

格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力

杨玉盛^{1,2}, 陈光水², 林 鹏¹, 黄荣珍², 陈银秀², 何宗明²

(1. 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005; 2. 福建农林大学林学院, 南平 353001)

摘要:通过对福建三明格氏栲天然林及在其采伐迹地上营造的 33 年生格氏栲人工林和杉木人工林细根分布、季节动态与净生产力进行的为期 3a(1999~2001)的研究,结果表明,格氏栲天然林、格氏栲和杉木人工林活细根生物量分别为 4.944 t/hm²、3.198 t/hm² 和 1.485 t/hm²,死细根生物量分别为 3.563 t/hm²、2.749 t/hm² 和 1.287 t/hm²;死细根生物量占总细根生物量的比例分别为 41.9%、46.2%和 46.4%;<0.5 mm 细根生物量占总细根生物量的比例分别为 31.2%、29.4%和 69.9%。3 种林分活细根生物量和死细根生物量季节间差异显著($P<0.05$),但年份间差异则不显著($P>0.05$);活细根生物量最大值均出现在 3 月份,最小值一般出现在 5~7 月份或 11~翌年 1 月份间。0~10 cm 表土层格氏栲天然林活细根生物量高达 295.65 g/m²,分别是格氏栲人工林和杉木人工林的 2.4 倍和 8.1 倍;该层格氏栲天然林活细根生物量占全部活细根生物量的 59.8%,均高于格氏栲人工林(39.07%)和杉木人工林(24.51%)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林细根分解 1a 后的干重损失率分别为 68.34%~80.13%、63.51%~77.95%和 47.69%~60.78%;年均分解量分别为 8.747、5.143 和 2.503 t/hm²;死亡量分别为 8.632、5.148 和 2.492 t/hm²;年均净生产量分别为 8.797、5.425 和 2.513 t/hm²,年周转速率分别为 1.78、1.7 和 1.69 次/a。

关键词:细根;垂直分布;动态;生产力;周转;天然林;人工林

Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China

YANG Yu-Sheng^{1,2}, CHEN Guang-Shui², LIN Peng¹, HUANG Rong-Zhen², CHEN Yin-Xiu², HE Zong-Ming² (1. Department of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1719~1730.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30170770);福建省自然科学基金资助项目(B0110025);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目福建省基础研究重大资助项目(2000-F-004)

收稿日期:2002-12-14;**修订日期:**2003-04-23

作者简介:杨玉盛(1964~),男,福建仙游人,博士,教授,主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 循环研究。E-mail: ffcyys@public.npqtt.fj.cn

致谢:福建农林大学蔡丽平、林瑞余、谢锦升、陈爱玲、陈清山、邹双全、李春林、硕士研究生郭剑芬、刘艳丽、岳永杰、于占源、江淼华、卢豪良等,及莘口教学林场郑燕明、刘春华、王巧珍、陈辉等参加了项目研究

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (30170770), Natural Science Foundation of Fujian (B0110025), Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT), and Basic Research Program of Fujian (2000-F-004)

Received date:2002-12-14;**Accepted date:**2003-04-23

Biography: YANG Yu-Sheng, Ph. D., Professor, Major in research of C and N cycling in subtropical broad-leaved evergreen forests.

Abstract: In the last decades, large-scale native forests have been converted to fast-growing and high yield commercial forest plantations to meet the demands for timber, fuel material, and other forest products. Some silvicultural measures, such as planting pure stands, clear cutting and slash burning, have been widely applied during this conversion. Yield decline and land deterioration in such disturbed ecosystem has become serious. In this context, the ecological comparisons between native forests and monoculture plantations are necessary in providing the implications for sustainable management. Few studies on fine roots dynamics have been conducted within these ecosystems though the importance of fine roots in carbon and nutrient cycling has been increasingly emphasized due to their rapid turnover rates.

Two 33 year old plantations, Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*, CF) and *Castanopsis kawakamii* (CK), were chosen to examine fine root (<2mm in diameter) distribution, seasonal pattern and net production in a 3 year study period. Results from these two plantations were compared with those of an adjacent natural forest of *Castanopsis kawakamii* (NF, ~150 year old) in Sanming, Fujian, China. Only the fine roots of overstory trees were considered in this study. Root biomass and necromass were determined by sequential soil coring at a bimonthly interval. Soil cores were divided into 10 depths; 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~70, 70~80, 80~90 and 90~100 cm. Litter bags (18 cm × 18 cm in size, 0.25 mm in mesh) were used to determine the decay rates of fine roots <0.5mm, 0.5~1mm, and 1~2mm in diameter, respectively. Annual net production, mortality, decomposition and turnover rate of fine roots were calculated by the compartment-flow method.

During the 1999~2001, the mean annual fine root biomass ranged from 1.485 t/hm² in the CF to 4.944 t/hm² in the NF, and the mean annual fine root necromass from 1.287 t/hm² in the CF to 3.563 t/hm² in the NF. The contribution of <0.5 mm roots to total fine root biomass ranged from 31.2% in the NF to 69.9% in the CF. Significant seasonal changes were found between these forests ($P < 0.05$), while no yearly variations were detected significantly ($P > 0.05$). An early spring flush of root biomass (March) was found in these three forests, and the minimum value mainly occurred during May-July or November-January. For the NF, 59.8% of root biomass was found in the top soil of 0~10 cm, a layer that maximum depth distribution difference among these forests occurred, where root biomass of the NF was 2.37 times and 8.12 times as much as that of the CK and the CF, respectively. Percentages of original mass lost during the first year of decomposition ranged from 43.79%~56.31% for the FH to 68.34%~80.13% for the NF. Mean annual root decomposition, mortality and production ranged from 8.47 t/(hm² · a), 8.632 t/(hm² · a) and 9.5 t/(hm² · a) in the NF to 2.503 t/(hm² · a), 2.492 t/(hm² · a) and 2.513 t/(hm² · a) in the CF. The mean root turnover rate ranged from 1.78 times/a in the NF to 1.69 times/a in the CF.

Key words: fine roots; seasonal pattern; vertical distribution; production; turnover; natural forest; monoculture plantations.

文章编号:1000-0933(2003)09-1719-12 中图分类号:Q948,S718.55 文献标识码:A

我国中亚热带地区山高坡陡,土壤抗蚀性能差,加上降雨量大且集中,天然林经皆伐、炼山和整地后改为人工林,群落结构简单与树种单一且由于幼林郁闭前水土肥流失较为严重,人工林长期生产力维持日益引起人们关注^[1]。位于福建三明莘口的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)保护区内格氏栲天然林是目前世界上独一无二的、树龄(约 150a 以上)和面积(700 hm²)较大,保存较为完整的中亚热带天然常绿阔叶林^[2,3]。20 世纪 60 年代,部分的格氏栲天然林曾被皆伐后营造诸如杉木、福建柏、格氏栲、木荚红豆树等人工纯林,这些人工林与现存格氏栲天然林毗邻、本底条件(母岩、土层厚度、土壤层次)相似,从而为天然林和不同人工林的生态学比较提供良好的试验地条件,一些研究者曾报道格氏栲天然林群落结构、植物种组成和多样

性、土壤肥力、水源涵养功能等^[3~5]。本项目组在前人研究基础上,自 1999 年始对其凋落物和细根数量、组成及动态、C 循环(土壤呼吸及可溶性有机 C)和 N 循环进行定位研究。

林木细根具有巨大的吸收表面积,是林木吸收水分和养分的主要器官,同时因其生长和周转迅速,对森林生态系统物质循环和能量流动起着十分重要的作用^[6~11]。研究显示虽然细根占林木根系总生物量中的比例不足 30%,但其年净生产力却占森林总净生产力的 30%~80%;每年通过枯死细根向土壤归还碳、养分和能量甚至超过地上部分凋落物^[6~8]。20 世纪 70 年代初以来,关于林木细根生长、死亡、寿命、生物量、生产力、周转量、分布、季节动态及细根对森林生态系统 C 和养分循环的贡献等研究迅速增加,并逐渐成为国际性研究热点之一^[6~9]。90 年代初,微根管(Minirhizotron)技术开始在林木细根研究中得到广泛应用,推动细根研究进一步深入^[12~14]。最近,大量的研究者通过模拟大气 CO₂ 浓度、O₃ 浓度、气温升高及酸沉降等,探讨细根对全球变化的响应^[15~17]。

国内早期采用全挖法研究根系生物量(粗根和细根),后应用全挖法(粗根)配合土柱法(细根)^[18,19];随后出现介绍国外林木细根研究进展的一些报道^[20~22],并有部分研究者采用土芯法(Soil core)和内生长土芯法(Ingrowth core)等研究细根的生物量、生产力、分布、分解和细根的养分归还、能量动态等^[23~29]。本文从细根生物量、分布、季节动态及生产力角度,比较格氏栲天然林和人工林生态学差异。

1 试验地概况

试验地位于福建三明市莘口教学林场小湖工区(26°11'30"N, 117°26'00"E),东南面和西北面分别与戴云山脉和武夷山脉相连;属中亚热带季风气候,年均气温 19.1℃,年均降水量 1749mm(主要集中于 3~8 月份)(图 1),年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%,全年无雾期为 300d;土壤为沙质页岩发育的红壤,土层厚度超过 1m。

1966 年,部分格氏栲天然林经皆伐、炼山,并于 1967 年经穴状整地后用 1 年生格氏栲和杉木实生苗造林,造林密度均为 3000 株/hm²。1999 年,分别在 3 种林分中坡位置各建立 5 个 20m×20m 的标准地,概况如下:

格氏栲天然林坡向东北,坡度 31°。植物种类丰富,群落结构复杂^[2,3]。乔木层可按高度明显分为 3 个亚层(>18 m, 12~18 m 和 6~12 m),主要有格氏栲、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*),石栎(*Lithocarpus glaber*),山矾(*Symplocos caudate*),刨花楠(*Machilus pauhoi*),山黄皮(*Randia cochinchinensis*),以格氏栲占优势(相对显著度 85%)。灌木层按高度可分为两层(<6m 和 <2m),以百两金(*Ardisia crispa*),卡氏乌饭(*Vaccinium carlesii*),狗骨柴(*Tricalysia dubia*)和毛冬青(*Ilex pubescens*)为主,盖度 45%。草本层为零星分布,以砂仁(*Amomum villosum*),狗脊(*Woodwardia japonica*),芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。

格氏栲人工林为东北坡向,坡度 30°林冠单层,林下植被种类简单、数量少,灌木层以杜茎山(*Maesa japonica*),百两金(*Ardisia crispa*),玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)和鸡血藤(*Millettia reticulata*)为主。草本层以狗脊(*Woodwardia japonica*)和芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。

杉木林为东北坡向,坡度 35°,林冠单层,灌木层以粗叶榕(*Ficus hirta*),悬钩子(*Rubus palmatus*)和毛冬青(*Ilex pubescens*)为主。草本层以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)和乌毛蕨(*Blechnum orientale*)为主。

不同林分的林分特征及土壤性质见表 1。

2 研究方法 2.1 乔木细根生物量测定

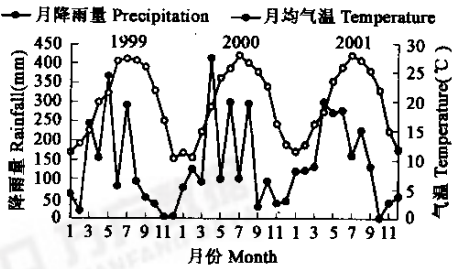


图 1 试验地 1999~2000 年月降雨量和月均气温
Fig. 1 Monthly mean temperature and rainfall during the 1999~2000 at the study site.

1999 年 1 月份至 2001 年 11 月份隔月于月底用内径 6.8cm 的土钻在各林分标准地的上中下部分别随机钻取土芯 10 个,每种林分共 30 个,深度为 1m。按 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80 及 80~100cm 分割土芯,用塑料袋装好后马上带回福建农林大学莘口教学林场小湖工区简易实验室。在室内把土样放在土壤套筛上,用自来水浸泡、漂洗、过筛,拣出根系,用放大镜、剪刀、镊子等工具分别分出乔木根和林下植被根。把乔木层直径<2mm 的细根进一步归为 1~2mm、0.5~1mm、<0.5mm 三组(分组前先用游标卡尺准确计量直径分别为 2mm、1mm、0.5mm 的细根制成 3 个径级标准样,再根据标准样进行目视分级),并根据外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度来区分活死根^[6]。将分级好的各样品在 80℃ 下烘干至恒重后称重,按以下公式计算细根生物量:

$$\text{细根现存量 (t/hm}^2\text{)} = \text{平均每根土芯根干重 (g)} \times (\text{t}/10^6\text{g}) / (\pi(6.8\text{cm}/2)^2 \times (\text{hm}^2/10^8\text{cm}^2))$$

以后的统计中细根均包括了乔木层细根(天然林中除格氏栲树种外,亦包括了其它乔木树种)。

2.2 细根分解试验

随机收集各林分表层土(0~20cm)的活细根样品,分成 1~2mm、0.5~1mm、<0.5mm 3 个径级后自然风干,称取每个径级 5g 风干样品装入 18cm×18cm、孔径为 0.25mm 的尼龙网袋中(根据样品含水量换算为烘干重),埋入各林分中坡位置 10cm 深土层内,每个径级共 80 袋,并于放置 30、60、90、150、210、270、330、390、510、630、750d 后随机抽取各径级样品 6 袋,除去附着的土壤、杂物和新长入的细根后,在 80℃ 下烘干至恒重后称重,用于失重分析。

2.3 细根净生产力和周转

细根年净生产量、分解量和死亡量用改进的分室通量模型计算^[8,30]:

$$LFR_t = LFR_{t-1} + P_t - M_t$$

$$DFR_t = DRT_{t-1} + M_t - D_t$$

$$D_t = (DFR_{t-1} + M_t)DR_t$$

$$T = P/Y$$

式中, LFR 、 DFR 、 P 、 M 、 D 、 DR 、 T 和 Y 分别表示活细根生物量、死细根生物量、年净生产量、年死亡率、年分解量、分解速率、周转速率和平均活细根生物量, t 为时间间隔。

2.4 统计分析

统计分析用 SPSS(11.0)软件进行。用双因素方差分析和最小差异显著性法检验年份和季节间的生物量差异($P<0.05$),配对 t 检验不同林分间的差异($P<0.05$)。同时根据 $X/X_0=\exp(-kt)$ (其中, X_0 为分解初始干重, X 为分解 t d 后的残留干重, k 为分解系数),拟合不同径级细根分解的负指数方程,求得分解系数 k 。

3 结果 万方数据

3.1 细根生物量

表 1 不同林分特征和土壤性质
Table 1 Stand characteristics and soil properties in the NF, CK and CF

因子 Parameters	林分 Forest type ¹⁾		
	NF ⁽²⁾	CK	CF
林分特征 ^①			
郁闭度 ^② (%)	0.95	0.95	0.85
平均树高 ^③ (m) ²⁾	24.3	18.9	21.9
平均胸径 ^④ (cm) ²⁾	42.2	24.2	23.3
密度 ^⑤ (stem/hm ²) ²⁾	255	875	1117
蓄积量 ^⑥ (m ³ /hm ²) ²⁾	398.	412.	425.
灌木层生物量 ^⑦ (t/hm ²)	310	431	912
草本层生物量 ^⑧ (t/hm ²)	10.115	0.780	1.993
枯枝落叶层现存量 ^⑨ (t/hm ²)	0.867	0.292	2.478
7.720	7.441	3.155	
土壤性质			
容重 (g/cm ³)	0.93	1.10	1.20
有机质 (g/kg)	46.0	29.8	29.5
全 N (g/kg)	1.88	1.12	1.12
全 P (g/kg)	0.36	0.31	0.29
水解 N (mg/kg)	135.6	115.2	110.3
速效 P (mg/kg)	7.63	5.92	4.69

* 1) NF 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; CK 格氏栲人工林 *C. kawakamii* plantation forest; CF 杉木人工林 Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation forest. 2) 天然林中仅包括格氏栲 *Castanopsis kawakamii* is only involved in the NF

① Stand characteristics, ② Canopy coverage, ③ Mean tree height, ④ Mean tree diameter at breast height, ⑤ Stand density, ⑥ Stand volume, ⑦ Biomass of shrub layer, ⑧ Biomass of herb layer, ⑨ Standing crop of forest floor, Soil (top 0~20cm) properties, Bulk density, Organic matter, Total N, Total P, Hydrolyzable N, Available P

活细根和死细根生物量不同林分间均差异显著 ($P<0.05$)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林活细根生物量分别为 4.944 t/hm^2 、 3.198 t/hm^2 和 1.485 t/hm^2 ,死细根生物量分别为 3.563 t/hm^2 、 2.749 t/hm^2 和 1.287 t/hm^2 ;死细根生物量占总细根生物量的比例分别为 41.9% 、 46.2% 和 46.4% , $<0.5\text{ mm}$ 细根生物量占总细根生物量的比例分别为 31.2% 、 29.4% 和 69.9% (表 1)。

3.2 细根生物量动态

不同林分活细根和死细根生物量不同季节间差异均达到显著水平 ($P<0.05$),但年份间差异均未达显著水平 ($P>0.05$)。所有林分活细根生物量 1 月至 3 月份均显著增加,随后在 7 月份(或 5 月份)显著降低 ($P<0.05$);活细根生物量峰值均出现在 3 月份,而杉木人工林则在 9 月份出现另一个较大值。活细根生物量最低值一般出现在 5 月~7 月份或 11 月~1 月份间;死细根生物量最大值则出现在 5 月或 7 月份(图 2)。

3.3 细根垂直分布

不同林分活细根和死细根生物量均随土壤深度增加而减少,其中格氏栲天然林活细根生物量随土壤深度增加而减少表现最为明显,其次为格氏栲人工林,杉木人工林表现最不明显(图 3)。不同林分活细根生物量最大差异出现在 0~10 cm 表土层,该层格氏栲天然林活细根生物量高达 295.65 g/m^2 ,分别是格氏栲人工林和杉木人工林的 2.4 倍和 8.1 倍;其活细根生物量占全部活细根生物量的 59.8% ,而格氏栲人工林和杉木人工林则仅分别为 39.07% 和 24.51% (图 3)。

3.4 细根年净生产力

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林不同径级细根分解 1 年后的干重损失率分别为 $68.34\%\sim 80.13\%$ 、 $63.51\%\sim 77.95\%$ 和 $47.69\%\sim 60.78\%$;细根径级越小,分解速率越高 ($P<0.05$)(表 2)。负指数方程能较好地拟合细根的分解过程 ($r^2>0.9$, $P<0.05$)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林年均分解量分别为 8.747 、 5.143 和 2.503 t/hm^2 ,死亡量分别为 8.632 、 5.148 和 2.492 t/hm^2 ,年均净生产量分别为 8.797 、 5.425 和 2.513 t/hm^2 ,年周转速率分别为 1.78 、 1.7 和 1.69 次/a (表 3)。

4 讨论

4.1 细根生物量

林木细根生物量与其所在气候带、土壤类型、群落结构、树龄及干扰程度等有关^[31~32]。本研究格氏栲天然林乔木层细根生物量 (8.507 t/hm^2) 位于世界亚热带森林细根生物量范围的上限 ($1.1\sim 10.6\text{ t/hm}^2$)^[24~27,31],或居热带常绿阔叶林细根生物量范围的中间位置 ($0.6\sim 22.7\text{ t/hm}^2$)^[31]。格氏栲人工林细根生物量均高于同气候带其它阔叶树人工林,而杉木人工林的则与同气候带针叶树人工林相似^[24,27,31]。格氏栲天然林细根生物量分别是格氏栲人工林和杉木人工林的 1.43 倍和 3.07 倍(表 2),这可能与其土壤肥力、林地生产力和群落多样性较大等有关^[3,4]。而格氏栲人工林细根生物量是杉木人工林的 2.15 倍,这与一般阔叶树人工林细根生物量高于针叶林的报道一致^[24,31,33],亦与格氏栲和杉木两树种生物学特性有关。

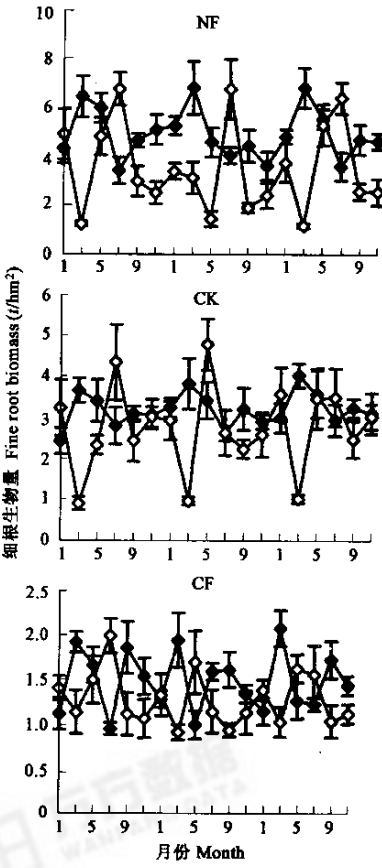


图 2 不同林分活细根和死细根生物量季节变化

Fig. 2 Seasonal patterns of fine root biomass and necromass (t/hm^2) in the *C. kawakamii* (NF), *C. kawakamii* (CK) and *C. lanceolata* (CF) forests
◆活细根生物量 Fine root biomass ◇死细根生物量 Fine root necromass

众多报道认为天然林皆伐后的自然更新过程中细根生物量可很快恢复到伐前水平,但亦有一些报道认为至少得需要 20a 以上才能达到伐前的水平^[13,34],而对天然林皆伐后营造与天然林中占优势树种相同的人工林的细根生物量恢复报道却较少。本研究格氏栲天然林经皆伐营造格氏栲人工林及杉木人工林 33a 后,人工林的细根生物量仍未达天然林的 70%(表 2),这与营造的人工林细根生物量恢复比天然更新林木的慢有关(未刊资料),亦可能与传统纯林经营措施对林地过度扰动、林分郁闭前林地发生较为严重水土流失及乔木层结构单一等有关^[1,4,35,36]。

表 2 不同林分乔木层活、死细根(<2mm)生物量 (t/hm ²)									
Table 2 Fine root (<2mm) biomass and necromass (t/hm ²) of tree layer in the NF, CK and CF									
林分	活细根生物量 Fine root biomass				死细根生物量 Fine root necromass				合计
Forest types	1999	2000	2001	平均 Mean	1999	2000	2001	平均 Mean	Total
NF *									
1~2mm	2.119	2.041	2.151	2.104	1.412	1.127	1.246	1.262	3.366
	±0.513	±0.446	±0.411	±0.468	±0.731	±0.677	±0.696	±0.67	±0.687
0.5~1mm	1.441	1.388	1.437	1.422	1.154	0.974	1.075	1.068	2.49
	±0.335	±0.287	±0.2	±0.307	±0.59	±0.556	±0.597	±0.552	±0.761
<0.5mm	1.432	1.374	1.449	1.418	1.303	1.078	1.319	1.234	2.652
	±0.289	±0.181	±0.319	±0.302	±0.718	±0.694	±0.713	±0.675	±0.729
小计 Subtotal	4.992	4.803	5.037	4.944	3.869	3.179	3.64	3.563	8.507
	±1.055	±1.077	±1.030	±0.995	±1.911	±1.901	±1.933	±1.848	±1.690
CK									
1~2mm	1.388	1.472	1.531	1.469	0.998	0.987	1.04	1.008	2.477
	±0.238	±0.197	±0.237	±0.342	±0.421	±0.429	±0.39	±0.389	±0.734
0.5~1mm	0.849	0.854	0.885	0.863	0.854	0.836	0.899	0.863	1.726
	±0.113	±0.121	±0.116	±0.209	±0.39	±0.388	±0.339	±0.351	±0.602
<0.5mm	0.837	0.875	0.905	0.872	0.859	0.864	0.91	0.878	1.75
	±0.125	±0.137	±0.119	±0.222	±0.335	±0.416	±0.342	±0.345	±0.541
小计 Subtotal	3.074	3.201	3.32	3.198	2.71	2.687	2.849	2.749	5.947
	±0.436	±0.412	±0.416	±0.409	±1.138	±1.229	±0.979	±1.055	±0.906
CF									
1~2mm	0.554	0.587	0.568	0.57	0.378	0.349	0.366	0.363	0.933
	±0.1	±0.149	±0.116	±0.117	±0.099	±0.099	±0.082	±0.095	±0.236
0.5~1mm	0.283	0.259	0.271	0.271	0.357	0.285	0.320	0.329	0.592
	±0.111	±0.065	±0.097	±0.088	±0.102	±0.081	±0.079	±0.087	±0.187
<0.5mm	0.674	0.617	0.642	0.644	0.638	0.561	0.609	0.603	1.247
	±0.229	±0.182	±0.208	±0.196	±0.170	±0.134	±0.127	±0.134	±0.211
小计 Subtotal	1.51	1.463	1.481	1.485	1.372a	1.195a	1.294a	1.287	2.772
	±0.392	±0.324	±0.355	±0.337	±0.349	±0.288	±0.264	±0.320	±0.621

* 注释与表 1 同 See footnotes in table 1

4.2 细根生物量动态

细根生物量一年中常出现 1 或 2 个峰值,或变化不明显;峰值出现时间在春季展叶期前后、晚夏或秋季等,但受树种特性及外界环境条件(如降水量、土温、养分有效性等)综合影响,细根生物量动态会有一定程度的波动^[6,8,12,23,26,37,38]。本研究活细根生物量峰值均出现在本区林木地上部分旺盛生长期(4 月或 5 月份)之前的 3 月份,这与地上部分快速生长时,其地下部分根系生长特别慢的研究结果相一致^[39,40]。早春细根的旺盛生长可能与土温回升、含水量升高(雨季开始)和碳水化合物供应充足(由于地上部分尚未进入旺盛生长期,而前一个生长季节所储存的碳水化合物首先供给地下部分生长)有关^[37,38]。杉木人工林活细根生物量在初秋 9 月份出现另一个较高的峰值,这可能与 8 月份杉木林地部分由于高温干旱出现生长间竭期有关^[1]。炎夏降雨量小时,土壤常因强度蒸发及林木强烈蒸腾作用而使土壤含水量下降,从而导致林木

活细根生物量下降,如在本研究中 6 月(1999 年)、5 月和 7 月(2000 年)及 7 月份(2001 年)极低的降雨量导致了不同林分 5 月或 7 月份活细根生物量的显著降低(图 1,图 2)。本研究中细根生物量的动态变化模式与鼎湖山、长白山等地的研究结果不尽相同^[23,26],这与研究地自然条件及树种特性的不同等有关。

4.3 细根垂直分布

本研究中细根生物量随土壤深度增加而明显下降的结论与大多数研究者报道相一致^[9,12,28,36,41]。森林的枯枝落叶层每年通过淋失(溶)、分解等过程向矿质土壤层提供大量有机 C 和养分,是森林生态系统重要的养分库和水库,使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,从而为具有强烈趋水、趋肥性的林木细根向表土层聚集提供良好的条件^[5,12,41]。与人工林相比,格氏栲天然林年凋落物量和年凋落物养分归还量大,加上凋落物分解速率较快*,使其表层 0~20cm 土壤有机质含量、全 N 和全 P 及速效性 N、P、K 养分含量均远高于人工林的(表 1),从而导致其林木细根分布更密集于表层土壤(图 3)。同时,由于细根在生长过程中的穿插切割作用、死亡腐烂后留下大量的根孔以及快速周转过程中向土壤归还大量的有机质和养分,格氏栲天然林表层细根的高度富集有利于表层土壤容重降低、土壤团粒结构稳定性及土壤有机质提高,形成疏松肥沃、结构良好的天然林特有的表层土壤(表 1)。与杉木人工林相比,格氏栲人工林表层 10cm 土壤更高的细根数量则与其较高的枯枝落叶层现存量 and 树种特性差异有关(表 1)。

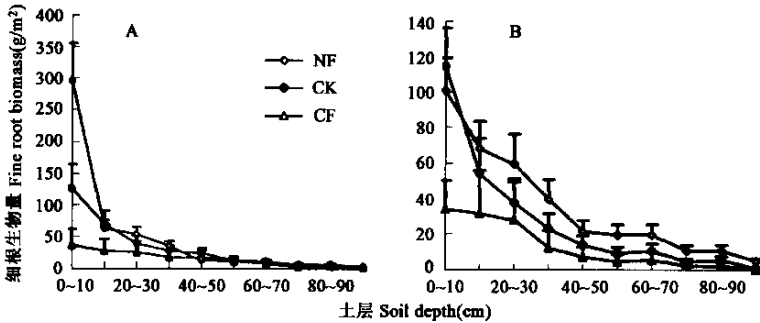


图 3 不同林分活细根和死细根生物量垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of fine root biomass (A) and necromass (B) in the *C. kawakamii* (NF), *C. kawakamii* (CK) and *C. lanceolata* (CF) forests.

由于我国亚热带山地生态系统具有极大的侵蚀危险性,对其过度干扰,易诱发严重的水、土、肥流失^[1]。格氏栲天然林表土层内活细根生物量高度富集有利于快速、高效的吸收来自凋落物分解释放的养分和截获林冠淋溶的养分;而矿质土壤表层覆盖 3~5cm 厚的枯枝落叶层,发挥着良好的涵养水源、保持水土功能^[5]。因此作为本区地带性植被常绿阔叶林具有高效率的养分和水分保持机制和“紧凑”的养分循环策略,可有效地抑制其生态系统潜在脆弱性。

鉴于本区林木细根在森林土壤表层富集程度对养分保持和土壤肥力恢复有重要作用,应对现有天然林采取保护措施;在局部天然林皆伐地段应采用不炼山的、人工促进天然更新的办法,保护残留根系,并迅速恢复植被,以保留或提高表层根系密度;而经营人工林时,应尽量减少对林地表层土壤的扰动以促进表层细根的生长,这对实现南方山地的森林可持续经营有一定的意义。

4.4 细根净生产力

细根的分解受细根性质、土壤条件和所处气候条件的影响^[42~44]。虽然格氏栲天然林与人工林土壤条件有较大差异(表 1),但两种林分的细根分解速率却较为接近(表 3);而格氏栲人工林和杉木人工林的土壤条件相对较为接近,但两者细根分解速率却差异较大,说明在气候条件相对一致情况下,细根质量决定

* 未发表资料

其分解速率^[44]。杉木细根的分解速率均高于分布在亚热带以北地区的其它针叶树,如红松(12%~25%)^[6],欧洲赤松(25%)^[42],花旗松(15%)^[45],喜马拉雅长叶松(26%)^[44],这说明了林木细根分解速率明显地受分布地带气候条件影响。格氏栲细根分解速率快于杉木细根,这与阔叶树细根分解速率一般高于针叶林的报道一致^[24,44]。本研究中细根年分解常数 k 介于 0.65~1.62,位于所报道的世界森林的范围内(0.02~1.74)^[6,13,23,24,43,45],且与其它亚热带森林的相当(0.6~1.74)^[13,24,43]。

本研究的细根年净生产量均落入所报道的世界森林范围内(1.4~11.5 t/hm²)^[8]。与其它亚热带森林(取样深度 40cm 左右,径级<2mm)相比,格氏栲天然林 0~40cm 土层细根净生产力高于南亚热带鼎湖山的季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和中亚热带武夷山的甜槠林^[25,26],0~20cm 土层细根净生产力与印度南部热带的某些常绿阔叶林相近^[41](表 5)。格氏栲人工林细根净生产力虽低于格氏栲天然林,但 0~40cm 土层细根净生产力却高于本研究的杉木人工林及其它所报道的同气候带人工林^[24,27,31]。本研究杉木人工林(33 年生)细根净生产力则高于湖南会同 11 年生杉木人工林^[24],而与相同试验地的 27 年生杉木林的接近^[27](表 5)。

Gill and Jackson 综述世界各地的研究表明,世界各地林分细根周转速率范围在 0.019~2.644/a 之间,平均周转速率为 0.56/a^[46]。本研究细根周转速率(1.69~1.78/a)处于所报道的世界范围内,但明显高于世界平均水平,这与目前的世界范围内报道资料大多来自温带的有关^[46]。同时,本研究的细根周转速率亦明显高于中国亚热带已报道其它的林分^[24~27],这与研究者采用林木细根研究方法和估算细根的净生产力方法不同有关(表 5)。目前,国内外研究者所采用林木细根研究方法(如土芯法、内生长法和微根管法)和净生产力计算方法(如最大最小法、积分法、决策矩阵法和分室通量模型法)所得结果有很大的差异,从而给不同研究间的比较带来了一定的不确定性^[30]。在已报道的国内绝大部分研究在连续土芯法基础上,采用最大-最小法估算净生产力^[23,24,26,27](表 5)。一般认为最大-最小法会低估了细根的生产力,特别是对细根周转速率高、细根季节变化不明显或比较复杂的树种,因而只适用于细根周转慢、细根生长具有明

表 4 不同林分细根年生产量、死亡率、分解量和周转速率

Table 4 Annual fine root production, mortality and decomposition (t/(hm² · a)) and turnover rates (a⁻¹) in the NF, CK and CF

林分 Forest type	年份 Year	年分解量 Decomposition	年死亡率 Mortality	年净生产量 Production	周转速率 Turnover rate
NF *	1999	9.227	7.887	8.832	1.97
	2000	7.921	8.481	8.061	1.68
	2001	9.093	9.529	9.5	1.89
	平均 Mean	8.747	8.632	8.797	1.78
CK	1999	4.892	4.587	5.952	1.94
	2000	4.997	5.647	5.411	1.69
	2001	5.143	5.209	4.911	1.48
	平均 Mean	5.011	5.148	5.425	1.7
CF	1999	2.651	2.573	2.734	1.81
	2000	2.333	2.387	2.255	1.54
	2001	2.526	2.517	2.551	1.72
	平均 Mean	2.503	2.492	2.513	1.69

* 注释与表 1 同 See footnotes in table 1

表 3 不同林分细根分解速率和分解系数

Table 3 Mass loss rates after the first year of decomposition and the decomposition rate coefficients of fine roots in the NF, CK and CF

林分 Forest type	径级 Diameter class (mm)	分解 1 年后 干重损失率 Mass loss rate after one year (%)	分解系数 Decomposition rate coefficient	
			Day-based	Year-based
NF *	1~2	68.34	0.0032	1.15
	0.5~1	75.78	0.0039	1.4
	<0.5	80.13	0.0045	1.62
CK	1~2	63.51	0.0028	1.01
	0.5~1	74.54	0.0038	1.37
	<0.5	77.95	0.0042	1.51
CF	1~2	47.69	0.0018	0.65
	0.5~1	54.71	0.0022	0.79
	<0.5	60.78	0.0026	0.94

* 注释与表 1 同 See footnotes in table 1

表 5 不同森林乔木层细净根生产力比较

Table 5 Fine root productivity in various forest ecosystems

森林类型 Forest type	气候带 Climate	年龄 Age (a)	径级 Diameter (mm)	取样深度 Sampling depth (cm)	净生产力 Production (t/(hm ² · a))	计算方法 Method	文献 Source
杉木纯林 Pure forest of <i>C. lanceolata</i>	北亚热带 Northern subtropics	11	<2	45	1.137	改进最大-最小法 Advanced Max-min	24
火力楠纯林 Pure forest of <i>Michelia macclurei</i>	北亚热带 Northern subtropics	11	<2	45	4.318	改进最大-最小法 Advanced Max-min	24
杉木火力楠混交林 Mixed forest of <i>C. lanceolata</i> and <i>M. macclurei</i>	北亚热带 Northern subtropics	11	<2		2.179	改进最大-最小法 Advanced Max-min	24
甜槠林 <i>Castanopsis eyrei</i>	中亚热带 Mid-subtropics	76	<2	40 以下	7.371	内生生长法 Ingrowth core	25
杉木林 <i>C. lanceolata</i>	中亚热带 Mid-subtropics	27	<2	100	2.504	改进最大-最小法 Advanced Max-min	27
格氏栲天然林 Natural forest of <i>C. kawakamii</i>	中亚热带 Mid-subtropics	~150	<2	20	6.373 *	分室通量模型 Compartment flow model	本研究 Present study
				40	7.952 *	分室通量模型 Compartment flow model	本研究 Present study
格氏栲人工林 <i>C. kawakamii</i> plantation forest	中亚热带 Mid-subtropics	33	<2	40	4.405 *	分室通量模型 Compartment flow model	本研究 Present study
杉木林 <i>C. lanceolata</i>	中亚热带 Mid-subtropics	33	<2	40	1.793	分室通量模型 Compartment flow model	本研究 Present study
季风常绿阔叶林 monsoon evergreen broad-leaved forest	南亚热带 Southern subtropics		<2	40	2.65	改进最大-最小法 Advanced Max-min	26
针阔叶混交林 mixed coniferous and broad-leaved forest	南亚热带 Southern subtropics		<2	40	2.42	改进最大-最小法 Advanced Max-min	26
湿润落叶林 Moist deciduous	热带 Tropics		<3	25	8.3~8.9	正增量累加法 Summation of positive biomass increments	41
半常绿林 Semi-evergreen forest	热带 Tropics		<3	25	7.9~8.04	正增量累加法 Summation of positive biomass increments	41
常绿林 Evergreen forest	热带 Tropics		<3	25	6.3~9.4	正增量累加法 Summation of positive biomass increments	41

* 不同取样深度细根净生产力按该层次细根生物量所占比例推算 Productivity of fine roots at different soil depth was calculated according to their respective biomass proportion in total fine root biomass

显季节性且季节变化呈单峰型的树种;而分室通量模型由于同时考虑了细根的生长、死亡和分解,计算的

结果比最大-最小法更相对较大且更为客观^[30]。

据报道森林生态系统地下凋落物(枯死细根)和地上部分凋落物量具有良好的正相关关系,且细根年死亡量接近或高于地上部分凋落物产量^[6~8, 47]。本研究中格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林的细根年死亡量分别是年凋落物量(分别为 11.008、9.538 和 5.461 t/hm²)^[48]的 78.42%、53.97%和 45.63%,明显高于同气候带鼎湖山常绿阔叶林细根年死亡量占地上部分年凋落叶量(24.1%)^[26]。鉴于鼎湖山常绿阔叶林地上部分凋落物^[49]与本研究格氏栲天然林的接近(11 t/hm²),而在推算细根净生产力和死亡量时由于采取最大最小法,使其数值偏小^[26]。因此,在亚热带地区计算森林细根净生产力和死亡量时用分室通量模型可能更为适宜。3 种林分细根的年死亡量均与各自年净生产量接近,这与其他研究者的结论相似^[37],表明天然林和处于近成熟龄的人工林细根几乎无净生长,细根净生产力基本用于维持现存的细根生物量。

References:

[1] Yang Y S. *Sustainable management of Chinese fir plantations*. Beijing: China Forestry Press, 1998.

[2] Zhang H B. *Forests in Fujian*. Beijing: China Forestry Press, 1993.

[3] Lin P, Qiu X Z. Study on the *Castanopsis kawakamii* forest in the Wakeng area of Sanming city, Fujian Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1986, **10**(4): 241~252.

[4] Yang Y S, He Z M, Zhou S Q. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kawakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2): 198~202.

[5] Yang Y S, Zhou S Q, Liu A Q. A study on the water conservation function of the natural forest of GE's evergreen chinquapin. *Journal of Natural Resources*, 1992, **7**(3): 217~233.

[6] McLaugherty C A, Aber J D and Melillo J M. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 1982, **63**(5): 1481~1490.

[7] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 1986, **15**: 303~377.

[8] Santantonio D, Grace J C. Estimating fine-root production and turnover from biomass and decomposition data: a compartment-flow model. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1987, **17**: 900~908.

[9] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*, 1983, **71**: 87~101.

[10] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, **81**(1): 275~280.

[11] Chen H, Harmon M E, Sexton J, *et al.* Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U. S. A. *Canadian Journal of Forestry Research*, 2002, **32**: 320~331.

[12] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forest. *Ecology*, 1996, **77**(1): 167~176.

[13] Arunachalam A, Maithani K, Pandey H N, *et al.* The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north-east India. *Forest Ecology and Management*, 1996, **88**: 273~282.

[14] Zogg G P, Zak D R, Burton A J. Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability. *Tree Physiology*, 1996, **16**(8): 719~725.

[15] King J S, Thomas R B, Strain B R. Growth and carbon accumulation in root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* seedlings as affected by varying CO₂, temperature and nitrogen. *Tree Physiology*, 1996, **16**(7): 635~642.

[16] Janssens I A, Crookshanks M, Ceulemans R. Elevated atmospheric CO₂ increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and soil CO₂ efflux in Scots pine seedlings. *Global Change Biology*, 1998, **4**(8): 871~878.

[17] Pregitzer K S, Zak D R, Maziasz J. Interactive effects of atmospheric CO₂ and soil-N availability on fine roots of *Populus nigra* L. *Applied Ecology*, 2000, **10**(1): 18~33.

[18] Yang Y S, Lin X F, Yu X T, *et al.* A study on the pattern texture and biomass of Chinese fir interplanted with

Litsea cubeba. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1991, **11**(4): 341~348.

- [19] Li Z W, Yang Y S. Root study in the mixed forest of Chinese fir and *Michelia macclurei*. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, **12**(1): 20~24.
- [20] Shan J P, Tao D L. Overseas researches on tree fine root. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, **11**(4): 46~49.
- [21] Huang J H, Han X G, Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 270~277.
- [22] Zhang X Q, Wu K H, Murach D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 875~883.
- [23] Shan J P, Tao D L, Wang M, *et al.* Fine roots turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, **4**: 241~245.
- [24] Liao L P, Chen C Y, Zhang J W. Turnover of fine roots in pure and mixed Chinese fir and *Michelia macclurei* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, **6** (1): 7~10.
- [25] Li L H, Lin P, Xing X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eydei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(4): 337~340.
- [26] Wen D Z, Wei P, Kong G H, *et al.* Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, **23** (4): 361~369.
- [27] Yang Y S, Chen G S, He Z M, *et al.* Production, distribution and nutrient return of fine roots in a mixed and a pure forest in subtropical china. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, **8**(3): 223~233.
- [28] Yang Y S, Chen G S, He Z M, *et al.* Study on spatial distribution of fine roots in a mixed *Cunninghamia lanceolata*-*Tsoongiodendron odorum* plantation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, **10**(2): 111~117.
- [29] Yang Y S, Chen G S, Xie J S, *et al.* Dynamics of Nitrogen and Phosphorus concentrations of fine roots in a mixed forest of *Cununghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Forestry Research*, 2001, **12**(2): 105~108.
- [30] Kurz W A, Kimmins J P. Analysis of some sources of error in methods used to determine fine root production in forest ecosystems: a simulation approach. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1987, **17**: 909~912.
- [31] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1996, **187**: 159~219.
- [32] Idol T W, Pope P E, Ponder Jr F. Fine root dynamics across a chronosequence of upland temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 2000, **127**: 153~167.
- [33] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, *et al.* Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba. *Canadian Tree Physiology*, 1997, **9**: 69~86.
- [34] Yin X, Pery J A, Dixon R K. Fine-root dynamics and biomass distribution in a *Quercus* ecosystem after harvest. *Forest Ecology and Management*, 1989, **27**: 159~177.
- [35] Castellanos J, Jaramillo V J, Sanford Jr R B, *et al.* Slash-and-burn effects on fine root biomass and productivity in a tropical dry forest ecosystem in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2001, **148**: 41~50.
- [36] Liao L P, Deng S J, Yu X J, *et al.* Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 569~573.
- [37] López B, Sabaté S, Gracia C A. Annual and seasonal changes in fine root biomass of *Quercus ilex* L. *Plant and Soil*, 2001, **230**: 125~134.
- [38] Mallonen K, Helmisaari H S. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management*, 1998, **102**: 283~290.
- [39] Eissenstat D M, Van Rees K C J. The growth and function of pine roots. *Ecological Bulletins*, 1994, **43**: 76~91.
- [40] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 169~182.
- [41] Sundarapandian S M, Swamy P S. Fine root biomass distribution and productivity patterns under open and closed

- canopies of tropical forest ecosystems at Kodayar in Western Ghats, South India. *Forest Ecology and Management*, 1996, **86**: 181~192.
- [42] Berg B. Decomposition of root litter and some factors regulating the process. Long-term root litter decomposition in a Scots pine forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, **16**: 609~617.
- [43] Bloomfield J, Vogt K A, Vogt D J. Decay rate and substrate quality of fine roots and foliage of two tropical tree species in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Plant and Soil*, 1993, **150**: 233~245.
- [44] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, *et al.* Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya, *Forest Ecology and Management*, 2000, **131**: 191~199.
- [45] Fogel R, Hunt G. Fungal and arboreal biomass in a western Oregon Douglas-fir ecosystem. Distribution patterns and turnover. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1979, **9**: 245~256.
- [46] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytology*, 2000, **147**: 13~31.
- [47] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 1989, **70**(5): 1346~1354.
- [48] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al.* Litter Production, Nutrient Return and Leaf-Litter Decomposition in Natural and Monoculture Plantation Forests of *Castanopsis kawakamii* in Subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [49] Tu M Z, Yao W H, Wen H, *et al.* Characteristics of litter in evergreen broadleaved forest of the Dinghushan Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, **30**(1): 34~42.

参考文献:

- [1] 杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [2] 章浩白. 福建森林. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [3] 林鹏, 丘喜昭. 福建三明瓦坑的赤枝栲林. 植物生态学与地植物学学报, 1986, **10**(4): 241~252.
- [4] 杨玉盛, 何宗明, 等. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性差异的研究. 生态学报, 1998, **18**(2): 198~202.
- [5] 杨玉盛, 邹双全, 刘爱琴. 格氏栲天然林水源涵养功能的研究. 自然资源学报, 1992, **7**(3): 217~233.
- [18] 杨玉盛, 林先富, 俞新妥, 邹双全. 杉木套种山苍子模式的结构与生物量初步研究. 福建林学院学报, 1991, **11**(4): 341~348.
- [19] 李振问, 杨玉盛. 杉木火力楠混交林根系的研究. 生态学杂志, 1993, **12**(1): 20~24.
- [20] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态. 生态学杂志, 1992, **11**(4): 46~49.
- [21] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. 生态学报, 1999, **19**(2): 270~277.
- [22] 张小全, 吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述. 生态学报, 2000, **20**(5): 875~883.
- [23] 单建平, 陶大立, 王淼, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究. 应用生态学报, 1993, **4**: 241~245.
- [24] 廖利平, 陈楚莹, 张家武. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. 应用生态学报, 1995, **6**(1): 7~10.
- [25] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. 应用生态学报, 1998, **9**(4): 337~340.
- [26] 温达志, 魏平, 孔国辉, 等. 鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转. 植物生态学报, 1999, **23**(4): 361~369.
- [27] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林和杉木纯林群落细根生产力、分布及养分归还. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(3): 223~233.
- [28] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林细根的分布. 热带亚热带植物学报, 2002, **10**(2): 111~117.
- [36] 廖利平, 邓仕坚, 于小军, 等. 不同连栽代数杉木人工林细根生长、分布与营养物质分泌特征. 生态学报, 2001, **21**(4): 569~573.
- [48] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解. 生态学报, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [49] 屠梦照, 姚文华, 翁轰, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物的特征. 土壤学报, 1993, **30**(1): 34~42.