

杉木-观光木混交林群落 N、P 养分循环的研究

杨玉盛^{1,2} 陈光水¹ 谢锦升¹ 何宗明¹ 陈银秀¹ 黄荣珍¹

(1 福建农林大学林学院, 南平 353001) (2 厦门大学生物学博士后流动站, 厦门 361005)

摘要 通过对福建三明 27 年生杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)-观光木 (*Tsoongiodendron odorum*) 混交林 (混交比例 2:1) 及杉木纯林群落 N、P 养分循环进行为期 2 年的研究。结果表明, 混交林中杉木和观光木地上各组分的 N、P 含量大小均为叶 > 活枝 (或皮) > 枯枝 > 干, 而根系的则随径级的减小而增大, 且观光木各组分的 N 含量均高于杉木的; 混交林群落的 N、P 总积累量达 585.223 kg·hm⁻² 和 128.784 kg·hm⁻², 分别是纯林群落的 1.5 倍和 1.3 倍。混交林群落 N、P 养分年归还量达 75.740 kg·hm⁻² 和 5.493 kg·hm⁻², 分别是杉木纯林的 113.0% 和 79.6%。混交林通过凋落物、降水淋溶和细根枯死 3 种途径的 N 归还量分别占群落总归还量的 67.1%、8.4% 和 24.5%, 而纯林的则分别为 69.3%、8.1% 和 22.6%; 混交林 3 种途径的 P 归还量分别占群落总归还量的 64.0%、7.5% 和 28.5%; 而纯林则为 74.8%、5.3% 和 19.9%。混交林中林下植被层的 N、P 归还量分别占群落总归还量的 14.8% 和 37.3%; 而纯林的则为 29.5% 和 59.4%。混交林群落的 N、P 富集率和利用系数均低于纯林的, 而周转期则均大于纯林的。混交林群落的 P 吸收系数小于纯林的, 而循环系数则高于纯林的, 但其两者的 N 吸收系数和循环系数则相似。

关键词 杉木 观光木 混交林 N P 养分循环

NUTRIENT CYCLING OF N AND P BY A MIXED FOREST OF *CUNNINGHAMIA LANCEOLATA* AND *TSOONGIODENDRON ODORUM* IN SUBTROPICAL CHINAYANG Yu-Sheng^{1,2} CHEN Guang-Shui¹ XIE Jin-Sheng¹ HE Zong-Ming¹CHEN Yin-Xiu¹ and HUANG Rong-Zhen¹

(1 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China)

(2 Post-doctoral Station of Biology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract A study on the cycling of N and P in a pure forest of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. and a Chinese fir-*Tsoongiodendron odorum* Chun mixed forest (2 Chinese fir: 1 *T. odorum*) over two years was carried out in Samming, Fujian, China. For both Chinese fir and *Tsoongiodendron odorum*, the concentrations of N and P in aboveground fractions were in the order of leaves > living branches (or stem bark) > dead branches > stem wood, and those in roots increased with an increase in root diameter. N concentrations in various fractions of *T. odorum* were higher than their respective values for Chinese fir. The standing crops of N and P in the mixed stand were up to 585.223 kg·hm⁻² and 128.784 kg·hm⁻², being 1.5 and 1.3 times as much as that in the pure stand, respectively. The annual return of N and P amounted to 75.740 and 5.493 kg·hm⁻² in the mixed forest, respectively, being 113.0% and 79.6% of that in the pure forest. The fractions of annual N return through litterfall, rain leaching and fine root turnover were 67.1%, 8.4% and 24.5% in the mixed forest, respectively, and the corresponding values were 69.3%, 8.1% and 22.6% in the pure forest. These three pathways contributed to 64.0%, 7.5% and 28.5% of total P return in the mixed forest, and 74.8%, 5.3% and 19.9% in the pure forest, respectively. 14.8% of N return and 37.3% of P return in the mixed forest, and 29.5% of N return and 59.4% of P return in the pure forest were derived from the undergrowth vegetation. For both N and P elements, the enrichment ratios and the utilization coefficients were lower, and the recycling periods were higher in mixed forest than in pure stand. For P, the absorption coefficient was lower, and the cycling coefficient was higher, in mixed forest than in pure forest, while there were no significant differences for those of N between the two forests.

Key words *Cunninghamia lanceolata*, *Tsoongiodendron odorum*, Mixed forest, Nitrogen, Phosphorus, Nutrient cycling

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工纯林多代连 栽地力衰退问题已引起人们的极大关注, 而杉阔混

收稿日期: 2001-04-25 接受日期: 2001-11-01

基金项目: 中国博士后科研基金、福建省科委重大基础研究项目 (2000-F-004) 及高等学校骨干教师资助计划项目

E-mail: ffcyys@public.nptt.fj.cn

交林则被认为是维持杉木人工林长期生产力的较好途径之一(盛炜彤, 1992; 俞新妥, 1996; 杨玉盛, 1998)。南方林区针对杉木人工林地力衰退现象, 结合营林生产开展了一系列杉阔混交林试验研究, 目前与杉木混交的主要阔叶树种有火力楠(*Michelia macclurei*)、酸枣(*Choerospondias axillaris*)、檫树(*Sassafras tsumu*)、闽楠(*Phoebe bournei*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes*)、中华杜英(*Elaeocarpus chinensis*)、木荷(*Schima superba*)、乳源木莲(*Manglietia yuyuanensis*)、深山含笑(*Michelia maudiae*)、观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等(俞新妥, 1989; 冯宗炜等, 1985)。目前国内研究者对杉阔混交林的生物量、生产力和土壤肥力研究的较多, 有不少研究者亦对杉木纯林的养分分布和循环进行了研究(潘维侑等, 1983; 陈楚莹等, 1988; 邓仕坚等, 1988; 吴志东等, 1990; 俞新妥, 1992; Li, 1996; 杨玉盛等, 1998; Chen, 1998; 田大伦等, 2001), 但对杉木阔叶树混交林的养分循环研究较少(陈楚莹等, 1988; Lian & Zhang, 1998; 刘凯昌等, 1993; 吴幼媚等, 1993)。

森林生态系统的养分归还由乔木层和林下植被层的凋落物、地下细根枯死和降水淋溶三部分组成。但已报道有关养分循环研究中养分归还一般只包括乔木层的凋落物, 有些还包括了林下植被凋落物归还或降水淋溶, 很少涉及到乔木层和林下植被层的枯死细根归还(潘维侑等, 1983; 冯宗炜等, 1985; 杨玉盛等, 1998; 田大伦等, 2001)。很多研究者表明细根的养分归还可以占森林生态系统养分归还的很大一部分(Vogt *et al.*, 1986; Hendrick & Pregitzer, 1993)。由于缺乏对细根周转及其养分归还的研究, 国内目前有关养分循环的研究大大低估了养分归还量和循环速率。

本课题组通过对 27 年生杉木观光木混交林和杉木纯林包括凋落物、林下植被、细根和降水养分归还在内的养分年归还量、年存留量和年吸收量进行深入研究, 探讨杉木观光木混交林和杉木纯林的养分循环特点, 为揭示杉阔混交林培肥地力机制, 实现杉木林的可持续经营提供理论依据。

1 试验地概况

试验地位于福建三明福建林学院莘口教学林场小湖工区(北纬 $26^{\circ}11'30''$, 东经 $117^{\circ}26'00''$), 属中亚热带季风型气候, 年均气温 19.1°C , 年均降水量 1749 mm, 年均蒸发量 1585.0 mm, 年均相对湿度为

81%, 无霜期 300 d 左右, 土壤是由砂页岩发育的红壤。1973 年用实生苗造林, 初植密度为 $3000 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 混交林为行间混交(杉木与观光木比例为 3:1)。杉木纯林现保留密度为 $1100 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均树高(H)和平均胸径(D)分别为 19.61 m 和 23.6 cm, 郁闭度为 0.80, 林下植被盖度 95%, 灌木层以粗毛榕(*Ficus hirta*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)等为主, 草本层以乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)等为主; 混交林中杉木和观光木现保留密度分别为 $907 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $450 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (混交比例调整为 2:1), 其中杉木 H 和 D 分别为 20.88 m 和 25.1 cm, 观光木 H 和 D 分别为 17.81 m 和 17.0 cm, 郁闭度为 0.95, 林下植被盖度 80%, 灌木层以亮叶冬青(*Ilex viridis*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)等为主, 草本层以狗脊(*Woodwardia japonica*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)为主。

2 研究方法

研究时间为 1999 年 1 月至 2001 年 1 月。分别在杉木观光木混交林和杉木纯林中设置 $20 \text{m} \times 20 \text{m}$ 标准地 3 块, 对标准地内林木进行每木检尺, 根据林分平均树高和胸径, 选取平均木, 混交林每块标准地选择平均木 2 株, 纯林则选择 1 株, 共砍伐平均木 9 株, 进行以下研究: 乔木层地上部分生物量按 Monsi 分层切割法测定, 根系生物量测定则采用全挖法(测定 $> 0.2 \text{cm}$ 根系), 乔木层各器官生物量(不包括 $< 2 \text{mm}$ 细根)净增量采用相对生长法进行推算(冯宗炜等, 1999)。灌木和草本层生物量采用样方收获法测定(不包括 $< 2 \text{mm}$ 细根), 其生物量净生长量的测定采用灌木和草本层的生物量现存量分别除以其平均年龄而得, 本文中灌木叶、草茎叶、草根的平均年龄按 2 年计, 灌木枝、灌木根的平均年龄按 8 年计(冯宗炜等, 1999)。在每个林分的每个标准地内分对角线分别布设 5 个 $0.5 \text{m} \times 1 \text{m}$ 的收集架, 每个月定期收集凋落物以测定年凋落物量。全年测定各林分每个标准地内的穿透雨、树干茎流、林外降雨量, 并取水样供室内分析。

隔月于月底用内径 6.8 cm 的土钻在样地的上、中、下部随机钻取土芯 30 个, 深度为 1 m, 取出土芯并用流动水浸泡、漂洗、过筛, 拣出根系, 分出各目的树种根和其它根(包括下木和草本), 根据根系外形、颜色、弹性来区分活死根。杉木活细根弹性好, 颜色较白, 剥开外皮后可见新鲜的棕色内皮, 而死根较柔软、无弹性, 颜色为灰色或灰黑色, 内皮颜色呈暗棕

色。观光木活根呈白色半透明, 鲜嫩, 圆满, 易折断; 观光木死根较柔软, 伴有一定程度的腐烂, 颜色灰白, 不透明。林下植被活细根一般颜色较浅, 弹性亦较好, 而死根一般颜色较暗, 无弹性等。经对同一份细根样品进行重复分选, 其重复性好。分选出活、死细根后, 进一步细分成 3 个径级(细根直径 1~2 mm、0.5~1 mm、<0.5 mm, 根据选出的直径分别为 2 mm、1 mm、0.5 mm 的细根为标准进行目视分级, 重复性较好), 将全部根置于 80 °C 烘箱中烘干至恒重后称重。细根生物量现存量按以下公式计算: 细根现存量($t \cdot \text{hm}^{-2}$) = 平均每根土芯根干重(g) \times ($t/10^6 \text{g}$) / ($\pi(6.8 \text{ cm}/2)^2 \times (\text{hm}^2/10^8 \text{ cm}^2)$) (McClougherty & Aber, 1982; Vogt *et al.*, 1986)。

在样地附近从表层土(0~20 cm)中随机收集目的树种(细分成 3 个径级)和林下植被的活根与死根的混合样品, 自然风干后称取 5 g 样品装入 18 cm \times 18 cm、孔径为 0.25 mm 的尼龙网袋中, 每袋样品均换算为干重, 埋入近地表 10 cm 处, 放置样地中部, 每个径级共 100 袋, 以后每隔一定时间从各点中随机抽取各径级样品各 6 袋, 用于失重分析。

<2 mm 细根的年归还量、净增量、净生产力根据极差公式计算(McClougherty & Aber, 1982):

$$M = M_{\max} - M_{\min} + D; P = P_{\max} - P_{\min} + M; T = P/Y.$$

式中, M 、 P 、 D 、 T 分别代表细根年死亡量、年生长量、年分解量和周转率; M_{\max} 、 M_{\min} 分别为死细根现存量最大值和最小值; P_{\max} 、 P_{\min} 和 Y 分别表示活细根现存量的最大值、最小值和平均值。

植株分析: 对各标准地的乔木层、灌木层、草本层(地上、地下)各器官、每月凋落物(分别各组成)、每两个月细根(分径阶)分别取混合样, 每个林分共 3 个重复, 测定含水率和 N、P 养分浓度, N: 凯氏定 N 蒸馏法, P: 钼锑抗比色法(林业部科技司, 1991)。

水样分析: 总 N: 凯氏法, P: 硫酸-高氯酸氧化-钼蓝比色法(林业部科技司, 1991), 每个标准地为一个重复。

计算: 群落中各组分养分积累量为群落各组分的生物量与其相应养分浓度的乘积; 某元素的富集率为净初级生产量中元素的平均浓度与群落生物量中的对应元素的平均浓度的比值。某元素周转期为群落中该元素积累量与其年归还量的比值; 某元素吸收系数为群落中该元素年吸收量与表层土壤中该元素贮量的比值, 某元素利用系数为群落中该元素

年吸收量与其现存量的比值, 某元素循环系数为群落中该元素年归还量与其年吸收量的比值(林益明等, 1998)。

3 结果

3.1 混交林及纯林各组分的 N、P 含量

杉木和观光木地上各组分的 N、P 含量大小均为叶 > 活枝(或皮) > 枯枝 > 干(表 1)。杉木和观光木地下部分的 N、P 含量均随径级的减小而增大, 混交林中观光木和杉木 <2 mm 细根 N 平均含量分别是各自 >2 mm 粗根的 4.3 倍和 5.3 倍, 而 P 的平均含量则分别是各自 >2 mm 粗根的 3.2 倍和 1.8 倍(表 1)。从表 1 可见, 观光木各组分的 N 含量均比杉木的高, 其中观光木叶的 N 含量是杉木叶的 2.3~2.5 倍; 而 P 的平均含量则与杉木的相近。混交林和纯林灌木层各组分的 N、P 含量均为叶 > 根 > 枝, 草本层为茎叶 > 根。混交林灌木层和草本层的 N、P 平均含量均小于纯林($p < 0.01$)。

3.2 混交林群落 N、P 的积累量及其分布

混交林群落的 N、P 总积累量达 585.223 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 128.784 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是纯林群落的 1.5 倍和 1.3 倍(表 2); 混交林乔木层 N 和 P 的积累量分别是纯林的 1.7 倍和 1.4 倍。混交林乔木层 N、P 养分积累量占群落的比例亦比纯林的高(混交林 95% 左右, 纯林的 88% 左右)。混交林中杉木 N、P 养分积累量亦分别比纯林杉木的增加 15.1% 和 11.2%。

纯林的灌木层 N、P 积累量分别是混交林的 1.5 倍和 1.6 倍, 其占群落 N、P 养分积累量的比例分别比混交林的高出 3.1% 和 2.2%; 草本层 N、P 积累量则分别是混交林的 1.7 倍和 2.7 倍, 其占群落 N、P 养分积累量的比例分别比混交林的高出 5.3% 和 4.9%(表 2)。

3.3 混交林群落 N、P 养分归还量

杉木观光木混交林群落 N、P 养分年归还量达 75.740 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 5.493 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是杉木纯林的 113.0% 和 79.6%(表 3)。混交林中乔木层和林下植被层的 N 归还量分别占群落总归还量的 85.2% 和 14.8%, P 归还量分别占为 62.7% 和 37.3%; 而纯林中乔木层和林下植被层的 N 归还量分别占群落总归还量的 70.5% 和 29.5%, P 归还量分别占 40.6% 和 59.4%。混交林群落中通过凋落物、降水淋溶和细根枯死的 N 归还量分别占群落总归还量的 67.1%、8.4% 和 24.5%, P 归还量分别占 64.0%、

表 1 混交林及纯林群落 N、P 养分含量

Table 1 Concentrations of N and P in different parts of the mixed and pure forest ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

层次 Layer	器官 Organ	混交林 Mixed forest				纯林 Pure forest	
		观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>		杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>		杉木 <i>C. lanceolata</i>	
		N	P	N	P	N	P
乔木层 Tree layer	叶 Leaf	21.940±1.229	2.671±0.163	9.348±0.748	2.769±0.169	8.694±0.487	2.431±0.148
	活枝 Living branch	5.083±0.285	0.837±0.051	2.960±0.237	1.442±0.088	2.141±0.120	1.193±0.073
	枯枝 Senesced branch	2.711±0.152	0.244±0.015	1.740±0.139	0.174±0.011	1.652±0.093	0.181±0.011
	干 Stem wood	1.543±0.086	0.202±0.012	1.184±0.095	0.208±0.013	1.014±0.057	0.159±0.010
	皮 Stem bark	4.081±0.229	0.913±0.056	2.760±0.221	1.680±0.102	2.494±0.140	1.670±0.102
地下部分 Belowground	根桩 Root stock	2.715±0.152	0.345±0.021	1.125±0.090	0.232±0.014	1.190±0.067	0.221±0.013
	> 20 mm	2.932±0.164	0.368±0.022	1.393±0.111	0.297±0.018	1.535±0.086	0.276±0.017
	10~20 mm	3.804±0.213	0.376±0.023	3.231±0.258	0.469±0.029	2.568±0.144	0.311±0.019
	4~10 mm	4.973±0.278	0.478±0.029	3.650±0.292	0.609±0.037	3.377±0.189	0.485±0.030
	2~4 mm	6.630±0.371	0.806±0.049	5.281±0.422	0.677±0.041	3.148±0.176	0.510±0.031
	1~2 mm	7.571±0.424	0.823±0.050	5.664±0.453	0.327±0.020	5.642±0.316	0.328±0.020
	0.5~1 mm	10.738±0.601	0.932±0.057	6.770±0.542	0.403±0.025	6.767±0.379	0.403±0.025
< 0.5 mm	15.119±0.847	1.301±0.079	9.161±0.733	0.545±0.033	9.019±0.505	0.539±0.033	
灌木层 Shrub layer	叶 Leaf	9.848±0.551	1.675±0.102			13.570±0.760	2.592±0.158
	枝 Branch	2.764±0.155	0.583±0.036			2.075±0.116	0.980±0.060
	根 Root	3.870±0.217	0.862±0.053			5.484±0.307	1.100±0.067
草本层 Herb layer	茎叶 Stem and leaf	10.720±0.600	2.111±0.129			14.670±0.822	3.300±0.201
	根 Root	9.766±0.547	1.412±0.086			7.039±0.394	1.709±0.104

表中数据为: 平均值±标准差 Data are mean±SE (n=3)

表 2 混交林与纯林群落 N、P 养分积累量与分布

Table 2 Accumulation and distribution of N and P elements in the mixed and pure forest

层次 Layer	混交林 Mixed forest						纯林 Pure forest		
	观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>			杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>			杉木 <i>C. lanceolata</i>		
	生物量 Biomass ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	P ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	P ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	P ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
乔木层 Tree layer	53.096	162.603	22.874	198.300	361.292	96.395	195.485	313.972	86.651
	±2.389	±7.317	±1.029	±8.130	±14.813	±4.952	±11.729	±18.838	±5.199
小计 Subtotal	251.396	523.895	119.269				195.485	313.972	86.651
	±10.307	±21.480 (94.9)	±4.890 (96.0)				±11.729	±18.838 (86.5)	±5.199 (88.9)
灌木层 Shrub layer	2.083	13.414	2.458				2.37	19.83	4.054
	±0.521	±3.354 (2.4)	±0.615 (2.0)				±0.427	±3.569 (5.5)	±0.730 (4.2)
草本层 Herb layer	1.427	14.55	2.464				2.75	29.072	6.725
	±0.086	±0.873 (2.7)	±0.148 (2.0)				±0.248	±2.616 (8.0)	±0.605 (6.9)
群落 Community	254.906	551.859	124.191				200.605	362.874	97.43
	±12.942	±29.667 (100)	±6.177 (100)				±13.462	±25.013 (100)	±6.938 (100)

表中数据为: 平均值±标准差; 括号内为各层次养分积累量占群落的百分比 Data are mean±SE (n=3); Figures in parentheses are percentages

7.5%和28.5%;而纯林中3者的N归还量分别占群落总归还量的69.3%、8.1%和22.6%,P归还量则为74.8%、5.3%和19.9%。

3.4 混交林群落 N、P 养分循环特点

从表4可见,混交林N、P的年存留量分别为32.461 kg°hm⁻²和3.835 kg°hm⁻²,分别是纯林的105.8%和69.0%;而N、P养分年吸收量分别为108.201 kg°hm⁻²和9.328 kg°hm⁻²,分别是纯林的110.9%和74.9%。混交林群落生物量中N、P的平

均浓度为2.168 g°kg⁻¹和0.485 g°kg⁻¹,而纯林的则为1.811 g°kg⁻¹和0.485 g°kg⁻¹;混交林净初级生产中元素的平均浓度(g°kg⁻¹)N为5.658,P为0.495;纯林则N为5.469,P为0.718。混交林表层(0~20 cm)土壤N、P贮量为1935.2 kg°hm⁻²和410.0 kg°hm⁻²,而纯林则分别为1751.0 kg°hm⁻²和323.0 kg°hm⁻²。根据上述数据计算所得N和P养分循环的各指标见表4。

表3 混交林与纯林群落 N、P 的年归还量

Table 3 Annual return of N and P through various pathways in the mixed and pure forest (kg°hm⁻²°a⁻¹)

层次 Layer	途径 Pathway	混交林 Mixed forest						纯林 Pure forest	
		观光木		杉木		小计 Subtotal		杉木 <i>C. lanceolata</i>	
		<i>Tsoongiodendron odorum</i>		<i>Cunninghamia lanceolata</i>		N	P	N	P
乔木层 Tree layer	凋落物	13.920	0.573	28.582	1.433	42.502	2.006	30.185	1.760
	Litterfall	±1.879	±0.077	±3.859	±0.193	±5.107	±0.241	±3.627	±0.211
	枯死细根	4.17	0.353	11.529	0.675	15.699	1.028	11.503	0.678
	Senesced root	±0.619	±0.052	±1.712	±0.100	±1.771	±0.116	±1.298	±0.077
	降水淋溶					6.342	0.411	5.421	0.365
	Leaching					±0.942	±0.061	±0.805	±0.054
	小计					64.543	3.445	47.109	2.803
	Subtotal					±8.993	±0.422	±6.597	±0.339
林下植被 Undergrowth	凋落物					8.337	1.511	16.130	3.398
	Litterfall					±1.096	±0.199	±2.120	±0.447
	枯死细根					2.860	0.537	3.612	0.697
	Senesced root					±0.390	±0.073	±0.493	±0.095
	小计					11.197	2.048	19.742	4.095
	Subtotal					±1.388	±0.254	±2.448	±0.508
群落 Community	合计 Total					75.740	5.493	66.851	6.898
						±10.225	±0.742	±9.025	±0.931

表中数据为:平均值±标准差 Data are mean±SE (n=3)

表4 混交林和纯林群落 N、P 元素循环特性

Table 4 Cycling characteristics of N and P elements in the mixed and pure forest

群落 Community	养分 Element	存留量 Retention (kg°hm ⁻² °a ⁻¹)	归还量 Return (kg°hm ⁻² °a ⁻¹)	吸收量 Uptake (kg°hm ⁻² °a ⁻¹)	富集率 Enrichment ratio	周转期 Recycle period (a)	吸收系数 Absorption coefficient (%)	利用系数 Utilization coefficient (%)	循环系数 Cycling coefficient (%)
混交林 Mixed forest	N	32.461 ±5.480	75.740 ±10.225	108.201 ±16.489	2.61 ±0.32	7.3 ±1.1	5.59 ±0.45	19.61 ±2.32	70.00 ±1.093
	P	3.835 ±0.449	5.493 ±0.742	9.328 ±1.212	1.02 ±0.19	22.6 ±2.3	2.28 ±0.18	7.51 ±1.01	58.89 ±0.692
纯林 Pure forest	N	30.694 ±3.684	66.851 ±9.025	97.545 ±14.396	3.02 ±0.28	5.4 ±0.8	5.57 ±0.52	26.88 ±2.15	68.53 ±0.854
	P	5.559 ±0.615	6.898 ±0.931	12.457 ±1.459	1.48 ±0.15	14.1 ±2.0	3.86 ±0.25	12.79 ±1.87	55.37 ±1.916

表中数据为:平均值±标准差 Data are mean±SE (n=3)

混交林群落的 N、P 富集率均低于纯林的 ($p < 0.01$); 而其周转期则均大于纯林 ($p < 0.01$)。混交林群落的 P 吸收系数小于纯林 ($p < 0.01$), 但其两者的 N 吸收系数则相似 ($p > 0.01$)。混交林 N、P 的利用系数均显著地低于纯林 ($p < 0.01$)。混交林 P 循环系数高于纯林, 但 N 循环系数则两者无显著差别 ($p > 0.01$)。

4 讨论

4.1 养分归还量

据报道, 杉木林凋落物营养元素归还量为 $56 \sim 128.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (潘维俦等, 1983; 冯宗炜等, 1985; 俞新妥, 1992; 杨玉盛等, 1998), 而季雨林、雨林和常绿阔叶林等的凋落物营养元素年归还量则为 $184.6 \sim 412 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (卢俊培等, 1988; 吴志东等, 1990; 翁轰等, 1993), 说明常绿阔叶林的养分归还量比杉木林的大。对杉木天然混交林的研究进一步表明, 杉木及其伴生树种单株养分归还量大小为: 丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*) > 苦槠 (*C. sclerophylla*) > 甜槠 (*C. eyrei*) > 木荷 > 米槠 (*C. carlesii*) > 杉木¹⁾。而本课题组的研究则表明, 虽然混交林中观光木凋落物的 N、P 养分含量 (N: $12.818 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P: $0.528 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高于杉木 (N: $6.389 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P: $0.343 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但观光木的单株凋落物 N、P 养分归还量 (30.9 g 和 1.3 g) 却比杉木的 (31.5 g 和 1.6 g) 小。这与杉木观光木混交林中观光木生长受到一定程度的抑制, 树冠较小, 凋落物量较低有关。

由于细根的养分浓度高、寿命短、周转速率快, 因而每年通过细根枯死向土壤归还的养分数量较大。Vogt 等 (1986) 综合世界上众多研究者在不同森林生态系统中研究报道后, 认为通过细根死亡而向土壤输入 N 比地上凋落物输入的大 $18\% \sim 58\%$; Hendrick 等 (1993) 对糖槭 (*Acer saccharum*) 林的研究表明细根周转每年归还的 N 量占总归还量的 $48\% \sim 58\%$; 李凌浩等 (1998) 研究表明通过细根死亡归还的 N 量占群落 N 归还量的 49.5% , 比地上凋落物的多 3.1% ; 而 P 归还量占群落 P 归还总量的 42.3% , 略低于凋落物。在本研究中, 虽然混交林和纯林细根的生物量仅分别占各自群落总生物量的 2.1% 和 2.3% , 但其每年的 N 和 P 养分归还量占群落总归还量的比例混交林为 24.5% 和 28.5% , 纯林为 22.6% 和 19.9% , 可见, 细根枯死的养分归还占有较

大的比重而不能忽略。

几乎所有的养分均可从树冠和树干上被降雨淋溶。已报道的降雨淋溶量大小差异很大, 如 N 为 $0 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, P 为痕量 $\sim 8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Kimmins, 1987)。降雨淋溶的养分归还量大小取决于森林的树种组成和结构。本研究中混交林养分淋溶量均略高于纯林的 ($p < 0.01$), 这与混交林林分郁闭度和冠层厚度较大有关。虽然淋溶量大小还与树木的养分状况有关, 但一般淋溶量大小为 $N > P$ (Kimmins, 1987), 这与本文的研究结果相似。本研究中 N、P 的年淋溶量与田大伦等 (2001) ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$: $6.502 \text{ N}, 0.487 \text{ P}$) 和 Li (1996) ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$: $5.23 \text{ N}, 0.36 \text{ P}$) 的研究相近, 但年淋溶量占群落养分总归还量的比重却差异较大。本研究中养分淋溶量占群落总归还量仅为 $5.3\% \sim 8.4\%$, 而后两者的研究则表明降雨淋溶是年养分归还量的主要部分, 与他们所研究的杉木林均为幼林、凋落物量少有关。

由于本研究中群落的养分归还量包括了凋落物、细根枯死和降雨淋溶, 因而使得本研究中混交林和纯林群落的 N、P 养分归还量大大高于 29 年生杉木林 (N: $21.999 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 P: $1.315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) (杨玉盛等, 1998), 亦高于其它的杉木纯林和混交林 (潘维俦等, 1983; 冯宗炜等, 1985; 陈楚莹等, 1988; 俞新妥, 1992; Li, 1996; Lian & Zhang, 1998)。如本研究中养分归还量仅考虑凋落物, 则混交林的 N 和 P 归还量将分别有 32.9% 和 36.0% 被忽略, 而纯林则有 30.7% 和 25.2% 被忽略。

目前关于森林生态系统养分生物循环的研究大多仅限于乔木层, 而较少涉及到林下植被层, 专门研究林下植被的养分循环亦很少 (杨玉盛等, 1999)。Kimmins (1987) 报道林下植被层的生物量变化范围为 $0 \sim 15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 虽然它仅占生态系统生物量的很小一部分, 但它对生态系统养分循环和生产力的贡献却很大。它通常具有比乔木层更高的养分浓度、更快的生物量周转速率和养分循环速率。一个对亚高山林的研究表明, 虽然林下植被凋落物仅占地上总凋落物量的 $3\% \sim 11\%$, 但它的 N 和 P 养分归还量却分别占总养分归还量的 $16\% \sim 38\%$ 和 $14\% \sim 35\%$ (Kimmins, 1987)。本研究表明, 混交林和纯林林下植被生物量虽仅占群落总生物量的 1.38% 和 2.55% , 但其年 N 和 P 归还量占群落总归还量混交林为 14.8% 和 37.3% , 纯林为 29.5% 和 59.4% (表

1) 许新建, 1992. 武夷山天然杉木混交林主要伴生树种凋落物养分积累和归还研究. 福建林学院硕士研究生毕业论文.
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4), 表明在近成熟林中, 林下植被在群落养分循环中占有重要位置。混交林林下植被的养分归还量低于纯林的(表 3), 这与纯林乔木层盖度低, 林下植被生物量大及其养分含量(表 1)较高有关。本研究中, 林下植被在群落 P 归还中所占比例比 N 更大, 这与陈楚莹等(1988)的研究结果一致, 说明林下植被在 P 的吸收和归还中具有重要作用。

4.2 养分循环特点

混交林与纯林群落的 N、P 富集率均大于 1, 说明纯林和混交林群落仍在不断的吸收和富集 N、P, 表明两个群落仍正处在继续生长发展阶段(林鹏等, 1990)。与甜槠群落(N: 1.54, P: 1.71)和海莲(*Bruguiera sexangula*)红树林群落(N: 1.83, P: 2.03)的相比, 混交林和纯林群落 N 富集率均较高, 而 P 的富集率则较低(林鹏等, 1990; 林益明等, 1998)。

混交林群落 N、P 的周转期均大于纯林群落(表 4), 说明混交林群落 N、P 元素的周转较纯林慢, 这与纯林林下植被数量所占比例高且林下植被的周转速率比乔木层快有关。混交林及纯林群落 N 的周转速率均快于 P, 这可能与土壤中 P 含量较低和植物对 P 的利用策略有关。混交林群落 N 的周转期比甜槠群落(N: 43 a, P: 40 a)和海莲红树林群落(N: 13 a, P: 12 a)短, 而 P 的周转期则介于前两者之间(林鹏等, 1990; 林益明等, 1998)。

据报道不同年龄杉木林循环系数为 11%~49% (潘维侑等, 1983; 冯宗炜等, 1985; 俞新妥, 1992; 杨玉盛等, 1998), 由于已报道的研究中养分归还量均未计入细根的养分归还量, 使得该数值偏低。而本研究中营养元素归还量包括了凋落物、细根和降水淋溶的养分归还, 计算得杉木纯林和混交林的 N、P 的循环系数均比以往所报道的同类林分的结果大; 除甜槠群落(N: 52%, P: 54%)外, 仍比大多数阔叶林的养分循环系数(70%~86%)低(卢俊培等, 1988; 吴志东等, 1990; 翁轰等, 1993; 林益明等, 1998)。说明杉木林养分循环失衡是客观存在的。杉木吸收量大, 归还量小, 固定和带走的养分多, 是导致地力下降的主要原因之一。本研究亦表明, 杉木观光木混交林的 N、P 的循环系数均比杉木纯林的高, 这与陈楚莹等(1988)、Lian 和 Zhang(1998)的研究结果一致。说明营造杉阔混交林有利于提高生态系统养分的循环速率, 这对促进林地土壤肥力的提高和林木的生长有重要的意义。

由于循环系数和周转期所涉及的时间尺度不同, 因而要分析群落中元素周转快慢情况, 这两个指

标应结合起来分析。从以上分析可看出, 混交林群落 N、P 的周转期比纯林的长, 表明混交林群落在过去的生长中吸收的多, 而归还的少, 因而 N、P 的周转速率较慢, 但随着年龄的加大, 混交林的循环系数不断增大, 一年中的养分周转速率增大, 至 27 年生时 N 的循环系数已接近纯林, 而 P 的循环系数则高于纯林。表明混交林早期对地力的消耗亦较大, 此后由于养分归还量逐渐增大, 从而有利于土壤肥力的恢复。

参 考 文 献

- Chen, H. J. 1998. Biomass and nutrient distribution in a Chinese fir plantation chronosequence in Southwest Hunan, China. *Forest Ecology and Management*, **105**: 209~216.
- Chen, C. Y. (陈楚莹), K. P. Wang (王开平), J. W. Zhang (张家武) & S. J. Deng (邓仕坚). 1988. Nutrient accumulation, distribution and cycling in Chinese fir-Homana mixed forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, **7**(4): 7~13. (in Chinese)
- Deng, S. J. (邓仕坚), C. Y. Chen (陈楚莹), J. W. Zhang (张家武) & K. P. Wang (王开平). 1988. Study on production and nutrition distribution in old-growth Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, **7**(1): 13~18. (in Chinese)
- Feng, Z. W. (冯宗炜), C. Y. Chen (陈楚莹), K. P. Wang (王开平) & J. W. Zhang (张家武). 1985. Studies on the accumulation, distribution and cycling of nutrient elements in the ecosystem of the pure stand of subtropical *Cunninghamia lanceolata* forests. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica (植物生态学与地植物学丛刊)*, **9**: 245~257. (in Chinese)
- Feng, Z. W. (冯宗炜), X. K. Wang (王效科) & G. Wu (吴刚). 1999. Biomass and productivity in forest ecosystem of China. Beijing: Science Press. 41~45. (in Chinese)
- Hendrick, R. L. & K. S. Pregitzer. 1993. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, **23**: 2507~2520.
- Kimmins, J. P. 1987. *Forest ecology*. New York: Macmillan Publishing Company. 68~93.
- Li, L. H. (李凌浩), P. Lin (林鹏) & X. R. Xing (邢雪荣). 1998. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **9**: 337~340. (in Chinese)
- Li, X. 1996. Nutrient cycling in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand on a poor site in Yishan, Guangxi. *Forest Ecology and Management*, **89**: 115~123.
- Lian, Y. W. & Q. S. Zhang. 1998. Conversion of a natural broad-leaved evergreen forest into pure and mixed plantation forests in a subtropical area: effects on nutrient cycling. *Canadian Journal of Forest Research*, **28**: 1518~1529.
- Lin, P. (林鹏) & X. H. Wu (吴新华). 1990. Accumulation and biological cycle of N and P elements in the *Bruguiera sexangula* mangrove forest in Hainan, China. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition) (厦门大学学报(自然科学版))*, **24**: 464~467. (in Chinese)
- Lin, Y. M. (林益明), Z. J. Li (李振基), Z. W. Yang (杨志伟), P. Lin (林鹏), J. Y. He (何建源) & C. D. Liu (刘初钊). 1998. Accumulation and biological cycle of nitrogen and phosphorus elements in *Castanopsis eyrei* community in Wuyi Mountains. In: Lin, P. (林鹏) ed. *Wuyishan research series: forest ecosystems (I)*. Xiamen: Xiamen University Press. 7~12.

- (in Chinese)
- Liu, K. C. (刘凯昌) & T. X. Zeng (曾天勋). 1993. Nutrient transfer and cycling in a young Chinese fir *Michelia macclurei* forest. In: Wang H. Z. (王宏志) ed. Mixed forest in southern China. Beijing: China Forestry Publishing House. 176~181. (in Chinese)
- Lu, J. P. (卢俊培) & Q. H. Liu (刘其汉). 1988. Preliminary studies on litter of tropic rain forest in Jianfeng Mountain, Hainan. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica (植物生态学与地植物学学报), 12: 104~111. (in Chinese)
- McLaugherty, C. A. & J. D. Aber. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. Ecology, 63: 1481~1490.
- Pan, W. C. (潘维侑), D. L. Tian (田大伦) & L. C. Li (李利村). 1983. Studies on nutrient cycling in Chinese fir plantations. Journal of Central South Forestry College (中南林学院学报), 3(1): 1~17. (in Chinese)
- Science and Technology Department of the Ministry of Forestry (林业部科技司). 1991. The collective of forestry criteria (III). Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)
- Sheng, W. T. (盛炜彤). 1992. Research on soil degradation in Chinese fir plantations. Beijing: Chinese Science and Technology Press. 5~21. (in Chinese)
- Tian, D. L. (田大伦), W. H. Xiang (项文化) & W. X. Kang (康文星). 2001. Hydrologic process and nutrient dynamics of young second-rotation Chinese fir plantation. Scientia Silvae Sinicae (林业科学), 37(3): 64~71. (in Chinese)
- Vogt, K. A., D. J. Vogt & J. Bloomfield. 1986. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. Advance in Ecological Research, 15: 303~377.
- Weng, H. (翁轰), Z. A. Li (李志安), M. Z. Tu (屠梦照) & W. H. Yao (姚文华). 1993. Study on amount and nutrient concentrations of litterfall in evergreen broad-leaved forest of the Dinghu Mountain. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica (植物生态学与地植物学学报), 17: 299~304. (in Chinese)
- Wu, Y. M. (吴幼媚) & G. H. Peng (彭桂华). 1993. Biocycle characteristics and benefit of mixed forest of Chinese fir and *Erythrophloeum fordii*. In: Wang H. Z. (王宏志) ed. Mixed forest in southern China. Beijing: China Forestry Publishing House. 170~175. (in Chinese)
- Wu, Z. D. (吴志东), F. Q. Peng (彭福泉), Y. P. Che (车玉萍), R. L. Yin (尹瑞龄), X. X. Gu (顾希贤) & Y. M. Wu (吴幼媚). 1990. Characteristics in nutrient biological cycle and their effects on soil in some plantations in south sub-tropic. Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 27: 251~259. (in Chinese)
- Yang, Y. S. (杨玉盛), R. H. Qiu (邱仁辉), X. T. Yu (俞新妥) & G. S. Chen (陈光水). 1999. Nutrient elements biological cycle of undergrowth under different rotations of continuously planting Chinese fir. Journal of Northeast Forestry University (东北林业大学学报), 27(3): 26~30. (in Chinese)
- Yang, Y. S. (杨玉盛), R. H. Qiu (邱仁辉), Z. M. He (何宗明), X. T. Yu (俞新妥) & B. L. Huang (黄宝龙). 1998. Studies on the stand net productivity and biological cycle of nutrient elements in the 29-year-old plantations of Chinese fir on different rotations. Scientia Silvae Sinicae (林业科学), 34(6): 3~11. (in Chinese)
- Yang, Y. S. (杨玉盛). 1998. Studies on the sustainable management of Chinese fir plantations. Beijing: China Forestry Publishing House. 7~58. (in Chinese)
- Yu, X. T. (俞新妥). 1989. Principle and technology on planting mixed forests. Beijing: China Forestry Publishing House. 69~100. (in Chinese)
- Yu, X. T. (俞新妥). 1992. A summary of the studies on the plantation productivity and nutrient cycling in Chinese fir plantation ecosystem. Journal of Fujian College of Forestry (福建林学院学报), 12: 264~276. (in Chinese)
- Yu, X. T. (俞新妥). 1996. Silviculture of Chinese fir. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press. 1~32. (in Chinese)

责任编辑: 黄建辉 责任编辑: 张丽赫