0323	0.2612	0.0398	2.9664	78.0618		
	合计 Total	24300	36.1767	6.6005	94.4706	111.9549	8.5360	0.1799	1.9507	0.2421	10.1534	270.2648		

表 5 巨尾桉人工林元素(kg/(hm<sup>2</sup>·a))生物循环表

林分密度 Stand density (tree/hm <sup>2</sup> )	项目 Item	大量元素 Macro-element											元素合计 Total
		循环量											
		N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn			
900	吸收量①	78.1403	8.5991	122.2364	130.2614	13.9593	351.1961	0.1796	2.0460	0.2897	12.1163	17.5582	
	存留量②	32.2857	5.9028	84.2412	98.3785	7.5238	228.3321	0.1608	1.7618	0.2176	8.9825	11.1227	
	归还量③	45.8546	2.6963	37.9952	31.8829	6.4355	124.8640	0.0368	0.2842	0.0821	3.1338	6.4355	
	归还速率④	0.59	0.31	0.31	0.24	0.46	0.35	0.19	0.14	0.27	0.26	0.37	
	循环速率⑤	80.3613	9.1524	129.6969	139.8665	14.7001	373.7767	0.2128	2.2161	0.3195	13.0408	18.9697	
	吸收量①	35.5287	6.4915	92.7289	108.7934	8.3123	251.8549	0.1769	1.9315	0.2389	9.9126	12.2599	
1125	存留量②	44.8326	2.6609	36.9680	31.0731	6.3878	121.9218	0.0359	0.2846	0.0806	3.1282	6.7098	
	归还量③	0.56	0.29	0.22	0.43	0.33	0.17	0.17	0.25	0.24	0.24	0.35	
	循环速率⑤	78.4360	9.1470	129.0315	141.0877	14.7083	372.4097	0.2128	2.2202	0.3178	13.2040	15.9549	
	吸收量①	36.1767	6.6005	94.4706	111.9549	8.5360	257.7386	0.1799	1.9507	0.2421	10.1534	12.5262	
	存留量②	42.2593	2.5465	31.5609	29.1328	6.1723	114.6711	0.0329	0.2693	0.0757	3.0506	3.4287	
	归还速率④	0.54	0.28	0.27	0.21	0.42	0.31	0.15	0.12	0.24	0.23	0.21	

① Absorption, ② Accumulation, ③ Restitution, ④ Cycling velocity

>Cu。存留量以高密度林分稍高,但差异不明显。各种元素存留量依次顺序与吸收量相同。大量元素归还给林地以低密度林分为高,微量元素归还给林地以中低密度林分为高。由于本研究未将净降水淋洗和树干流所归还的养分估算进去,养分的实际归还比上述计算要大。

大量元素和微量元素的循环速率:低密度林分平均分别为 0.35 和 0.37;中密度林分为 0.33 和 0.35;高密度林分为 0.31 和 0.21。各种元素循环速率依次为:N>Mg>P>K>Zn>Mn>Ca>Cu>Fe。随着林分密度的增大而营养元素的循环速率逐步下降,高密度林分微量元素的循环速率仅 0.21,即表明微量元素归还给土壤的量太低,也表明了巨尾桉特别速生的特点。巨尾桉 1 年生时即可郁闭成林,营养物质大部分用于生物量构成。因此营造高密度林分,幼林的施肥应注意补充适量的微量元素,这为巨尾桉造林初植密度确定、中幼林施肥和防止桉树林地力衰退提供了科学依据。

#### 4 结论与讨论

6 年生巨尾桉人工林不同组分的营养元素含量差异较大,以树叶营养元素含量最高,树干最低。按其含量大小依次为:树叶>树皮>果实>树根>树枝>树干。各组分中大量元素以 K 和 N 的含量最高,P 的含量最低。微量元素以 Mn、Fe 的含量高,Cu 最低,Zn 在各组分中差异不大。从元素含量看来,巨尾桉作为造纸材,主要是伐走木材,耗费的养分不会太大,对维持地力有利。

单株林木营养元素的积累量随密度的增大而减小,低密度林分单株营养元素积累量是高密度林分的 1.44 倍。不同组分营养元素积累量的多少不受林分密度制约。大量元素排列顺序依次为:树干>树根>树皮>树枝>树叶>果实,微量元素排列顺序依次为:树干>树根>树枝>树叶>果实,说明枝干和树皮在养分积累中对两类元素的选择吸收是明显的。单株林木各种营养元素积累量依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu。林分营养元素积累总量随密度的增加而增加。不同组分营养元素积累总量,不受林分密度制约,表现出同单株林木一致的变化规律。

乔木层是有机物的主要生产,所积累的营养元素占整个林分养分总积累量的 75.3% 以上。各种不同密度林分均以 Ca 的积累量高。草本层营养元素积累量比乔木层低得多。仅占林分养分总积累量的 4.2% 以下。草本层营养元素积累量随林分密度的增大而减小,主要因为林分密度大,郁闭度高,草本层生物小。各种不同密度林分均以 N 素积累量最高,K 和 Ca 较高,Cu 的积累量最低。死地被物和粗腐殖质所积累的营养元素甚为可观。占整个林分养分积累总量的 20.0% 左右。这表明林分归还给土壤的养分比较丰富,对于维持生态系统的稳定和平衡及维持地力,保护地被物是重要的营林措施。年净积累量随林分密度增加而提高。3 种密度林分年净积累量 239.4548~270.2648kg/(hm<sup>2</sup>·a),大量元素占总量的 95.20% 以上。各种元素的年净积累量以 Ca 为最大,占 41.08%~41.42%;Cu 的年净积累量最小,仅占 0.66%。

林分大量元素及微量元素的吸收量以中等密度林分为高,各种元素吸收量依次为:Ca>K>N>Mg>P>Mn>Fe>Zn>Cu。营养元素的存留量以高密度林分稍高,但差异不明显。各种元素存留量依次顺序与吸收量相同。大量元素归还给林地以低密度林分为高,达 124.8640kg/(hm<sup>2</sup>·a),微量元素归还给林地以中低密度林分为高,达 6.7098kg/(hm<sup>2</sup>·a)。由于本研究未将净降水淋洗和树干流所归还的养分估算进去,养分的实际归还比上述计算要大。营养元素的循环速率,随着林分密度的增大而逐步下降。各种营养元素循环速率依次为:N>Mg>P>K>Zn>Mn>Ca>Cu>Fe。各种林分营养元素的循环速率低,即表明营养元素归还给林地少,也充分说明了巨尾桉特别速生的特点,营养物质大部分用于乔木层生物量构成。

#### 参考文献

- [1] 潘维伟. 森林生态系统第一性生产量的测定技术与方法. 湖南林业科学, 1981, 1(2): 1~12.
- [2] Upchurch D R, and Taylor H M. Tools for studying rhizosphere dynamics. In: *Rhizosphere Dynamics*. A. F. Harrison, P. Ineson, L. C. Hammond eds. Boulder: Westview Press, 1990.
- [3] 陈灵芝, 任继凯, 陈清明. 北京西山人工洋槐林的生物量研究. 植物学报, 1986, 28: 201~208.
- [4] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999. 12~29.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [6] 彭少麟, 方炜, 等. 人类干扰对热带人工桉林生态系统的影响. 生态学报, 1995, 15(增刊 A 集): 31~37.
- [7] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学. 北京: 科学出版社, 1996. 360~372.
- [8] Duvinga 等. 温带落叶林矿质元素的生物循环. 见: 李文华, 等译, 植物生态学译丛(第 1 集), 北京: 科学出版社, 1974. 72~95.