

第 2 代杉木人工林微量元素的积累、分配及其生物循环特征

方 晰, 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星

(中南林学院生态研究室, 湖南株洲 412006)

摘要:利用定位观测取得的数据, 对第 2 代杉木人工林 4 种微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn)的积累、空间分布及其生物循环进行了研究。结果表明: 杉木林生态系统中 4 种微量元素总贮量为 307289.708 kg/hm², 其空间分布表现为土壤层 > 乔木层 > 死地被物层 > 草本层 > 灌木层。土壤层中微量元素的贮量占绝对优势, 4 种微量元素贮量的排序为 Fe > Mn > Zn > Cu。杉木中 4 种微量元素的积累量为 35.971 kg/hm², 排列顺序为 Mn > Fe > Zn > Cu, 各器官中微量元素积累量排列顺序为树叶 > 树根 > 树枝 > 树干 > 树皮。杉木生态系统中 4 种微量元素的年存留量为 4.108 kg/(hm²·a), 年归还量为 -2.209 kg/(hm²·a), 其中凋落物归还量为 1.257 kg/(hm²·a), 淋溶归还量为 -3.446 kg/(hm²·a), 杉木林冠针叶、枝及树干对 Zn 元素具有较强的吸附能力, 年吸收量为 2.084 kg/(hm²·a), 尽管杉木对微量元素吸收数量不大, 但为净吸收的。4 种微量元素的吸收系数排序为 Mn > Cu > Fe > Zn; 利用系数的排序为 Cu > Fe > Mn > Zn; 循环系数的顺序为 Zn > Fe > Mn > Cu; 周转期大小顺序为 Mn > Cu > Fe > Zn。因此, 该系统中 Zn、Fe 存留比例较小, 周转期短, 流动性较大, 而 Mn、Cu 则相反, 存留比例较大, 周转期长, 流动性较小。

关键词:第 2 代杉木人工林; 微量元素; 积累; 生物循环

Accumulation, distribution and biological cycling of microelements in a second rotation Chinese fir plantation

FANG Xi, TIAN Da-Lun, XIANG Wen-Hua, YAN Wen-De, KANG Wen-Xing (Research Section of Ecology, Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1313 ~ 1320.

基金项目:国家科技部基础研究重大资助项目(2102); 国家重点野外台站资助项目(2000-076); 国家林业局重点科研项目(2001-07); 湖南省科委重大资助项目(99JZY1004)

收稿日期:2002-06-03; **修订日期:**2003-04-05

作者简介:方 晰(1968~), 女, 广西邕宁县人, 博士生, 副教授, 主要从事生态学教学和森林生态系统定位研究。E-mail: xwh510@sohu.com

致谢:英文摘要得到澳大利亚国立大学资源环境与社会学校 Juergen Bauhus 博士帮助修改, 特此表示感谢。

Foundation item: The National Key Fundamental Research Project of the Ministry of Science and Technology (No. 2102); Research Program of National Key Scientific Station for Field Observation (No. 2000-076); Key Research Program of State Forestry Administration (No. 2001-07), and Key Research Program of Hu'nan Science and Technology Commission (No. 99JZY1004)

Received date:2002-06-03; **Accepted date:**2003-04-05

Biography: FANG Xi, Ph. D. candidate, Associate professor, major research field: long term research of forest ecology. Email: xwh510@sohu.com

Acknowledgements: The authors would like to thank Dr. Juergen Bauhus from the School of Resources, Environment and Society, Australian National University, who gave the valuable comments and helped improve the English abstract.

Abstract: This study investigated the accumulation, distribution and biological cycling of four microelements (Fe, Mn, Cu, Zn) in a second rotation Chinese fir plantations at the Huitong Ecological Station, Hu'nan Province of China. The quantities of micronutrients in the system could be ranked in the following order: Fe (303558.9 kg/hm^2) > Mn (1783.7 kg/hm^2) > Zn (1672.0 kg/hm^2) > Cu (275.2 kg/hm^2). The greatest pool of micronutrients was in the soil, and the next largest pool was in overstorey trees. The smallest pool was found in understorey plants. In the soil, Fe was evenly distributed in different layer whereas Zn was mainly concentrated at $0 \sim 45 \text{ cm}$ depth. The concentration in the distribution of Mn and Cu in the $45 \sim 60 \text{ cm}$ depth layer indicated adsorption processes at that depth. The overstorey trees of Chinese fir had accumulated Fe 12.70 kg , Mn 22.34 kg , Cu 0.24 kg/hm^2 and Zn 0.69 kg/hm^2 . Obviously, the highest accumulation was observed for Mn and the lowest was found for Cu. The amounts of micronutrients in different parts of overstorey trees decreased in the order of leaves > roots > branches > stem > bark. Microelements storage in understorey plants and litter was up to 2.16 kg/hm^2 of Fe, 3.12 kg/hm^2 of Mn, 0.05 kg/hm^2 of Cu and 0.18 kg/hm^2 of Zn. Microelements in understorey plants and litter constituted an important nutrient pool in Chinese fir plantations. The annual microelement accumulation reached Fe 1.50 , Mn 2.50 , Cu 0.03 and Zn 0.08 kg/hm^2 . The annual returns to soil were Fe 7.99 , Mn 6.77 , Cu 0.15 and Zn -17.04 kg/hm^2 , of which litterfall contained Fe 0.22 , Mn 1.00 , Cu 0.004 and Zn 0.029 kg/hm^2 and leaching Fe 7.70 , Mn 5.76 , Cu 0.15 and Zn -17.07 kg/hm^2 , respectively. The aboveground tree components in Chinese fir plantations had a strong capacity to accumulate Zn. The total annual uptakes of the four elements were $9.49 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ of Fe, $9.27 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ of Mn, $0.30 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ of Cu and $-16.97 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ of Zn. Although the amount of uptake was very low, it was a net uptake. The uptake coefficient, utilization coefficient, cycling coefficient and turnover period of 4 microelements followed the order of Mn > Cu > Fe > Zn, Cu > Fe > Mn > Zn, Zn > Fe > Mn > Cu, and Mn > Cu > Fe > Zn, respectively. The biological cycling of Zn and Fe was characterized by low retention, short turnover periods and fast flow rates, while that of Cu and Mn was characterized by high retention, long turnover periods and slow flow rates. These results provide some basic information for soil nutrient manipulations and further research of biological cycling in Chinese fir plantations

Key words: second rotation Chinese fir plantation; microelements; accumulation; biological cycling

文章编号:1000-0933(2003)07-1313-08 中图分类号:S718.55 文献标识码:A

在绿色植物的生命过程中,除了需要大量营养元素(如 N、P、K、Ca、Mg 等)来保证以外,还需要必要的微量元素才能顺利地进行^[1]。微量元素与植物的光合作用、碳水化合物的运转和积累有密切相关性,对植物的干物质积累起着重要作用^[1]。许多研究表明,微量元素可与生物体相互作用,通过结构和调节机制而产生营养性、毒性和刺激性,从而对有机体的生长发育、繁殖、农林(畜)产品的数量和质量产生很大的影响^[2]。目前,许多国家就微量元素与食物链的关系开展了一些的研究工作,并取得了明显的进展^[3~5]。我国也相继开展了土壤、植物或动物体中某些微量元素背景值的研究^[6~9]。但在森林生态系统养分循环的研究方面,大都是偏重于大量营养元素的循环,仅有为数不多学者在研究分析森林生态系统养分循环时,同时涉及到了微量元素的含量与循环^[10~13]。相比之下,由于植物体内的微量元素含量低,加上测定方法上的限制,微量元素在森林生态系统中的积累、分配及其生物循环规律的研究报道在国内外报道仍很少。杉木是我国南方特有的优良用材树种,有近千年的栽培历史,全国分布最广,面积已达到 911.1 万 hm^2 ^[14]。20 世纪 80 年代第 1 期世界银行贷款中,杉木占 34% ^[15]。可见,杉木在我国南方集体林区的林业生产建设中的地位和作用。但杉木林面积较大和皆伐作业的永续利用方式造成多代连栽,杉木林地生产力的维持以及杉木林的持续速生丰产成为了林业生产中面临的主要问题^[16]。而营养元素循环作为森林生态系统基本

功能过程之一,是系统生产力及持久性的决定因素。为此,本文根据定位观测的数据,对第 2 代杉木人工林生态系统中微量元素的积累、分配及其生物循环进行探讨,以阐明杉木人工林中微量元素的分布、迁移规律,有利于揭示森林经营方式对森林土壤肥力的影响,探索维持林地生产力的机理和生态过程,实现杉木林的可持续经营,也为更深入地研究森林生态系统养分循环提供部分基础数据。

1 材料与方 法

试验地设于国家重点野外科学观测试验站-湖南会同生态定位站,地理坐标为东经 109°45',北纬 26°50'。地貌为低山丘陵,海拔高 300~500 m,相对高度在 150 m 以下。气候属典型的亚热带湿润气候,年平均气温 16.8℃,年相对湿度在 80%以上,年降水量为 1100~1400 mm。地层古老,以震旦纪板溪系灰绿色板岩、变质页岩为主。土壤为山地黄壤。站内有 8 个试验集水区,其自然地理状况基本相似,彼此相距不超过 100 m,本次研究是在 I、Ⅲ 号集水区内进行,集水区内为 1988 年营造的第 2 代杉木人工林,林下代表性植被有杜茎山(*Macrsajaponica*)、柃木(*Burga spiece*)、拔契(*Smidax china*)、狗脊(*Woodardia japonca*)等。测定时间为 1997 年 11 月份和 1998 年的 11 月份,试验林分特征见表 1。

表 1 试验林分特征

Table 1 The property of the investigated stands(1998)

样地编号 No.	地形地势 Topography	林分密度 Density (tree/hm ²)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均树高 Mean H (m)	各生长级林木的株数百分比 Tree number percentage of each growth grade(%)				
					I	II	III	IV	V
1	山坡 Hillside	1594	11.59	9.72	12.03	23.31	36.09	18.05	10.52
2	山坡 Hillside	2164	10.71	9.55	12.00	16.00	40.00	21.33	10.67
3	山麓 Foothill	1834	11.80	10.01	15.25	25.42	40.68	7.63	11.02
4	山洼 Valley	2284	12.43	9.99	13.25	21.19	49.67	9.27	6.62
5	山洼 Valley	2524	11.84	10.10	13.94	21.21	27.88	27.88	9.09
	平均 Mean	2080	11.67	9.87	13.29	21.43	38.86	16.83	9.62

1.1 杉木生物量和净生产力的测定

在集水区的固定样地内,对杉木人工林生物量进行动态观测。生物量的测定采用分级分层取样法^[17]。以 2a 间测定的生物量年增长量作为净生产力的估测指标。

1.2 林下地被物生物量的测定

在样地内按梅花形设置 25 个面积 1 m×1 m 的小样方,记录每个样方内的植物种类,灌木分为叶、茎、根,草本植物分为地上部分和地下部分,采用全挖法实测生物量。死地被物则全部测定生物量。

1.3 凋落物量的测定

在集水区内的山坡、山麓和山洼安装面积 20 m² 的塑料薄膜装置各 1 个,每月收集 1 次,按组分测定生物量。

1.4 植物、土壤和水样样品采集与化学分析方法

测定林分生物量的同时,杉木分层按干、皮、枝(分当年生、1 年生、2 年生、老枝)、叶(分当年生、1 年生、2 年生、老叶)、根(分<0.2 cm、0.2~0.5 cm、>0.5 cm、根头)等组分分别采集 6 株样木的分析样品。对样品逐一进行化学分析,以 6 株样木的算术平均值作为最终分析结果。

灌木层植物将同种植物分为茎、叶、根分别采集。草本层植物将同种植物分地上部分和地下部分分别采集,死地被物以混合样进行采集。凋落物在每月收集时,选取一定量的凋落物作为分析样品。土壤分层(0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm)采集,并测定土壤容重,根据容重计算出单位面积土层重量。

大气降水水样,在杉木林集水区径流场内安装一座高 22 m(高出林冠层 1.5 m 以上)的观测铁塔上采集;林冠穿透水水样在穿透水承接器中采集;树干茎流水水样是用 2 m 长塑料导管从树干高 1.5 m 处蛇形缠绕树干在基部处采集。在 2a 期间,根据降水性质和天气状况等,在每次降雨时,基本上都采集了水样,

以其算术平均值作为最终分析结果。

植物、土壤和水样中的 Fe、Mn、Cu、Zn 用 Hp3510 型原子吸收分光光度计测定。

2 结果与分析

2.1 杉木中微量元素的积累与分配

人工林生态系统中,林木是最活跃、最重要的亚系统,该亚系统所进行的初级生产既是能量固定过程,亦是营养元素的积累过程。林木中营养元素的积累与分配主要决定于林木生物量的积累(现存量)及其各组分中营养元素的含量。根据各层次不同年龄和器官的微量元素含量及相对应组分的生物量计算,杉木中 4 种微量元素总积累量为 35.971 kg/hm²(见表 2)。在杉木中 4 种微量元素的积累量的排列顺序为 Mn>Fe>Zn>Cu。从表 2 可以看出,生物量与微量元素于各组分中分配上的差异,针叶中微量元素所占比例远远超过了其生物量所占比例,在 14.43% 生物量中,微量元素积累量为 16.885 kg/hm²,占总积累量的 46.94%。而树干(去皮)其生物量占总生物量的 47.70%,但其中的微量元素积累量仅为总积累量的 10.76%。各组分的微量元素积累量排列顺序为:树叶>树根>树枝>树干>树皮。树叶的微量元素积累量高是因为树叶是植物诸功能的中心,特别是光合作用的主要器官,植物体内的各种营养元素遵循着优先供应的原则而使之含量较大有关;而树根的积累量比较高是由于微量元素由根部吸收后,不容易迁移而积累在树根而使之含量较大有关。树叶、枝、皮中微量元素的积累量占总积累量的 71.71%。由此可知,杉木采伐利用是仅利用树干部分造成的养分输出不大,对林地生产力产生影响较小。值得注意的是林木采伐后,环境条件改变对养分循环的途径和速率所产生的影响。

表 2 杉木人工林的生物量及微量元素的积累与分配^{*}

Table 2 The accumulation and distribution of biomass and microelements in Chinese fir plantation

分析组分 Composition	生物量 Biomass (t/hm ²)	微量元素 Microelement (kg/hm ²)				
		Fe	Mn	Cu	Zn	合计 Total
树叶 Leaf	10.43 (14.43)	2.648	13.941	0.074	0.225	16.885(46.94)
树枝 Branch	8.40 (11.62)	1.929	4.207	0.070	0.156	6.362(17.69)
树干 Stem	34.48 (47.70)	1.887	1.844	0.033	0.108	3.872(10.76)
树皮 Bark	7.70 (10.65)	0.783	1.425	0.029	0.120	2.357(6.55)
树根 Root	11.27 (15.59)	5.458	0.919	0.035	0.083	6.495(18.06)
总计 Total	72.28 (100)	12.702	22.336	0.241	0.692	35.971(100)

^{*}括号内的数字为百分数 Data in the bracket represent percentage

由于各组分生物量占总量的比率不同,某些组分含有某一元素的含量虽然较高,但由于该组分的生物量较小,则其所含有某一元素的可能小于其它组分。从表 2 可看出,同一种微量元素在不同组分的积累量存在着明显差异,其基本规律如下:

Fe 树根>树叶>树枝>树干>树皮
 Mn 树叶>树枝>树干>树皮>树根
 Cu 树叶>树枝>树根>树干>树皮
 Zn 树叶>树枝>树皮>树干>树根

2.2 土壤中微量元素的积累与分配

土壤是森林生态系统中相对稳定的组成要素,是微量元素的重要来源,也是微量元素迁移、转化和积累的重要场所。土壤中微量元素的含量,既与母岩和成土母质有密切的关系,又受到局部地形和生物地球化学循环的深刻影响。杉木林土壤中微量元素积累与分配状况如表 3 所示。由于土壤各层次的深度不一致,为了便于比较,分别取每层 15 cm 厚度体积的含量和容重及体积之积得出积累量。

从表 3 中可以看出,杉木林土壤中 Fe 元素贮量在各层次分布均匀,其总贮量达 303544.01 kg/hm²,Zn 元素的贮量为 2298.61 kg/hm²,其中,其贮量达 1298.61 kg/hm²,占土壤层 Zn 总贮量的 77.71%,优势比较明显。而 Mn、Cu 元素的分布情况与 Zn 元素不同,主要分布在下层(15~60 cm)中,下层土壤中的贮量比上

层土壤贮量明显要高,表现出明显的沉积现象。杉木林土壤中,4 种微量元素贮量的排列顺序为:Fe>Mn>Zn>Cu。贮量最大的 Fe 元素的贮量是贮量最小的 Cu 元素贮量的 1104.18 倍。

表 3 杉木林土壤中微量元素积累与分配*

Table 3 The storage and distribution of microelements of the soil in Chinese fir plantation

层次 Layer (cm)	Fe		Mn		Cu		Zn	
	积累量 S (kg/hm ²)	分配比 D (%)						
0~15	77528.66	0.256	257.70	0.147	61.09	0.222	435.32	0.260
15~30	74990.08	0.247	456.35	0.259	69.28	0.252	444.25	0.266
30~45	76809.31	0.253	525.81	0.299	76.59	0.279	419.04	0.251
45~60	74215.96	0.244	518.34	0.295	67.94	0.247	372.51	0.223
合计 Total	303544.01	1.00	1758.20	1.00	274.90	1.00	1671.12	1.00

* S storage, D percentage of distribution

2.3 杉木林生态系统中微量元素总积累量及其空间分布

杉木林生态系统中微量元素的总积累量及其在层次中的空间分布状况见表 4。从该表中可以看出,杉木林生态系统中微量元素的总贮量为 307 289.708 kg/hm²,其中土壤占有量最大,为 307 248.23 kg/hm²,占总贮量的 99%以上,土壤层是生态系统微量元素的主要贮存库,在森林生态系统物质循环中起着十分重要作用。植物群落中仅为 37.873 kg/hm²。而杉木中为 35.971 kg/hm²,仅占整个生态系统微量元素总贮量的 0.0134%。

从整个生态系统来看,4 种微量元素的积累量在空间上的分布表现为:土壤层>乔木层>死地被物层>草本层>灌木层(表 4)。草本层的微量元素积累量为 1.121 kg/hm²,排列顺序为 Fe(0.622)>Mn(0.460)>Zn(0.032)>Cu(0.007)。灌木层的微量元素积累量为 0.781kg/hm²,排列顺序为 Mn(0.437)>Fe(0.310)>Zn(0.027)>Cu(0.007)。死地被物层的微量元素积累量为 3.605 kg/hm²,排列顺序为 Mn(2.225)>Fe(1.228)>Zn(0.118)>Cu(0.034)。灌木层、草本层和死地被物层三者的微量元素积累量为 5.507 kg/hm²,占整个生态系统的 0.002%,为杉木的 15.31%,比例比较小,但是重要的养分库。

表 4 杉木林生态系统微量元素的积累量及其空间分布

Table 4 Microelement accumulation and spatial distribution in Chinese fir plantation

层次 Stratum	生物量/土壤 Biomass/Soil (t/hm ²)	微量元素 Microelement (kg/hm ²)				
		Fe	Mn	Cu	Zn	合计 Total
乔木层 Tree stratum	72.28	12.702	22.336	0.241	0.692	35.971
下木层 Under stratum						
灌木层 Shrub stratum	0.70	0.310	0.437	0.007	0.027	0.781
草本层 Herb stratum	0.64	0.622	0.460	0.007	0.032	1.121
死地被物层 Litter stratum	3.23	1.228	2.225	0.034	0.118	3.605
土壤层 Soil stratum(0~60 cm)	7080	303544.01	1758.20	274.90	1671.12	307248.23
总计 Total		303558.872	1783.658	275.189	1671.989	307289.708

2.4 微量元素生物循环特征

生物循环是指森林土壤和植物间营养元素的流动过程,包括吸收、存留、归还三个环节,循环平衡公式为:吸收=存留+归还^[18]。存留是指多年生植物各组分在 1 年内营养元素增加的数量;吸收元素的一部分则以凋落物的残落和分解、净降水淋洗和树干茎流淋溶以及根部的解吸、外渗、分泌等方式归还土壤。通过上述方法计算杉木林生态系统微量元素生物循环的各项指标(表 5)。当然,按此法计算所得的归还量是未能考虑根枯死分解和分泌和外渗等途径归一定给土壤的养分量,因而比实际归还量偏低。

从表 5 中可以看出,微量元素吸收量为 2.084 kg/(hm²·a),存留量为 4.108 kg/(hm²·a),总归还量

为 $-2.209 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 其中凋落物归还的养分量为 $1.257 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 淋溶养分归还量为 $-3.446 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。值得注意的是在会同试验区自然降水中 Zn 的含量比其它微量元素的含量要高, 经过一年多的定位观测, 自然降水中 Zn 的含量平均为 $1.554 \text{ mg}/\text{kg}$, 而经过杉木林冠层后的穿透水及树干茎流中 Zn 的含量却大大降低, 分别为 $0.108 \text{ mg}/\text{kg}$ 和 $0.562 \text{ mg}/\text{kg}$, 说明杉木针叶、枝及树干对雨水中的 Zn 有较强的吸附能力, 从而使淋溶归还量为负数。也有研究表明, 进入杉木林集水区的重金属元素 (Cu、Zn、Pb、Cd), 除部分来源于自然循环外, 大部分是由于人为活动所引起, 并在会同林区土壤中有一定程度的富集^[19]。

表 5 杉木人工林微量元素的生物循环

Table 5 Microelement biological cycling in Chinese fir plantation

项目 Items	Fe	Mn	Cu	Zn	合计 Total
现存量 Storage(kg/hm^2)	12.702	22.336	0.241	0.692	35.971
吸收量 Absorption [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	9.485	9.268	0.296	-16.965	2.084
总归还量 Total Return [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	7.986	6.765	0.150	-17.043	-2.209
凋落物归还量 Return of litter [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	0.221	1.003	0.004	0.029	1.257
淋溶归还量 Return of leaching [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	7.698	5.762	0.146	-17.072	-3.446
存留量 Retention [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	1.499	2.503	0.028	0.078	4.108
吸收系数 Absorption coefficient	0.0001	0.0360	0.0048	负值	0.00003
利用系数 Utilization coefficient	0.75	0.41	1.23	负值	0.06
循环系数 Cycling coefficient	0.84	0.73	0.51	1.00	负值
周转期 Turnover period(a)	0.63	3.30	1.61	负值	负值

从表 5 中可以看出, Fe 元素的年吸收量最大, 其次为 Mn, 4 种元素年吸收量的顺序为: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn}$, 年存留量的顺序为: $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu}$, 年归还量的排序为: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn}$ 。

生态系统的养分循环的特点可以通过吸收系数、利用系数、循环系数及周转期来表征^[18~20]。吸收系数是指单位时间、单位面积植物所吸收的某种元素的量与表土层中相应元素总量之比; 利用系数为单位时间、单位面积植物所吸收的某种元素的量与存在于植物现存量中相应元素总量之比; 而循环系数则是单位时间、单位面积植物归还量与相应吸收的量的比; 周转期为养分元素经历一个循环周期所需的时间, 由养分的总贮量与归还量的比, 各参数的计算结果(见表 5)表明, 杉木林对 Mn 元素的吸收系数最大, 为 0.036, 其次是 Cu, 为 0.0048, 吸收系数最小的是 Zn, 为负值, 说明杉木林对 Mn 吸收强度最大, Cu 次之, Zn 最低, 其吸收系数的排序是: $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn}$ 。

杉木林微量元素平均利用系数为 0.06。从各微量元素的利用系数来看, Cu 的利用系数最高为 1.23, 其次为 Fe(0.75)、Mn(0.41)、Zn(负值)为最小, 说明 Cu 在植被中的周转率高于 Mn、Fe。

从各种微量元素的循环系数看, Zn 的最大, Fe 为其次, Cu 为最小, 它们的排序为: $\text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu}$ 。循环系数反映了元素在循环过程中的存留量大小, 循环系数越大, 系统中存留量的比例就越小, 反之亦然。因此, 系统中 Zn、Fe 的存留比例最小, 而流动性较大, 而 Mn、Cu 则相反, 存留比例大, 流动性较小。

周转期是生态系统营养元素循环速率的指标, 它表明元素在林木体内存留的时间长度。第 2 代杉木林各微量元素的周转期大小顺序为: $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn}$ 。以 Zn 的周转最快, 流动性大。其次是 Fe, 而 Cu、Mn 最慢, 流动性最小。这与上述的循环系数中 4 种元素变动情况是一致的。

3 结论

杉木林中 Mn、Fe、Zn 和 Cu 4 种微量元素的积累量为 $35.971 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 排列顺序为 $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu}$ 。微量元素的分配与生物量不成比例关系, 各组分的微量元素积累量排列顺序为树叶 > 树根 > 树枝 > 树干 > 树皮。同一微量元素在不同组分的积累量也存在明显差异。

土壤中微量元素在各层次分布均匀, Zn 元素的贮量主要集中在 $0 \sim 45 \text{ cm}$ 中, 总贮量为 $1671.12 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 而 Mn、Cu 主要分布在下层 ($15 \sim 60 \text{ cm}$), 表现出明显的沉积现象, 4 种微量元素贮量的排序为 Fe

>Mn>Zn>Cu。

整个生态系统中微量元素的总贮量为 307 289.708 kg/hm²,土壤中的贮量占绝对优势,为生态系统微量元素的主要贮存库。杉木林中微量元素仅占整个生态系统的总贮量的 0.0134%。4 种微量元素的贮量在系统中空间上的分布表现为土壤层>乔木层>死地被物层>草本层>灌木层。

杉木林生态系统中 4 种微量元素年吸收量为 2.084 kg/(hm²·a),存留量为 4.108 kg/(hm²·a),总归还量为 -2.209 kg/(hm²·a),其中凋落物归还的养分为 1.257 kg/(hm²·a),淋溶归还量为 -3.446 kg/(hm²·a)。杉木针叶、枝及树干对雨水中的 Zn 有很强的吸附能力。杉木林对 Mn 吸收强度最大,Cu 次之,Zn 最低,其吸收系数的排序是:Mn>Cu>Fe>Zn。系统中 Zn、Fe 的存留比例较小,周转期较短,而流动性较大,而 Mn、Cu 则相反,存留比例大,周转期长,流动性较小。

References:

- [1] Pan R C, Dong Y D. *Plant Physiology*. Beijing: The Higher Education Press, 1995.
- [2] Xu C Y. Study on microelements of poultry branches of learning of more than ten years in our country. *China animal nutrition learned journal*, 1989, **1**(1): 1~9.
- [3] Miao Z J. *Environment Chemistry and Biological Effects of Microelements*. Beijing: China Environment Science Press, 1992.
- [4] Xing T X, Li L L, Peng Y. Study on contents of the Trace Elements in the soil-crop-Animal Ecosystem. *China Journal of Ecology*, 2000, **19**(2): 24~29.
- [5] Chapin F S. The Mineral Nutrition of wild plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1980, **11**: 233~260.
- [6] Ji W Y. Background Value and Characteristic of Major 19 Kinds of Elements in Cereal Crop Country in TaiHu Lake River Valley. *Journal of Environment Science*, 1987, **7**(1): 86~92.
- [7] Du R. Simple explanations of the trace mineral substance in our country forage divide. *Magazine of China Poultry*, 1989, **25**(4): 20~23.
- [8] She C X. Microelements content and distribution in the Red-soil Hunan, China. *Research of Agricultural Modernization*, 1994, (supp): 41~45.
- [9] Xu J L, Bao Z P, Yang J R, et al. Chemical forms of Pb, Cd and Cu in crops. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1991, **2**(3): 244~248.
- [10] Liu X Z, Tian D L, Zhu X N, et al. Biological Cycling of the Nutrient Elements in the Natural Secondary *Quercus fabri* forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, **33**(Sp. 2): 148~156.
- [11] Jordon C. F., *Nutrient cycling in Tropical Forest Ecosystems*. John Wiley & Sons, 1985. 45~145.
- [12] Wang F Y. Nutrient Fluxes in the Ecosystem of broad-leaved *Korean Pine* Forest. In: Edited by Department of Scientific and Technological Ministry of Forestry. *Long-term Research of China's Forest Ecosystem*. Ha Er-bin: North-east Forestry University Press, 1994. 80~85.
- [13] Xiang W H, Liu X Z, Cai B Y. Contents, Accumulation and Distribution of Nutrient Elements in an Intermediate Cuttings *Masson's Pine* Forest. In: Edited by Liu X Z. *Long-term Located Research on Forest ecosystem*. Beijing: China Forestry Press, 1993. 178~186.
- [14] Yu X T. *Learning of Chinese Fir Cultivation*. Fuzhou: Fujian Science Press, 1997.
- [15] Li Y C. *The forestry development strategy of towards 21 centuries*. Beijing: China Forestry Press, 1996.
- [16] Cheng W D. *Research on Artificial Forestry Soil Fertility Failure*. Beijing: China Scientific and Technological Press, 1992.
- [17] Tian D L, Xiang W H, Yan W D, et al. Effect of successive——rotation on productivity and biomass of plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(4): 14~18.
- [18] Cole D W and Rapp M. Elemental cycle in: *IBP. Dynamic properties of Forest Ecosystem*, Britain, Cambridge University Press, 1971. 41~408.
- [19] Zhou X L, Tian D L. Cycling of heavy metal elements in a Chinese fir plantation ecosystem. *Journal of Central-*

South Forest Collage, 1989 (supp): 132~137.

- [20] Li F, Chen Y Y. A study on the Nutrient Cycling of the Mineral elements in the *Pinus massoniana* forest mixed with broad-leaved trees. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, **35**(3): 16~21.

参考文献:

- [1] 潘瑞炽,董愚得编. 植物生理学. 第三版. 北京:高等教育出版社,1995. 32~40.
- [2] 许振英. 十多年来我国畜牧学科中微量元素研究. 中国动物营养学报,1989,1(1):1~9.
- [3] 缪自基主编. 微量元素的环境化学与生物影响. 北京:中国环境科学出版社,1992.
- [4] 刑廷铄,李丽立,彭艺. 土壤-作物-动物生态体系中微量元素含量. 生态学杂志,2000,19(2):24~29.
- [6] 计维农. 太湖流域主要粮食作物中 19 种元素背景值及其特征. 环境科学学报,1987,7(1):86~92.
- [7] 杜荣. 我国饲料中微量矿物质浅析. 中国畜牧杂志,1989,25(4):20~23.
- [8] 余崇祥. 湖南红壤中微量元素的含量与分布. 农业现代化研究,1994,增(1): 41~45.
- [9] 许嘉琳,鲍子平,杨居荣,等. 农作物中铅、镉、铜的化学形态. 应用生态学报,1991,2(3):244~248.
- [10] 刘焯章,田大伦,朱小年,等. 天然次生白栎林营养元素的生物循环,1997,林业科学,33(Sp. 2):148~156.
- [12] 王凤友. 阔叶红松林生态系统的养分流. 见:林业部科技司编. 中国森林生态系统定位研究,哈尔滨:东北林业大学出版社,1994. 80~85.
- [13] 项文化,刘焯章,蔡宝玉. 间伐后马尾松林养分含量、积累和分布. 见:刘焯章主编. 森林生态系统定位研究. 北京:林业出版社,1993. 178~186
- [14] 俞新妥 编著. 杉木栽培学. 福州:福建科学出版社,1994.
- [15] 李育才主编. 面向 21 世纪的林业发展战略. 北京:中国林业出版社,1996.
- [16] 盛伟彤主编. 人工林地力衰退研究. 北京:中国科学技术出版社,1992.
- [17] 田大伦,项文化,闫文德,等. 速生阶段杉木人工林产量结构及生产力的代际效应. 林业科学,2002,38(4):14~18.
- [19] 周湘莉,田大伦. 杉木人工林生态系统重金属元素的循环. 中南林学院学报,1989(增刊):132~137.
- [20] 李飞,陈永瑞. 人工马尾松阔叶混交林矿质营养循环的研究. 林业科学,1996,35(3):16~21.