

华南两种豆科人工林体内养分转移特性

李志安¹, 邹 碧¹, 曹裕松¹, 沈承德², 孙彦敏², 杜卫兵¹, 李勤奋¹

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要:报道了马占相思与大叶相思两种豆科植物叶内养分的动态及养分转移特征, 分析测定两种植物的绿叶与黄叶内氮、磷、钾、钠、钙、镁等 6 种元素的含量。结果表明, 两种植物的成熟叶养分含量季节性变化不明显, 全年养分水平较为稳定。马占相思体内氮、磷、钾、镁养分水平显著高于大叶相思, 这 4 种元素在绿叶与黄叶内的含量也有显著差别。两种植物对 4 种元素大量转移再利用, 但对钙、钠没有表现出转移, 大叶相思与马占相思平均养分转移率分别为: 氮 49.8%, 39.8%, 磷 75.5%, 66.5%, 钾 61.8%, 43.3%, 镁 19.4%, 15.6%。作为豆科植物具有的固氮能力, 使转移率格局与非豆科植物不同, 表现为氮转移率降低, 而其它元素转移率显著上升。马占相思氮转移量高达 $112.43\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 磷 $12.74\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 钾 $45.78\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 但镁只有 $1.64\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 大叶相思养分转移量为: 氮 $90.17\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 磷 $7.23\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 钾 $34.49\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 镁 $1.58\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 通过转移获得的养分与植物从环境中吸收的养分量大致相当, 这两个养分源共同满足了植物生长过程中的养分需求。

关键词: 马占相思; 大叶相思; 养分动态; 养分转移; 亚热带; 人工林

Nutrient resorption in the leaves of two leguminous species widely planted in South China

LI Zhi-An¹, ZOU Bi¹, CAO Yu-Song¹, SHENG Cheng-De², SUN Yan-Min², DU Wei-Bing¹, LI Qin-Fen¹ (1. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Geochemistry Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1395~1402.

Abstract: Two legume species (*Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium*) were widely planted as pioneer species in tropical and subtropical regions of China. They were both adaptive to the infertile habitat. This paper examined the nutrient dynamics and nutrient resorption of the two species. The forests studied were at the age of 12. Mature green leaves and abscising leaves were sampled monthly over a year. Samples were oven dried and determined for N, P, K, Na, Ca, Mg. Meanwhile, litter traps were mounted under the forests and the litter collected and weighed monthly. Nutrient resorption rate was estimated with the nutrient difference between green leaves and abscising leaves.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170191, 30200035); 广东省自然科学基金资助项目 (2000 0976, 003031); 中国-澳大利亚合作资助项目 (ACIAR Project FST 97/77); 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目, 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目

收稿日期: 2003-04-07; **修订日期:** 2003-05-10

作者简介: 李志安 (1962~), 男, 广东省梅县人, 博士, 研究员, 主要从事森林土壤与植物营养生态研究。

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30170191, No. 30200035), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2000 0976, No. 00303), Sino-Australian ACIAR Project FST 97/77, Field Frontiers Project of CAS Knowledge Innovation Program, Director Foundation of South China Institute of Botany, CAS

Received date: 2003-04-07; **Accepted date:** 2003-05-10

Biography: 李志安, Professor, main research field: forest soil, plant nutritional ecology. E-mail: lizan@scib.ac.cn

The results showed that the nutrient content of mature leaves of the two species had no seasonal pattern. All nutrient remained relatively stable over the year. The nutrient level of N, P, K, Mg in *A. mangium* was significantly higher than that in *A. auriculiformis*. And four elements in green leaves showed markedly higher than those in abscising leaves, which indicated the obvious nutrient resorption in leaves. The mean nutrient resorption rates of *A. auriculiformis* and *A. mangium* were: N 49.8%, 39.8%, P 75.5%, 66.5%, K 61.8%, 43.3%, Mg 19.4%, 15.6%, with no certain resorption for Ca and Na. The nitrogen fixing ability of legumes made them different from non-legumes in nutrient resorption pattern, i. e. lower N resorption and higher P, K, Mg resorption. The nutrient quantity resorbed in *A. mangium* was N 112.43 kg/(hm² · a), P 12.74 kg/(hm² · a), K 45.78 kg/(hm² · a), Mg 1.64 kg/(hm² · a) respectively. The nutrient quantity resorbed in *A. auriculiformis* was N 90.17 kg/(hm² · a), P 7.23 kg/(hm² · a), K 34.49 kg/(hm² · a), Mg 1.58 kg/(hm² · a). The nutrient acquired by resorption was equivalent to that absorbed from the environment by roots. Both nutrient sources of resorption and root absorption meet the demand of plant growth.

Key words: *Acacia auriculiformis*; *Acacia mangium*; nutrient dynamics; nutrient resorption; subtropical regions of China

文章编号:1000-0933(2003)07-1395-08 中图分类号:Q142 文献标识码:A

在过去 20a 间,华南地区进行了大面积的造林绿化,对退化荒坡进行生态恢复,在此过程中,大量使用针叶树营造先锋人工林。然而,面积最广阔的马尾松与湿地松已逐渐显露出生态劣势,它明显地使土壤衰退,不利于人工林向自然林的演替。在这期间,有两个豆科树种引起关注,即马占相思(*Acacia mangiu*)与大叶相思(*Acacia auriculiformis*),这两个树种适应性强、生长迅速、能有效改良土壤,余作岳与彭少麟^[1]认为,这两个种适于我国热带亚热带地区的退化荒坡的生态恢复。目前,这两个树种已在华南得到一定范围的推广,规划中的湛江大型造纸企业,准备大规模植造马占相思林作为主要造纸原料。作为两个外来种,其生态学特性只是得到有限的探讨,丁明懋等^[2]研究了其固氮特性,赵平^[3]等研究了其生理生态特性,张文其等^[4]研究了生长过程中的生物量变化特征,李志安等^[5]报道了其营养结构。然而,与耐瘠特征直接相关的营养利用机理尚没有深入的研究。

营养利用机理的核心是体内的营养转移,即体内养分的再利用,特别是反映在衰老枝叶内的养分转移,它使枝叶的凋落不至于造成大量营养的损失。营养转移是普遍存在的现象,被认为是物种适应贫瘠土地的最重要机理^[6~9],它提高了体内养分的利用效率,降低了对环境中养分供应的依赖^[9]。本文主要从养分转移的角度,探讨这两个豆科固氮树种在营养利用上的特征。

1 材料与方法

材料取自中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站,试验站位于亚热带季风气候区,年均气温 21.7℃,极端最高气温 37.5℃,最低气温 0℃,年均降雨量 1700mm。它具有华南低丘坡地的典型特征,研究区最高峰海拔 103m,丘陵坡面坡度一般在 26° 以下。土壤为富铁土,成土母质是砂页岩。

试验站建立了多个以集区为单元的人工林类型进行生态比较,本研究在 12a 林龄的马占相思与大叶相思林进行。大叶相思平均基径 10.3cm,马占相思为 14.9cm,种植规格为 3m×3.5m。

在面积为 1hm² 的样方内,放置 10 个面积为 1m² 的凋落物收集箱,于每月底收集测定凋落物量。与此同时,采集植物绿叶与黄叶样品,方法如下:在样方内随机选取 15 株树,将它们分为 3 组,从每组内的 5 株树上采集大致等量的样品,混合成一个样品,因而,3 组共获得 3 个重复。绿叶样采树冠外围阳叶,黄叶样直接从树上采集即将脱落的叶子,个别月份无法直接从树上采,则从地表拾取刚脱落的叶子(从颜色极易判断)。在取样过程中,为了减少淋溶的影响,一般在取样前 3d 内没有降雨。根据绿叶内养分含量与黄叶内养分含量可以计算出养分转移量^[6]:

万方数据

$$\text{养分相对转移率} = \frac{\text{绿叶养分含量} - \text{黄叶养分含量}}{\text{绿叶养分含量}} \times 100\%$$

这种计算方式假定叶子脱落前后的重量不变,尽管实际情况不完全如此,但有研究发现从成熟叶到脱落叶的重量损失一般不超过 10%^[10]。根据养分转移量与转移率,可以计算实际转移量:

林分养分转移量(kg/hm²)= 养分转移率×凋落物量(kg/hm²)

所有植物样品在 60℃烘干,磨碎并通过 1mm 筛,并分别测定 N、P、K、Na、Ca、Mg 等 6 种元素含量。一部分样品用硫酸-过氧化氢消化,流动注射分析仪测定 N 与 P(N 基于淀粉蓝比色法,P 基于钼蓝比色法),火焰光度计测定 K 与 Na^[11]。另一部分样品用三酸消化(HNO₃-H₂SO₄-HClO₄),原子吸收光谱测定 Ca 与 Mg^[12]。

由于两个种绿叶与黄叶样品均是每月同时采集,应用配对样本 *t* 检验法检验两个种间及两个不同样品类型间的差别。

2 结果与分析

2.1 叶养分动态

两种豆科林的成熟叶与枯黄叶养分动态见图 1。从氮、磷、钾 3 个最重要的元素看,种间差别非常显著,绿叶与黄叶间的差别也很显著,这些差别均达到统计上极显著水准(表 1)。马占相思叶含氮、磷浓度总是高于大叶相思,两个种含钾量在上半年也是如此,但下半年差别幅度不大。钠、钙、镁 3 个元素种间差别不大,各条曲线交织在一起,*t* 检验显示,钠与钙不同样品间没有显著差异,但植物含镁量在绿叶与黄叶间存在显著差别。

表 2 利用变异系数量度不同养分全年变化的幅度,变异系数越大,表明月份间变化越大。从绿叶看,含氮量最为稳定,变异系数最小,其次是磷和镁,这两个种具有固氮能力,它在维持体内氮含量的稳定方面起重要作用。钾、钠、钙 3 种元素的变异较大,即全年动态较强,钾钠在体内通常以离子状态存在,易被雨水淋溶,因而,表现出含量上的较大不确定性。从黄叶看,含氮量的变异性大大高于绿叶,变异性最小的是镁,变异性最大的是磷钾。从黄叶与绿叶的对比来看,氮磷均是绿叶中变异性小,黄叶中变异性大,但其它四种金属元素则没有这种确定性,经常是相反的格局,这可能与金属元素易于淋溶的特性有关。

从图 1 看,叶含氮量全年比较稳定,没有表现出季节性变化,下半年马占相思落叶含氮量有略微下降趋势,而绿叶含氮量则有上升趋势,这可能是有效从落叶中转移养分后,满足了绿叶养分需求。磷全年也表现出相对稳定的特征,特别是绿叶含磷量表现出小幅升降的交替变化。绿叶含钾量在夏季有所上升,其它时间均比较平稳。钠、钙、镁 3 种元素同样没有明显的季节性变化,但镁表现出夏季上升的趋势。黄叶的养分含量变化不一,但比较显著的共同点是多数元素在 12 月份有一个跃升,而且马占相思黄叶的养分动态性比大叶相思强。黄叶含氮量的变化也没有季节性特征,全年比较平衡,马占相思在 7 和 8 月份有一定的下降趋势,而大叶相思在 1~3 月份有较大的起伏。黄叶磷的动态变化较强,特别是马占相思在 3~6 月份有一较高的含量平台,接着在 7 和 8 月份显著下降,随后又是上升,直至 12 月份达到最大值。大叶相思钾元素全年非常平稳,马占相思在 6 月份出现峰值。黄叶含其它 3 种元素多数动态性不强,但马占相思含钠有大的起伏。

表 1 配对样本养分差异性检验 *t* 值
Table 1 *T* values for paired data *t* test

	N	P	K	Na	Ca	Mg
大叶相思 <i>A. auriculiformis</i> ^①	12.070	10.598	8.529	-2.985	1.839	4.392
马占相思 <i>M. mangium</i> ^①	11.562	11.427	4.113	-2.264	0.257	4.815
绿叶 Green leaves ^②	6.979	6.999	3.489	0.674	-2.822	-1.340
黄叶 Yellow leaves ^②	8.678	3.929	5.322	1.451	-1.839	0.162
转移率 Resorption rate ^③	4.023	1.598	2.703	0.975	1.591	0.685

① 种内绿叶与黄叶的比较 comparison between yellow leaf and green leaf; ② 同类样品不同种间的比较 comparison between two species; ③ 种间转移率比较 comparison between two species; *t*_{0.01}, *v*₌₁₁=3.106, *t*_{0.001}, *v*₌₁₁=4.437

2.2 养分相对亏缺数据

衰老叶中许多重要养分的含量显著低于绿叶养分,一般认为这是植物转移养分现象。从表 1 看出,绿

叶与黄叶含氮、磷、钾及镁的量有显著差异,这几个元素具有明显的养分转移,但钠与钙差异不显著。从图 2 看,具有明显转移现象的 4 种元素,转移率是不同的,磷转移率最高,镁的转移率最低,大叶相思与马占相思平均转移率分别为:N 49.8%,39.8%,P 75.5%,66.5%,K 61.8%,43.3%,Mg 19.4%,15.6%。结果表明,即使是固氮树种,植物仍需大量转移利用衰老叶中的氮,而氮的充足供应(固氮与有效的转移),可能是造成磷更高效转移的重要原因,因为,植物体内具有保持最重要元素间平衡的趋势。除氮、磷、钾外,镁元素具有明显的转移现象。钙被认为是非转移元素,甚至认为在衰老叶中有积累的趋势,因而,没有表现出转移。计算出的钠相对转移率多数出现负值,主要原因在于该元素极易被淋洗,而且叶内含量水平低,因而,数值表现为很大起伏并多出现负值,它显然不代表钠在衰老叶中积累(见图 1)。

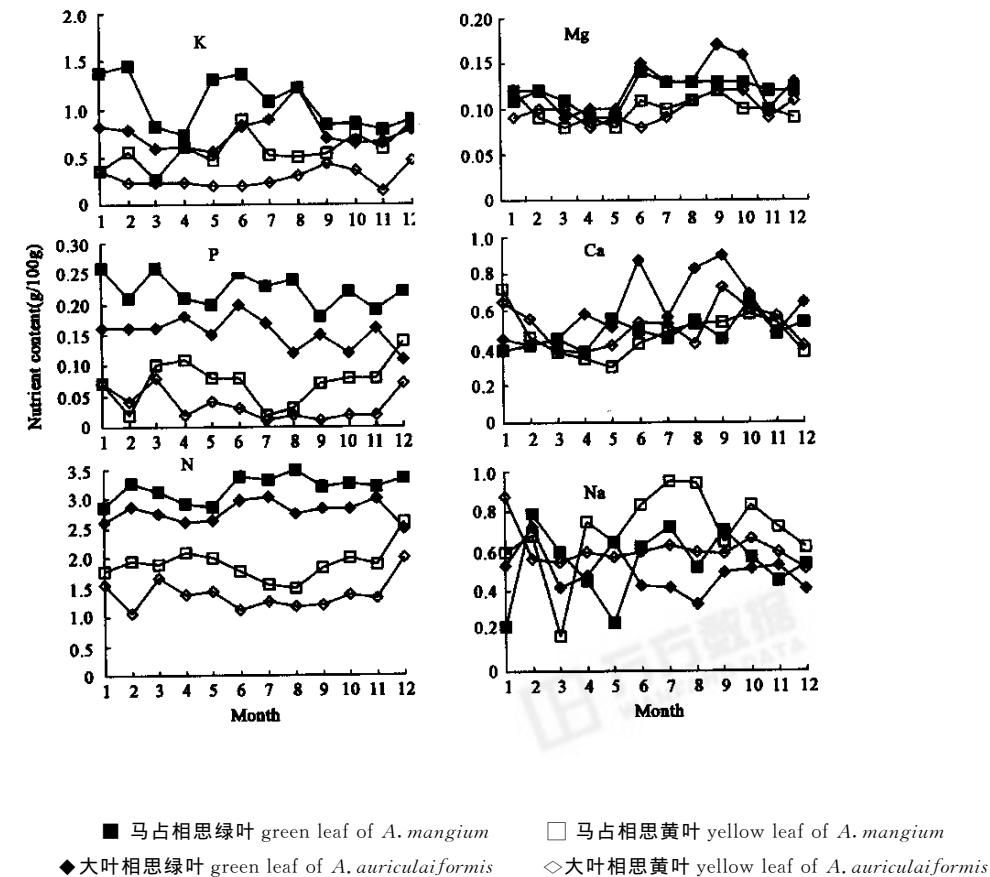


图 1 马占相思与大叶相思叶养分含量动态

Fig. 1 Nutrient content in leaf of *A. auriculiformis* and *A. mangium*

表 2 养分与转移率全年变异系数

Table 2 Variation coefficient of nutrients and resorption rates (%)

	N	P	K	Na	Ca	Mg
<i>A. mangium</i>						
绿叶 Green leaf	6.7	11.8	34.1	32.6	16.8	13.4
黄叶 Yellow leaf	15.0	49.1	31.9	28.9	25.0	13.9
转移率 Resorption rate	25.4	25.3	57.4	143.9	6730.6	72.4
<i>A. auriculiformis</i>						
绿叶 Green leaf	6.1	17.0	24.4	21.5	28.0	20.3
黄叶 Yellow leaf	19.2	68.8	35.2	14.7	22.2	14.3
转移率 Resorption rate	24.9	24.5	22.6	100.7	281.5	72.5

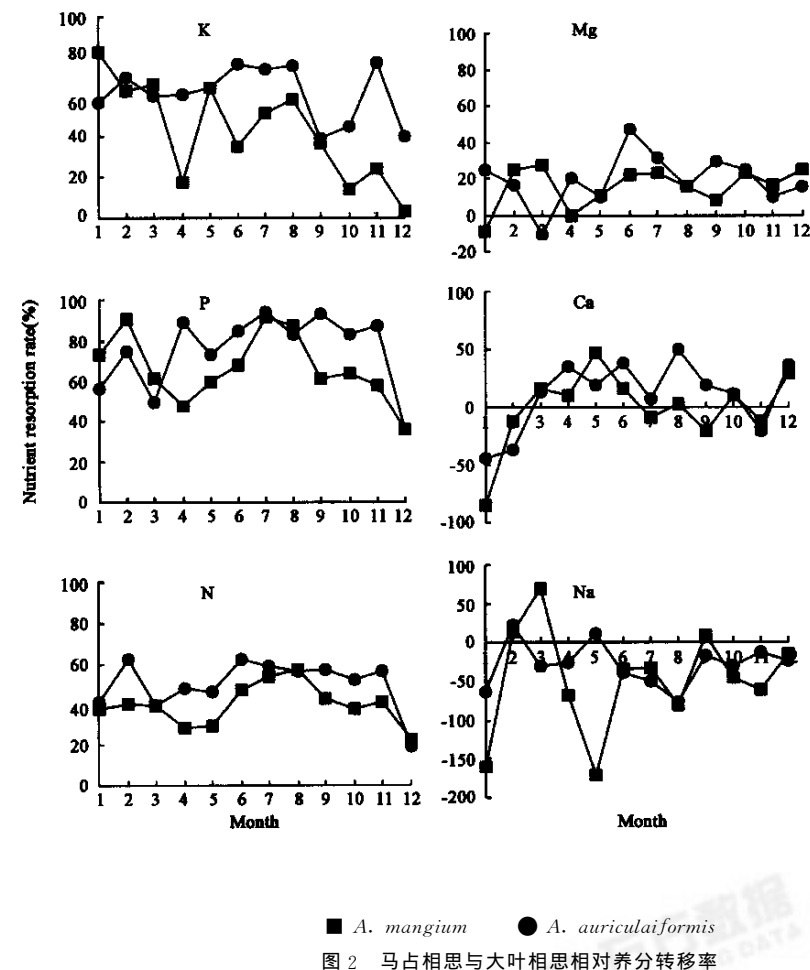


图 2 马占相思与大叶相思相对养分转移率

Fig. 2 Relative nutrient resorption rate in leaf of *A. auriculiformis* and *A. mangium*

养分转移率没有季节性格局,氮、磷、钾 3 个元素共同特征是在 12 月份明显下降,大大低于平均水平,这可能是冬季某个特殊环境因素引起的偶然变化。马占相思在 6 至 9 月份相对转移率上升,明显高于处于较低值的 3 月份和 4 月份,但大叶相思没有这种格局。磷有较大的起伏变化,马占相思从 2 月份的峰值开始下降至 4 月份低值,转而上升至 7 月份的另一个峰值,之后又一直下降至最低值;大叶相思则在年初有一较大的起伏,之后较为平稳。马占相思的钾转移率除了在 4 月份偶然下降外,表现为全年一路走低趋势,大叶相思则在 8 月份之后的下降中,出现 11 月份的突然跃升。镁的转移率全年在较低水平上维持较平衡的趋势。

2.3 林份养分转移量

从表 3 看出,大叶相思从衰老叶中转移的营养量是相当可观的,氮高达 $90.17\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,这一数值相当于其固氮量。相对于其体内含量水平而言,磷、钾、镁的转移量也是相当大的。这些被转移的养分是直接可利用的有效养分。转移量在 7 和 8 月份有一一高值,并总体上表现为下半年比上半年转移量高,处于较寒冷的 12、1 和 2 月份,转移量明显较低。由于转移率变化幅度不如落叶量的变化幅度,转移量主要决定因素是落叶量。

马占相思转移的养分量高于大叶相思,氮转移量高达 $112.43\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,磷 $12.74\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,钾 $45.78\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,镁 $1.64\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表 4)。从 8 月份直至次年 2 月份,均有较高的养分转移,同样这是此期间较高的落叶量所致。与大叶相思相似,大多数元素的最大转移量出现于 8 月份(钾出现于 1 月

份),但低转移量出现时间与大叶相思不同,主要在 3 至 7 月份。

表 3 12a 林龄大叶相思年养分转移量

Table 3 The quantity of nutrients resorbed from abscising leaves of *A. auriculiformis* at the age of 12 years (kg/hm²)

Month	N	P	K	Mg
1	3.54±2.11	0.30±0.18	1.52±0.91	0.10±0.06
2	4.94±2.91	0.33±0.20	1.50±0.88	0.06±0.03
3	7.45±2.28	0.56±0.17	2.44±0.75	-0.07±0.02
4	5.02±2.02	0.64±0.26	1.49±0.60	0.08±0.03
5	2.70±1.47	0.24±0.13	0.78±0.42	0.02±0.01
6	3.93±2.26	0.36±0.21	1.32±0.76	0.15±0.09
7	13.34±2.67	1.20±0.24	4.86±0.97	0.30±0.06
8	21.92±3.01	1.42±0.19	13.04±1.79	0.28±0.04
9	7.80±3.49	0.67±0.3	1.30±0.58	0.24±0.11
10	8.18±2.37	0.56±0.16	1.62±0.47	0.22±0.06
11	7.88±2.33	0.65±0.19	2.38±0.70	0.05±0.01
12	3.48±0.56	0.29±0.05	2.27±0.37	0.15±0.02
Sum	90.17	7.23	34.49	1.58

数据为平均值±标准偏差 (n=10)The data represent mean±standard deviation (n=10)

表 4 12a 林龄马占相思年养分转移量

Table 4 The quantity of nutrients resorbed from abscising leaves of *A. mangium* at the age of 12 years (kg/hm²)

Month	N	P	K	Mg
1	9.12±1.76	1.62±0.31	14.05±2.70	-0.09±0.02
2	10.09±1.97	1.46±0.29	7.09±1.38	0.23±0.05
3	5.21±2.32	0.68±0.30	2.29±1.02	0.13±0.06
4	2.86±1.36	0.34±0.16	0.45±0.21	0.00
5	2.51±1.33	0.36±0.19	2.56±1.36	0.03±0.02
6	7.33±2.21	0.78±0.23	2.19±0.66	0.14±0.04
7	4.46±2.61	0.52±0.31	1.40±0.82	0.07±0.04
8	27.67±7.62	2.91±0.80	9.96±2.74	0.28±0.08
9	11.10±1.23	0.88±0.10	2.49±0.28	0.08±0.01
10	12.67±1.06	1.42±0.12	1.22±0.10	0.30±0.03
11	12.71±1.72	1.05±0.14	1.81±0.25	0.19±0.03
12	6.71±0.80	0.72±0.09	0.27±0.03	0.27±0.03
Sum	112.43	12.74	45.78	1.64

数据为平均值±标准偏差 (n=10) The data represent mean±standard deviation (n=10)

3 讨论与结论

从出叶、展叶、成熟直至衰老过程中,叶子重要养分含量变化一般是从开始的最大值,逐步稀释下降(展叶期),至相对稳定(成熟期),最后在衰老期大幅度下降^[13],李培芝等^[14]把日本落叶松针叶内元素的季节变化划分为:波动中季节下降型的元素(氮、磷、钾),季节积累型(钙、铁、锰)和季节稳定型(镁、铜、锌)。本研究中,马占相思与大叶相思全年叶子养分含量变化较小,处于相对稳定状态,这主要是由于样品以相同标准在成熟期采集,它说明,只要叶子处于相似的生长阶段,其养分含量是相似的,而与季节性没有直接的关系。

养分转移被认为是物种适应贫养环境的一种重要生态策略,它是一种普遍存在的现象,Chapin and Kedrowski^[15]对植物对氮的转移率变幅在 0~79%(平均 52%),磷的转移率在 0~90%(平均 43%)。马占相思与大叶相思氮转移率稍低于平均水平(分别为 40%和 50%)^[15],这与固氮植物一般较非固氮植物

对氮的转移率低的观察是一致的^[16,17],而磷的转移率显著高于平均水平(分别为 67%与 76%)。这两个种氮、磷转移率与植物平均转移率的差别,主要源于其固氮特性,固氮作用降低了通过转移机理获取氮的需求。即当某种养分可利用性提高时,体内转移再利用养分量下降,这与外源性养分供应状况是相似的^[9,15,18]。然而,植物体内元素间是平衡相关的,特别是重要元素间需要保持基本平衡^[19],因而,氮的充足供应加剧了对其它元素转移的压力,这造成了两个种对磷转移率的升高,最高转移率达 95%,钾、镁也出现显著的转移。非豆科树种转移特征通常与此不同,如沈善敏等^[20]报道,我国北方杨树氮的转移率为 60%,磷的转移率为 50%,钾几乎没有转移,钙、镁甚至积累,显然,其氮的转移率要显著高于豆科树种,而磷的转移率又低于豆科树种,对钾、镁则完全不转移。由此看出,氮作为植物体内最重要的营养元素,它对其它营养元素的转移有极大的影响。

马占相思与大叶相思在养分转移上有较大的区别,可能是它们通过固氮获得的营养供应不同所致,而非种间机理上的差别。一般认为,植物对养分转移上的差异是生态型而非遗传型特征^[9],当某种养分获得了较充足的供应时,植物从衰老叶中转移的养分量就下降。因而,无论通过固氮或从环境中获得营养供应,其表现在营养转移上的响应是相似的,如 Pugnaire 与 Chapin 发现,在肥沃土地上生长的地中海常绿植物,氮转移率为 46%,而在瘦瘠土地上生长的植物氮转移率上升至 65%^[9]。在这里,马占相思则可能通过固氮获得了更多的氮供应,而表现出较低的转移率。

马占相思与大叶相思氮的转移率差别刚好是 10%,而磷的转移率差别是 9%,并且大小格局一致,似乎表明氮转移形成了相似程度的磷的转移压力。但 Pugnaire 与 Chapin 的结果显示,磷的转移没有表现出与氮转移率相对应的变化,肥沃地上磷转移率为 47%,而瘦瘠地为 46%,两者非常相似。因而,氮转移转移率的差别并不一定有对应程度的磷转移率的差别,高氮转移是否形成对磷转移压力,可能还必须与其它供应源一起考虑(如固氮及根部吸收)。

叶子大量转移养分极大地满足了植株生长的养分需求,李志安等^[20]报道了该林分 8a 林龄时年均养分吸收量估计值:氮 125.10kg/hm²,磷 9.73kg/hm²,钾 27.65kg/hm²,镁 17.59kg/hm²,显然,通过根系吸收(包括固氮)获得的养分量与通过营养转移获得的养分是相当的(表 4),约为 1:1 的关系,它们共同满足了林分每年生长的需求。因而,养分转移在植物生长过程中起着极为重要的作用。

本研究表明,马占相思与大叶相思具有相当高的养分转移效率,在退化土地的植被恢复过程中,具有较高养分转移率的树种具有特殊的意义,它减少了植物本身对环境养分供应的依赖,有利于先锋群落的建立。然而,过高的养分转移率将减少通过凋落物回归土壤的养分量,它不利于土壤养分库的积累与优质有机质库的建立,进而又将影响先锋群落向地带性顶极群落的演替。因而,从生态系统层次上看,植物体内合理的养分转移效率最有利于生态系统整体生态功能的发挥。

References:

- [1] Yu Z Y and Peng S L. The artificial and natural restoration of tropical and subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(supp. A): 1~17.
- [2] Ding M M, Yu W M, Liao L Y. Effect of ecological factors on nodulation and N-fixation in *Acacia mangium*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1994, **2**(2):15~21.
- [3] Zhao P, Zeng X P and Yu Z Y. The annual photosynthetic trend of trees on downland in Heshan, Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(supp. A):64~67.
- [4] Zhang W Q, Peng S L, Ren H, *et al.* The allocation of the biomass and energy in *Acacia mangium* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(supp. A): 44~48.
- [5] Li Z A and Peng S L. Nutrient structure of several man-made forests in tropics and subtropics of China. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, **20**(4):1~4.
- [6] Boerner R E J. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency of four deciduous tree species in relation to site fertility. *Applied Ecology*, 1984, **21**:1029~1040.
- [7] Chapin F S III and Moilanen L. Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from Alaskan birch

- leaves. *Ecology*, 1991, **72**(2):709~715.
- [8] Nambiar E K S and Fife D N. Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiology*, 1991, **9**:185~207.
- [9] Pugnaire F I and Chapin F S III. Controls over nutrient resorption from leaves of evergreen Mediterranean species. *Ecology*, 1993, **74**(1):124~129.
- [10] Schlesinger W H, Delucia E H and Billings W D. Nutrient-use efficiency of woody plants on contrasting soils in the western Great Basin, Nevada. *Ecology*, 1989, **70**(1):105~113.
- [11] Bao S D. *Agriculturally chemical analysis of soil*, 3rded. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 263~270.
- [12] Nanjing Soil Institute, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 360~370.
- [13] Pushp K R and Surendera P S. Dynamics of nutrients and leaf mass in central Himalayan forest trees and shrubs. *Ecology*, 1987, **68**(6):1974~1983.
- [14] Li P Z, Fang S H, Zhang S Y. Seasonal nutrient pattern in leaves of *Larix principis-rupprechtii* forest in Japan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, **2**(3):207~213.
- [15] Chapin F S and Kedrowski R A. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous Taiga trees. *Ecology*, 1983, **64**:376~391.
- [16] Killingbeck K T. Nutrient in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology*, 1996, **77**:1716~1727.
- [17] Killingbeck K T. Inefficient nitrogen resorption in genets of the actinorhizal nitrogen-fixing shrub *Comptonia peregrina*: physiological ineptitude or evolutionary trade-off?. *Oecologia*, 1993, **94**: 542~549.
- [18] Shaver G R and Melillo J M. Nutrient budgets of marsh plants: efficiency concepts and relation to availability. *Ecology*, 1984, **65**(5):1491~1510.
- [19] Garten C T Jr. Correlations between concentrations of elements in plants. *Nature*, 1976, **261**: 687~688.
- [20] Shen S M, Y W D, Zhang L. Internal and external cycle of nutrient in poplar tree. I. Change of nutrient concentration and nutrient stock before and after abscission. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, **3**(4):296~301.
- [21] Li Z A, Ding M M, Fang W. The nutrient storage and distribution in artificial *Acacia mangium* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(supp. A):103~114.

参考文献:

- [1] 余作岳,彭少麟. 热带亚热带退化生态系统的植被恢复及其效应. *生态学报*, 1995, **15**(suppA):1~17.
- [2] 丁明懋,蚊伟民,廖兰玉. 生态条件对马占相思结瘤固氮的影响. *热带亚热带植物学报*, 1994, **2**(2):15~21.
- [3] 赵平,曾小平,余作岳. 广东鹤山丘陵人工林几种乔木的光合年变化. *生态学报*, 1995, **15**(suppA):64~67.
- [4] 张文其,彭少麟,任海等. 鹤山人工马占相思林的生物量与能量分配. *生态学报*, **15**(suppA):44~48.
- [5] 李志安,彭少麟. 我国热带亚热带几种人工林体内营养结构特征. *生态学杂志*, 2001, **20**(4):1~4.
- [11] 鲍士旦. *土壤农化分析*, 北京:中国农业出版社, 2000. 263~270.
- [12] 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. 360~370.
- [14] 李培芝,范世华,张颂云. 日本落叶松人工林针叶中矿质营养元素的季节吸收特点及其相互关系. *应用生态学报*, 1991, **2**(3):207~213.
- [20] 沈善敏,宇万太,张璐. 杨树主要营养元素内循环及外循环研究 I. 落叶前后各部位养分浓度及养分贮量变化. *应用生态学报*, 1992, **3**(4):296~301.
- [21] 李志安,丁明懋,方炜,等. 马占相思人工森林生态系统养分物质的储存与分布. *生态学报*, 1995, **15**(supp. A):103~114.