

不同年龄阶段马占相思 (*Acacia mangium*) 人工林 营养元素的生物循环

何 斌¹, 秦武明¹, 余浩光², 刘运华², 覃 林¹, 覃永华¹

(1. 广西大学林学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西高峰林场 广西 南宁 530001)

摘要:对马占相思人工林 6 种营养元素(N、P、K、Ca、Mg、S)的含量、积累、分布和生物循环特点以及随林分年龄的变化趋势进行了研究。结果表明:(1)林木不同组分营养元素含量的大小次序为树叶>干皮>活枝>枯枝或树根>干材;各组分和凋落物中营养元素含量以 N 最高,其次是 Ca 或 K,然后是 S 和 Mg,P 最低;林地土壤中,以 K 的含量最高,其次是 Ca、Mg、N 和 P,S 最低;随林龄的增加,0~40cm 土壤 N、P 和 S 含量呈增加趋势;(2)4 年、7 年生和 11 年生林分营养元素总积累量分别为 1022.08、1997.08 和 2633.45 kg·hm⁻²,其中乔木层营养元素贮存量依次占 73.64%、82.39% 和 83.65%,林下植被层依次占 13.74%、8.74% 和 6.20%,地表现存凋落物层依次占 12.62%、8.87% 和 10.16%;乔木层以 N 积累量最大,占总贮存量的 53.90%~60.07%,P 最小,仅占 0.90%~1.23%;(3)马占相思林中不同组分营养元素积累量的分配随林龄的增长发生变化,由 4 年生以树叶和树枝占主导,逐渐转移到 7 年生和 11 年生以干材和树皮为主导;(4)林分营养元素年积累量依次为 7 年生(235.06 kg·hm⁻²·a⁻¹)>11 年生(200.26 kg·hm⁻²·a⁻¹)>4 年生(188.16 kg·hm⁻²·a⁻¹);林木各组分营养元素年积累量总的变化趋势为:树干>树叶>树枝>根系>树皮,同一组分各营养元素年积累量与各组分营养元素积累量变化顺序一致,即为 N>Ca>K>S>M>P;(5)林分营养元素年吸收量分别为 382.35、432.04 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 403.15 kg·hm⁻²·a⁻¹,年归还量分别为 194.19、196.98 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 202.89 kg·hm⁻²·a⁻¹,营养元素的循环系数分别为 0.51、0.46 和 0.50,利用系数为 0.51、0.26 和 0.18,周转期为 3.88、8.35 和 10.86。可见,马占相思人工林早期营养元素利用率低,归还速率较快,林分生长到近熟期(11a)时营养元素的周转期较长,但其归还速率仍然较快,有利于林地地力的恢复、维持和提高。

关键词:马占相思人工林;年龄阶段;营养元素;生物循环

文章编号:1000-0933(2007)12-5158-10 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

Biological cycling of nutrients in different ages classes of *Acacia mangium* plantation

HE Bin¹, QIN Wu-Ming¹, YU Hao-Guang², LIU Yun-Hua², QIN Lin¹, QIN Yong-Hua¹

1 Forestry College, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China

2 Gaofeng Forestry Farm of Guangxi, Nanning Guangxi 530001, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5158 ~ 5167.

Abstract: Due to adaptation to the infertile habitat, *Acacia mangium* is widely planted as pioneer species in tropical and south subtropical regions in China. The content, accumulation, distribution and biological cycling of six nutrient elements (N, P, K, Ca, Mg and S) as well as their changes with growth of stands in *A. mangium* plantation of three different age classes (4-year-old, 7-year-old and 11-year-old) were studied. The results show that concentrations of these six nutrient

基金项目:广西自然科学基金资助项目(0640018);广西“十五”林业科学研究资助项目(2002-59)

收稿日期:2006-09-28; 修订日期:2007-04-29

作者简介:何斌(1962~),男,广西桂平人,硕士,副研究员,主要从事森林土壤与森林生态学研究. E-mail:hebin125@sohu.com

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of Guangxi, China (No. 0640018) and “Tenth Five-Year Plan” of Forest Science Research of Guangxi (No. 2002-59)

Received date: 2006-09-28; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: HE Bin, Master, Associate professor, mainly engaged in forest soil science and forest ecology. E-mail:hebin125@sohu.com

elements in different components of *A. mangium* plantation were in the order of leaves > bark > alive branch > dead branch or root > stem. In plant, concentration of N was the highest among the six elements, followed by K and Ca, while Mg and P were the lowest in various components of *A. mangium* plantation. In the soil, concentration of K was the highest, then Ca, Mg, N, P, and S concentration was the lowest among six elements. Concentrations of N, P and S in the 0—40 cm of soil depth increased with increasing stand age. The total nutrient accumulations at three different age classes plantation were $1022.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1997.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $2633.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Of the total storage of nutrients, 73.64%—83.65% was distributed in arbor layer, 6.20%—13.74% at forest floor layer, 8.87%—12.62% at standing litter layer. Among six elements, N accumulation in arbor layer was largest, covering 53.90%—60.07% of total nutrient storage. P accumulation in arbor layer was the lowest, only 0.90%—1.23% of total nutrient storage. The accumulations of nutrients in *A. mangium* varied with different stands growth stages. Most nutrient elements accumulated in leaves and branches at 4-year-old stage, while they gradually moved gradually in stem and bark at 7-year-old and 11-year-old. Nutrient annual net accumulations in three age classes plantation were $188.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $235.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $200.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Comparison of nutrient annual net accumulation in different components was in the order of stem > leaves > branches > roots > bark. Changes in annual net accumulation of various nutrients in the same component was similar to that in various components, $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{S} > \text{Mg} > \text{P}$. The annual absorption of six nutrient elements in three age classes plantations were $382.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $432.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $403.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The annual returns equaled to $194.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $196.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $202.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The nutrient utilization coefficients were 0.51, 0.26 and 0.18, respectively. The cycling coefficients were 0.51, 0.46 and 0.50, respectively. The recycling periods were 3.88, 8.35 and 10.86, respectively. As observed, the nutrient utilization efficiency in early stage in *A. mangium* plantation was lower but return rate was higher. When stands approached near-mature stage (11-year-old), the recycling period of nutrients increased with the augmentation of return rate, resulting in the recovery, maintenance and enhancement of forestland fertilization.

Key Words: *Acacia mangium* plantation; age class; nutrient elements; biological cycling

森林生态系统中的养分循环是其系统功能的主要表现之一,也是维持森林结构和功能稳定的不可或缺的重要因素。近年来,森林特别是人工林生态系统的养分分布及其循环规律的研究已成为十分活跃的一个领域。马占相思(*Acacia mangium*)原产于澳大利亚昆士兰北部沿海、巴布亚新几内亚等地,具有干形通直,出材率高,适应性强、速生高产及固氮改土等特性^[1,2]。因此,马占相思作为一个多用途的固氮树种,自 20 世纪 80 年代中期开始在我国热带、亚热带地区的广东、海南和广西等省区大面积种植和发展,成为当地荒山绿化的主要树种之一,同时也是仅次于桉树(*Eucalyptus*)的短周期速丰林树种,并取得了显著的生态效益和经济效益。目前,国内外对马占相思的经营管理进行了大量的研究工作,在马占相思的栽培管理、病虫害防治、良种选育、综合加工利用等方面发表了大量的研究文献^[2],但有关马占相思人工林营养元素含量、积累以及生物循环的研究文献较少^[3~6],其中国内仅见林龄小于 7 a 的中、幼龄林营养元素生物循环的报道,并且只是针对乔木层的地上部分。由于马占相思人工林林龄在 1~7 a 内生物量增长迅速,7~11 a 生物量增长则相对较慢,11 a 后生物量趋于平稳^[7],因此,作为以纸浆材为培育目标的轮伐期为 6~9 a,作为大径材的轮伐期则为 10~15 a^[8,9]。为此,本文通过对 4、7、11 年生马占相思人工林 N、P、K、Ca、Mg 和 S 等 6 种营养元素的含量、积累、分布和生物循环的研究,进一步揭示马占相思人工林的养分特征和循环规律及其对土壤肥力的影响,这对马占相思人工林的合理经营与管理,都具有重要的理论意义和实践价值。

1 试验地及林分概况

试验地位于广西南宁市国有高峰林场界牌分场,地理位置为东经 $108^{\circ}21'$,北纬 $22^{\circ}58'$,属亚热带季风气候,年平均温度 21.8°C ,极端最高气温 40°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温约 7200°C ,年平均降雨量 1350 mm,降雨多集中

在 5~9 月份,相对湿度 79%。标准地位于山坡中部,海拔高度约 250 m,坡度 25~28°,坡向南偏东,土壤类型为砂页岩发育形成的赤红壤,土壤厚度在 80 cm 以上,造林前土壤肥力均较差,其中 4a 生马占相思林造林前 0~20 cm 和 20~40 cm 土层有机质、全氮、全磷含量分别为 19.91、0.916、0.308 和 9.65、0.702、0.293 g·kg⁻¹。

试验地前茬林分均为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林,并分别于各自造林前 1 年的年底采伐,经炼山整地后,于次年 4 月份用马占相思实生苗定植。调查时在立地条件相似、生长良好、林龄分别为 4、7 和 11a 马占相思人工林内设置固定标准地。各不同年龄阶段马占相思人工林的林分特征见表 1^[10,11]。

表 1 不同年龄马占相思人工林的林分特征

Table 1 Stand feature of different ages of *Acacia mangium* plantations

林龄 Stand age (a)	密度 Density (tree·hm ⁻²)	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average height (m)	林分生物量 Stand biomass (t·hm ⁻²)							林分生产力 Productivity (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
				树叶 Leave	活枝 Alive branch	枯枝 Dead branch	树皮 Bark	树干 Stem	树根 Root	合计 Sum	
4	1140	14.0	12.0	6.04	7.06	3.31	6.63	28.31	11.71	63.06	15.765
7	930	18.3	17.7	6.70	21.70	8.10	9.83	89.81	33.08	169.22	24.174
11	775	23.5	19.0	6.62	26.89	4.38	12.28	122.83	40.44	213.44	19.404

2 研究方法

2.1 生物量测定和生产力的估算

分别在 4 年、7 年生和 11 年生马占相思人工林中选择邻近分布,母岩一致,海拔、坡向、坡位等立地条件相似,整地、抚育、施肥等营林和管理措施相同,长势良好且较一致的林分,按不同年龄阶段分别设置面积 20 m × 20 m 的标准样地各 3 块,测定各标准地林木胸径和树高,在每个林龄标准地内选择 3 株平均木,采用收获法测定样木的生物量^[12],即将样木伐倒后,地上部分采用 Monsic 分层切割法,每 2 m 为一区分段,分干材、干皮、1 年生枝、多年生枝、枯枝、叶,地下部分根系采用全根挖掘法,按根兜、粗根(根系直径 ≥ 2.0 cm)、细根(0.5~2 cm)、吸收根(< 0.5 cm),分别称重及取样测定各器官的含水率及干重,计算林分生物量,以年平均增长量作为净生产力的估测指标^[11]。

2.2 年凋落物归还量的测定

在 3 个不同年龄阶段马占相思人工林标准地各设置 1 m × 1 m 的凋落物收集框 6 个,每月收集凋落物 1 次,按叶、枝、果和杂物等组分测定生物量^[12]。

2.3 样品的采集与分析

样品采集在测定生物量的同时按不同组分采集分析样品;凋落物样品为按各月份凋落物重量比例各选取一定量的凋落物混合后作为化学分析样品。在每个标准地随机选择 3 点,按 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 3 个层次采集土壤样品,并把相同标准地同一层次土壤按重量比例混合。

样品分析 样品中 N 含量采用浓 H₂SO₄-HClO₄-氨气敏电极法测定^[13],P 含量用钼锑抗比色法测定,K 含量用火焰光度计法测定,Ca、Mg 含量用原子吸收光谱法测定^[14],S 含量用硫酸钡比浊法测定^[14]。文中的试验数据为 3 个重复平均值。

3 结果与分析

3.1 不同年龄马占相思林分营养元素含量与分布

3.1.1 马占相思各器官及林下植被和凋落物中营养元素含量与分布

植物中化学元素含量反映了植物在一定生境条件下从土壤中吸收和蓄积矿质养分的能力,由于植物不同器官的生理机能不同,不同营养元素在植物体内的功能也不同,营养元素在植物不同器官及不同营养元素在同一器官中的分布也有差异^[15]。从表 2 可见,马占相思平均单株不同器官的营养元素含量相差很大,并且在不同年龄阶段也存在一定的差异,树叶作为同化器官,其生长周期短,是合成有机物质的场所,也是代谢最活

跃的器官,其营养元素含量总是最高,而干材以木质为主,其生理功能最弱,大多数养分已被消耗或转移,因而元素含量也最低。按营养元素含量大小排序大致是树叶>干皮>活枝>枯枝或树根>干材。不同年龄阶段各器官营养元素含量均以 N 最高,其中树叶 N 含量在 22.50~27.254 g·kg⁻¹之间,其它元素大小排序大致是 Ca>K>S 和 Mg>P。

马占相思林下植被即草本和灌木的营养元素含量均较丰富,与马占相思各组分相比,除低于树叶外,均明显高于其它营养器官。因此,就营养元素含量在 3 个不同年龄阶段马占相思群落的垂直结构的分布而言,呈现自上而下递增的趋势,即草本植物含量>灌木植物含量>乔木植物含量,反映了森林植物群落不同垂直结构层次植物对土壤养分富集能力的差异^[13]。

马占相思林凋落物的营养元素含量均较高,各营养元素含量大小排列次序与林木各器官的排列次序基本一致,但多数元素含量明显高于除树叶外的其它器官。由于马占相思凋落物尤其是 4a 生时的凋落物主要以树叶为主(占 95%以上),因此,与林木不同器官相比,除 Ca、Mg 含量略高于树叶外,其它 4 种营养元素含量多数低于树叶,尤其是 P 素含量显著低于树叶,与李志安等的研究结果基本一致^[16]。

表 2 不同年龄马占相思人工林各组分营养元素含量(g·kg⁻²)

Table 2 Nutrient-elements contents in different components of different ages of *Acacia mangium* plantations

林龄 Stand age(a)	组分 Components	N	P	K	Ca	Mg	S	合计 Total
4	树叶 Leaf	22.50(0.64)	0.62(0.02)	3.58(0.12)	7.16(0.08)	1.38(0.06)	1.53(0.06)	36.77(0.66)
	活枝 Alive branch	6.27(0.10)	0.22(0.01)	1.09(0.05)	4.04(0.09)	0.73(0.03)	0.40(0.02)	12.75(0.15)
	枯枝 Dead branch	4.16(0.08)	0.12(0.01)	0.42(0.02)	3.24(0.05)	0.64(0.04)	0.51(0.02)	9.09(0.10)
	干材 Stem	4.04(0.06)	0.04(0.00)	0.79(0.03)	1.35(0.04)	0.16(0.01)	0.13(0.01)	6.50(0.10)
	干皮 Bark	12.15(0.23)	0.12(0.01)	1.67(0.02)	3.75(0.07)	0.18(0.02)	0.76(0.04)	18.62(0.28)
	树根 Root	4.23(0.10)	0.15(0.02)	1.27(0.06)	2.56(0.15)	0.24(0.02)	0.36(0.11)	8.81(0.23)
	凋落物 Litter	13.34(0.27)	0.27(0.03)	2.13(0.07)	9.54(0.17)	1.66(0.14)	1.48(0.05)	28.42(0.55)
	灌木 Herb	10.62(0.14)	0.78(0.03)	6.84(0.21)	4.09(0.15)	1.55(0.03)	0.78(0.02)	24.66(0.26)
	草本 Shrub	12.04(0.08)	0.65(0.04)	9.5(0.15)	7.83(0.20)	1.28(0.05)	1.87(0.11)	33.17(0.12)
7	树叶 Leaf	27.25(0.40)	0.95(0.06)	6.64(0.11)	4.67(0.22)	1.18(0.05)	1.52(0.05)	42.21(0.54)
	活枝 Alive branch	6.28(0.15)	0.12(0.01)	1.99(0.01)	4.49(0.19)	0.51(0.02)	0.31(0.02)	13.70(0.30)
	枯枝 Dead branch	4.27(0.09)	0.10(0.01)	0.50(0.03)	3.75(0.16)	0.83(0.06)	0.38(0.02)	9.83(0.20)
	干材 Stem	3.27(0.14)	0.02(0.00)	0.47(0.03)	0.78(0.03)	0.05(0.01)	0.15(0.01)	4.74(0.14)
	干皮 Bark	12.51(0.16)	0.18(0.02)	1.86(0.06)	7.52(0.18)	0.15(0.02)	0.57(0.02)	22.79(0.14)
	树根 Root	3.89(0.19)	0.20(0.01)	1.11(0.05)	1.70(0.08)	0.22(0.02)	0.32(0.02)	7.44(0.16)
	凋落物 Litter	12.64(0.22)	0.38(0.02)	2.51(0.12)	7.68(0.31)	1.40(0.04)	1.33(0.10)	25.94(0.41)
	灌木 Herb	9.76(0.13)	0.68(0.03)	8.25(0.13)	4.18(0.13)	1.22(0.07)	0.70(0.02)	24.79(0.18)
	草本 Shrub	10.74(0.35)	0.8(0.03)	9.52(0.26)	8.8(0.20)	1.07(1.06)	1.54(0.07)	32.47(0.31)
11	树叶 Leaf	23.34(0.74)	1.07(0.06)	7.23(0.11)	8.86(0.20)	1.44(1.07)	1.89(0.11)	43.83(0.58)
	活枝 Alive branch	7.65(0.19)	0.20(0.01)	1.69(0.08)	7.13(0.17)	0.70(0.03)	0.40(0.02)	17.77(0.16)
	枯枝 Dead branch	5.54(0.08)	0.04(0.00)	0.17(0.01)	7.49(0.19)	0.30(0.02)	0.57(0.04)	14.11(0.12)
	干材 Stem	2.63(0.05)	0.02(0.00)	0.28(0.01)	1.59(0.07)	0.07(0.01)	0.11(0.01)	4.70(0.09)
	干皮 Bark	15.19(0.32)	0.14(0.01)	4.71(0.14)	10.54(0.23)	0.19(0.01)	0.61(0.04)	31.38(0.42)
	树根 Root	7.24(0.11)	0.07(0.00)	0.72(0.04)	1.42(0.07)	0.27(0.01)	0.40(0.02)	10.12(0.13)
	凋落物 Litter	13.11(0.20)	0.35(0.02)	2.33(0.11)	10.23(0.17)	1.29(0.05)	1.51(0.08)	28.82(0.26)
	灌木 Herb	10.03(0.22)	0.59(0.02)	4.87(0.16)	3.64(0.08)	0.98(0.04)	0.75(0.04)	20.86(0.34)
	草本层 Shrub	8.90(0.31)	0.47(0.03)	5.83(0.17)	8.72(0.23)	1.05(0.04)	1.80(0.02)	26.77(0.57)

* 括号内数字为标准偏差($n=3$) Values in parentheses are standard deviations($n=3$);下同 the same below

表3 不同年龄马占相思人工林土壤养分含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Nutrient contents in soil of different ages of *Acacia mangium* plantations

林龄 Stand age(a)	深度 Depth (cm)	N	P	K	Ca	Mg	S
4	0~20	1.379 (0.090)	0.321 (0.017)	22.095(0.656)	7.795(0.262)	2.46(0.130)	0.063(0.005)
	20~40	0.875(0.056)	0.310 (0.014)	19.720(0.594)	6.766(0.209)	2.198(0.149)	0.048(0.004)
	40~60	0.652(0.032)	0.286 (0.012)	24.046(0.724)	5.588(0.241)	2.491(0.139)	0.030(0.003)
	平均值 Mean	0.969(0.056)	0.304 (0.014)	21.954(0.658)	6.716(0.237)	2.383(0.153)	0.046(0.004)
7	0~20	1.808(0.146)	0.337(0.011)	22.770(0.708)	7.431(0.242)	2.079(0.166)	0.096(0.007)
	20~40	1.002(0.074)	0.305(0.012)	21.590(0.635)	8.006(0.326)	2.425(0.463)	0.057(0.002)
	40~60	0.733(0.021)	0.293(0.010)	24.940(0.440)	6.456(0.459)	1.947(0.113)	0.036(0.003)
	平均值 Mean	1.181(0.080)	0.312(0.011)	23.100(0.594)	7.298(0.342)	2.156(0.147)	0.063(0.004)
11	0~20	2.107(0.101)	0.360(0.016)	20.620(0.594)	9.658(0.492)	2.614(0.192)	0.113(0.009)
	20~40	1.076(0.065)	0.317(0.016)	18.470(0.354)	8.384(0.441)	2.622(0.205)	0.074(0.005)
	40~60	0.816(0.033)	0.308(0.009)	22.830(1.117)	6.570(0.376)	2.182(0.147)	0.041(0.004)
	平均值 Mean	1.333(0.066)	0.328(0.014)	20.640(0.689)	8.204(0.436)	2.473(0.181)	0.076(0.006)

3.1.2 林地土壤中营养元素含量

不同年龄阶段马占相思林地土壤均以 K 的含量最高,明显高于其它元素,S 最低,其它元素依次是 Ca、Mg、N、P(表3)。由于受到大量凋落物分解作用的影响,0~20 cm 土层 N、P 和 S 含量均明显高于其它层次,并随土层深度的增加而减少,同时也表现出随林龄增长而增加的趋势,其中以全 N 增加幅度最大,分别比 4 年生马占相思林造林前即原杉木林增加 50.54%、107.20% 和 139.85%,20~40cm 土层也有相似的变化趋势,表明马占相思的生长过程对土壤 N、P、S,尤其是 N 素的生物累积有明显的促进作用,但 K 和 Mg 的垂直分布规律不明显,它们随林龄增长的变化规律也不明显。按照我国林地土壤养分贫瘠化等级的划分标准^[17],不同年龄阶段马占相思林土壤(按 0~40 cm 计)全 N、全 K 含量属于中度至轻度贫瘠,而全 P 含量则均属于严重贫瘠,这也是热带地区土壤的一个重要特征。因此,P 素的严重缺乏可能是影响马占相思人工林正常生长发育的重要原因。

3.2 不同年龄阶段马占相思林分营养元素积累与分布

从表 4 可见,马占相思林分营养元素积累总量随林龄增长而增大,4 年、7 年生和 11 年生 6 种营养元素积累总量分别为 1022.08、1997.08、2633.45 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。乔木层作为森林生态系统有机物的主要生产者,所积累的营养元素占整个林分的大部分,按林龄由小到大的顺序,乔木层营养元素积累量分别占林分营养元素积累总量的 73.64%、82.39% 和 83.65%。由于不同年龄阶段马占相思林各器官的生物量不同,各器官营养元素含量差别又比较大,因此,不同年龄阶段各器官营养元素积累量及其分配存在较大的差异。4 年生时马占相思林木营养元素积累量主要集中在树叶和树枝,随着林木的生长,干材和树皮不但积累量增加而且其占各组分总积累量比例也增大,7 年生和 11 年生时均占总积累量的大部分,而树枝和树叶只是绝对积累量增加,但所占总积累量的比例下降。而从乔木层各种营养元素积累量来看,均以 N 最高,分别为 438.21、988.36 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 1187.33 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,所占总积累量比例分别达到 58.22%、60.07% 和 53.90%,P 的积累量最小,分别占总积累量的 1.23%、1.22% 和 0.90%,其它营养元素大小排序依次均为 $\text{Ca} > \text{K} > \text{S} > \text{Mg}$ 。

林下植被即草本层和灌木层的生物量均比乔木层少得多,它们的营养元素积累量在整个林分的比例也都比乔木层小得多,其所占比例按林龄由小到大依次为 13.74%、8.74%、6.20%,均随林龄的增加而减少。凋落物是森林生态系统林木养分归还的重要途径之一,是林地有机质的主要物质库和恢复、维持和提高土壤肥力的重要基础。马占相思林分现存地表凋落物的营养元素积累量随林龄的增长呈现明显的增加趋势,其所占林分营养元素积累总量的比例(8.87%~12.62%)虽然不很高,但却是改善林地土壤肥力性状的基础,在维持和提高林地土壤肥力方面起着极其重要的作用。

表 4 不同年龄马占相思人工林营养元素积累与分配

Table 4 The accumulation and distribution of nutrient elements of different ages of *Acacia mangium* plantations

林龄 Stand age(a)	组分 Components	生物量 Biomass (t·hm ⁻²)	N	P	K	Ca	Mg	S	合计 Total
			(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)						
4	树叶 Leaf	6.04	135.90	3.73	21.59	43.25	8.34	9.24	222.04
	活枝 Alive branch	7.06	40.74	1.55	7.69	28.51	5.12	2.79	86.40
	枯枝 Dead branch	3.31	17.07	0.38	1.39	10.77	2.10	1.69	33.41
	干材 Stem	28.31	114.46	1.08	22.25	38.13	4.53	3.68	184.13
	干皮 Bark	6.63	80.54	0.76	11.06	24.84	1.21	5.04	123.45
	树根 Root	11.71	49.50	1.77	14.88	29.98	2.87	4.22	103.23
	小计 Total	63.06	438.21	9.27	78.88	175.49	24.16	26.65	752.66
	林下植被 Forest floor	4.82	54.78	3.43	39.70	29.18	6.79	6.52	140.39
	地表凋落物 Ground litter	6.53	65.69	2.74	15.41	32.98	4.83	7.38	129.03
	合计 Total	74.41	558.68	15.44	133.99	237.65	35.78	40.55	1022.08
7	树叶 Leaf	6.70	182.60	6.36	44.46	31.30	7.87	10.38	282.98
	活枝 Alive branch	21.70	120.03	4.33	43.17	97.45	10.06	6.67	282.70
	枯枝 Dead branch	8.10	50.77	0.79	40.60	30.40	6.76	3.08	95.86
	干材 Stem	89.81	562.93	1.98	41.94	70.32	4.22	13.47	515.24
	干皮 Bark	9.83	122.99	1.76	18.27	73.95	1.50	5.60	224.08
	树根 Root	39.47	128.65	4.88	36.67	56.35	7.47	10.52	244.55
	小计 Total	169.22	988.36	20.10	188.58	359.77	38.88	49.73	1645.41
	林下植被 Forest floor	6.40	64.49	4.60	55.43	36.32	7.50	6.22	174.55
	地表凋落物 Ground litter	9.22	95.52	3.04	17.89	44.53	6.18	9.96	177.12
	合计 Total	184.84	1148.37	27.74	261.90	440.62	52.56	65.91	1997.08
11	树叶 Leaf	6.62	154.53	7.08	47.88	58.63	9.54	11.39	289.04
	活枝 Alive branch	26.89	205.86	5.35	45.48	191.75	19.00	10.72	478.16
	枯枝 Dead branch	4.38	24.24	0.18	0.76	32.80	1.33	2.50	61.81
	干材 Stem	122.84	323.41	2.95	34.39	195.18	8.72	14.74	579.39
	干皮 Bark	12.28	186.51	1.66	57.86	129.41	2.37	7.49	385.30
	树根 Root	40.44	292.78	2.72	28.95	57.62	10.93	16.13	409.13
	小计 Total	213.44	1187.33	19.93	215.32	665.39	51.90	62.96	2202.82
	林下植被 Forest floor	7.33	71.55	4.12	37.37	35.52	7.31	7.32	163.19
	地表凋落物 Ground litter	13.11	132.94	4.59	35.40	66.34	11.54	16.65	267.44
	合计 Total	233.88	1391.82	28.64	288.09	767.25	70.75	86.93	2633.45

3.3 不同年龄阶段马占相思林分营养元素的年存留量

营养元素年存留量为植物体内营养元素积累的速率,依赖于林分生物量的增长量及营养元素的含量。以林分年平均生物量作为净生产力的指标,求出占相思林养分元素的年净积累量即养分的积累速率(表 5)。结果表明,4、7 年生和 11 年生马占相思人工林 6 种营养元素年存留量(年净积累量)分别为 188.16、235.06 kg·hm⁻²·a⁻¹和 200.26 kg·hm⁻²·a⁻¹,呈现先升高(4~7a)后下降(7~11a)即抛物线状变化趋势。马占相思人工林不同组分营养元素年存留量随林分年龄增长变化的总的变化趋势是树干(含干皮)积累速率高,林冠枝叶次之,树根和树皮最少。同一组分中 N 的积累速率最大,其次是 Ca、K、S 和 Mg, P 的年存留量最小。

3.4 不同年龄阶段马占相思林营养元素生物循环

人工林营养元素的生物循环是通过林木及林下植被的吸收、存留和归还这 3 个生理生态学过程来维持的,即吸收量 = 存留量 + 归还量。它们之间的关系会因为营林过程和环境条件的改变而表现出差异。由于本研究未将降水淋洗和树干茎流及死根归还量等估算进去,所以归还量计算结果较林分实际归还偏低。从表 6 可见,4、7、11 年生马占相思林 6 种营养元素的归还量分别为 194.19、196.98 kg·hm⁻²·a⁻¹和 202.89 kg·hm⁻²·a⁻¹,年吸

收量分别为 $382.35\ 432.04\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $403.15\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 前者随林龄的增长呈增大趋势, 但所增加的幅度均较小, 其中 11 年生的归还量已略高于其相应的存留量 ($200.26\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 后者则随林龄的增长呈抛物线状变化, 即先增加后减少。不同营养元素的年归还量和吸收量均以 N 最大, 分别为 91.35 、 96.32 、 $92.25\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 200.90 、 237.51 、 $200.19\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别占总归还量和总吸收量的 47.04% 、 48.90% 、 45.62% 和 52.57% 、 54.97% 、 49.66% ; 其它营养元素归还量和吸收量的大小排列顺序均为 $\text{Ca} > \text{K} > \text{S}$ 或 $\text{Mg} > \text{P}$ 。

表 5 不同年龄马占相思人工林各组分营养元素的年净积累量

Table 5 Nutrient annual net accumulation in components of different ages of *Acacia mangium* plantations

林龄 Stand age (a)	组分 Component	生产力 Productivity	N	P	K	Ca	Mg	S	合计 Total
		($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)						
4	树叶 Leaf	1.51	33.98	0.93	5.40	10.81	2.08	2.31	55.51
	活枝 Alive branch	1.76	10.18	0.39	1.92	7.13	1.28	0.70	21.60
	枯枝 Dead branch	0.83	4.27	0.10	0.35	2.69	0.52	0.42	8.35
	干材 Stem	7.08	28.62	0.27	5.56	9.53	1.13	0.92	46.03
	干皮 Bark	1.66	20.12	0.19	2.76	6.21	0.30	1.26	30.86
	树根 Root	2.93	12.38	0.44	3.72	7.50	0.72	1.06	25.81
	合计 Total	15.77	109.55	2.32	19.71	43.87	6.03	6.67	188.16
7	树叶 Leaf	0.96	26.08	0.91	6.35	4.47	1.12	1.48	40.43
	活枝 Alive branch	3.10	17.15	0.61	6.17	13.92	1.44	0.95	40.38
	枯枝 Dead branch	1.16	7.25	0.11	5.80	4.34	0.96	0.44	13.69
	干材 Stem	12.83	80.42	0.28	6.00	10.05	0.60	1.92	73.61
	干皮 Bark	1.40	17.57	0.25	2.61	10.56	0.21	0.80	32.01
	树根 Root	5.64	18.38	0.70	5.24	8.05	1.07	1.50	34.94
	合计 Total	24.17	141.19	2.87	26.94	51.40	5.55	7.10	235.06
11	树叶 Leaf	0.60	14.05	0.64	4.35	5.33	0.87	1.04	26.28
	活枝 Alive branch	2.44	18.72	0.49	4.13	17.43	1.74	0.97	44.29
	枯枝 Dead branch	0.40	2.20	0.02	0.07	2.98	0.12	0.23	5.62
	干材 Stem	11.17	29.40	0.27	3.17	17.74	0.79	1.34	52.67
	干皮 Bark	1.12	16.96	0.15	5.26	11.76	0.22	0.68	35.03
	树根 Root	3.68	26.62	0.25	2.63	5.24	0.99	1.47	37.19
	合计 Total	19.40	107.94	1.81	19.57	60.49	4.72	5.72	200.26

表 6 马占相思人工林营养元素的生物循环

Table 6 The biological cycling of nutrient elements in *Acacia mangium* plantation

林龄 Stand age (a)	项目 Item	N	P	K	Ca	Mg	S	合计 Total
4	贮存量 Storage ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	438.21	9.27	78.88	175.49	24.16	26.65	752.66
	吸收量 Absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	200.9	3.92	33.45	109.51	17.45	16.85	382.35
	存留量 Retention ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	109.55	2.06	19.71	43.87	6.03	6.67	188.16
	归还量 Return ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	91.35	1.86	13.74	65.64	11.42	10.18	194.19
	利用系数 Utilization coefficient	0.46	0.42	0.42	0.62	0.72	0.63	0.51
	循环系数 Cycling coefficient	0.45	0.47	0.41	0.60	0.65	0.60	0.51
	周转时间 Recycling period (a)	4.80	4.98	5.74	2.67	2.12	2.62	3.88
7	贮存量 Storage ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	988.36	20.10	188.58	359.77	38.88	49.73	1645.41
	吸收量 Absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	237.51	5.08	46.07	109.92	16.22	17.23	432.04
	存留量 Retention ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	141.19	2.87	26.94	51.40	5.55	7.10	235.06
	归还量 Return ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	96.32	2.21	19.13	58.52	10.67	10.13	196.98
	利用系数 Utilization coefficient	0.24	0.25	0.24	0.31	0.42	0.35	0.26
	循环系数 Cycling coefficient	0.41	0.44	0.42	0.53	0.66	0.59	0.46
	周转时间 Recycling period (a)	10.26	9.10	9.86	6.15	3.64	4.91	8.35
11	贮存量 Storage ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	1187.33	19.93	215.32	665.39	51.90	62.96	2202.82
	吸收量 Absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	200.19	4.27	35.98	132.53	13.80	16.35	403.15
	存留量 Retention ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	107.94	1.81	19.57	60.49	4.72	5.72	200.26
	归还量 Return ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	92.25	2.46	16.41	72.04	9.08	10.63	202.89
	利用系数 Utilization coefficient	0.17	0.21	0.17	0.20	0.27	0.26	0.18
	循环速率 Cycling coefficient	0.46	0.58	0.46	0.54	0.66	0.65	0.50
	周转时间 Recycling period (a)	12.87	8.10	13.12	9.24	5.72	5.92	10.86

不同年龄阶段马占相思林总的营养元素利用系数为 0.18~0.51,随林龄的增加而减少(表 6),循环系数大小次序则为 4 年生(0.51)>11 年生(0.50)>7 年生(0.46),周转期为 11 年生(10.86)>7 年生(8.35)>4 年生(3.88),说明 4~7a 是马占相思生长最旺盛的阶段,其对营养元素的需求也最为迫切,周转时间也最长。各不同营养元素中以 Mg 和 S 的循环速率最快,利用系数也最高,周转时间则最长,N、P 和 K 的循环速率最低,但利用系数相应也最低。

4 结论与讨论

不同年龄阶段马占相思林木各器官的营养元素含量,因元素不同、器官不同和年龄不同而差异。以树叶营养元素含量最高,其次是树皮和活枝,然后是树根,最小是枯枝和树干。不同年龄阶段各器官营养元素含量均以 N 最高,明显高于其他营养元素,其中树叶中 N 含量明显高于巨尾桉、马尾松和杉木等其它速生树种^[18-20],反映马占相思所具有的固氮特性。

马占相思凋落物(大部分为凋落树叶)的营养元素含量较高,除 Ca、Mg 含量略高于树叶外,N、P、K 和 S 由于衰老组织向存活组织转移作用而多数低于树叶,表明马占相思具有比较显著的养分再吸收或营养转移机能,这也与 Aerts R^[21]、Van Heerwaarden 等^[22]、Santa 等^[23]和曾德慧等^[24]对其它一些树种的研究结果相一致。马占相思所具有的养分再吸收或营养转移机能,对提高马占相思体内养分的利用效率,降低其对环境养分供应的依赖和适应贫瘠环境起到了重要的作用,同时这也是马占相思能够在比较干旱瘠薄的土壤上正常生长的重要因素。

不同年龄阶段马占相思林营养元素积累量为 1022.08~22633.45 kg·hm⁻²,年存留量分别为 188.16、235.06 kg·hm⁻²·a⁻¹和 200.26 kg·hm⁻²·a⁻¹,前者随林分年龄和生物量的增加而增大,后者随生长过程呈抛物线状变化,均明显高于相同或相近林龄的马尾松、杉木等其它速生树种^[19,20],其中以 N 营养元素积累量或积累速率最大,表明马占相思对 N 具有很强的吸收与富集能力,同时也是其具有较强的固氮改土能力的重要原因。

不同年龄阶段马占相思林营养元素年吸收量分别为 382.35、432.04 kg·hm⁻²·a⁻¹和 403.15 kg·hm⁻²·a⁻¹,年归还量分别为 194.19、196.98 kg·hm⁻²·a⁻¹和 202.89 kg·hm⁻²·a⁻¹,均远高于相同或相近林龄的巨尾桉、马尾松和杉木等其它速生树种^[18-20];营养元素的循环系数分别为 0.51、0.46 和 0.50,利用系数为 0.51、0.26 和 0.18,周转期为 3.88、8.35 和 10.86。表明马占相思人工林早期生长快,营养元素积累量较大但利用率较低,归还速率较快,随着林分生长到近熟期(11a),营养元素的周转期时间延长,但其归还速率仍然较快。

森林的形成与生长过程,也是森林与土壤相互影响和相互作用的过程,森林生态系统的养分循环直接影响着森林的生产力,很大程度上制约着森林地力变化的方向和强度,对林地养分平衡的维持有重要作用,影响着森林尤其是人工林的持续发展。研究表明,马占相思人工林早期生长较快,营养元素积累量较大,营养元素利用率较低,但作为豆科植物所具有的固 N 能力,其营养元素的转移格局与非豆科植物不同,N 转移率较低,P、K 转移率则较高^[25],通过枝叶的营养转移,提高了体内养分的利用效率,获得与其从环境中吸收大致相当的养分量,这两个养分源共同满足了植物生长过程中的养分需求,同时降低了对环境中养分供应的依赖^[26];另一方面,马占相思的固 N 作用使其树叶 N 含量显著高于其它树种,而其落叶高 N 量和大落叶量^[27],加上其具有比较发达、分布较浅且具根瘤的根系^[8],加速了林地土壤养分尤其 N 素养分的生物循环,使林下土壤获得快速的改良。因此,与原杉木林相比,其土壤有机质、全氮、全磷等主要肥力因素的含量已呈上升趋势。随着林分年龄的增加,林分生物量和养分积累量增大,凋落物和养分归还量也明显增多,更促进土壤腐殖质的合成和分解,加快林地土壤养分的循环和积累,有利于土壤良好结构的形成与稳定,并改善了土壤水分-物理性质^[7],林地土壤肥力水平得到进一步提高。因此,马占相思作为荒山造林或植被恢复的先锋树种,以及桉树多代连栽后的更替树种,将有利于维持和改善土壤肥力,提高水源涵养和保持水土功能,从而提高林地生产力,实现人工林经营的经济效益与生态效益并举的目标。

References:

- [1] Ren H, Peng S P, Yu Z Y. The ecological and biological characteristics of *Acacia mangium*. Chinese Journal of Ecology, 1996, 15(4): 1—5.
- [2] Li F, Deng G Y. Bibliometric analysis on the status of the researches in *Acacia mangium* plantations of China. Guangxi Forestry Science, 2002, 31(4): 215—217.
- [3] Xu D P, Yang M W, Zeng Y T, *et al.* Above ground net biomass production and nutrient cycling of young-age plantation of *Acacia mangium*. Guangdong Forestry Science and Technology, 1994, (4): 11—16.
- [4] Xu D P, Yang Z J, He Q X. Above ground net production and nutrient cycling of middle-age plantation of *Acacia mangium*. Forest Research, 1998, 11(6): 592—598.
- [5] Osnan K T, Rahman M M, Sikder S. Growth and nutrition of some forest tree species in Bangladesh. Annals of forestry, 2002, 10(2): 214—227.
- [6] Mackensen J, Klinge R, Ruhayat D, *et al.* Assessment of management dependent nutrient losses in tropical industrial tree plantations. Ambio, 2003, 32(2): 106—112.
- [7] Ren H, Peng S L, Xiang Y C. Biomass and net primary productivity in an *Acacia mangium* plantation in Heshan, Guangdong. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(1): 18—21.
- [8] Zneng W G. Study on growth laws of *Acacia mangium* plantation. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2000, 27(Supp): 37—38, 61.
- [9] Feng S, Chen R B, Feng S J. Introduction and growth of *Acacia mangium* in Yangjiang, Guangdong. Forestry Science and Technology, 2001, (9): 17—18.
- [10] He B, Qin W M, Dai J, *et al.* Study on function and value of the water conservation in different age classes of *Acacia mangium* plantations. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 5—8, 27.
- [11] Qin W M, He B, Yu H G, *et al.* Study on biomass productivity in different age classes of *Acacia mangium* plantation. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(1): 22—24.
- [12] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and productivity forest ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999. 112—129.
- [13] He B, Wen Y G, Ling H W, *et al.* Element distribution and its relationship with soil fertility in different succession of mangrove community Yingluo Bay Guangxi. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(5): 518—524.
- [14] Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. 308—322.
- [15] Zhang X B, Shangguang Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 32—41.
- [16] Li Z A, Lin Y B, Peng S L. Nutrient content in litter fall and its translocation in plantation forests in south China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 321—326.
- [17] Zhao Q G. Mechanism, temporal-spatial change and controlling Boonntermeasures of soil degradation in Hilly red soil region of Southeastern China. Science Press, 2002. 42.
- [18] Li Y L, Li Z H, Xie Y J. Nutrient cycle in *Eucalyptus grandis* × *urophglla* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(10): 1734—1740.
- [19] Xing W H, Tian D L. Nutrient cycling in *Pinus Massoniana* stands of different age classes. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(1): 89—95.
- [20] Liu A Q, Fan S H, Lin K M, *et al.* Comparison on nutrient cycling in diferent generation plantations of Chinese fir. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 273—27.
- [21] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: re there general patterns. The Journal of Ecology, 1996, 84: 597—608.
- [22] Van Heerwaarden L M, Toet S, Aerts R. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency and proficiency in six subarctic bog species after 4 years of nitrogen fertilization. The Journal of Ecology, 2003, 91: 1060—1070.
- [23] Santa Regina I, Leonardi S, Rapp M. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe. Forestry, 2001, 74: 1—10.
- [24] Zeng D H, Chen G S, Chen F S, *et al.* Foliar nutrients and their resorption efficiencies in four *Pinus sylvestri* ar *mongolica* plantations of different ages on sandy soil. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(5): 21—27.
- [25] Killingbeck K T. Nutrient in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. Ecology, 1996, 77: 1716—1727.
- [26] Li Z A, Zou B, Cao Y S, *et al.* Nutrient resorption in the leaves of two leguminous species widely planted in South China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1395—1401.
- [27] Zou B, LI Z A, Ding Y Z, *et al.* Litter fall of common plantations in south subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 715—721.

参考文献:

- [1] 任海,彭少麟,余作岳. 马占相思生态生物学特征. 生态学杂志,1996,15(4):1~5.
- [2] 李芳,邓桂英. 从文献计量分析看我国马占相思的研究现状. 广西林业科学,2002,31(4):16~18.
- [3] 徐大平,杨民权,曾育田. 马占相思幼林地上部分净生产力和养分循环的研究. 广东林业科技,1994,(4):11~16.
- [4] 徐大平,杨曾奖,何其轩. 马占相思中龄林地上部分生物量及养分循环的研究. 林业科学研究,1998,11(6):592~598.
- [7] 任海,彭少麟,向言词. 鹤山马占相思人工林的生物量和净初级生产力. 植物生态学报,2000,24(1):18~21.
- [8] 郑文国. 马占相思人工林生长规律研究. 福建林业科技,2000,27(增刊):37~38,61.
- [9] 冯水,陈瑞炳,冯顺简,等. 广东阳江马占相思引种与生长研究. 林业科技通讯,2001,(9):17~18.
- [10] 何斌,秦武明,戴军,等. 马占相思人工林不同年龄阶段水源涵养功能及其价值研究. 水土保持学报,2006,20(5):5~8,27.
- [11] 秦武明,何斌,余浩光,等. 马占相思人工林不同年龄阶段的生物生产力. 东北林业大学学报,2007,35(1):22~24.
- [12] 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. 112~129.
- [13] 何斌,温远光,梁宏温等. 英罗港红树植物群落不同演替阶段植物元素分布及其与土壤肥力的关系. 植物生态学报,2002,26(5):518~524.
- [14] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社,1999. 308~322.
- [15] 张希彪,上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. 生态学报,2006,26(2):373~382.
- [16] 李志安,林永标,彭少麟. 华南人工林凋落物养分及其转移. 应用生态学报,2000,11(3):321~326.
- [17] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控. 北京:科学出版社,2002. 42.
- [18] 李跃林,李志辉,谢耀坚. 巨尾桉人工林养分循环研究. 生态学报,2001,21(10):1734~1740.
- [19] 项文化,田大伦. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究. 植物生态学报,2002,26(1):89~95.
- [20] 刘爱琴,范少辉,林开敏等. 不同栽植代数杉木林养分循环的比较研究. 植物营养与肥料学报,2005,11(2):273~277.
- [24] 曾德慧,陈广生,陈伏生. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率. 林业科学,2005,41(5):21~27.
- [26] 李志安,邹碧,曹裕松,等. 华南两种豆科人工林体内养分转移特性. 生态学报,2003,23(7):1395~1401.
- [27] 邹碧,李志安,丁永祯,等. 南亚热带4种人工林凋落物动态特征. 生态学报,2006,26(3):715~720.