

马尾松人工林发育过程中的养分动态*

杨会侠^{1,2,3,4} 汪思龙^{1,2,*} 范冰^{1,2} 张伟东^{1,2,3} 韦翠娥⁵

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南会同 418307; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039; ⁴ 辽宁省森林经营研究所, 辽宁丹东 118002; ⁵ 国营三门江林场, 广西柳州 545006)

摘要 为了解马尾松人工林不同发育时期的养分动态,利用空间代替时间的方法对7、17、31和51年生4个年龄阶段的马尾松人工林养分积累、分配及循环进行了研究.结果表明:马尾松人工林发育过程中,生物量积累与养分积累具有不同步性,从17年生到51年生,生物量积累增长速率是N、P、K、Ca和Mg积累增长速率的3.3、5.4、3.3、3.7和9.8倍;各器官中养分的分配与养分库增长速率有关,随着林龄的增长,树干养分的比重和养分的根冠比增大;单位养分生产的干物质量随林龄增长而提高,51年生时林分的养分循环系数较高,具有低存留、高归还的特点,养分利用效率最高.缩短轮伐期降低了养分高效利用的机会.为维持林地的长期生产力,建议将马尾松人工林轮伐期延长到50年以上,同时降低收获强度.

关键词 马尾松 养分循环 养分利用效率 轮伐期

文章编号 1001-9332(2010)08-1907-08 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Dynamics of nutrients in an age sequence of *Pinus massoniana* plantation. YANG Hui-xia^{1,2,3,4}, WANG Si-long^{1,2}, FAN Bing^{1,2}, ZHANG Wei-dong^{1,2,3}, WEI Cui-e⁵ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Huitong National Research Station of Forest Ecoecosystem, Huitong 418307, Hunan, China*; ³*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; ⁴*Liaoning Institute of Forest Management, Dandong 118002, Liaoning, China*; ⁵*Sanmenjiang State-owned Forest Farm, Liuzhou 545006, Guangxi, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(8): 1907-1914.

Abstract: By using a chronosequence approach, this paper studied the nutrients accumulation, allocation, and cycling in 7-, 17-, 31-, and 51-year-old Masson pine plantations, aimed to analyze the dynamics of nutrients in Masson pine plantation at its different developmental stages. The results showed that 1) nutrient accumulation was not synchronized with biomass accumulation, with the accumulation rate of biomass being 3.3, 5.4, 3.3, 3.7, and 9.8 times of that of N, P, K, Ca, and Mg from age 17 to 51, respectively, 2) nutrient allocation to a specific component was related to the growth rate of the nutrient pool in the component, and the nutrient allocation to stem as well as the ratio of nutrient allocation to root/shoot increased with plantation age, and 3) the biomass production per unit nutrient, *i. e.*, nutrient use efficiency, and the nutrient cycling coefficient also increased with plantation age, being higher for 51-year-old plantation than for younger plantations, suggesting that shortening the rotation length could reduce the possibility to raise the nutrient use efficiency. It was suggested that both extending the current rotation length to as long as 50 years and reducing the harvest intensity could be helpful to conserve the nutrients and to maintain long-term productivity.

Key words: Masson pine (*Pinus massoniana*); nutrient cycling; nutrient use efficiency (NUE); rotation length.

在森林生态系统中,养分吸收、存留与归还过程及其调控一直是森林可持续经营管理基础理论的热

点问题之一^[1-2]. 由于森林生态系统发育过程的长期性和复杂性,其养分吸收和分配过程存在很多不确定因素,尤其是在人工林生态系统中,由于人类经营活动的影响,特别是周期性采伐,大量的养分元素

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-405)资助.

* * 通讯作者. E-mail: slwang@iae.ac.cn

2010-01-11 收稿,2010-06-11 接受.

随着木材以及其他器官的收获而被移出,从而导致系统养分的净消耗,也使得林地养分过程变得更为复杂^[3-5].

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方林区主要的造林先锋树种,也是松类中分布最广、面积最大的一个用材树种^[6].目前有关马尾松人工林养分过程的研究报道基本局限于某一年龄或较短年龄阶段林分的调查与分析,而且立地条件差异较大,甚至得出完全不同的结论^[7-9].陈永瑞等^[7]报道,16年生马尾松人工林对养分高存留、低归还,易消耗地力;而项文化和田大伦^[8]则认为,马尾松人工林早期自身养分利用率低,但归还速率快,有利于林地生产力的维持,成熟后及时采伐利用能维持林地持久生产力.另据报道,26~31年生的马尾松对营养元素的存留量和利用效率均较高,元素的生物循环强度和生物积累量也较大^[9].马尾松人工林养分循环效率、利用效率和林分密度有较大关系^[10-11],与阔叶树混交有利于增加养分的年流通量^[12-13].在生产实践中,人工林的轮伐周期趋于缩短,福建省采伐技术规程规定:短轮伐期马尾松用材林成熟龄可缩短为16~25年.同时,各地普遍存在对林产品收获强度增大的趋势,或将枝、叶全部移出林地,作为薪柴和饲料,以便于林地更新.有关这些经营管理方式对森林生态系统养分平衡状况以及长期生产力影响的研究则少见报道.

本文采用空间代替时间的方法,研究较大时间尺度上马尾松人工林发育过程中,不同林龄的养分状况和循环特征,探讨轮伐期长短对林地养分和长期生产力的影响,以期对马尾松人工林的经营管理提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 样地概况

试验地设置在广西壮族自治区柳州市的国有三门江林场(24°10′—24°27′ N, 109°26′—109°48′ E),地处中亚热带向南亚热带过渡季风气候带,年平均气温20.5℃,年日照时数在1200~1635 h,年均降雨量1367.7 mm.地形以山地丘陵地貌为主,土壤以红壤土和石灰土为主,土壤肥力中等^[14].

在对林场所有年龄阶段马尾松人工林进行踏查的基础上,选择立地条件相类似,营林措施基本相同,林相完整且具有代表性的7、17、31和51年生马尾松人工林,分别设置20 m×20 m的样地共4块.从7年生到51年生的林分密度分别为1518、1091、

500和325株·hm⁻²,平均树高分别为(7.8±0.9) m、(17.2±0.9) m、(21.2±0.9) m和(31.9±3.1) m,平均胸径分别为(9.4±2.1) cm、(21.3±2.2) cm、(25.9±5.2) cm和(39.4±11.0) cm.

1.2 样品采集

在每块样地内,分别选取有代表性的3株标准样木进行破坏性取样.1)地上部分:从树干基部把树伐倒,记录树高、胸径;砍下侧枝,选出直径 $d \geq 2$ cm不带叶的大枝,称量;选取代性的带叶小枝,测枝叶质量比,并称量全部小枝;在树干基部、离地1.3、3.6 m及以上每2 m处,锯取圆盘,标记后留作树干解析;测量干材与树皮质量比,并分别称量每段树干.2)地下部分:将根系全部挖出,分根桩、粗根($d \geq 3$ cm)、中根($3 \text{ cm} > d \geq 0.5 \text{ cm}$)、小根($d < 0.5 \text{ cm}$)4部分分别称量.对针叶、小枝、大枝、树干材、树皮、根桩、粗根、中根和小根分别取鲜样后称量,带回室内65℃恒温烘干至恒量后称量,计算含水量,换算成各组分的干物质质量.

在4块标准地随机布设5个1 m×1 m、高15 cm的凋落物收集筐,筐底部固定有尼龙网,筐下由4根1 m长的木棒支撑四角,防止凋落物与土壤接触或被其他动物分解,从2008年4月30日至2009年4月30日每月末收集一次凋落物,共12次.凋落物取回后,分为针叶、枯枝、树皮、生殖器官(包括球花和球果)以及剩余部分(主要由虫粪组成),然后放入烘箱中65℃烘至恒量,称取干质量,取样留待测定.

1.3 样品处理与化学分析

将烘干后的所有样品(包括全部样木各组分和每月凋落物各组分)用植物粉碎机打成粉末,过1 mm筛.然后采用H₂SO₄-HClO₄消煮法将样品消煮,将消煮液定容后再分别吸取少量制备成N、P、K、Ca和Mg的待测液;N含量测定采用凯氏滴定法;P含量测定采用钼蓝比色法;K、Ca和Mg含量测定采用原子吸收法.

1.4 数据整理与分析

为更精确测定林分现存生物量,在计算生物量过程中,利用93株马尾松人工林解析木数据(除了本研究的12株解析木,还包括龙里林场15株^[15]、西坡林场26株^[16]、禄峰山林场的4株^[8]及中国科学院会同森林生态试验站保存的36株解析木资料)建立了胸径与各器官生物量的相对生长关系, $W = aD^b$ 拟合了除大枝外各器官生物量,大枝生物量则采用S方程 $[W = \exp(a + b/D)]$.利用已建立的相对生长方程,计算出不同年龄林分的各器官生物量

及总生物量,再除以林分密度分别获得不同年龄平均单株各器官生物量及单株生物量。

养分利用效率(NUE)定义为消耗单位养分所获得的干物质质量。根据林木相邻年龄各器官生物量比例相对稳定的特点,采用比例法测定各林分的每年净生产力^[17]。由于三门江林场对马尾松人工林经营过程中对间伐抚育记录不详,为消除可能间伐对净生产力的影响,以各器官最后 5 年的平均净生长量代替最后一年的净生产力(net primary productivity, NPP)。

养分年存留量为各器官年净生产力与养分浓度乘积。养分年归还量为每月凋落物各组分质量与凋落物养分浓度乘积之和。养分循环指森林土壤和植物之间养分元素的流动过程,包括吸收、存留和归还 3 个环节,循环平衡公式为:吸收=存留+归还。采用养分利用系数、循环系数和周转时间 3 个参数来分析养分循环的特征。养分利用系数为年吸收量与总贮存量的比值,表明林木维持其生长所需的元素量。养分循环系数为年归还量与年吸收量的比值,表征元素的循环强度。养分周转时间为养分元素经历一个循环周期所需的时间,由养分的总贮存量除以年归还量。

所有数据统计均由 SPSS 13.0 软件完成,对各因子变化差异进行了单因素方差分析和 LSD 检验,差异显著水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 马尾松各器官的养分浓度

由图 1 可以看出,马尾松各器官内养分浓度存在显著差异,总体表现为:针叶>小枝/树皮>细根>中根/粗枝>粗根/根桩/树干材。除 Ca 浓度在树皮中与针叶、小枝中没有明显差异外,针叶中的养分浓度最高,树干材中最低,其他器官居中。

不同发育阶段马尾松器官中养分浓度差异显著。随着林龄的增长,N 浓度在针叶中升高,根桩中降低,其他器官中则无明显差异;P、K 浓度整体呈降低的趋势;Ca 和 Mg 浓度则呈抛物线形变化。针叶中各养分浓度为:N>K>Ca>Mg>P,其他器官中为:Ca>N>K>Mg>P。

2.2 马尾松人工林生物量、养分积累与分配

由表 1 可以看出,随着林龄的增长,马尾松人工林生物量与养分积累呈增加趋势,各养分积累为:Ca>N>K>Mg>P。从 17 年生到 51 年生,N、P、K、Ca

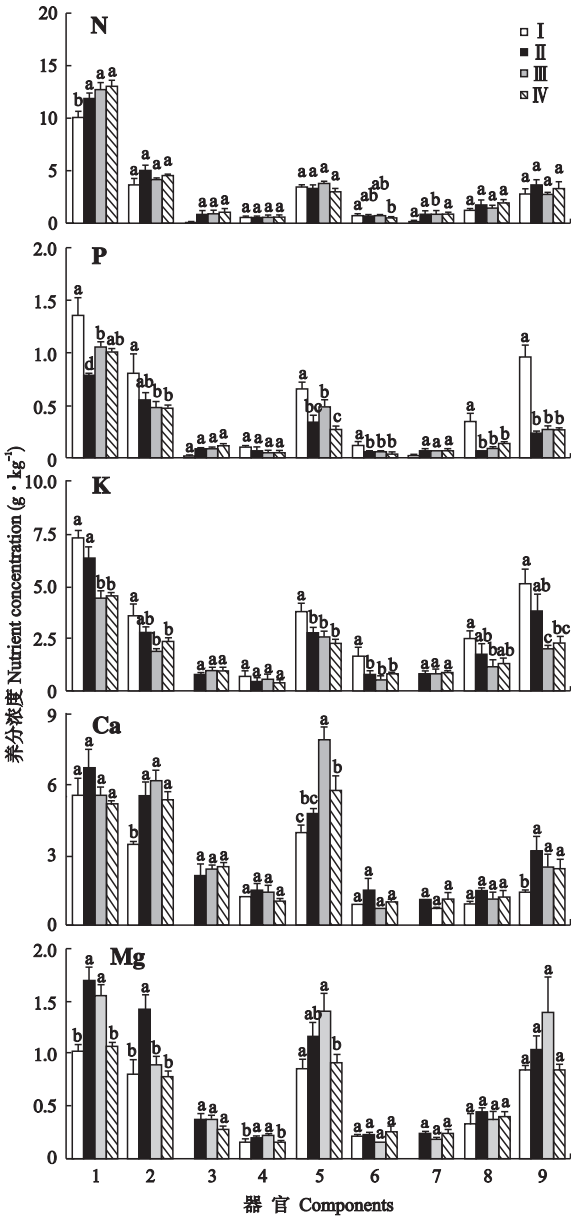


图 1 不同林龄马尾松各器官 N、P、K、Ca 和 Mg 浓度
Fig.1 Concentration of N, P, K, Ca, and Mg in various components of Masson pine tree with different ages.

I: 7 年生 7-year-old; II: 17 年生 17-year-old; III: 31 年生 31-year-old; IV: 51 年生 51-year-old; 1) 针叶 Needles; 2) 小枝 Small branches; 3) 大枝 Coarse branches; 4) 干材 Stem-wood; 5) 树皮 Stem-bark; 6) 根桩 Stump; 7) 粗根 Coarse roots; 8) 中根 Middle roots; 9) 小根 Fine roots.

和 Mg 积累分别增长了 26.9%、16.6%、27.1%、23.8% 和 9.1%,而生物量积累却增长了 89.1%,生物量积累的增长率分别是 N、P、K、Ca、Mg 增长率的 3.3、5.4、3.3、3.7 和 9.8 倍。

随着林龄的增长,马尾松各器官生物量和养分量占总生物量与总养分量比重的变化趋势有所差异(图 2):地上部分生物量与养分的比重逐渐下降,含 N 量从 7 年生的 96.2% 降到 51 年生的 78.0%,而

表 1 不同林龄马尾松人工林生物量和养分积累
Tab.1 Accumulation of biomass and nutrient of Masson pine plantation at different ages (mean±SE)

林龄 Stand age (a)	生物量 Biomass (t · hm ⁻²)	N (kg · hm ⁻²)	P (kg · hm ⁻²)	K (kg · hm ⁻²)	Ca (kg · hm ⁻²)	Mg (kg · hm ⁻²)
7	40. 8	83. 7±4. 7d	15. 3±1. 5e	83. 3±6. 8c	84. 2±4. 0d	16. 4±0. 9d
17	221. 7	313. 3±18. 1b	33. 4±3. 2a	229. 5±30. 3a	488. 9±55. 4b	96. 1±4. 2b
31	179. 9	227. 4±11. 5c	23. 5±1. 3b	151. 8±18. 2b	380. 9±25. 8c	62. 9±1. 9c
51	419. 3	397. 3±25. 7a	39. 2±3. 5a	292. 0±29. 1a	605. 1±25. 8a	104. 5±3. 1a

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

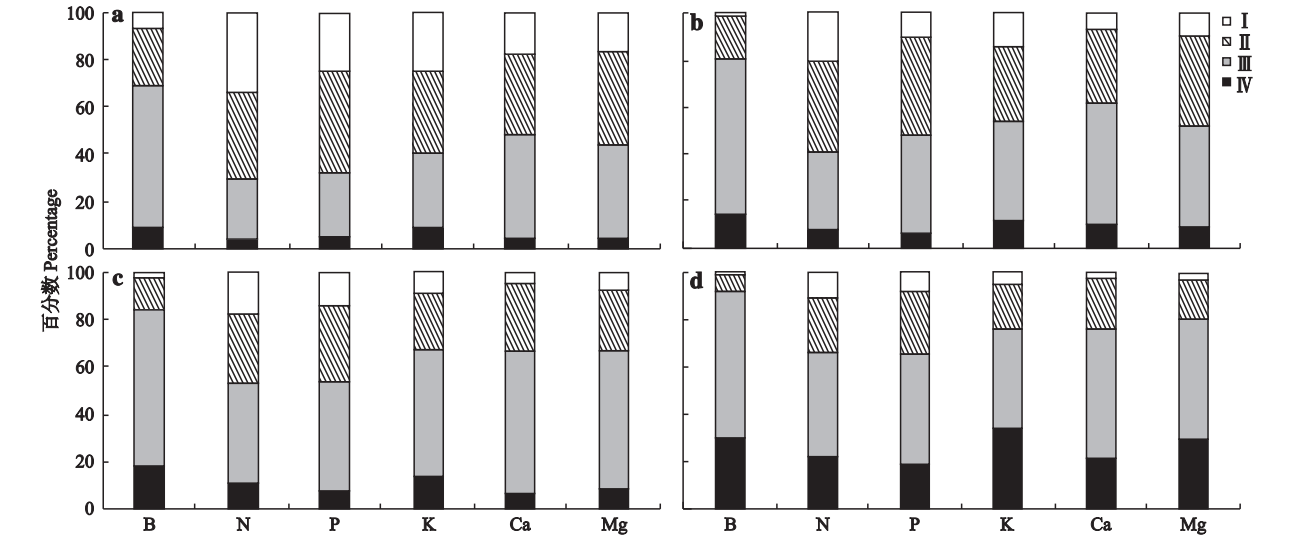


图 2 不同林龄马尾松人工林生物量和养分在各器官中的分配
Fig.2 Biomass and nutrient allocation in various components of Masson pine plantation at different ages.

I : 针叶 Needles; II : 树枝 Branches; III : 树干 Stem; IV : 树根 Roots; B: 生物量 Biomass; a) 7 年生 7-year-old; b) 17 年生 17-year-old; c) 31 年生 31-year-old; d) 51 年生 51-year-old. 下同 The some below.

地下部分生物量与养分的比重不断提高,从而使生物量与养分的根冠比也不断提高. 其中,地上部分针叶和树枝生物量与养分比重不断降低,而树干中除 K、Ca 和 Mg 比重在 31 年生时最高外,N、P 比重分别从 7 年生的 25.7% 和 28.2% 增长到 51 年生的 43.5% 和 47.5% .

2.3 马尾松人工的林养分利用效率

随着林龄的增长,马尾松人工林的养分利用效率提高(图3),各养分利用效率呈P>Mg>K>N

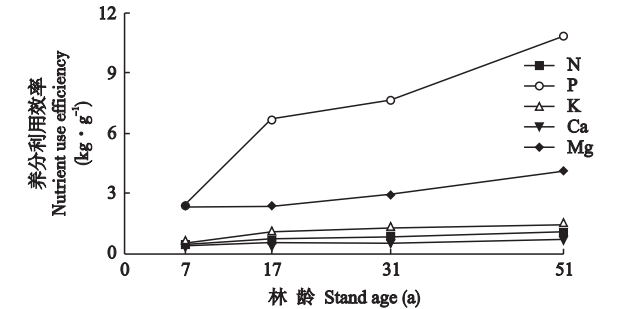


图 3 不同林龄马尾松人工林养分利用效率
Fig.3 Nutrient use efficiency (NUE) for N, P, K, Ca, Mg in Masson pine plantation at different ages.

>Ca. 不同养分的利用效率提高幅度有较大差异,其中,P 的利用效率增幅最大,从 7 年生的 2.5 kg · g⁻¹ 提高到 17、31、51 年生的 6.7、7.7 和 10.8 kg · g⁻¹,而 Ca 的利用效率则维持相对稳定.

2.4 马尾松人工林的养分循环

2.4.1 年净生产力与养分年存留量 随着林龄的增长,马尾松人工林年净生产力(NPP)与养分年存留量呈抛物线形变化,17 年生时最高,NPP 达 19.3 t · hm⁻² · a⁻¹(图 4 a),N、P、K、Ca 和 Mg 年存留量分别为 27.3、2.9、20.0、44.9 和 8.3 kg · hm⁻² · a⁻¹. 不同养分年存留量表现出 Ca>N>K>Mg>P (图 4 b).

2.4.2 年凋落物量与养分归还量 随着林龄的增长,马尾松人工林年凋落物量与各养分(除了 Mg)年归还量的变化由 7 年生开始下降,到 31 年生达到最低,然后有所提高,呈偏“V”字形. 其中,年凋落物中的 N 归还量由 7 年生的 40.0 kg · hm⁻² · a⁻¹,降低到 17 和 31 年生的 34.7 和 29.4 kg · hm⁻² · a⁻¹,然后增加到 51 年的 35.1 kg · hm⁻² · a⁻¹(图 4 c). 年归还 Mg 量则先提高、后降低、再提高,以

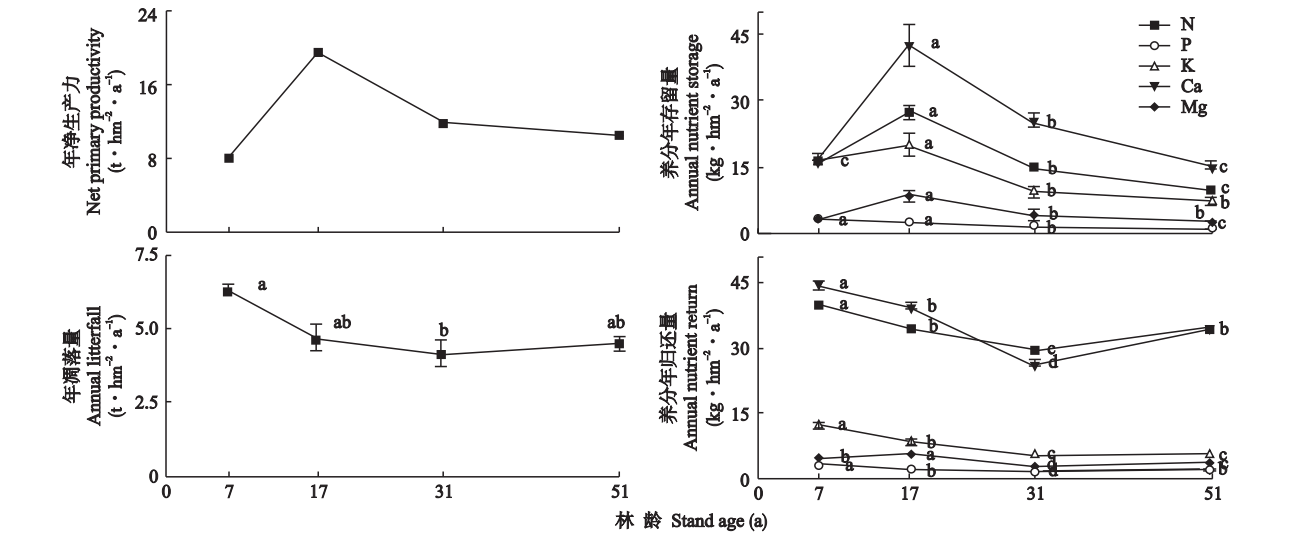


图 4 不同年龄马尾松人工林净生产力、年凋落量与养分的年存留量和归还量

Fig. 4 Net primary productivity (NPP), annual litterfall, annual nutrient storage and return of Masson pine plantation at different ages.

17 年生时最高 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 31 年生时最低 ($2.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). 各养分通过凋落物形式归还到林地的大小顺序为: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$ (图 4 d).

2.4.3 养分循环参数 由表 2 可以看出, 不同林龄马尾松人工林的养分循环特征参数表现各异, 分别介于 $0.56 \sim 0.78$ (N)、 $0.39 \sim 0.65$ (P)、 $0.29 \sim 0.45$ (K)、 $0.47 \sim 0.76$ (Ca)、 $0.38 \sim 0.58$ (Mg) 之间, 随林

龄增长, 呈先降低后提高, 呈凹槽状, 表现出 $\text{N} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Mg} > \text{K}$. N、P、K、Ca 和 Mg 利用系数分别从 7 年生的 0.68 、 0.39 、 0.36 、 0.82 、 0.48 降低到 51 年生的 0.11 、 0.07 、 0.04 、 0.09 、 0.06 . 不同林龄条件下各养分利用系数相对大小有一些变化, 但整体呈现出 $\text{N} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Mg} > \text{K}$. 随着林龄的增长, 各养分周转时间呈延长趋势, 总体上为 $\text{K} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Ca} > \text{N}$.

表 2 马尾松人工林生态系统养分循环参数

Tab. 2 Parameters of nutrient cycling in Masson pine plantation ecosystem

林龄 Stand age (a)	养分 Nutrient	养分总现存量 Nutrient storage (kg · hm ⁻²)	年存留量 Nutrient storage (kg · hm ⁻²)	年归还量 Nutrient return (kg · hm ⁻²)	年吸收量 Nutrient absorption (kg · hm ⁻²)	循环系数 Cycling efficiency	利用系数 Use efficiency	周转时间 Return time (a)
7	N	83.67	16.62	40.05	56.67	0.71	0.68	2.09
	P	15.27	3.03	2.98	6.01	0.50	0.39	5.13
	K	83.25	16.54	13.68	30.22	0.45	0.36	6.08
	Ca	84.15	16.72	52.22	68.94	0.76	0.82	1.61
	Mg	16.4	3.26	4.54	7.80	0.58	0.48	3.61
17	N	313.09	27.27	34.66	61.93	0.56	0.20	9.03
	P	33.29	2.90	1.83	4.73	0.39	0.14	18.22
	K	229.45	19.99	8.15	28.14	0.29	0.12	28.15
	Ca	488.84	44.92	39.31	84.24	0.47	0.17	12.43
	Mg	95.65	8.33	5.44	13.78	0.40	0.14	17.57
31	N	227.31	15.08	29.44	44.51	0.66	0.20	7.72
	P	23.33	1.55	1.61	3.16	0.51	0.14	14.50
	K	151.78	10.07	5.13	15.20	0.34	0.10	29.56
	Ca	380.75	29.07	26.01	55.08	0.47	0.14	14.64
	Mg	62.91	4.17	2.52	6.69	0.38	0.11	24.99
51	N	397.29	10.05	35.09	45.14	0.78	0.11	11.32
	P	38.80	0.98	1.85	2.83	0.65	0.07	20.94
	K	291.69	7.38	5.31	12.69	0.42	0.04	54.90
	Ca	605.26	18.03	35.72	53.75	0.66	0.09	16.94
	Mg	104.39	2.64	3.54	6.18	0.57	0.06	29.47

3 讨 论

3.1 马尾松各器官的养分浓度变化

本研究结果表明,马尾松针叶中各种养分浓度均最高,而树干中养分浓度最低,各器官中养分浓度的布局与前人的研究^[8-9,18-19]结果基本一致.针叶是针叶植物进行光合作用的主要器官,其新陈代谢活跃,需要更多的养分来维持其生理功能;而树干主要运输水分和无机盐,同时起支撑作用,生理活动较弱,对养分的需要和贮存量也相应较少.

N 是蛋白质、核酸和光合色素重要的组成部分.随着树龄的增长,针叶中 N 浓度增加,说明马尾松人工林针叶到 51 年生时仍保持较高的生理活性.这与前人的研究结果^[20-21]有所不同.其原因可能与不同树种的光合能力和衰老速率有关. P 和 K 浓度随年龄的增长而降低,与国外类似研究^[22-25]相一致.这种现象是养分的稀释效应,即随着年龄的增长,干物质积累增加,养分浓度降低.值得关注的是,本研究中 Ca 和 Mg 浓度随树龄增长呈抛物线形,与文献^[21,23]的研究报道不同. Ca 作为一种结构性物质,主要分布在细胞壁组织中,起支撑作用,同时, Ca 是调节细胞分裂、细胞新陈代谢的钙调蛋白的重要组成部分^[26],具有重要的生理功能; Mg 是叶绿素的重要组成部分,其浓度变化可能与种的特性和土壤化学性质有关.从各养分浓度总体布局看,马尾松人工林直到 51 年生仍保持较高的代谢活性.

3.2 马尾松人工林养分积累、分配及养分利用效率

随着林龄的增长,马尾松人工林养分积累量有提高的趋势,主要与养分库的不断增大有关.但 31 年生林分的养分积累比 17 和 51 年生的低,可能是由于 31 年生林分曾被大强度间伐,林分密度较低,从而导致林分生物量相对较低,说明林分密度也是影响养分积累的一个重要因子^[27].

马尾松人工林各养分积累速率远低于生物量积累,说明养分与生物量积累具有不同步性.这主要是由于不同浓度器官生物量的增长速率不同.生长前期,马尾松的主要任务是完成树冠构建,针叶、树枝等高养分浓度器官生物量增长迅速;林分郁闭后,针叶、树枝生物量虽有增长,但增长速率远不及低养分浓度器官树干,从而导致总的养分积累速率低于总的生物量积累.这说明马尾松完成树冠构建后,是以较低水平的养分来生产更多的干物质,养分利用效率更高,延长轮伐期和降低收获强度将有效地减少养分消耗,有利于维持林地的长期生产力.同样,各

器官生物量增长速率之间的相对差异也是造成养分在各器官中分配比重随林龄增长有较大变化的主要原因.随着林龄的增长,具有高养分浓度的针叶中养分比重下降,而低养分浓度的树干中养分比重升高,17、31 和 51 年生树干中养分均占总量的 50% 左右,与文献^[8,18-19]的研究结果相一致.马尾松是深根系树种,随着林龄的增长,根生物量增长迅速,从而引起养分在根冠中的分配比升高.

马尾松人工林养分利用效率随林龄增长而提高,51 年生时最高,尤其是 P 的利用效率增幅最大,51 年生是 7 年生的 4.3 倍.因此,短轮伐期造成的养分低利用效率是一些人工林土壤贫瘠化的一个重要原因^[28].在普遍缺 P 的亚热带地区发展马尾松人工林时,适当的延长轮伐期将有利于提高 P 的利用效率和维持立地的长期生产力^[29].

3.3 马尾松人工林的养分循环特征

在马尾松人工林,17 年生林分的养分年存留量最大,年归还量却相对较低,处于高存留、低归还、最消耗地力的年龄阶段.这与陈永瑞等^[7]研究结果相同,而与项文化和田大伦^[8]研究结果有较大差异,这可能与立地的养分状况和计算方法不同有关.51 年生林分的养分年存留量最低,只有 17 年生时的 1/3 左右,但其 K、Mg 归还量是 17 年生时的 65%, N、P 和 Ca 的归还量与 17 年生时相当,说明 51 年生马尾松人工林对养分的消耗水平降低,通过凋落物的方式将养分归还到林地,加速了养分的循环利用.

各养分的循环系数随林龄的增长先降低后提高,呈凹槽状.7 年生的林分对养分高归还、高吸收,比较有利于养分的再次吸收利用,但净生产力较低;17 和 31 年生的林分虽然净生产力相对较高,但对养分高吸收或低归还,养分消耗较大;而 51 年生的林分对养分低吸收,低归还,养分耗费相对较小,有利于林地土壤养分的积累,且有较高的干物质生产能力和养分利用效率.这与项文化和田大伦^[8]对马尾松人工林养分循环系数呈抛物线形的结论不同.各养分循环系数相对大小总体呈现出 $N > Ca > P > Mg > K$ 趋势,说明 N 是马尾松生长最重要的限制因子.而 K 的循环系数低并不能说明 K 的循环效率比其他几种养分低,因为 K 是易淋溶的元素,较大比重的 K 可以通过降雨淋溶归还到林地^[9].

随着林龄的增长,各养分利用系数呈降低趋势,为 $N > Ca > P > Mg > K$.这可能与 K 的再吸收效率较高有关^[30],而 N 是树木生长的最重要的限制因子.各养分周转时间呈延长的趋势, $K > Mg > P > Ca > N$,说明

随着林龄的增长, 养分在马尾松体内被再吸收利用的程度越高, 养分利用效率越高。

4 结 论

马尾松人工林养分在各器官中的分配与各器官生物量增长速率差异有关, 随着林龄的增长, 树干所占养分比重和根冠比提高; 马尾松人工林养分积累与生物量积累不同步, 树冠构建完成后, 马尾松以少量的养分生产更多的干物质, 养分利用效率提高; 马尾松人工林在 51 年生时的养分循环系数较高, 养分利用系数较低、循环周期最长, 养分利用效率最高; 5 种养分以 K 的利用效率最高, N 的循环效率最高; 马尾松人工林从 7 年生到 51 年生, 其养分归还量均小于吸收量。

应根据输出最少养分获取最大生物量及养分的最高利用效率原则来确定合理的轮伐期。建议在生态脆弱的地带, 马尾松人工林轮伐期延长至 50 年或更长, 同时降低收获强度。如果条件允许, 应在皆伐后新营造林分内施肥, 以补充收获移出林地的养分。

致谢 三门江林场何德良、韦长江参加野外工作; 高洪、于小军等协助部分室内工作; 陈楚莹先生对论文给予耐心指导, 一并致谢。

参考文献

- [1] Zhang X-B (张希彪), Shangguan Z-P (上官周平). Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in hilly loess regions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(2): 373–382 (in Chinese)
- [2] Chen C-Y (陈楚莹), Wang K-P (王开平), Zhang J-W (张家武), *et al.* Nutrient accumulation distribution and cycling in Chinese Fir-Homana mixed forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 1988, **7**(4): 7–13 (in Chinese)
- [3] Wei X, Kimmins JP, Zhou G. Disturbances and the sustainability of long-term site productivity in lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia—An ecosystem modeling approach. *Ecological Modelling*, 2003, **164**: 239–256
- [4] Stupak I, Nordfjell T, Gundersen P. Comparing biomass and nutrient removals of stems and fresh and predried whole trees in thinnings in two Norway spruce experiments. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, **38**: 2660–2673
- [5] Jokela EJ, Dougherty PM, Martin TA. Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: A synthesis of seven long-term experiments. *Forest Ecology and Management*, 2004, **192**: 117–130
- [6] Mo J-M (莫江明), Brown S, Kong G-H (孔国辉), *et al.* Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(5): 635–639 (in Chinese)
- [7] Chen Y-R (陈永瑞), Lin Y-M (林耀明), Li J-Y (李家永), *et al.* Studies on nutrient biological cycling in plantations in Qianyanzhou experimental area. *Jiangxi Science* (江西科学), 2001, **19**(3): 147–152 (in Chinese)
- [8] Xiang W-H (项文化), Tian D-L (田大伦). Nutrient cycling in *Pinus massoniana* stands of different age classes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(1): 89–95 (in Chinese)
- [9] Wen Z-M (温肇穆), Liang L (梁 樑). The productivity and the biocycling of nutrient elements of Masson pine. *Journal of Guangxi Agricultural College* (广西农学院学报), 1991, **10**(1): 49–57 (in Chinese)
- [10] Tian D-L (田大伦). Studies on nutrient elements cycling and density effect of pole stage of *Pinus massoniana* stand. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1989, **25**(2): 100–112 (in Chinese)
- [11] Qi L-H (漆良华), Pang T (庞 统), Chen X-P (陈晓萍), *et al.* A study of the nutrient cycle in aerially seeded *Pinus massoniana* of Hunan Province. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2003, **23**(2): 26–32 (in Chinese)
- [12] Zhang J-W (张家武), Liao L-P (廖利平), Li J-F (李锦芳), *et al.* Litter dynamics of *Pinus massoniana* and *Michelia macclurei* mixed forest and its effect on soil nutrients. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1993, **4**(4): 359–363 (in Chinese)
- [13] Fan H-B (樊后保), Li Y-Y (李燕燕), Sun X (孙新), *et al.* Litter accumulation and nutrient fluxes in *Pinus massoniana* stand and its mixed forests with broad-leaved trees. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2005, **11**(5): 521–527 (in Chinese)
- [14] Tang W-C (唐卫辰). Analysis and development strategies on the resource of Sanmenjiang Forest Farm in Guangxi. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2005, **34**(2): 108–110 (in Chinese)
- [15] Ding G-J (丁贵杰), Wang P-C (王鹏程). Study on change laws of biomass and productivity of Masson pine forest plantation. II. Biomass and productivity of stand at different ages. *Forest Research* (林业科学研究), 2001, **15**(1): 54–60 (in Chinese)
- [16] Fang L (方 磊). Research on biomass model of Mas-

- son pine. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2000 (in Chinese)
- [17] Feng Z-W (冯宗炜), Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), *et al.* The biological productivity on Chinese fir stands at different zone. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学丛刊), 1984, **8**(2): 93–100 (in Chinese)
- [18] Zhang X-D (张旭东), Xue M-H (薛明华), Xu J (许军). Distribution pattern of nutrient elements in Masson pine plantation of Anhui Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1993, **4**(1): 7–11 (in Chinese)
- [19] Kadeba O. Above-ground biomass production and nutrient accumulation in an age sequence of *Pinus caribaea* stands. *Forest Ecology and Management*, 1991, **41**: 237–248
- [20] Das AK, Ramakrishnan PS. Above-ground biomass and nutrient contents in an age series of Khasi pine (*Pinus kesiya*). *Forest Ecology and Management*, 1987, **18**: 61–72
- [21] Singh B. Nutrient content of standing crop and biological cycling in *Pinus patula* ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 1982, **4**: 317–332
- [22] Alifragis DD, Smiris DP, Maris F. The effect of stand age on the accumulation of nutrients in the aboveground components of an Aleppo pine ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 2001, **141**: 259–269
- [23] Ranger J, Marques R, Colin-Belgrand M, *et al.* The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management*, 1995, **72**: 167–183
- [24] Lodhiyal N, Lodhiyal LS. Aspects of nutrient cycling and nutrient use pattern of Bhabar Shisham forests in central Himalaya, India. *Forest Ecology and Management*, 2003, **176**: 237–252
- [25] Peri PL, Gargaglione V, Pastur GM. Dynamics of above- and below-ground biomass and nutrient accumulation in an age sequence of *Nothofagus antarctica* forest of Southern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**: 85–99
- [26] Liang Q-F (梁秋芬), Liu K-C (刘宽灿), Xu B-Y (徐碧玉), *et al.* The roles of calmodulin in plant development. *Life Science Research* (生命科学研究), 2005, **9**(4): 1–5 (in Chinese)
- [27] Chen Z-X (陈兆先), He Y-J (何友军), Bai F-M (柏方敏), *et al.* Effects of stand density on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* air-sowing stands. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2001, **21**(1): 44–47 (in Chinese)
- [28] Xing X-R (邢雪荣), Han X-G (韩兴国), Chen L-Z (陈灵芝). A review on research of plant nutrient use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(5): 785–790 (in Chinese)
- [29] Ma X, Heal KV, Liu A, *et al.* Nutrient cycling and distribution in different-aged plantation of Chinese fir in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2007, **243**: 61–74
- [30] Li R-H (李荣华), Wang S-L (汪思龙), Wang Q-K (王清奎). Nutrient contents and resorption characteristics in needles of different age *Pinus massoniana* (Lamb.) before and after withering. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(7): 1443–1447 (in Chinese)

作者简介 杨会侠,女,1973年生,博士研究生.主要从事人工林经营与生态学研究. E-mail: yhx-s@163.com

责任编辑 李凤琴
