

华东师范大学 (10269)

2005 届硕士学位论文



天童常绿阔叶林次生演替过程中细根的
周转和养分动态

研究生：施家月

学号：YS02165004

导师：王希华 副教授

系别：环境科学系

专业：生态学

方向：植被生态

上海·华东师范大学

二 五年五月

East China Normal University (10269)

A Dissertation Submitted For Masterate, 2005

EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY

**Fine Root Turnover and Nutrient Dynamics in the
Secondary succession of Evergreen Broad-Leaved Forest in Tiantong**

Graduate: Shi Jiayue

Number: YS 02165004

Advisor: Prof. Wang Xihua

Department: Enviroment Science

Speciality: Ecology

Major Field: Vegetation Ecology

ShangHai·ECNU

May, 2005

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是我在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知,除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体,均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名: _____ 日期: _____

学位论文授权使用声明

本人完全了解华东师范大学有关保留、使用学位论文的规定,学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅。有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

日期: _____ 日期: _____

学位论文作者签名: _____ 导师签名: _____

毕业论文答辩委员会成员名单

姓名	单位	职称
宋永昌	华东师范大学	教授
王开运	华东师范大学	教授
陈小勇	华东师范大学	教授
李得志	华东师范大学	副教授
李俊祥	华东师范大学	副教授

答辩委员会主席：**宋永昌**

目 录

中文摘要	1
英文摘要	3
第一章 前言	
1 研究目的和意义	5
2 研究历史概述	5
3 本文研究的主要内容	10
4 研究技术路线及拟解决的关键问题	10
5 样地概况	11
第二章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的生物量及其生产力	
2.1 研究方法	13
2.1.1 细根取样	13
2.1.2 细根现存量、净生产力和周转率的计算	14
2.1.3 统计分析	14
2.2 结果	14
2.2.1 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的时间动态	14
2.2.2 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的空间分布	15
2.2.3 常绿阔叶林演替过程中细根的生物量	16
2.2.4 常绿阔叶林不同演替阶段细根的生产力和周转	18
2.3 小结与分析	18
第三章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的营养贮存	
3.1 研究方法	20
3.1.1 细根样品的提取	20
3.1.2 N、P 含量的测定	20
3.1.3 计算方法	20
3.1.4 统计分析	21
3.2 结果	21
3.2.1 不同演替阶段细根 N、P 含量及季节变化	21
3.2.2 不同演替阶段细根 N、P 养分贮存量	21
3.2.3 不同演替阶段细根养分年归还量	23

3.3 小结与分析.....	24
第四章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的分解动态	
4.1 研究方法.....	26
4.1.1 细根分解试验.....	26
4.1.2 细根分解过程的拟合.....	26
4.1.3 统计分析.....	27
4.2 结果.....	27
4.2.1 群落细根的分解动态及 N、P 营养成分的变化.....	27
4.2.2 群落细根的分解速率.....	27
4.2.3 常见种细根的分解动态.....	29
4.2.4 常见种细根的分解速率.....	31
4.2.5 细根分解与与初始营养含量的关系.....	31
4.3 小结与分析.....	33
第五章 细根特征与常绿阔叶林次生演替关系的探讨	
5.1 不同演替阶段细根特征的比较.....	35
5.2 细根特征与群落演替关系的探讨.....	36
5.2.1 细根生物量与群落演替的关系.....	36
5.2.2 细根周转与群落演替的关系.....	39
5.2.3 细根总体特征与群落演替的关系.....	39
5.2.4 细根与群落的物质循环.....	40
第六章 研究结论和展望	
6.1 结论.....	42
6.2 研究展望.....	43
参考文献	44
后记	51

天童常绿阔叶林次生演替过程中细根的 周转和养分动态

摘要

本文研究了常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的季节动态、生产力和周转率，不同演替阶段细根生物量的空间分布特征，不同演替阶段细根养分含量的季节变化、细根养分库特征及养分归还，不同演替阶段群落细根分解动态以及一些常见种的分解动态，最后探讨了常绿阔叶林演替动态与细根的关系。结果表明：

(1) 从铁芒萁-山鸡椒稀疏群落、榿木-石栎群落、马尾松群落、马尾松-木荷群落、木荷群落至栲树群落的常绿阔叶林次生演替过程中，群落活细根平均生物量依次为： $1.013 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $1.966 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $0.714 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $1.305 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $2.049 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.513 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ；死细根平均生物量为： $1.380 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $1.320 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $0.352 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $0.226 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， $0.666 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.688 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，演替前期与演替后期群落活细根和死细根生物量均较高；细根生物量具有明显的季节动态 ($P < 0.01$)，细根生物量高峰期出现在4月份和7月份，在11月份和2月份较低；活细根和死细根生物量差异在不同演替阶段差异显著 ($P < 0.05$)，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落中死细根生物量高于活细根生物量，其余五个群落死细根生物量低于活细根生物量。

(2) 常绿阔叶林不同演替阶段细根年周转率 (times/yr) 分别为：4.065，2.494，2.279，0.902，1.092 和 0.695，演替前期阶段细根周转率高于演替后期。

(3) 细根在土壤中呈不均匀分布，活细根和死细根均随着土层深度的增加而明显下降，0-20cm 土层细根生物量占总生物量的 80% 左右；细根在土壤上层富集程度随演替进行无明显规律。

(4) 不同演替阶段细根 N 含量存在差异 ($P < 0.05$)，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落细根 N 含量高于榿木-石栎群落，从榿木-石栎群落向栲树群落演替过程中，N 含量表现增加的趋势，而不同演替阶段细根 P 含量差异不显著 ($P > 0.05$)；不同演替阶段细根 N、P 含量季节变化明显，P 含量在7月或11月达到最高，演替前期群落细根 N 含量季节变化模式与 P 相似，而演替后期群落细根 N 含量峰值出现在4月；细根 N、P 含量随土层深度的增加而减少 ($P < 0.05$)；活细根与死细根 N、P 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

(5) 演替前期和后期群落细根 N、P 养分年归还量和年释放量比较高，而演替中期群落细根 N、P 养分年归还量和年释放量较低。

(6) 在细根分解初期，常绿阔叶林不同演替阶段群落细根失重率较高；细

根失重率与时间不呈线性关系，经指数衰减模型拟合后，不同演替阶段细根分解系数为：0.785，0.504，0.356，0.406，0.617 和 0.796，演替前期和演替后期群落细根分解速率快，演替中期分解速率慢；群落细根在分解过程中 N、P 含量均发生了变化，在分解初期，演替中、前期群落细根表现为富集，而演替后期表现为释放。

(7) 22 种植物细根在相同环境下的分解结果表明：22 种植物的细根分解 95%所需的时间为 3~4 a，平均时间为 3.74 a，高于本地区本地区常见种凋落叶的平均分解时间；不同植物细根的分解特征存在一定的差异，对于营养含量高的落叶树种和演替顶级种分解速率高，这与地上凋落物的分解特征相似；在分解初期，植物细根与凋落叶一样，N、P 营养含量发生了固持现象，即残留细根中的营养元素高于细根的初始营养含量；植物细根的分解速率与细根初始 N、P 含量均呈正相关关系。

(8) 细根生物量与周转率可以表征细根特征随群落演替过程的变化，地上植被和土壤环境是影响细根特征的主要因素，细根生物量与土壤 N 含量、有机质、地表凋落物量、木荷和栲树重要值以及群落乔、灌层植物密度均呈显著的正相关关系 ($P<0.05$)，与马尾松重要值呈显著的负相关关系 ($P<0.01$)；细根周转特征与群落演替过程中植物获取资源策略密切相关，演替初期，细根具有较高的周转率，但细根资源利用效率低，即投入较多的净初级生产力来获得较多资源，演替中期细根周转率较低，但资源利用效率仍较低，即投入较少的净初级生产力获得较少的资源，演替后期细根的资源利用效率最高，投入较少的净初级生产力获得较多的资源；细根物质循环随着群落演替进行趋于稳定状态。

关键词：细根 生物量 生产力 周转率 空间分布 养分含量 分解 次生演替
常绿阔叶林 天童

Fine Root Turnover and Nutrient Dynamics in the Secondary succession of Evergreen Broad-Leaved Forest in Tiantong

Abstract

In this paper, the seasonal dynamics and spatial distribution of the biomass, the production and turnover rate, nutrient contents and its dynamics, nutrient pools and the dynamic decomposition for the fine root in the different stages of succession have been investigated to discover the relationship between the fine root and the succession of the evergreen broadleaved forest in Tiantong. The main findings as followed:

(1) There are distinct seasonal dynamics of the fine root biomass in the series of the succession, the maximum of the biomass occurred in the April and/or July. The peaks of the biomass for the live and the dead fine root in the earlier and later stages demonstrate the seasonal dynamics of the series in the succession. The biomass of the live fine root are $1.013\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $1.966\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.714\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $1.305\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $2.049\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $2.513\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively, while the dead is $1.380\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $1.320\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.352\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.226\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.666\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $0.688\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. The biomass of the dead fine roots is obvious less than that of the live.

(2) The turnover rate of the fine root in the earlier stage is larger than that of the later, the turnover rate in the different series of the succession are 4.065, 2.494, 2.279, 0.902, 1.092 and 0.695, respectively.

(3) The spatial distribution of the fine root is uneven in the soil profile. The biomass of the live and dead fine root is decreased with the depth of the soil. The proportion of the fine root in the upper 0-20cm sum to 80% of the totals. But there is no distinguished difference for the biomass of the fine root in the upper horizon in the series of the succession.

(4) There is variance in the N content in the live and dead fine root for the different stages in the succession. The N content in the live and dead fine root in the *D.pe+L.cu* comm. is higher than that of *L.ch+L.gl* comm., the N content

increases with the succession processes from *L.ch+L.gl* comm. to *C.fa* comm. but there is no significant variance in P content in the fine roots. But there are significant seasonal variance of the N and P content in the fine root, the peak of the P content occurs in the July or November, while in the later succession the peak of the N content occurs in the April. The seasonal variance of the N content is similar to that of the P content in the earlier and middle succession. The content of the N and P decreases with the depth in soil profile. and shows no significant variance between the live and dead fine root.

(5) In the earlier and later stages, the annual return and release of N and P was higher than that of the intermediate stages.

(6) During the initial stages of the fine root decomposition, the percent of mass losing was very high. By the exponential decay model ,the decomposition coefficient in different succession stages was 0.785 , 0.504 , 0.356 , 0.406 , 0.617 and 0.796,respectively. In the earlier and later stages, the decomposition rate was faster than that in the intermediate. However, the nutrient content in the fine roots had changed during the decomposition. The N and P in fine roots was enriched in the earlier and middle stage, but was released in the later.

(7) It will take three to four years to decompose to that degree of 95% for the fine roots according to the selected 22 sampling plants in Tiantong, the average was 3.74a, which is higher than that of 2.54a for leaf litter. There is difference in the fine root decomposition for individual species; the decomposition rate was rather high in some species in Climax or high-nutrient-content deciduous species, and it correlates positively with the initial nutrient content of N and P in the fine root.

(8) The fine root biomass and turnover rate can instead of the characters of fine root. The fine root biomass is affected by many factors, such as soil nutrient, organic matters, the upper floor masses, etc. it is positively correlated with those factors. The community structure and species composition are important impacts on fine roots biomass which is positively correlated with the *Castanopsis fargesii* and *Schima superba* importance value and the plant density ,and is negative correlated with the *Pinus massoniana* importance value . The fine root turnover rate can reflect the plant resource capture efficiency in different succession stages of Evergreen Broad-Leaved Forest. Fine roots matter cycling tends to be stable with the secondary succession in forest community.

Keywords: fine root, biomass, production, turnover rate, spatial distribution, nutrient content, decomposition, secondary succession, evergreen broad-leaved forest, Tiantong

第一章 前言

1 研究目的和意义

细根 (Fine root), 通常是指直径小于 2mm 的根系, 是森林群落的重要组成部分, 是根系系统中最活跃和最敏感的部分 (Nadelhoffer 2000, Henrick *et al.* 1993), 是植物获得水分和养分的主要器官, 它具有巨大的吸收表面积, 它的生长、死亡、分解和周转在森林生态系统养分循环中起着重要的作用。研究表明虽然细根在森林生态系统中占根系总生物量不足 30%, 但其净生产力却占森林总生产力的 30% - 80% (McClaugherty, 1982), 每年通过枯死细根归还到土壤中的养分和能量甚至会超过地上部分的凋落物, 如果忽略细根的生产、周转和分解, 土壤有机物质和营养元素的周转将被低估 20% - 80% (Vogt *et al.*, 1986)。同时, 细根动态对环境具有重要的指示作用, 可以反映树木和生态系统的健康状况 (Vogt *et al.*, 1993)。但是, 长期以来, 细根的生态功能在我国亚热带常绿阔叶林生态系统的研究中没有得到很好的开展。

我国东部现存的亚热带常绿阔叶林大都为次生植被, 是常绿阔叶林受损后形成的, 大都处于不同的演替阶段。其演替的过程是复杂的, 其中土壤植被界面的养分周转和维持在其中起着重要作用, 细根作为这一界面的重要组成单元, 是联系植被和土壤物质循环的一个重要环节。但是细根到底在这一生态功能中起到怎样的作用, 其在常绿阔叶林演替过程中起到怎样的作用, 这些问题目前都还没有明确的答案。本研究以受损常绿阔叶林不同演替阶段为对象, 以演替早期阶段的铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和櫟木-石栎群落为基点, 比较常绿阔叶林受损 (人为干扰) 后, 各次生演替阶段细根的生长动态、分解特征、生物量季节动态以及分布格局, 阐明演替对细根动态的影响; 通过对细根与土壤之间作用的研究, 解释土壤-根系养分的互动效应, 为揭示常绿阔叶林退化机制、及该地区的植被恢复和森林管理提供理论依据。

2 研究历史概述

早在 18 世纪初, 人们就对农业生态系统中的根系进行过研究, 如 Hales (1727) (薛德榕, 1985) 采用简单的挖掘技术, 对掘出栽培作物的根系进行了形态学的观测并测定其重量和长度, 但由于在相当长时间内, 对根系特别是细根功能认识

的不足以及研究方法的限制，细根的研究发展缓慢。国外对根系的系统研究始于 20 世纪 50 年代，到 70 年代的国际生物学计划（IBP）期间，温带、热带、亚热带地区的针叶林、阔叶林的根系生物量已被系统研究（Santantonio,1977），他们在寻求分析和模拟针叶林生态系统的结构和功能时，将森林生态系统划为 5 个主要组成部分：林冠层，下木层，林地层，根系层和土壤层，根系层是森林生态系统的组成部分，模型的目标是量化各组间的物流关系，因此对根系层进行了系统的研究（Santantonio,1977）。我国在上世纪 70、80 年代测定整个森林生态系统生物量时，对根系生物量进行了估测，如李文华（1977）对小兴安岭主要森林群落结构和演替进行研究时，采用土柱法对根系生物量进行了测定，不仅对根系进行了粗度级划分、测定了根系的长度和生物量，并且测定了影响根系生物量的环境因素。

随着全球碳循环研究的开展和森林生物地球化学循环过程研究的深入，人们已经开始认识到细根（直径 $< 2\text{mm}$ ）在生态系统中的重要作用。虽然地下生物量主要集中在粗根（直径 $> 2\text{mm}$ ）中，但是植被每年用于生长的光合产物大部分被分配到细根中（Jackson et al,1997），细根在森林生态系统中的作用逐渐受到重视，而且研究方法不断改进，细根生物量、生产力、周转率及对群落动态影响等研究成为生态学研究的热点问题之一。归纳起来，主要包括以下几个方面：

2.1 细根生物量

Perrson（1973）在对瑞典中部英格兰松（*Pinus sylvestris* L.）幼龄林细根生物量动态的研究，以及后来对北方森林细根生产力及其分配进行的研究成为了细根研究的典范（Persson,1983），尤其是调查细根生物量所采用的内生长法（Root ingrowth method），至今仍广泛被用于细根生物量的研究中。Harris(1977)通过活细根现存量的季节变化估测细根的年生产量和死亡量，首次证明了细根的生产量与其生物量不成比例。之后，研究细根生长、死亡、寿命、生物量、生产量、周转率、分布、季节动态及细根对森林生态系统碳和养分循环贡献的文献迅速增加。近 20 年来，细根生物量的研究不仅局限于区域尺度上，逐步向全球尺度发展，如 Jackson(1997)分析了全球细根生物量、长度、表面积及其在土壤中的分布深度，估算了全球细根的养分库。

国内在不同气候带细根生物量调查方面也开展了一些工作，但在整个区域尺度上的研究较少，大多是对区域内某个群落类型细根生物量的研究，如单建平（1993）对长白山阔叶红松林细根生产力和周转进行了研究，李凌浩（1998）研究了武夷山甜槠林细根生物量和生长量动态，廖兰玉（1993）和温达志（1999）在鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林也开展了一些工作。

目前关于细根生物量的研究主要集中在以下两个方面：（1）细根生物量积累

与分布特征的研究，主要研究细根生物量在生态系统中的地位与空间分布特征；
(2) 细根生物量的季节动态，研究细根生长与气候、植物生物学特性、土壤环境的关系。

2.1.1 空间分布特征

细根生物量的多少直接反映了根系从土壤库吸收养分的高低，不同气候类型、森林类型和立地条件，细根生物量可能存在一定差异，即使在同一森林中也会由于取样方法、时间和细根分类标准的不同而得出不同的细根生物量(Burke and Raynal,1994;Steele *et al*,1997)。据全世界 100 多个森林生态系统细根生物量研究结果(张小全,2001):细根(直径<2-5mm)生物量变化在 46~2805 g.m⁻² 之间(n=169),大部分在 100~1000 g.m⁻² 之间(n=125),细根生物量分别占地下部分总生物量和林分生物量的 1.1~74.7%(n=105)和 0.1~32.2%(n=93),大多数为 3~30%(n=71)和 0.5~10%(n=79)。按照不同气候带下森林类型平均,细根生物量在 216g.m⁻²(北方常绿针叶林)和 1087 g.m⁻²(热带常绿阔叶林)之间,细根生物量占地上部分生物量和总生物量的比例分别为 11.8%~50%和 1.7%~15.8%,除亚热带落叶阔叶林和常绿针叶林较低外,从北方森林到寒温带、暖温带到热带森林,细根生物量呈增加趋势。同一气候带不同森林类型比较,落叶阔叶林细根平均生物量大于常绿针叶林,但低于常绿阔叶林,可见,细根生物量与气候条件、森林类型和立地条件密切相关。

细根生物量垂直分布具有一定的规律性,随土壤深度增加呈指数递减(Lawson,1995),但细根生物量的垂直分布与树种生物学特性、植物年龄和土壤理化性质等因子密切相关,树木或林分细根大部分位于 50cm 土层以上,且多集中于枯落物层和 10cm 以上矿质土壤表层(Burke *et al*,1994;Buttner *et al*,1994;Finer *et al*,1997;Hahn *et al*,1998;温达志等,1999;李凌浩等,1998),一些树种细根垂直变化不明现或中下部土层分布有较多的根系(Fischer *et al*,1998),产生细根富集于地表的主要原因是土壤温度从地表向下迅速下降(Tryon,1983;Steele *et al*,1997),提高土壤温度不但使细根生物量增加,而且使细根趋于深土层分布(Ruijter *et al*,1996),另外表层丰富的营养条件有利于细根的生长。不同森林类型,细根在土壤中的分布存在一定差异,北方森林根系分布最浅,而温带针叶林最深,它们在表层 30cm 内根系占 80% - 90%和 50%(Jackson *et al*,1997)。

2.1.2 季节动态

植物细根生物量季节动态可以反映细根的生长变化情况,细根生物量在不同月份具有明显的季节动态(Lopez B,2001),不同气候带下,细根生物量季节动态存在一定差异。在热带多为“单峰型”分布,这主要与土壤水分有关,生物量高峰和低峰分别出现在雨季和旱季,且细根直径越小,季节变化越明显

(Sundarapandian *et al*,1996); 在温带, 部分研究为“单峰型”, 峰值出现在春季 (Burke *et al*,1994;Joslin *et al*,1987) 或夏秋季(McClaugherty *et al*,1982;Rytter *et al*,1996;单建平等, 1993); 也有许多人认为呈现“双峰型”分布, 峰值出现在春季和秋季, 主要与土壤水分状况有关 (Harris *et al*,1977); 在亚热带, 细根生物量季节动态与温带相似, “单峰型”和“双峰型”分布都存在 (廖利平等,1995; 温达志等,1999)。

2.2 细根生产和周转的研究

2.2.1 细根生产

在森林生态系统中, 细根净生产力是生态系统净初级生产力重要的一部分, 细根的净初级生产力为 $20 \sim 1317 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$, 占林分总净初级生产量的 3%~84%, 大部分在 10%~60% (张小全,2001)。与生物量相似, 不同气候、森林和土壤类型, 细根的生产量会有较大的差异, 从北方森林到温带、亚热带和热带森林, 细根生产量呈增加的趋势。根据生态学中的最优分配模型, 细根生产量随着土壤资源限制性增强而呈现增加的趋势 (Caldwell and Richards,1986); 有些研究结果认为针叶林中细根净初级生产量较高 (Vogt *et al*,1986;Ruess *et al*,1996), 但也有认为同一气候带下, 常绿阔叶林和落叶阔叶林细根的净初级生产量高于针叶林 (张小全,2001)。

2.2.2 细根周转

细根的周转对土壤养分库具有重要的贡献, 它是森林生态系统碳和养分循环潜在的调节器 (Gill and Jackson,2000;Aerts and Chapin,2000;Silver and Miya,2001), 细根周转对土壤 N 和 C 的贡献比枯落物大 18%~58%, 如果忽略细根的周转, 土壤有机物质和营养元素的周转将被低估 20%~80% (Vogt *et al*,1986)。不同气候、森林和土壤类型, 细根周转率变化较大, 亚热带森林周转率高, 这也是该地区细根生物量较低的原因, 温暖的气候条件下细根周转率较高, 潮湿的热带森林中细根周转率最高 (Vogt *et al*,1986;Lawson,1995)。相同的气候带, 不同森林类型细根周转率存在一定的差异, 阔叶林细根周转率低于针叶林, 高周转率的针叶林维持较低细根生物量是降低能量消耗的一种适应策略 (Fogel,1983)。细根的周转具有明显季节性, 夏秋季节土壤温度高, 细根周转加速 (Marshall *et al*,1985;Burke *et al*,1994); 在贫瘠的立地上, 植物将投入更多的净生产力用于细根的生长, 细根周转加快, 而肥沃的立地条件细根周转减慢 (Cannell,1985; Pregitzer *et al*,1993), 但也有研究认为低营养环境细根寿命周期延长, 周转减慢, 而肥沃立地条件细根生命周期缩短 (Aber *et al*,1985;Grime *et al*,1991;Pregitzer *et al*,1995), 土壤有效养分与细根周转率可能呈正相关, 也可能呈负相关, 主要与植物种类、整个植物碳平衡与有效养分在土壤中分布的空间异

质性有关 (Hendrick et al,1996)。

2.2.3 细根周转对土壤养分的贡献

细根的周转是土壤养分的主要贡献者之一，同时细根参与了土壤的形成，特别是根系对生物库养分流动的作用，形成了植物 - 土壤养分流动系统，植物在生长过程中，根系向环境中摄取养分和水分，同时也向环境中分泌质子和离子，并释放大量的有机物质，这些物质不仅为林地提供了丰富的碳源，并且极大地改变了土壤的物理和化学性质，间接地转化了养分元素的离子形态，从而对土壤的水分和养分产生较大的作用，Vogt et al (1982) 研究表明，23 年生太平洋冷杉林分通过细根归还的 N、P、K、Ca 分别为 60、10、20、30、10 Kg.(hm².a)⁻¹，可见细根周转是土壤营养元素重要的来源。

2.3 细根的分解特征

植物干物质分解是森林生态系统最重要的生物化学过程之一 (De Catanzaro and Kimmins,1985)，土壤环境、气候条件和干物质本身的质量是影响干物质分解的主要因素，长期以来，森林生态系统干物质分解的研究主要集中在地上凋落物的分解，世界不同森林生态系统地上凋落物分解过程及其控制因素已被详细研究 (Singh and Gupta,1997; Vogt et al;1991)，而对土壤碳库贡献 25 ~ 80% 的细根分解过程研究非常有限，细根分解研究方法和理论与地上凋落物分解具有相同的地方，但细根所处环境条件和本身的性质与凋落物不同，细根分解过程与凋落物也有许多不同的地方。

土壤环境是影响细根分解的重要因子之一，与凋落物不同，细根的分解直接在土壤中进行，土壤的理化性质、动物和微生物都直接影响细根分解。Ostertag(1999)在夏威夷岛对不同演替阶段群落进行施肥试验，比较土壤养分条件对细根分解的影响，结果表明，施肥对细根分解速率影响不同，在演替前期群落中，土壤养分增加对细根分解没有影响，而演替后期土壤养分增加细根分解加速，这说明养分限制演替后期群落的细根分解，而对演替前期没有影响，但 Conn et al (1996)则得出了相反的结论。大量研究表明，基质质量对细根的分解影响很大，Usman(2000)认为，不同径级细根分解速率差异主要是不同径级细根初始养分含量以及所含易分解成分比例不同引起的，通常小径级细根初始养分含量和易分解成分比例高，因此小径级细根分解速率比大径级细根快。

2.4 细根特征与群落演替动态

目前关于细根与群落演替关系的研究主要集中在两个方面：(1) 细根生物量随演替过程的变化；(2) 群落演替过程中细根生产力的变化，但对群落演替过程中细根综合特征与群落演替关系的研究报道不多。细根的垂直分布通常与林分发育程度有关，演替初期与演替后期群落细根的垂直分布可能存在较大的差

异。通常演替早期阶段林分细根分布较深，而后期较浅（Grier et al,1981）；对同一树种，年龄较大的林分细根趋于表层（Grier et al,1981;Berish et al,1982）。这主要与林分的立地条件和林分内不同植物对竞争的适应有关，以最大限度降低对土壤养分和水分的竞争，达到资源的合理分配和利用（Strong et al,1983;Finer et al,1997;Travis,2000）。森林受到干扰后发生的次生演替过程中，细根的生产量也会随着演替而变化，但细根生产量随着演替的变化规律比较复杂，不同森林生态系统有不同的研究结论，有些研究结果认为细根生产量随着演替进行而下降（Finer et al,1997; Persson,1993），也有认为细根生产量在林分达到成熟初期达到最大（李凌浩,1998），也有认为细根生产量随着演替的进行而增加（Grier et al,1981），细根生产量随着植被演替而呈现不同的变化规律，这可能与演替过程中地上植被和土壤环境因子相关。

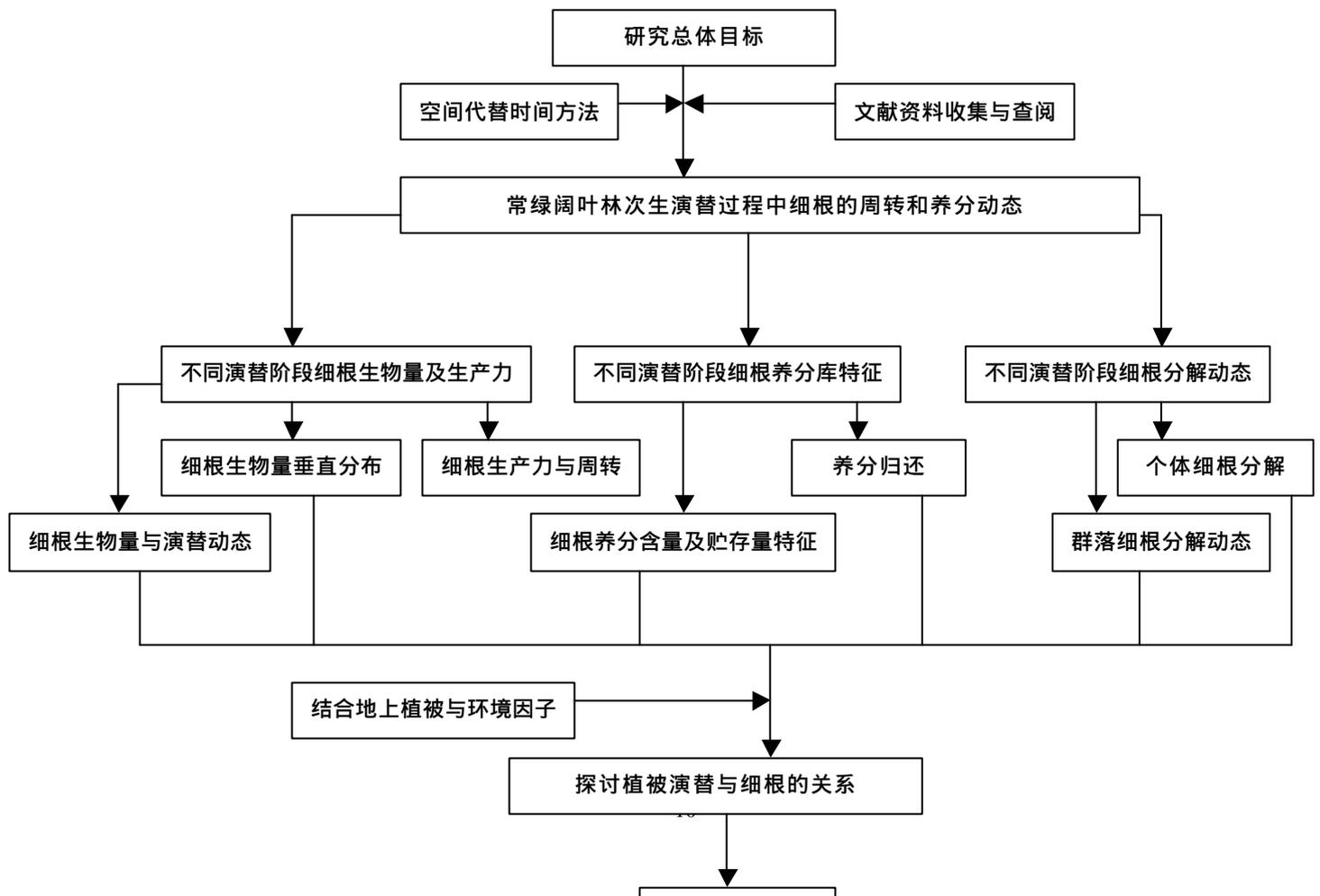
3 本文主要研究内容

- （1）常绿阔叶林不同演替阶段细根的生物量及生产力。
- （2）常绿阔叶林不同演替段细根的养分贮存量及养分归还。
- （3）常绿阔叶林不同演替段细根的分解动态。

4 研究技术路线及拟解决的关键问题

4.1 研究技术路线

本文在综合研究文献基础上，结合本地区实际情况，提出如下研究技术路线：



4.2 拟解决的关键问题

常绿阔叶林演替过程中细根周转特征及生产力的研究,揭示细根在群落演替中的作用。

5 样地概况

研究地点位于浙江省宁波鄞州区天童国家森林公园,详细资料见文献(宋永昌,1995)。由于人为长期干扰破坏,森林公园现有的植被类型大都为次生植被类型,形成以铁芒萁-山鸡椒稀疏群落(*Dicranopteris pedata* Nakaike-*Litsea cubeba* var. *formosana* Comm.)为演替初始阶段的不同植被演替系列,主要包括 榿木-石栎群落(*Loropetalum chinense*-*Lithocarpus glaber* Comm.)、马尾松群落(*Pinus massoniana* Comm.)、马尾松-木荷群落(*Pinus massoniana*-*Schima superba* Comm.)、木荷群落(*Schima superba* Comm.)、栲树群落(*Castanopsis fargesii* Comm.)等六个阶段。本研究以此六个演替阶段作为实验样地,采用空间序列代替时间序列的方法,调查不同演替阶段细根的特征。各样地情况如下:

(1) 铁芒萁-山鸡椒稀疏群落

位于防火道左侧(北纬 29° 48.017, 东经 121° 47.180),海拔 157 m,坡度 19°。该样地下方存留大量的坟墓,为了森林防火,林场又砍伐一条带状防火道,每年该防火道清理一次,本样地则设置在该带状防火道上,样地上面的枯枝落叶已被清理,保存砍伐时留下的植物根桩,木荷、石栎和苦槠的根桩已经开始长出萌生枝条,地面上生长了较多铁芒萁和山鸡椒,另有少量的乌饭、五节芒和苦竹。

(2) 榿木-石栎群落

榿木-石栎群落位于防火道左侧(北纬 29° 48.026, 东经 121° 47.168),铁芒萁-山鸡椒稀疏群落上方,海拔 164 m,坡度 22°。群落分为三层:第一层主要以幼龄阶段的木荷、马尾松和石栎组成,高度为 5~7m,层盖度约 60%,第二层主要由榿木、苦槠、石栎和山矾等常绿阔叶树种组成,高度 2~4m,层盖度 100%,第三层为草本植物层。地表枯枝落叶较厚,分解较快,土壤比较肥沃。

(3) 马尾松群落

马尾松群落位于防火道右侧(北纬 29° 47.970, 东经 121° 47.206),海拔 135m,坡度 15°。群落可分为三层:乔木层,主要以针叶树种马尾松和常绿阔叶

树木荷组成，高度为 10~16m，盖度为 80%。灌木层，层高度为 1.5~5m，盖度为 100%，主要由檫木、马银花和山矾组成，第三层为草本植物层。地表枯枝落叶较薄，主要以马尾松落叶，分解差，土壤贫瘠。

(4) 马尾松木荷群落

马尾松木荷群落位于跑马场后方（北纬 29°47.982，东经 121°47.284），海拔 121 m，坡度 80。群落分为三层：乔木层，又可分为两个亚层，其中第一亚层主要以针叶树种马尾松和落叶树种枫香组成，层高度为 14~20m，盖度 40%；第二亚层为木荷和赤皮稠亚层，高度 10~14m，盖度 30%。灌木层，高度为 1.5~5m，盖度 100%，主要以连蕊茶、山矾和隔药柃为主，第三层为草本植物层。地表枯枝落叶较马尾松林厚，分解也较差，土壤贫瘠。

(5) 木荷群落

木荷群落位于天童生态试验站右方 300m 左右、林道上方 100m 处（北纬 29°47.156，东经 121°47.303），海拔 163 m，坡度 200。群落可分为三层：乔木层，主要以木荷为主，另有少量的马尾松、石栎和苦槠，层高度为 12~20m，盖度为 80%。灌木层主要以马银花、山矾和窄基红褐柃为主，伴有老鼠矢、黑山山矾和连蕊茶等常绿灌木，层高度为 1.5~5m，盖度 100%，第三层为草本植物层。群落中枯枝落叶较厚，分解较快，土壤较肥沃。

(6) 栲树群落

栲树群落位于天童实验站后面 300 米处（北纬 29°48.290，东经 121°47.205），海拔 196 m，坡度 260，是该地区常绿阔叶林的顶级群落。群落分为三层：乔木层，主要以栲树组成，另有少量的木荷和枫香，层高度为 15~25 m，盖度 90%。灌木层，层高度为 1.5~5 m，盖度 100%，主要以连蕊茶、细齿柃和羊舌树组成，另有一些栲树幼树和交让木，第三层为草本植物层。群落地表凋落物较厚，分解较快，土壤肥沃。

第二章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的生物量及其生产力

细根在森林生态系统初级生产力分配中占有较大的比例,并在养分循环中起着重要的作用(Joslin and Henderson,1987;Nadelhoffer and Raich,1992;李凌浩,1998),近10年,我国对不同森林生态系统细根生物量和生产力变化规律开展了大量的研究(郑金平,2004;杨玉盛,2003;单建平,1993;廖利平,1995;李凌浩,1998;温达志,1999),但对人类干扰后森林恢复和演替过程中细根生物量和周转规律的研究较少。受损森林生态系统在发生次生演替过程中,由于植物种类和比例的变化,以及环境因子的改变,不同演替阶段细根的生物量分布格局、时间动态以及生产和周转也必然发生一定的变化。本章主要对以下几个问题进行探讨:1 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的时间动态;2 常绿阔叶林次生林演替过程中细根生物量的空间分布;3 常绿阔叶林演替过程中细根的生物量格局;4 常绿阔叶林不同演替阶段细根的生产力和周转。

1 研究方法

1.1 细根取样

研究细根周转有很多种方法,大体可分为两类,直接测定的方法有:挖掘法、整段标本法、根钻法、土柱法、剖面法、玻璃壁法、微根管法和生长袋法,间接测定的方法有:氮平衡法、生态系统碳平衡法、碳通量法、淀粉含量法、同位素示踪法和非生物变量相关法等(张小全等,2000)。但目前使用较多的主要为根钻法、生长袋法、根室法和微根管法,每种方法各有其优缺点。尽管根钻法和生长袋法存在一些缺点,但目前大量研究中还是采用这两种方法,本研究采用根钻法。

在不同演替阶段的固定样地周围随机选取一块面积 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的研究样地,2004年4月、7月、11月和2005年2月,用内径 7.6cm 土钻在样地上坡、中坡和下坡,分三个坡位钻取土芯,每个坡位上选取5个点,将获取的土芯按取样器的刻度分三层(样地的取样深度如表2-1所示),用塑料袋将每层土样封装、贴上标签带回实验室,将取回土样用自来水浸泡、冲洗、过筛,捞出根系并分成2个径级($<2\text{mm}$, $>2\text{mm}$),根据根系外形、颜色和弹性来区分活、死根(McClaugherty,1982),将区分好的各样品置于 80°C 烘箱烘干至恒重后称重,得

出干重，折合成生物量。

表 2-1 不同样地的取样深度

Table 2-1 The soil depth of sampling in different plots

群落类型 Community type	采样深度 Sampling depth		
	上层 (cm)	中层(cm)	下层(cm)
铁芒萁-山鸡椒稀疏群落 <i>D.pe+L.cu</i> comm.	0~10	10~20	20~45
檫木-石栎群落 <i>L.ch+L.gl</i> comm.	0~10	10~20	20~45
马尾松群落 <i>P.ma</i> comm.	0~10	10~20	20~30
马尾松-木荷群落 <i>P.ma+S.su</i> comm.	0~10	10~20	20~35
木荷群落 <i>S.su</i> comm.	0~10	10~20	20~45
栲树群落 <i>C.fa</i> comm.	0~10	10~20	20~50

注：马尾松群落和马尾松-木荷群落土壤较浅，取样深度降低

1.2 细根现存量、净生产力和周转率的计算

细根现存量 ($t \cdot hm^{-2}$) = 平均每根土芯根细根干重 (g) $\times (t/10^6) / [p (7.6/2)^2 \times (hm^{-2}/10^8)]$

细根净生产力和周转率通过以下公式计算 (McClaugherty et al, 1982):

$$M = M_{max} - M_{min} + D$$

$$P = P_{max} - P_{min} + M$$

$$T = P/Y$$

其中，M 为细根年死亡量，P 为细根年净生产力，D 为细根年分解量（细根分解速率见第四章），T 为细根周转率 (times. a^{-1})； M_{max} 、 M_{min} 为死细根现存量最大值和最小值； P_{max} 、 P_{min} 分别为活细根现存量的最大值、最小值；Y 为活细根现存量的平均值。

1.3 统计分析

利用 SPSS11.5 统计分析软件的 ANOVA 过程对不同演替阶段细根生物量差异进行成组设计的方差分析，Independent-samples T Test 对两样本均数的比较进行 T 检验。

2 结果

2.1 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的时间动态

常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量时间动态如表 2-2 所示，不同演替阶段活细根和死细根生物量都在 11 月份和 2 月份较低，细根生物量高峰期都出现在

4 月份和 7 月份，细根生物量高峰季节与低峰季节差异非常显著 ($P < 0.01$)

表 2-2 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量时间动态

Table 2-2 The seasonal dynamics of fine root biomass in different succession stages of evergreen-broad leaved forest

月份 Month	细根类型 Fine root type	铁芒萁-山鸡椒稀疏群落 <i>D.pe + L.cu</i> comm.	榿木-石栎群落 <i>L.ch + L.gl</i> comm.	马尾松群落 <i>P.ma</i> comm.	马尾松-木荷群落 <i>P.ma + S.su</i> comm.	木荷群落 <i>S.su</i> comm.	栲树群落 <i>C.fa</i> comm.
2 月份 February	活细根 Live fine root	0512(0214)	0.732(0227)	0.415(0117)	1.067(0554)	1.567(0712)	1.980(0994)
	死细根 Dead fine root	0.795(0431)	0.912(0335)	0.078(0036)	0.098(0044)	0.456(0312)	0.545(0316)
	总细根 Total	1.307(0516)	1.664(0447)	0.493(0118)	1.165(0443)	2.023(0884)	2.525(1.095)
4 月份 April	活细根 Live fine root	1.214(0.741)	3.063(1.123)	1.187(0.605)	1.533(0.534)	2.462(0.976)	2.291(1.156)
	死细根 Dead fine root	2.467(1.096)	2.224(1.322)	0.546(0.422)	0.467(0.523)	0.787(0.436)	0.628(0.655)
	总细根 Total	3.681(1.439)	5.287(2.036)	1.733(0.685)	2.000(0.835)	3.249(1.153)	2.919(1.275)
7 月份 July	活细根 Live fine root	1.897(1.674)	3.430(2.140)	1.237(0.440)	1.662(0.461)	3.023(0.639)	3.930(0.720)
	死细根 Dead fine root	1.614(0.981)	1.426(0.919)	0.699(0.279)	0.253(0.300)	1.203(0.503)	1.128(0.492)
	总细根 Total	3.511(1.524)	4.856(2.941)	1.936(0.518)	1.915(0.666)	4.226(0.887)	5.058(0.973)
11 月份 November	活细根 Live fine root	0.429(0.392)	0.636(0.933)	0.345(0.335)	0.957(0.449)	1.143(0.558)	1.852(0.951)
	死细根 Dead fine root	0.664(0.412)	0.718(0.559)	0.086(0.091)	0.084(0.081)	0.216(0.162)	0.450(0.295)
	总细根 Total	1.093(0.539)	1.354(1.160)	0.431(0.343)	1.041(0.443)	1.359(0.614)	2.302(0.988)

注：括号内为标准差

2.2 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量的空间分布

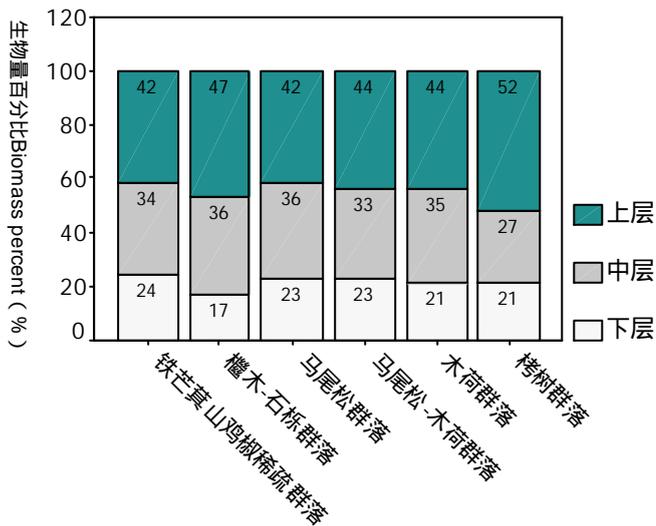


图2-1常绿阔叶林不同演替阶段活细根的垂直分布

Fig.2-1 The vertical distribution of live fine roots in different succession stages

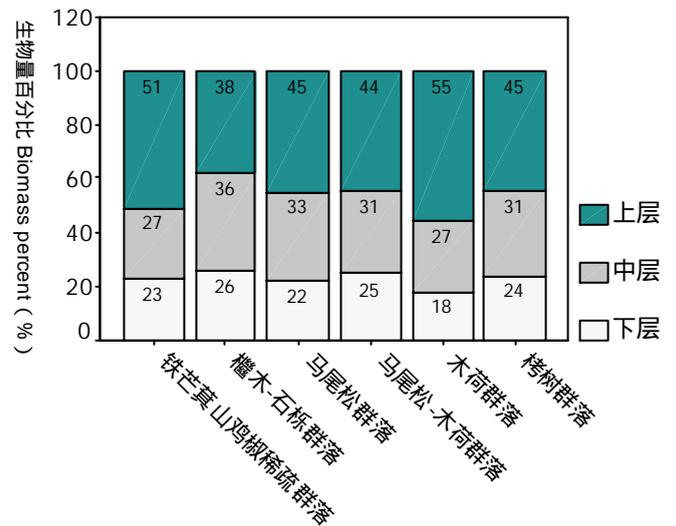


图2-2常绿阔叶林不同演替阶段死细根的垂直分布

Fig.2-2 The vertical distribution of dead fine roots in different succession stages

如图 2-1、图 2-2 可见：各演替阶段活细根和死细根生物量随着土层深度的增加而明显下降，上层与下层细根生物量具有显著差异 ($P < 0.05$)，细根生物量主要集中在上层和上层 (0-20cm) 土层中，这两层细根生物量占总生物量的 80% 左右，其中上层细根生物量占总生物量的 50% 左右，细根在土壤上层富集程度随演替进行无明显规律。

2.3 常绿阔叶林演替过程中细根的生物量

常绿阔叶林细根生物量随着演替的动态变化如图 2-3 所示，总的趋势来看，细根生物量在不同演替阶段呈现“波浪型”变化，从铁芒萁-山鸡椒稀疏群落到櫟木-石栎群落，活细根、死细根和细根总平均生物量处于上升的趋势，但从櫟木-石栎群落到马尾松群落阶段，活细根、死细根和总细根生物量急剧下降，随后细根生物量随着演替进行呈现上升的趋势，马尾松群落在整个演替过程中最低，ANOVA 分析结果表明 (表 2-3)，每个季节不同演替阶段活细根、死细根和细根总生物量差异非常显著 ($P < 0.01$)；活细根生物量与死细根生物量在不同演替阶段存在显著差异 ($P < 0.05$)，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落中活细根生物量低于死细根生物量，其余五个群落活细根生物量均高于死细根生物量。

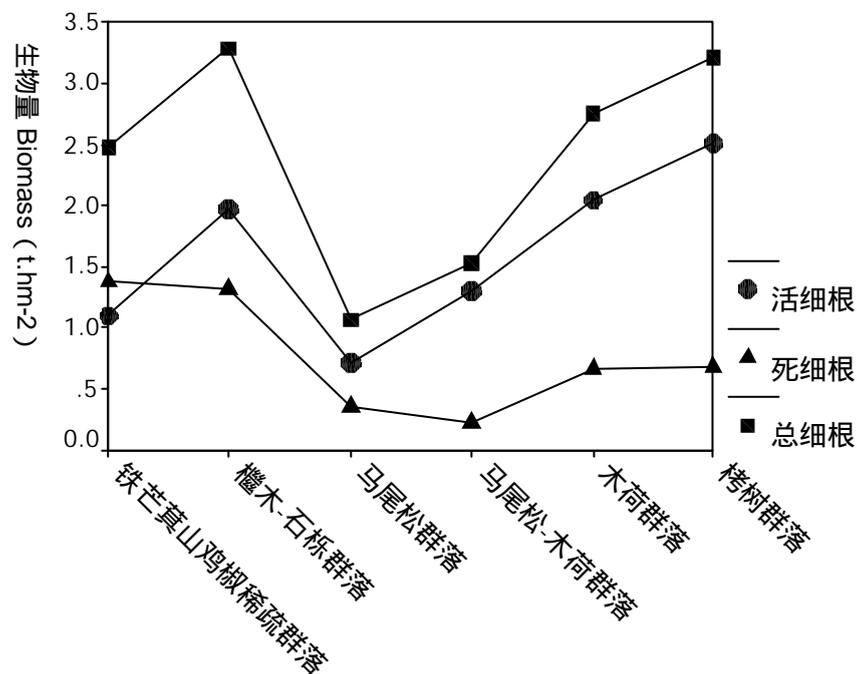


图 2-3 常绿阔叶林在不同演替阶段细根生物量动态
Fig.2-3 The dynamics of fine roots biomass in different succession stages of evergreen-broad leaved forest

表2-3 常绿阔叶林不同演替阶段细根生物量差异方差分析
 Table2-3 The differences of fine root biomass in different succession stages

变异来源	Origin of mutation		方差总和 Sum of squares	自由度 Df	均方 Mean square	F	P	
4 月份 April	活细根 Live fine root	组间	54.521	5	10.904	14.131	0.000	
		组内	62.504	81	0.772			
		总变异	117.025	86				
	死细根 Dead fine root	组间	87.268	5	17.454	25.703	0.000	
		组内	55.004	81	0.679			
		总变异	142.273	86				
	总细根 Total	组间	187.817	5	37.563	21.758	0.000	
		组内	139.838	81	1.726			
		总变异	327.656	86				
	7 月份 July	活细根 Live fine root	组间	84.326	5	16.865	11.611	0.000
			组内	122.009	84	1.452		
			总变异	206.335	89			
死细根 Dead fine root		组间	34.022	5	6.804	16.526	0.000	
		组内	34.586	84	0.412			
		总变异	68.609	89				
总细根 Total		组间	172.131	5	34.426	15.392	0.000	
		组内	187.879	84	2.237			
		总变异	360.01	89				
11 月份 November		活细根 Live fine root	组间	103.017	5	20.603	47.652	0.000
			组内	35.455	82	0.432		
			总变异	138.472	87			
	死细根 Dead fine root	组间	7.889	5	1.578	15.765	0.000	
		组内	8.207	82	0.1			
		总变异	16.096	87				
	总细根 Total	组间	143.379	5	28.676	51.505	0.000	
		组内	45.654	82	0.557			
		总变异	189.033	87				
	2 月份 February	活细根 Live fine root	组间	143.675	5	22.779	32.564	0.000
			组内	43.342	84	0.743		
			总变异	187.017	89			
死细根 Dead fine root		组间	10.687	5	2.453	16.892	0.000	
		组内	8.345	84	0.245			
		总变异	19.032	89				
总细根 Total	组间	178.987	5	33.785	57.789	0.000		
	组内	45.143	84	0.764				

2.4 常绿阔叶林不同演替阶段细根的生产力和周转

常绿阔叶林不同演替阶段细根的年净生产力、死亡量、分解量和周转率如表 2-4 所示，细根年净生产力、年死亡量和年分解量在常绿阔叶林演替初期（铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和欆木-石栎群落）最高，演替后期阶段（木荷群落和栲树群落）次之，而处于演替中期的针叶林（马尾松群落）和针阔混交林（马尾松木荷群落）最低；细根的周转反映了细根更新一次所需的时间，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落细根的周转速度最快，更新一次所需时间为 0.278 年，欆木-石栎群落和马尾松群落细根周转也比较快，更新一次所需时间为 0.4 年和 0.439 年，马尾松木荷群落和木荷群落细根更新一次所需时间为 0.916 年，而栲树群落细根更新一次所需时间为 1.439 年。

表 2-4 不同演替阶段细根的年死亡量、年分解量、年净生产力和周转率

Table 3-1 Annual mortality, mass loss, net production and turnover rate of fine roots

群落类型 Community type	年死亡量(t.hm ⁻²) Annual mortality	年分解量(t.hm ⁻²) Annual loss	年净生产力(t.hm ⁻²) Annual net production	年周转率(times/yr) Annual turnover rate
铁芒萁-山鸡椒稀疏群落 <i>D.pe+L.cu</i> comm.	2.650	0.847	4.118	4.065
欆木-石栎群落 <i>L.ch+L.gl</i> comm.	2.111	0.605	4.904	2.494
马尾松群落 <i>P.ma</i> comm.	0.735	0.122	1.627	2.279
马尾松-木荷群落 <i>P.ma+S.su</i> comm.	0.472	0.089	1.177	0.902
木荷群落 <i>S.su</i> comm.	1.331	0.344	2.237	1.092
栲树群落 <i>C.fa</i> comm.	1.086	0.407	1.747	0.695

3 小结与分析

本研究中细根生物量的高峰期出现在春季和夏季，秋季和冬季较低，细根生物量的时间动态与该地区气候条件密切相关，本研究区域为典型亚热带气候带，在冬季，温度较低和降雨量少，细根生长缓慢，细根生物量最低，随着春季来临，温度和降雨不断增加，土壤湿润，植物光合作用增强，细根的生长开始加速，细根生物量处于上升趋势，到秋季，随着降雨和温度的下降，植物光合作用减弱，细根生物量也开始下降。

森林在受到干扰后（如砍伐），细根的生物量会发生明显的变化

(Travis, 2000), 本研究铁芒萁-山鸡椒稀疏群落是在櫟木-石栎群落采伐后形成的, 通过对采伐前后细根生物量差异分析可知, 森林采伐后, 活细根生物量急剧下降, 死细根表现为上升的趋势, 铁芒萁-山鸡椒稀疏群落群落中死细根生物量高于活细根生物量。细根生物量与群落结构密切相关, 但在群落演替过程中存在一定的波动性, 从櫟木-石栎群落演替到马尾松群落阶段, 细根生物量急剧下降, 但从马尾松群落向栲树群落演替过程中, 群落细根生物量逐渐升高, 栲树群落细根生物量最高。

细根的死亡和地上部分凋落物是植物返还土壤有机质的重要途径, 将本研究中细根的年死亡量与张庆费 (1999) 对凋落物的研究结果进行比较后发现: 虽然马尾松群落细根死亡量在演替过程中最低, 但马尾松群落地上凋落物量也很低, 马尾松群落细根年死亡量占地上部分年凋落物总量的 52.65% (细根年死亡量/凋落物量), 所占比例最高, 其次为马尾松木荷群落, 所占比例为 34.52%, 木荷群落和栲树群落分别为 26.12% 和 32.9%。由此可见, 细根特征在演替阶段中的作用在以前的研究中被忽略, 其详细特征和作用在第五章讨论。

细根周转是细根生长、衰老、死亡、脱落和再生长的过程, 细根周转主要由细根寿命决定。准确测定细根的周转率非常困难, 目前大多采用细根净生产力与活细根生物量的比值来间接测定, 从细根周转率计算可知, 活细根和死细根生物量季节差异越大, 细根年分解量越高, 细根周转率也就越高, 而活细根平均生物量越高, 细根周转率就越低。虽然演替前期群落活细根年平均生物量较高, 但细根净生产力很高, 因此演替前期群落细根周转率较高; 而演替后期群落活细根平均生物量最高, 细根净生产力较低, 因此演替后期细根周转率最低, 甚至比演替中期马尾松群落低, 演替后期常绿阔叶林细根的周转率在整个演替过程中最低, 这可能与细根寿命有关, 从活细根生物量可知, 演替后期群落活细根生物量在整个演替过程中最高, 因此演替后期群落细根寿命可能较长, 细根寿命有待于进一步的研究。

表层细根的高度富集对于保护该地区山地生态环境和植被恢复具有重要意义, 该地区植被在人为过度干扰下, 易诱发严重的水、土、肥流失, 表层细根生物量的高度富集有利于高效、快速吸收来自凋落物分解释放的养分和截获林冠淋溶的养分, 并具有很高的涵养水源、保持水土功能, 因此, 本地区地带性常绿阔叶林具有高效率的养分和水分保持机制。另外, 细根表层富集对该地区森林采伐后恢复过程中土壤肥力恢复具有重要作用, 该地区森林采伐后, 保护残留根系, 尽量减少对表层土壤的干扰促进表层细根的生长, 对于该地区森林管理中可持续经营具有一定的意义。

第三章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的营养贮存

由于细根的营养浓度高、寿命短、周转速度快，每年通过细根枯死向土壤归还的营养数量较大（杨玉盛，2002），细根死亡是有机质和养分，尤其是 N、P 等元素向土壤归还的主要途径，本文第二章研究结果表明该地区细根的年死亡量是地上年凋落物量的 30% 左右，可见细根周转形成的地下凋落物是土壤中 N、P 的重要来源，在研究森林生态系统养分循环过程中，细根的营养库是森林生态系统养分库的重要组成部分，因此，细根营养的研究具有重要的生态学意义。

本章以细根 N、P 养分现存量为研究对象，主要针对以下几个问题进行探讨：1 不同演替阶段细根 N、P 养分含量；2 不同演替阶段细根 N、P 养分库特征；3 常绿阔叶林不同演替阶段细根的营养归还和释放特征。

1 研究方法

1.1 细根样品的提取

利用土钻法对每个季节不同演替阶段获取的细根，烘干称重后保存。由于每个取样点细根量不够化学分析的需要，因此将上坡、中坡和下坡每一层的细根样品混合，将混合的样品粉碎、过筛后装瓶待分析。

1.2 N、P 含量的测定

细根消解采用德国产（VELP）温控消解炉进行，消解方法采用标准凯氏法（Amin, 2004），称取 0.2g 待分析样品（精确到 0.0001 g）放入消解管中，每只管中加入 5ml 浓硫酸，称取 2.5g 硫酸钠/硫酸铜（按 10 : 1 混合）加入管中，摇匀，在 375℃ 下消解 3 小时，冷却后转移到容量瓶中（要反复冲洗消解管）定容，然后采用 Skalar 流动注射分析仪进行 N、P 分析。

1.3 计算方法

1.3.1 细根 N、P 养分贮存量

细根 N、P 养分的年贮存量是一年每次取样细根 N、P 养分现存量的平均值（每次取样细根 N、P 养分现存量取为取样细根生物量的现存量与 N、P 养分浓度的乘积）。

1.3.2 养分年归还量和年释放量

用死细根的平均养分含量乘以细根的年死亡量就是细根养分年归还量,细根养分年释放量为死细根年分解后养分归还到土壤中的养分。

1.4 统计分析

利用 SPSS11.5 中 Independent-samples T Test 对两样本均数的比较进行 T 检验。

2 结果

2.1 不同演替阶段细根 N、P 含量及季节变化

如表 3-1 所示,不同演替阶段细根的 N 含量存在一定的差异,在演替前期,铁芒萁-山鸡椒稀疏群落与榿木-石栎群落 N 含量差异显著 ($P<0.05$),铁芒萁-山鸡椒稀疏群落比榿木-石栎群落高,从榿木-石栎群落向栲树群落演替过程中,群落活细根和死细根 N 含量随演替进程逐步升高,栲树群落 N 含量在演替过程中最高,栲树群落活细根和死细根 N 含量与铁芒萁-山鸡椒稀疏群落差异不显著 ($P>0.05$),与其它群落差异显著 ($P<0.05$),不同演替阶段细根 P 含量无显著差异 ($P>0.05$)。

就季节动态来看(表 3-1),除铁芒萁-山鸡椒稀疏群落外,其它五个群落细根 P 含量季节变化模式相似,2 月份养分含量比较低,之后开始升高,在 7 月份或 11 月份达到最高,铁芒萁-山鸡椒稀疏群落在 4 月份和 11 月份养分含量都比较高;演替前期群落细根 N 含量随季节变化模式与 P 相似,而演替后期群落细根 N 含量峰值比演替前期群落提前,峰值出现在 4 月份,N、P 含量最高季节与最低季节差异显著 ($P<0.05$)。

从表 3-1 可以看出,群落细根 N、P 含量随土层深度变化明显,上层和中、下层细根 N、P 含量差异显著 ($P<0.05$),细根 N、P 含量随土壤深度的增加而降低;活细根和死细根 N、P 含量差异不明显 ($P>0.05$),本研究中大部分死细根 N、P 含量略低于活细根,少量略高于活细根。

2.2 不同演替阶段细根 N、P 养分贮存量

从表 3-2 可以看出,常绿阔叶林不同演替阶段细根 N、P 的养分贮存量在演替前期阶段的榿木-石栎群落和演替后期的栲树群落较高。在演替前期阶段,群落细根 N、P 养分贮存量表现为先增加后减少,即榿木-石栎群落细根 N、P 养分贮存量最大,N 贮存量分别是铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和马尾松的 1.66 倍和 5.53 倍,P 贮存量为 2.02 倍和 4.66 倍,从马尾松群落向栲树群落演替过程中,群落细根 N、P 的贮存量呈现上升的趋势,到栲树群落,细根的 N、P 贮存量达到最大。

表 3-1 不同演替阶段细根 N、P 含量及季节变化

Table 3-1 The seasonal dynamics of nutrient content in different succession stage

群落类型 Community type	土层 Soil class	种类 Fine root type	种类								
			2 月份 February		4 月份 April		7 月份 July		11 月份 November		
			P%	N%	P%	N%	P%	N%	P%	N%	
铁芒箕-山鸡椒稀 疏群落 <i>Dpe+Lcu</i> comm.	上层	活细根	0.038 (0.004)	0.989 (0.221)	0.046 (0.016)	1.026 (0.738)	0.038 (0.001)	1.106 (0.223)	0.040 (0.000)	1.519 (0.000)	
		死细根	0.035 (0.012)	0.776 (0.114)	0.042 (0.002)	0.820 (0.191)	0.032 (0.001)	0.732 (0.317)	0.038 (0.006)	0.941 (0.160)	
	中层	活细根	0.035 (0.008)	0.875 (0.098)	0.039 (0.009)	0.788 (0.241)	0.034 (0.002)	0.727 (0.144)	0.038 (0.004)	1.318 (0.139)	
		死细根	0.032 (0.009)	0.765 (0.212)	0.038 (0.008)	0.663 (0.253)	0.024 (0.001)	0.714 (0.088)	0.028 (0.002)	0.641 (0.114)	
	下层	活细根	0.031 (0.006)	0.723 (0.067)	0.038 (0.007)	0.663 (0.025)	0.032 (0.002)	0.525 (0.073)	0.038 (0.004)	1.129 (0.173)	
		死细根	0.032 (0.004)	0.712 (0.116)	0.040 (0.009)	0.543 (0.024)	0.032 (0.001)	0.694 (0.235)	0.028 (0.002)	0.544 (0.240)	
	櫟木-石栎群落 <i>Lch+Lgl</i> comm.	上层	活细根	0.034 (0.003)	0.432 (0.056)	0.042 (0.014)	0.576 (0.319)	0.046 (0.006)	1.133 (0.542)	0.059 (0.010)	1.235 (0.226)
			死细根	0.033 (0.002)	0.412 (0.045)	0.036 (0.009)	0.734 (0.151)	0.051 (0.009)	1.280 (0.165)	0.045 (0.011)	0.994 (0.175)
		中层	活细根	0.032 (0.009)	0.376 (0.085)	0.033 (0.004)	0.372 (0.195)	0.046 (0.004)	1.083 (0.068)	0.054 (0.015)	1.131 (0.149)
			死细根	0.031 (0.006)	0.354 (0.056)	0.034 (0.008)	0.372 (0.235)	0.043 (0.015)	1.071 (0.222)	0.050 (0.024)	0.820 (0.415)
		下层	活细根	0.030 (0.009)	0.289 (0.079)	0.029 (0.020)	0.295 (0.179)	0.043 (0.000)	1.033 (0.000)	0.042 (0.008)	0.870 (0.339)
			死细根	0.031 (0.013)	0.334 (0.086)	0.037 (0.003)	0.226 (0.070)	0.039 (0.020)	1.017 (0.097)	0.039 (0.008)	0.437 (0.022)
马尾松群落 <i>P.ma</i> comm.	上层	活细根	0.041 (0.003)	0.432 (0.045)	0.045 (0.017)	0.484 (0.089)	0.058 (0.007)	1.474 (0.465)	0.055 (0.005)	0.956 (0.084)	
		死细根	0.040 (0.007)	0.476 (0.123)	0.043 (0.015)	0.550 (0.355)	0.043 (0.000)	0.550 (0.000)	0.043 (0.000)	0.550 (0.000)	
	中层	活细根	0.039 (0.006)	0.334 (0.089)	0.038 (0.008)	0.352 (0.089)	0.046 (0.009)	1.263 (0.435)	0.048 (0.007)	0.763 (0.048)	
		死细根	0.037 (0.003)	0.379 (0.136)	0.038 (0.042)	0.589 (0.304)	0.038 (0.000)	0.762 (0.000)	0.038 (0.000)	0.352 (0.000)	
	下层	活细根	0.036 (0.005)	0.317 (0.043)	0.035 (0.005)	0.342 (0.113)	0.044 (0.009)	1.150 (0.354)	0.046 (0.009)	0.873 (0.193)	
		死细根	0.032 (0.014)	0.335 (0.099)	0.035 (0.023)	0.262 (0.098)	0.045 (0.000)	1.042 (0.000)	0.035 (0.000)	0.342 (0.000)	

(续表 3-1)

		0.046	1.045	0.048	1.301	0.055	1.478	0.055	1.478
	活细根	(0.007)	(0.056)	(0.004)	(0.067)	(0.006)	(0.134)	(0.000)	(0.000)
		0.044	0.887	0.046	0.694	0.066	1.273	0.046	0.694
	上层 死细根	(0.005)	(0.176)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.040	0.823	0.040	0.896	0.044	1.358	0.044	1.358
	活细根	(0.005)	(0.074)	(0.002)	(0.084)	(0.008)	(0.089)	(0.000)	(0.000)
		0.039	0.801	0.042	0.775	0.045	1.375	0.042	0.775
	中层 死细根	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.036	0.790	0.037	0.634	0.032	0.535	0.032	0.535
	活细根	(0.002)	(0.118)	(0.000)	(0.000)	(0.004)	(0.076)	(0.000)	(0.000)
马尾松木荷群落		0.033	0.775	0.040	0.693	0.050	0.992	0.040	0.693
<i>P.ma+S.su</i> comm.	下层 死细根	(0.000)	(0.000)	(0.007)	(0.012)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.050	1.108	0.053	1.408	0.039	0.870	0.047	0.842
	活细根	(0.008)	(0.212)	(0.007)	(0.177)	(0.003)	(0.127)	(0.003)	(0.045)
		0.049	1.067	0.051	1.796	0.041	0.996	0.045	0.950
	上层 死细根	(0.006)	(0.089)	(0.017)	(0.132)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.045	1.045	0.040	1.301	0.035	0.723	0.046	0.779
	活细根	(0.009)	(0.076)	(0.009)	(0.109)	(0.003)	(0.153)	(0.000)	(0.000)
		0.044	0.998	0.045	1.822	0.037	0.782	0.040	0.746
	中层 死细根	(0.004)	(0.085)	(0.019)	(0.493)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.042	0.993	0.042	1.438	0.035	0.594	0.021	0.463
	活细根	(0.006)	(0.078)	(0.009)	(0.774)	(0.002)	(0.033)	(0.002)	(0.251)
木荷群落		0.043	0.990	0.044	1.295	0.044	1.295	0.038	0.385
<i>S.su</i> comm.	下层 死细根	(0.006)	(0.065)	(0.026)	(0.422)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.061	1.443	0.068	2.058	0.088	0.961	0.091	1.385
	活细根	(0.009)	(0.076)	(0.008)	(0.526)	(0.000)	(0.000)	(0.010)	(0.232)
		0.058	1.227	0.036	1.426	0.078	1.123	0.124	1.500
	上层 死细根	(0.006)	(0.065)	(0.013)	(0.405)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.041	1.212	0.044	1.802	0.066	0.961	0.079	1.269
	活细根	(0.004)	(0.134)	(0.007)	(0.889)	(0.000)	(0.000)	(0.017)	(0.084)
		0.036	1.564	0.037	1.772	0.036	0.956	0.082	1.245
	中层 死细根	(0.005)	(0.098)	(0.005)	(0.466)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
		0.038	1.089	0.040	1.398	0.051	0.706	0.059	1.131
	活细根	(0.006)	(0.058)	(0.009)	(0.543)	(0.000)	(0.000)	(0.010)	(0.149)
栲树群落		0.038	1.212	0.045	1.589	0.033	0.764	0.045	0.926
<i>C.fa</i> comm.	下层 死细根	(0.006)	(0.086)	(0.025)	(0.387)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)

注：括号内为标准差

2.3 不同演替阶段细根养分年归还量

如表 3-3 所示，演替前期和演替后期群落细根 N、P 养分年归还量和养分年释放量都比较高，马尾松-木荷群落最低，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落细根的年归还量和年释放量最高。

表 3-2 不同演替阶段细根 N、P 养分贮存量 (Kg.hm⁻²)

Table 3-2 The average nutrient stock of fine roots in different succession stages

细根类型 Fine roots type	土层 soil class	铁芒箕-山鸡椒稀疏群落 D.pe+L.cu comm.		欏木-石栎群落 L.ch+L.gl comm.		马尾松群落 P.ma comm.		马尾松木荷群落 P.ma+S.su comm.		木荷群落 S.su comm.		栲树群落 C.fa comm.	
		N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
活细根 Live fine roots	上层	4.595	0.166	13.203	0.653	2.293	0.135	7.491	0.288	9.893	0.437	17.782	0.885
	中层	3.303	0.139	5.897	0.328	1.387	0.097	3.366	0.135	6.669	0.258	8.615	0.373
	下层	1.923	0.095	4.436	0.256	1.078	0.063	1.516	0.085	3.984	0.159	5.027	0.211
	合计	9.821	0.401	23.536	1.237	4.758	0.296	12.373	0.507	19.7	0.853	31.424	1.469
死细根 Dead fine roots	上层	5.852	0.275	4.687	0.222	0.59	0.046	0.899	0.052	2.789	0.101	3.875	0.189
	中层	2.549	0.12	3.288	0.213	0.45	0.03	0.609	0.028	1.643	0.051	3.108	0.383
	下层	1.694	0.096	1.579	0.124	0.182	0.015	0.467	0.026	0.938	0.037	2.209	0.073
	合计	10.094	0.491	9.554	0.559	1.222	0.091	1.975	0.106	5.37	0.189	9.192	0.646
总细根 Total	上层	10.447	0.442	17.89	0.875	2.883	0.182	8.39	0.339	12.682	0.538	21.658	1.074
	中层	5.851	0.259	9.186	0.541	1.836	0.127	3.975	0.163	8.313	0.309	11.722	0.756
	下层	3.617	0.191	6.015	0.38	1.261	0.078	1.983	0.11	4.921	0.196	7.236	0.284
	合计	19.915	0.892	33.09	1.797	5.98	0.386	14.348	0.613	25.069	1.042	40.616	2.115

表 3-3 不同演替阶段细根养分的年归还量和年释放量

Table 3-3 The nutrient mass annual returned and annual released in different succession stages

群落类型 Community type	年归还量 (Kg.hm ⁻² .a ⁻¹) Annual returned mass		年释放量(Kg.hm ⁻² .a ⁻¹) Annual released mass	
	N	P	N	P
	铁芒箕-山鸡椒稀疏群落 D.pe+L.cu comm.	18.868	0.875	6.031
欏木-石栎群落 L.ch+L.gl Comm.	14.158	0.823	4.06	0.236
马尾松群落 P.ma Comm.	10.893	0.823	3.122	0.048
马尾松-木荷群落 P.ma+S.su Comm.	4.102	0.208	0.773	0.040
木荷群落 S.su Comm.	14.854	0.586	3.839	0.147
栲树群落 C.fa Comm.	13.857	0.586	5.193	0.220

3 小结与分析

不同演替阶段细根养分含量的差异可能与土壤环境条件密切相关,据阎恩荣

(未发表数据)对该地区不同演替阶段的研究结果,土壤养分含量高的环境下其细根的养分含量也相对较高;本研究中活细根与死细根养分含量差异不显著($P>0.05$),这可能与细根死亡后在土壤中分解过程有关,关于细根分解过程中养分含量的变化过程在第四章讨论,细根衰老过程中可能发生了养分转移(McClaugherty,1982;Nadechoffer,1985;陈光水,2001),但这种养分转移会比较少,通常情况活细根养分含量略低于死细根,本研究中少量死细根 N、P 含量高于活细根,这可能由于死细根在分解过程中养分产生了富集。

细根养分是森林生态系统养分库的重要组成部分,细根的周转对土壤 N 和 C 的贡献比凋落物大 18% - 58% (Vogt et al,1986),可见细根通过死亡、分解将大量的养分归还到土壤中,本文通过对不同演替阶段细根养分归还和养分释放的研究表明,演替初期和演替后期细根的养分归还和养分释放较高,而演替中期阶段较低,这可能与群落演替过程中地上植被组成的变化有关,在常绿阔叶林初期阶段,林分光照条件较好,林下植被丰富,林下植被细根在群落的养分归还中占有重要的位置(杨玉盛,2002),因此,在植被恢复初期,细根的养分归还和释放比较大,到演替中期阶段,森林的郁闭度增强,林下植被减少,此时乔木层细根的养分归还仍然比较低,所以细根的养分归还量非常少,而到演替后期阶段,虽然林下植被细根养分归还比较少,但乔木层优势种细根变得非常发达,细根养分归还量仍比较高。

第四章 常绿阔叶林不同演替阶段细根的分解动态

细根在森林生态系统中的作用如同植物叶片一样重要 (Harris et al,1977;Persson,1979),细根在分解过程中,把大量的养分归还到林地的土壤中 (Vogt et al,1986),细根在分解过程中养分变化是陆地生态系统养分循环的重要组成部分 (Joslin and Henderson,1987),也是森林生态系统地球生物化学循环的重要过程 (Decatanzaro and Kimmins,1985)。尽管细根对维持生态系统养分发挥着重要的作用,但与地上凋落物分解相比,对细根的分解研究要少得多 (Berg,1984;Vogt et al,1986)。影响细根分解的因素很多,如土壤中的动物和微生物、周围的环境条件以及根系本身的特征。受损森林生态系统在恢复过程中,由于地上植物群落组成和立地条件的变化,细根的分解动态和分解过程中向土壤中归还养分的量也必然发生变化。本章针对常绿阔叶林不同演替阶段细根的分解动态和细根分解过程中养分的释放进行研究。

1 研究方法

1.1 细根分解试验

本研究采用的是分解袋法。具体试验步骤如下:随机收集每个群落表层土中 (0-20cm) 的活细根样品,自然风干后,称取风干样品 (换算为干重)3.5g 装入 15 cm×20 cm、孔径为 0.2 mm 的尼龙网袋,将网袋内外编号,埋入各样地中坡,深度近地表层 10 cm 处,每个样地共 25 袋,并放置 30、60、120、180、240d 后,每次随机抽取 5 袋样品,除去附着的土壤、杂物和新长入的细根后,随后快速用清水漂洗,在 80 ℃ 烘箱中烘干至恒重后,用于失重分析和化学成分分析。

另外,根据固定样地群落学调查结果,选择演替过程中一些常见植物为研究对象,常见种细根的取样比较繁琐,为了尽量避免破坏林内植物,沿着路边及竹林中选择一些常见植物,采用挖掘方法获取其细根,马尾松、石栎和苦槠虽然在演替过程中起着非常重要的作用,但由于细根非常少,无法获取足够细根样品进行分解,因此这三个种细根分解试验无法进行。将获取的细根样品自然风干后进行分解,其分解方法和群落细根的分解方法相同,为了剔除环境因子对细根分解的影响,所有对常见种细根的分解试验在木荷林中进行,木荷林位于华东师范大学环境科学系生态试验站右侧约 100m,林道上方 50 米处,林中地表凋落物层较厚,主要以木荷的凋落叶为主。细根分解过程 N、P 测定方法同第四章。

1.2 细根分解过程的拟合

细根的分解过程是一个动态过程,通常情况下,细根的残留率和时间关系不成线性关系,Olson (1963) 提出指数衰减模型描述凋落物的分解,其衰减模型

为： $X/X_0=e^{-kt}$ ，式中 t 为时间， X_0 为初始凋落物的质量， X 为 t 时刻的残留重量， k 为年分解速率 ($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)，但实际应用中，多用 $y=ae^{-kx}$ 来描述，式中 y 为重量残留率 (%)， a 为拟和参数， k 为年腐解系数 ($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)，细根分解过程和凋落物一样，本研究利用此模型拟合细根残留率和时间关系，并计算细根的分解速率。

1.3 统计分析

利用 SPSS11.5 统计软件拟合细根分解过程残留率与时间的关系，并对细根分解速率与初始养分含量进行相关分析。

2 结果

2.1 群落细根的分解动态及 N、P 营养成分的变化

常绿阔叶林不同演替阶段细根的分解动态见图 4-1，群落细根的分解随时间进程失重率增大，但失重率并不与时间呈线性关系。6 个群落细根在分解初期 (0 - 60 天) 的分解速率较快，失重率为 20% 左右，之后细根的分解速率开始下降，在 240 天的分解过程中，细根的失重率在 40% 左右。

群落细根在分解后 N、P 含量均发生了变化，参照王希华 (2004) 对凋落叶分解过程养分变化的研究方法，以取样时细根的营养元素含量占初始营养含量的百分比为依据，若百分比大于 100 表示营养元素发生了积累，小于 100 则说明发生了释放，从图中可以看出，在分解初期，演替前期群落 N、P 均发生了积累，而演替后期群落均发生了释放，但在分解中后期 N、P 浓度的变化过程比较复杂，无明显变化规律。

2.2 群落细根的分解速率

如表 4-1 所示，常绿阔叶林不同演替阶段细根年分解率的变化范围为 0.356~0.796，分解较快的是栲树群落和铁芒萁-山鸡椒稀疏群落，其分解一半所需的时间分别是 0.744a 和 0.672a，分解 95% 需要 3.637a 和 3.605a，分解最慢的为马尾松群落，分解 95% 所需时间 8.216a。从演替进程来看，演替前期的铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和演替后期群落的细根分解速率较高，演替中期群落细根分解速率较慢。

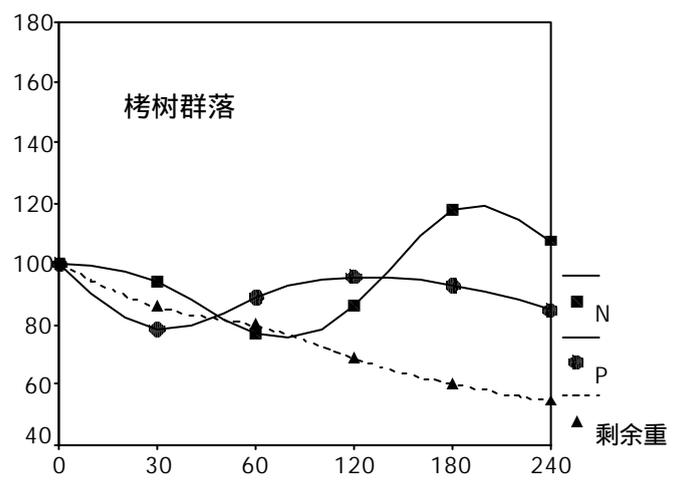
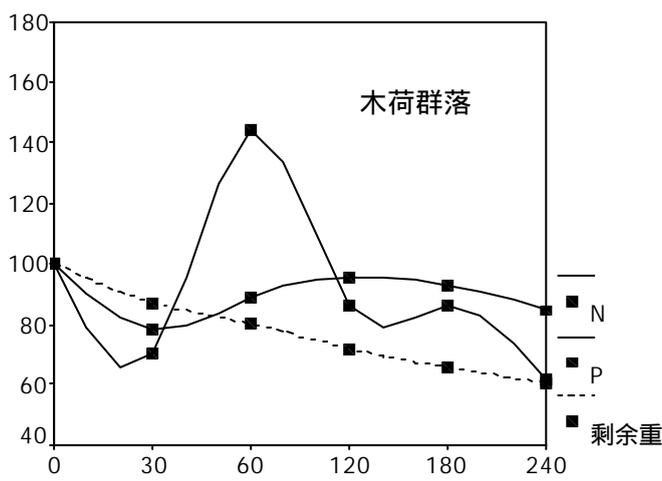
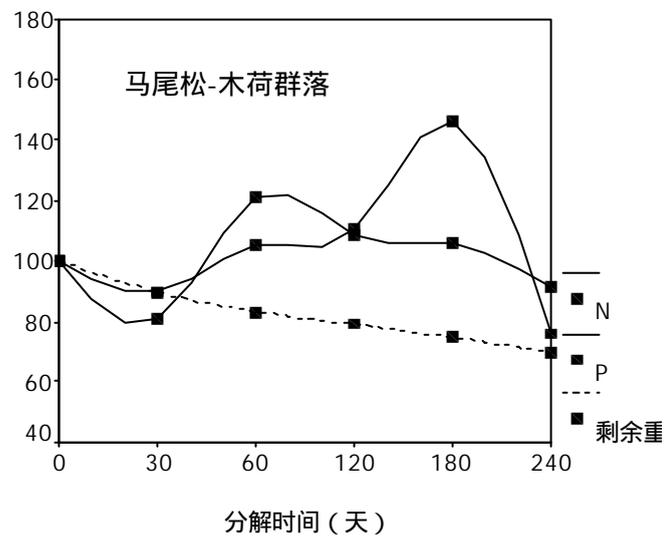
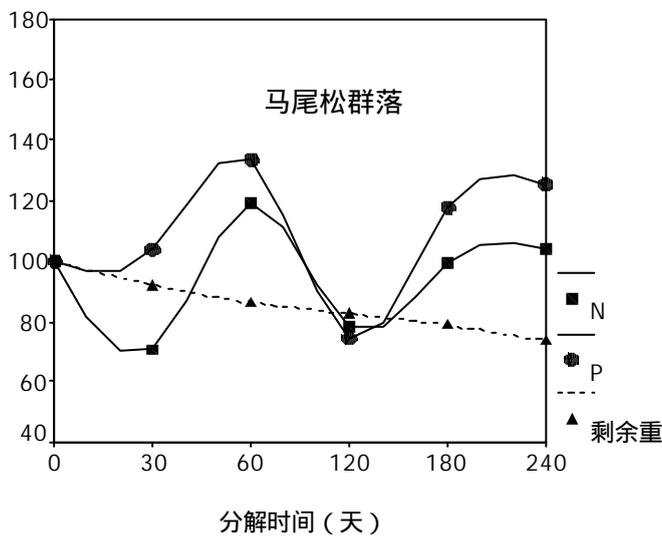
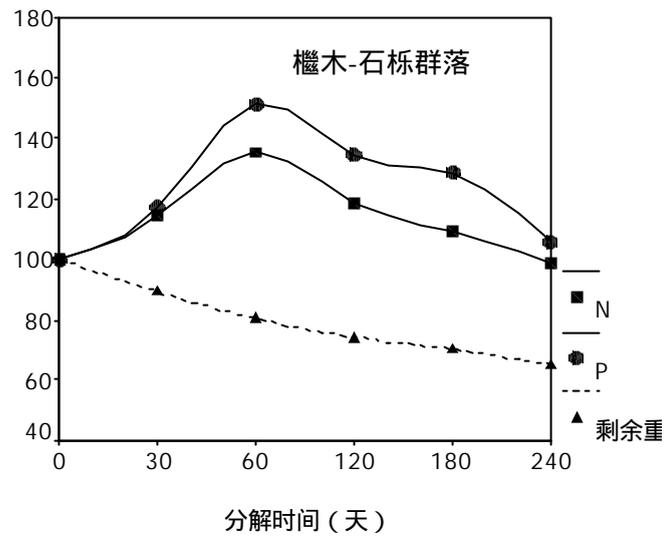
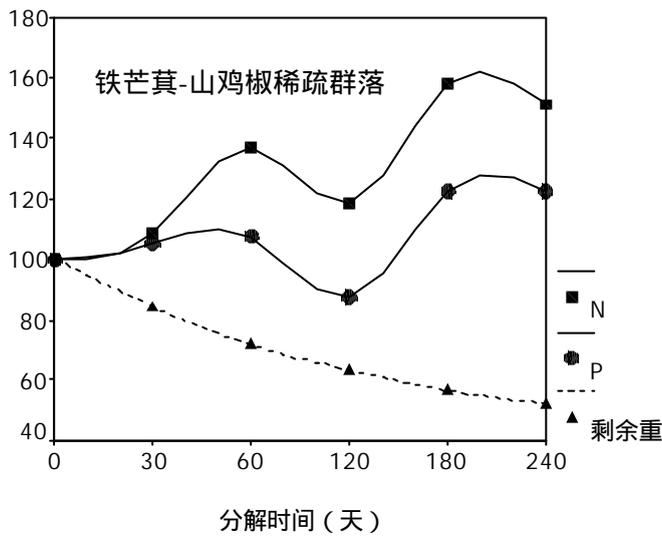


图4-1 受损常绿阔叶林不同演替阶段细根分解动态

Fig.4-1 The decomposition dynamics of community fine roots in different succession stages

表4-1不同演替阶段细根分解残留率随时间的指数回归方程

Table 4-1 Equation of fine root decomposition remains in different succession stages

群落类型 Community Type	回归方程 Equation	相关系数 Correlation efficiency(R ²)	分解系数 Decomposition rate	半分解时间 Time of half decomposition	95%分解所需时间 Time of 95% decomposition
铁芒箕-山鸡椒稀树群落 <i>D.pe+L.cu</i> comm.	$Y=84.73e^{-0.785x}$	0.949	0.785	0.672	3.605
欆木-石栎群落 <i>L.ch+L.gl</i> comm.	$Y=89.69e^{-0.504x}$	0.955	0.504	1.159	5.728
马尾松群落 <i>P.ma</i> comm.	$Y=93.16e^{-0.356x}$	0.975	0.356	1.748	8.216
马尾松-木荷群落 <i>P.ma+S.su</i> comm.	$Y=90.91e^{-0.406x}$	0.977	0.406	1.473	7.144
木荷群落 <i>C.fa</i> comm.	$Y=89.68e^{-0.617x}$	0.987	0.617	0.947	4.679
栲树群落 <i>C.fa</i> comm.	$Y=90.39e^{-0.796x}$	0.995	0.796	0.744	3.637

2.3 常见种细根的分解动态

22种植物细根在240天内的分解动态见表4-2所示，植物细根在分解前120天（5~9月）的失重率都较大，这可能与该段时间内雨量充沛、相对湿度和温度都比较高有关。植物细根的分解和凋落物具有相似的特征，据王希华等（2004）对该地区常见种凋落物的分解特征可知，对于一些营养含量高的落叶植物，即便在土壤微生物活动并不强烈的季节，其凋落物仍然具有较高的失重率，特别是在分解初期，植物细根的分解特征也具有此规律，如初始营养含量较高的落叶植物

枫香和鹅耳枥在分解过程中一直保持较高的失重率，240天内的失重率分别为66.976%和59.829%。演替后期顶级种（如米槠、栲树和木荷）细根的失重率也相对较高，虽然王希华（2004）等并没有分析该地区植物凋落物的分解特征与群落演替的关系，但从凋落物分解的数据可知，演替后期顶级种凋落物的年失重率较高，可见，植物细根的分解和凋落物分解具有相似的特征。

植物细根在分解过程中N、P含量均发生了变化，大多数植物细根在分解初期均发生了积累，而一些演替后期种（如米槠、木荷和栲树）在分解初期N、P含量却发生了释放，但细根在分解过程中N、P含量没有明显的变化的规律。

表4-2 植物细根的分解剩余率动态（%）
Table 4-2 Dynamics of remain rate of plant fine roots(%)

种类 Species	30d			60d			120d			180d			240d		
	干重 (标准差)			干重 (标准差)			干重 (标准差)			干重 (标准差)			干重 (标准差)		
	Dry weight (SD)			Dry weight (SD)			Dry weight (SD)			Dry weight (SD)			Dry weight (SD)		
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	
长叶石栎 <i>Lithocarpus harlandii</i>	0.771	110	107	1.502	138	121	0.915	144	141	0.551	112	109	1.191	108	120
鹅耳枥 <i>Carpinus viminea</i>	0.686	118	133	3.430	130	147	1.763	114	123	1.379	104	111	0.202	89	103
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.343	121	111	1.017	110	104	0.194	103	94	0.469	98	90	1.247	88	80
隔药铃 <i>Eurya muricata</i>	89.914			88.407			71.087			65.477			58.983		
光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	1.000	105	108	1.461	110	110	0.402	105	130	2.236	107	121	1.446	100	166
黑山山矾 <i>Symplocos heishanensis</i>	85.571			82.625			67.068			64.279			59.212		
红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	1.057	71	85	7.795	96	112	0.257	93	110	1.830	113	114	1.290	102	121
	88.457			85.969			67.669			64.381			59.876		
	0.886	125	173	1.335	120	184	1.964	153	179	1.357	165	183	0.508	133	148
	88.029			84.488			74.604			65.111			58.465		
	0.171	104	107	1.849	116	104	1.856	86	91	1.716	109	101	1.222	109	77

薄叶润楠	87.571			77.675			64.866			62.135			57.353		
<i>Machilus leptophylla</i>	1.029	103	110	0.186	114	143	0.436	88	137	0.739	89	136	0.302	114	154
黄丹木姜子	87.457			81.582			69.458			62.591			58.463		
<i>Litsea elongata</i>	1.257	84	112	2.286	46	129	4.834	85	107	1.127	90	113	1.478	80	112
欏木	88.370			78.179			59.717			57.567			54.209		
<i>Loropetalum chinense</i>	1.000	111	123	1.485	106	114	1.523	96	109	0.607	91	110	0.273	102	131
栲树	84.206			76.131			63.312			61.370			55.048		
<i>Castanopsis fargesii</i>	0.525	93	87	0.793	95	93	0.585	93	92	0.452	84	91	2.588	82	97
老鼠矢	82.743			74.925			61.209			54.462157			51.731		
<i>Symplocos stellaris</i>	1.971	116	122	0.822	136	180	5.056	148	185	5	123	151	1.668	107	138
连蕊茶	92.314			89.596			78.88732			73.549			66.161		
<i>Camellia fraterna</i>	0.629	100	100	0.475	109	105	87	117	111	0.789	128	113	0.643	104	73
马银花	97.743			91.777			77.613			69.611			63.742		
<i>Rhododendron ovatum</i>	0.829	102	124	0.341	105	126	1.765	109	129	1.018	109	116	1.270	93	105
米楮	86.057			77.992			59.531						50.706		
<i>Castanopsis carlesii</i>	1.943	79	100	1.992	117	106	1.525	100	122	56.302054	91	106	1.031	91	116
木荷	90.714			80.831			68.016			63.531			56.582		
<i>Schima superba</i>	0.710	78	59	1.561	137	86	0.779	127	97	0.463	122	114	1.000	107	135
披针叶茴香	87.314			83.946			69.329			63.202			59.469		
<i>Illicium lanceolatum</i>	2.143	96	90	2.535	118	71	1.248	65	72	0.595	109	94	0.437	96	67

(续表 4-2)

青冈	93.229			87.237			71.537			64.349			62.132		
<i>Cyclobalanopsis glauca</i>	1.514	100	131	0.483	115	152	1.948	100	148	1.633	115	140	1.479	100	139
青栲	94.800			90.637			70.994			67.375			61.962		
<i>Cyclobalanopsis myrsinaefolia</i>	0.429	105	106	2.294	107	109	1.962	111	111	1.067	118	116	0.591	118	121
山矾	87.000			82.484			70.626			63.603			59.234		
<i>Symplocos sumuntia</i>	0.600	110	122	0.606	115	127	0.123	100	105	1.165	102	105	1.559	108	113
细枝铃	92.457			89.523			74.746			68.723			62.991		
<i>Eurya loquaiana</i>	0.914	125	156	1.215	191	135	0.968	125	127	1.002	153	137	0.347	159	129
窄基红褐铃	94.714			91.660			76.914			71.413			65.343		
<i>Eurya rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>	2.029	118	120	0.481	267	188	2.056	112	111	1.317	148	149	1.303	106	126

2.4 常见种细根的分解速率

如表4-3所示，22种植物细根的分解系数的变化范围为0.585~1.839，分解最快的是枫香，分解一半所需的时间为0.377a，分解95%需要1.629a，其次是鹅耳枥，95%被分解需要1.936a，分解最慢的是连蕊茶，分解95%需要5.074a，由于常见种细根的分解试验在木荷中进行，可以认为所有种分解的环境条件基本相似，可以排除土壤、水分、土壤动物和土壤微生物对分解的影响，因而影响分解速率差异的主要因素是植物细根的质量。综合来看，该地区植物细根分解95%所

需的时间为3~4 a, 平均时间为3.74 a, 高于本地区常见种凋落叶的平均分解时间2.54 a (王希华, 2004)。

2.5 细根分解与与初始营养含量的关系

大量研究表明凋落物质量(如凋落物N含量或C:N)对凋落物的分解具有重要影响(Witkamp,1966;Berg and Staff,1980;Vogt et al,1991;Aerts,1997;王希华等,2004),有关细根质量对细根分解影响也有很多的研究(Witkamp,1966;Usman et al,2000),基本都认为细根的初始养分含量会明显影响细根的分解速率。本研究中22种植物细根分解试验是在相同的环境条件下同时进行的,从而可以认为影响细根分解的主要因素是细根的质量,如营养含量、理化结构等,通过对植物细根初始N、P营养含量与细根分解系数的相关分析结果表明(图4-2、图4-3),细根的分解系数与初始N、P营养含量具有显著的正相关性($P<0.05$),表明植物细根初始N、P含量越高,其在分解初期的分解速率越高,这与凋落物的研究结果基本一致。

表4-3 细根残留率随时间变化的指数回归方程

Table 4-3 Equation of fine root decomposition remains

种名 Species	回归方程 Equation	相关系数 Correlation efficiency(R ²)	分解系数 Decomposition rate	半分解时间 Time of half decomposition	95%分解所需时间 Time of 95% decomposition
长叶石栎 <i>Lithocarpus harlandii</i>	$y=85.274x^{-0.823t}$	0.912	0.823	0.649	3.447
鹅耳栎 <i>Carpinus viminea</i>	$y=97.493x^{-1.534t}$	0.858	1.534	0.435	1.936
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	$y=100.034x^{-1.839t}$	0.903	1.839	0.377	1.629
隔药柃 <i>Eurya muricata</i>	$y=96.371x^{-0.775t}$	0.967	0.775	0.847	3.818
光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	$y=89.278x^{-0.663t}$	0.938	0.663	0.874	4.347
黑山山矾 <i>Symplocos heishanensis</i>	$y=92.746x^{-0.719t}$	0.923	0.719	0.859	3.340
红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	$y=94.352x^{-0.732t}$	0.997	0.732	0.868	4.013
薄叶润楠 <i>Machilus leptophylla</i>	$y=88.122x^{-0.706t}$	0.921	0.706	0.803	4.064
黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	$y=91.039x^{-0.717t}$	0.975	0.717	0.836	4.047
欏木 <i>Loropetalum chinense</i>	$y=88.873x^{-0.846t}$	0.875	0.846	0.68	3.402
栲树 <i>Castanopsis fargesii</i>	$y=85.783x^{-0.707t}$	0.938	0.707	0.764	4.020
老鼠矢 <i>Symplocos stellaris</i>	$y=85.394x^{-0.838t}$	0.948	0.838	0.639	3.386
连蕊茶 <i>Camellia fraterna</i>	$y=97.293x^{-0.585t}$	0.992	0.585	1.138	5.074
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	$y=102.806x^{-0.761t}$	0.985	0.761	0.947	3.973
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	$y=89.032x^{-0.921t}$	0.931	0.921	0.627	3.127
木荷 <i>Schima superba</i>	$y=93.066x^{-0.788t}$	0.964	0.788	0.788	3.710
披针叶茴香 <i>Illicium lanceolatum</i>	$y=91.693x^{-0.708t}$	0.960	0.708	0.857	4.109
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	$y=96.632x^{-0.746t}$	0.939	0.746	0.883	3.970
青栲 <i>Cyclobalanopsis myrsinaefolia</i>	$y=99.204x^{-0.769t}$	0.932	0.769	0.891	3.885
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	$y=91.187x^{-0.692t}$	0.982	0.692	0.868	4.196
细枝柃 <i>Eurya loquaiana</i>	$y=97.735x^{-0.697t}$	0.976	0.697	0.962	4.265
窄基红褐柃 <i>Eurya rubiginosa var.attenuata</i>	$y=99.793x^{-0.670t}$	0.975	0.67	1.032	4.468

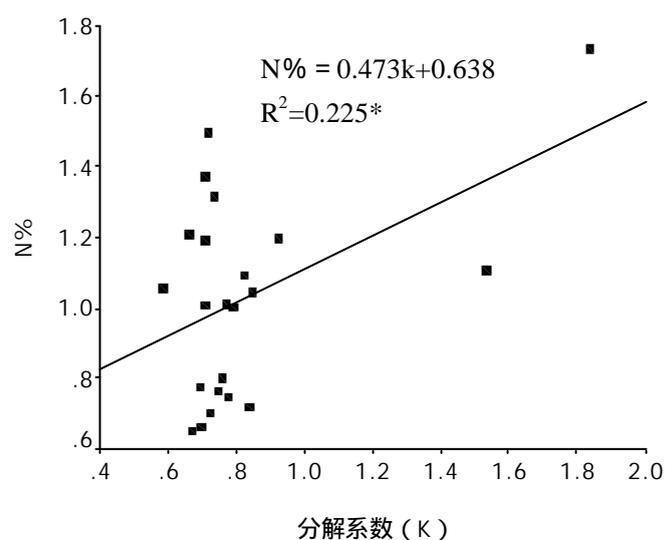
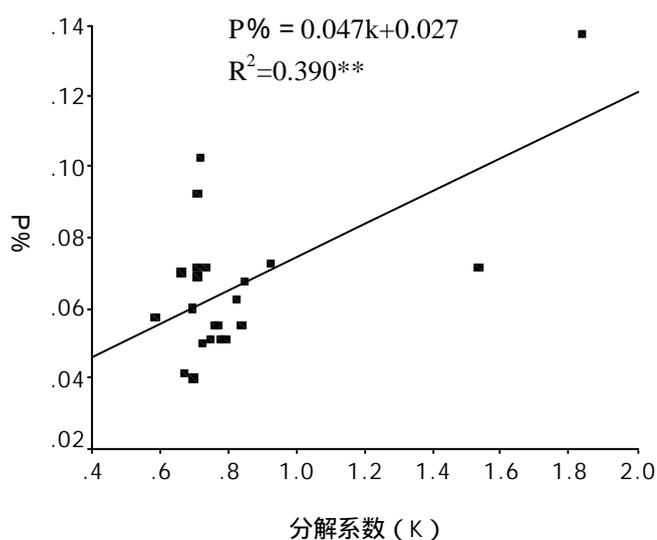


图4-2 分解系数与P (%) 的关系

图4-3 分解系数与N (%) 的关系

Fig.4-2 The relation between decomposition rate and P Fig.4-3 The relation between decomposition rate and N

3 小结与分析

细根的分解过程同凋落物的分解过程一样，它是一系列物理、化学和生物交互作用的结果。影响细根分解速率的因素很多，综合起来主要有以下几个方面：细根分解所处的环境条件（地上植被特征、土壤性质、地形和气候特征），细根的质量等。从本研究可以看出，群落和植物个体的细根在分解初期和高温多雨季节分解较快，这与本地区凋落物的分解相似（黄建军，2002）。这主要是由于细根在分解初期可溶性物质和易分解的物质占有的比例高，而随着分解的进行，木质素等难分解的物质比例增加，从而使得细根分解速度随时间呈现变缓的趋势。从细根分解速度随时间的分解动态（图4-1、表4-2）可知，细根在6-10月份失重率较大，而11-2月份细根的分解速度较慢，这可能由于6-10月份雨量充沛，相对湿度高，气温也比较高，温度较高可以加速土壤生物的呼吸，有利于细根的分解，而降雨量大，使得细根表面的淋溶作用增加和土壤湿度增加，同样促进细根的分解。同时，在此期间内，细根分解袋内土壤动物也明显比其它时间多（根据易兰对细根分解过程土壤动物的变化，未发表数据），土壤动物对细根的摄食作用加强，也在客观上加速了细根的分解。可见，细根的分解是一个复杂的过程，它所处的生物环境和非生物环境对细根分解都会产生重要影响。

不同植物细根的分解也会因为细根的质量而表现出一定的差异。Usman(2000)认为不同径级细根分解速率差异的主要原因是其初始的养分含量（尤其N含量）有所不同，细根的径级越小，其养分含量越高，就越容易分解，本研究也说明细根的初始N、P养分含量与分解速率密切相关。微生物在分解植物残体时通常以植物残体为营养，每同化4-5份碳，就需要1份氮（郭继勋，1992），C/N大的有机物分解时，由于氮含量缺乏，微生物发育受到限制，有机质分解缓慢，因此，细根的养分含量高会促进其分解。

细根与凋落叶的分解速率比较，目前尚无明确的结论，有些树种细根分解速率比凋落叶快，有些则比凋落叶慢（Vogt et al,1991），与凋落叶相比，细根含有较高的结构性木质纤维素、软木脂和铝含量，可显著降低其分解速率（Aber et al,1992;Bloomfield et al,1993），将本文植物细根的分解速率与该地区凋落叶（王希华等,2004）的分解速率比较可知细根的分解速率明显低于凋落叶的分解速率。

影响群落细根分解的因素是多方面的，如细根质量、群落内的环境条件等，本研究中铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和演替后期群落细根具有较高的分解速率，这与群落细根质量和群落内环境条件密切相关，铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和演替后

期群落细根的N、P浓度较高（见第六章）以及群落内的土壤环境条件（阎恩荣，未发表数据）有利于细根的分解。可见群落细根的分解是一个复杂的过程，在研究中应该长期测定，找出主要的影响因素。

细根在分解过程中，分解初期的营养含量变化存在两种情况：分解初期营养释放（Keplin,2001; 杨丽韞,2003）和营养固定（Hasegawa and Takeda,1996;McClagherty,1984），分解过程中的养分释放或固定，可以用分解物获取养分的程度来解释（Swift et al,1979），如果分解物养分不充足，那么这些有限的养分在分解初期就会被积聚和固定；相反，养分若能满足分解物的需要，那么在分解初期就会被释放。大量的研究也表明，如果被分解物质中的养分含量很低会使得土壤中的矿化N被固定到细根中（Mengel and Schrneer,1985）。在本项研究中，演替初期阶段的细根在分解过程中N、P养分大多数表现为初期固定，这可能是由于演替初期细根的养分含量低，土壤中的矿化N被固定到细根中，而演替后期细根的养分含量高，可以满足分解物的需要，所以该阶段表现为养分释放。由于本项研究没有对细根分解与土壤界面相互作用的过程进行详细的研究，细根从土壤环境吸收养分机制尚不清楚，有待于进一步的研究。

第五章 细根特征与常绿阔叶林次生演替关系的探讨

5.1 不同演替阶段细根特征的比较

描述细根特征的主要指标有：生物量、年净生产力、年死亡量、年分解量、周转量、养分归还量、养分释放量、分解速率等(如图 5-1)。各特征的生态学意义及其关系如下：细根生物量是细根最基本的特征之一，其它特征与生物量有着密切的联系，活细根生物量反映了植物在某一阶段对养分和水分的吸收能力，而死细根生物量反映了细根死亡后对土壤物质循环的贡献。细根年净生产力是细根一年积累量与年死亡量的总和。细根年分解量反映了细根枯死后向土壤输入的物质。细根周转率为细根生长、衰老、死亡、脱落和再生长的过程(Vogt et al,1986)，它反映了细根在整个生命周期，细根周转的快慢取决于细根的使用寿命，细根的使用寿命越短，周转也越快，生长过程中对 C 的消耗也越大(Bloomfield et al,1996;Eissenstat and Yanni,1997)，直接测定细根周转非常困难，本研究中细根周转采用间接方法测定，即细根年净生产力与活细根年平均生物量的比值。细根养分归还还是细根死亡后向土壤中输入的养分，反映了细根在养分循环中的作用，细根的养分年归还量取决于细根的年死亡量和死细根的养分含量，细根年死亡量和死细根养分含量越高，细根的养分年归还量就越高。细根养分释放量是枯死细根通过微生物分解、土壤小动物摄食而损失的养分，它是细根实际输入土壤的养分，养分年释放量高低不仅受养分归还量的控制，而且与细根分解速率相关。

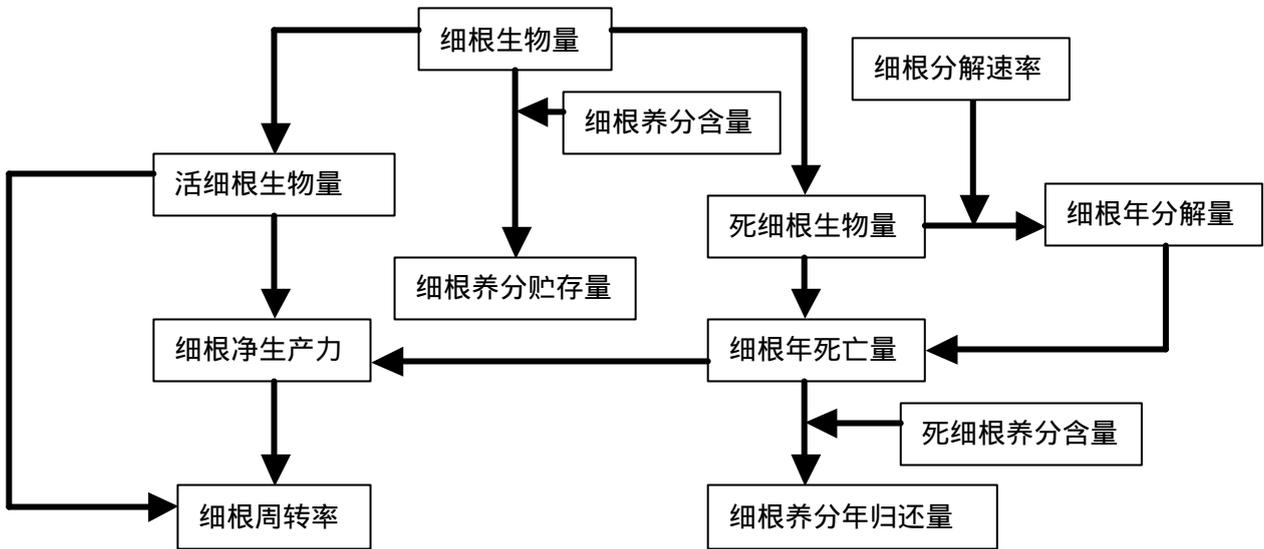


图 5-1 细根各特征之间的关系

Fig.5-1 The relationship among all characters of fine roots

对本研究来说(表 5-1)，细根的总体特征在不同演替阶段表现各异，但也表现出了一定的规律性，从表 5-1 可知，活细根生物量在演替后期最高，演替前

期次之，演替中期最低，而死细根生物量在演替前期最高，演替后期次之，演替中期最低；细根周转率在演替前期最高，演替中期次之，演替后期最低；细根年死亡量、年分解量、年净生产力、养分贮量、养分年归还量、养分年释放量及细根分解速率与细根生物量的变化基本一致，即演替前期和演替后期较高，演替中期最低，因此，细根生物量与周转率随群落演替过程的变化可以表征细根特征随群落演替过程的变化。

表 5-1 不同演替阶段细根各特征参数

Table 5-1 The parameters of fine root characters in different successional stages

细根特征 Characters of fine root		铁芒萁山鸡椒稀疏群落 <i>Dpe+Lcu</i> comm.	榿木 - 石栎群落 <i>Lch+L.gl</i> comm.	马尾松群落 <i>Pma</i> comm.	马尾松-木荷群落 <i>P.ma+S.su</i> comm.	木荷群落 <i>S.su</i> comm.	栲树群落 <i>C.fa</i> comm.
细根生物量 (t.hm ²)	活细根	1.013	1.966	0.714	1.305	2.049	2.513
Fine root biomass	死细根	1.380	1.320	0.352	0.226	0.666	0.688
年死亡量(t.hm ²)	Annual mortality	2.650	2.111	0.735	0.472	1.331	1.086
年分解量(t.hm ²)	Annual loss	0.847	0.605	0.122	0.089	0.344	0.407
年净生产力(t.hm ²)	net production	4.118	4.904	1.627	1.177	2.237	1.747
年周转率(times/yr)	turnover rate	4.065	2.494	2.279	0.902	1.092	0.695
分解系数		0.785	0.504	0.356	0.406	0.617	0.796
养分贮量 (Kg.hm ²)	N	19915	33.09	5.98	14.348	25.069	40.616
Nutrient stock	P	0.892	1.797	0.386	0.613	1.042	2.115
养分年归还量(Kg.hm ²)	N	18.868	14.158	10.893	4.102	14.854	13.857
Annual returned mass	P	0.875	0.823	0.823	0.208	0.586	0.586
养分年释放量(Kg.hm ²)	N	6.031	4.060	3.122	0.773	3.839	5.193
Annual released mass	P	0.280	0.236	0.048	0.040	0.147	0.22

5.2 细根特征与群落演替关系的探讨

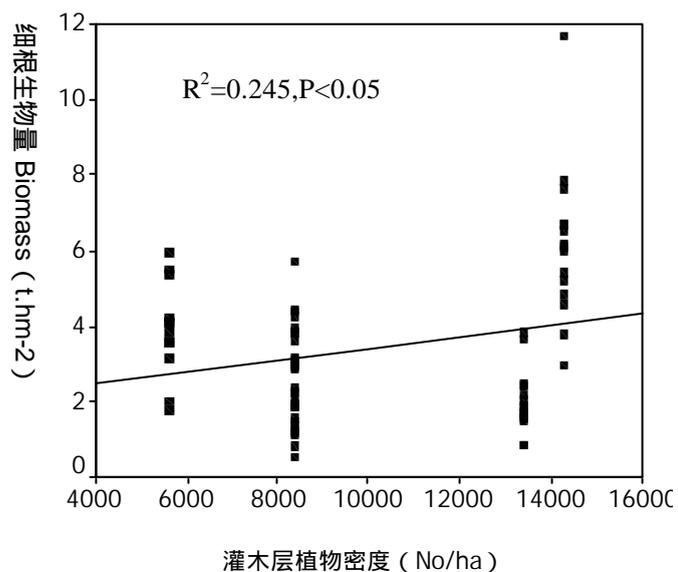
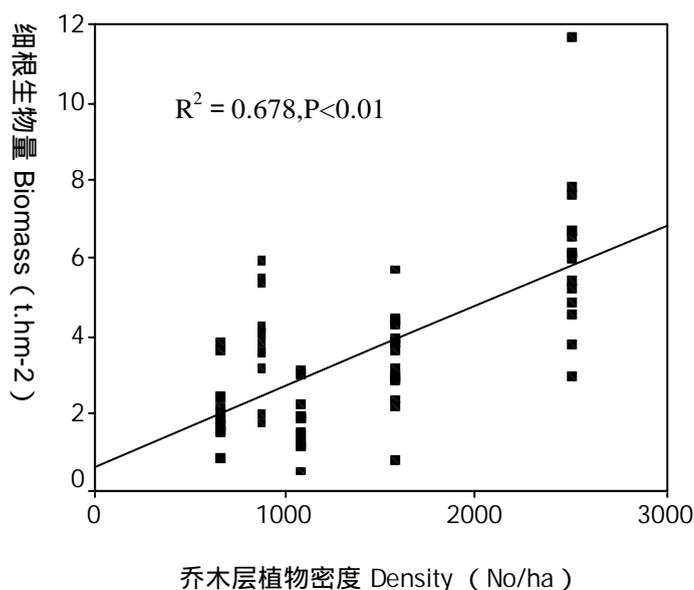
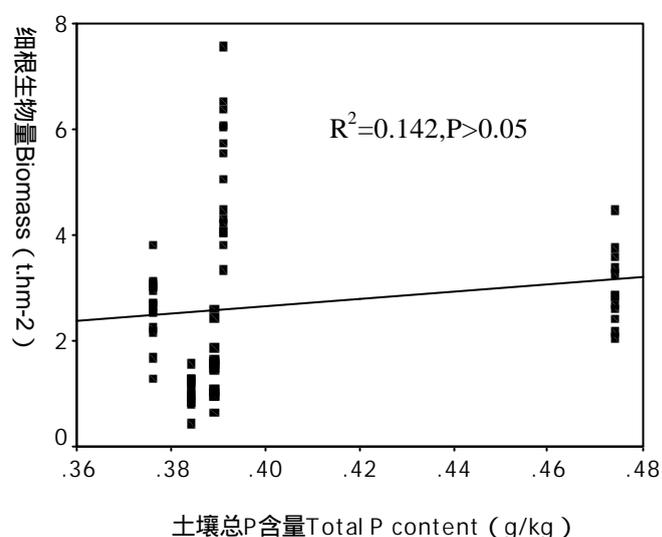
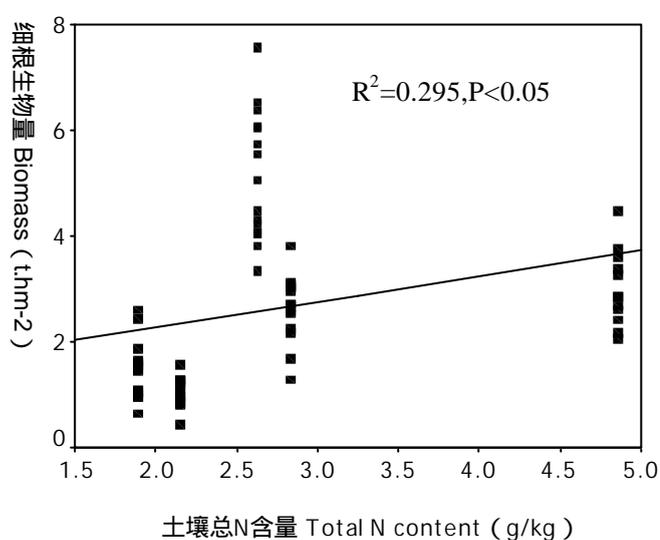
地上植被和土壤环境是影响细根分布的主要因素 (Singh et al, 2000), 群落在次生演替过程中, 细根与周围环境因子具有不断的适应和改造过程, 因此细根特征与群落演替过程中的环境条件、植被组成的变化密切相关; 本研究试图分析环境条件和植被组成与细根生物量、周转率的关系, 从而探讨细根特征与群落演替的关系。

5.2.1 细根生物量与群落演替的关系

将细根生物量 (各演替阶段, 每个阶段 15 个点) 与土壤养分、地表凋落物量进行相关分析后发现 (如图 5-1), 土壤 N 含量和有机质 (阎恩荣, 未发表数据) 与细根生物量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 土壤 P 含量与细根生物量无显著相关性 ($P > 0.05$); 地表凋落物量 (张庆费, 1999) 也与细根生物量具有显著的正相关关系 ($P < 0.05$)。这是因为在群落演替过程中土壤有效 N 是植物生长需求最多的限制性养分, N 含量也是细根生物量积累的主要限制因子之一, 土壤中 N 含量多少明显影响地下根系的生长 (王政权等, 1999), 而地上凋落物和土壤有机质

密切相关，它们是土壤 N 素的主要来源。

群落演替过程中物种组成和植物密度也是影响群落细根生物量的重要因素，不同树种根系形态具有较大的差异，如演替中、前期优势种马尾松地下主根发达，而细根数量分布非常少，而演替后期阶段的优势种木荷和栲树细根极其发达，是演替后期群落细根的主要组成部分，通过对马尾松、木荷和栲树在不同演替阶段的重要值与细根生物量相关分析发现，马尾松重要值与细根生物量呈显著负相关关系 ($P < 0.01$)，而木荷和栲树与细根生物量呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)，可见，群落演替过程中物种组成的变化可显著改变细根生物量的分布；细根生物量与乔木层、灌木层植物密度均呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$)。



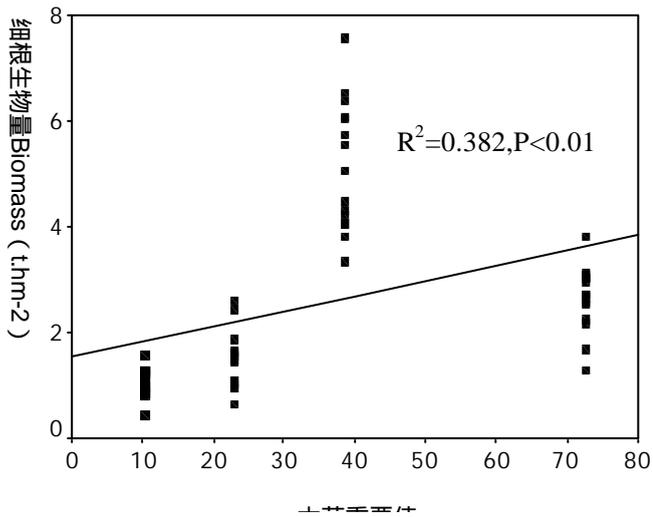
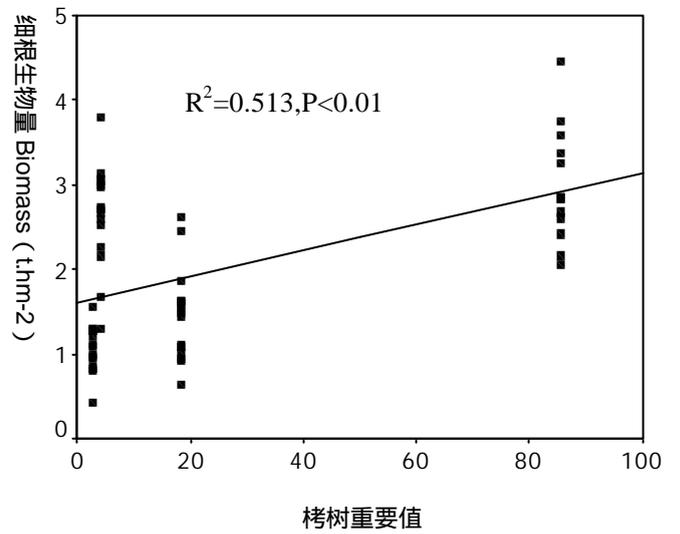
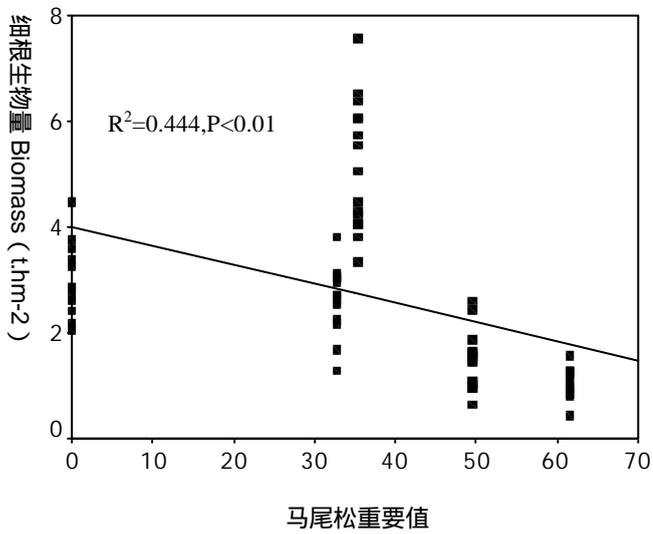
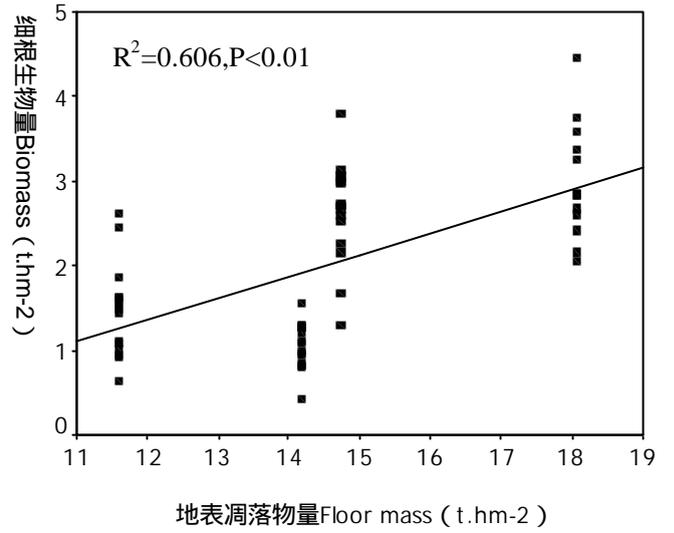
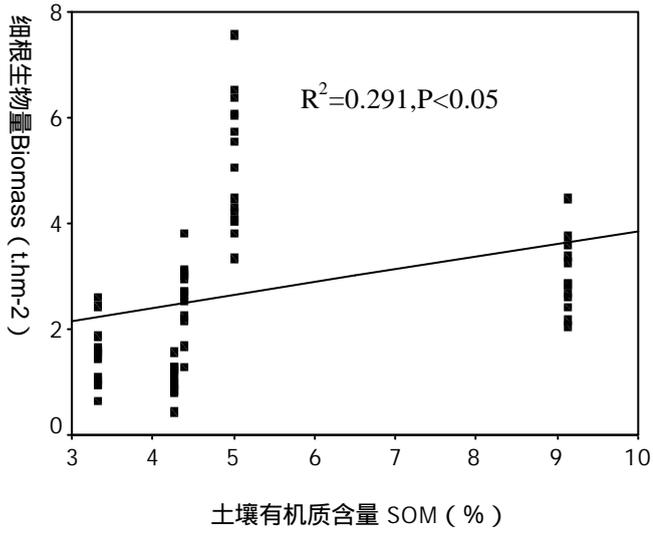


图 5-1 细根生物量与土壤因子、群落优势种重要值以及植物密度的关系

Table 5-1 Relationship between Fine root biomass, soil property or importance value of community dominant species

5.2.2 细根周转与群落演替的关系

细根周转在森林生态系统养分循环中的作用主要在于两个方面：一方面细根通过周转从环境中获取养分和水分，满足植物生长的需要；另一方面细根死亡后将生物体归还到环境中，以改变环境。细根的周转速率反映了植物的生长策略，细根周转速率提高，养分循环循环加快，细根在生长过程中消耗的净初级生产力增加，而周转速率降低，养分循环减慢，细根消耗的净初级生产力降低，因此，当细根获取资源效率（消耗每单位碳量所吸收的养分和水分）最高，细根的功能达到最优（Eissenstat and Van rees,1994）。

本研究中细根的周转率在演替前期最高，这与演替前期群落内植物生长较快和净生产力较高有关，在演替前期，植物细根从环境中吸收大量的养分和水分，以满足演替前期植物快速生长的需要，而演替前期群落较高的净生产力能够满足细根快速周转的能量消耗，但演替前期细根资源利用效率仍较低，即投入较多的净初级生产力来获得较多的资源；演替中期细根周转率较低，与植物生长较慢、群落净生产力低以及环境养分状况差有关，演替中期细根周转减慢，细根的死亡量减少，植物通过减少细根死亡而避免养分损失，另外，演替中期群落内植物细根的菌根的感染率可能会增加，从而降低对养分的限制；演替后期群落虽然环境条件较好，但群落净初级生产力较低，分配到细根中的净初级生产力减少，细根通过延长寿命来减少能量消耗，提高资源获取效率，因此，演替后期群落细根获取资源效率最高，演替后期群落细根较低的周转率对于维持群落稳定性具有一定意义。

5.2.3 细根总体特征与群落演替关系

在演替前期，林分郁闭度较低，林下植被丰富，乔木层优势种主要为一些幼龄的木荷、石栎和马尾松组成，群落内植物生长较快，群落净初级生产力较高，分配到根系生产力也较高，因此，群落细根周转较快，死细根生物量比较高，细根的养分库较高，养分年归还量也比较高，此时整个生态系统营养循环快，土壤环境不断改变，较好的土壤环境条件使得细根分解加快，进一步加速了细根的周转，这样使得演替后期一些慢生长的种类无法适应这种养分循环机制。随着演替进行，林冠达到郁闭后，群落内光照条件发生了改变，林下植被由于在激烈的光照条件竞争中被淘汰，群落细根生物量急剧下降，细根养分库和养分年归还量减少，土壤养分含量也明显下降，植物可获得养分减少，营养供给不能满足这些快生长植物的需求，此时那些对养分需求较少的马尾松在竞争中占据了优势地位，此时由于土壤养分较低，群落净初级生产力较低，细根分解速率和周转率会显著降低。

当马尾松群落形成后，群落的郁闭为一些既耐荫，又具有高养分利用效率物种的定居创造了条件，此时，土壤养分的限制并不能阻止群落继续向前演替，大多植物能够通过增加细根生物量而提高根的比表面积（RSA）来获取更多的养分，植物根系资源利用效率提高。本研究结果也表明：演替后期群落优势种木荷和栲树细根明显比马尾松、石栎和苦槠多，此阶段细根生物量急剧上升，细根养分库和年归还量也比较大，土壤养分含量提高，细根分解速率快，此时，群落内植物生长速度减慢，群落净初级生产力降低，分配到细根的能量减少，但此阶段活细根生物量最高，细根生命周期较长，周转减慢，获取资源量仍较高，因此，细根资源利用效率最高。

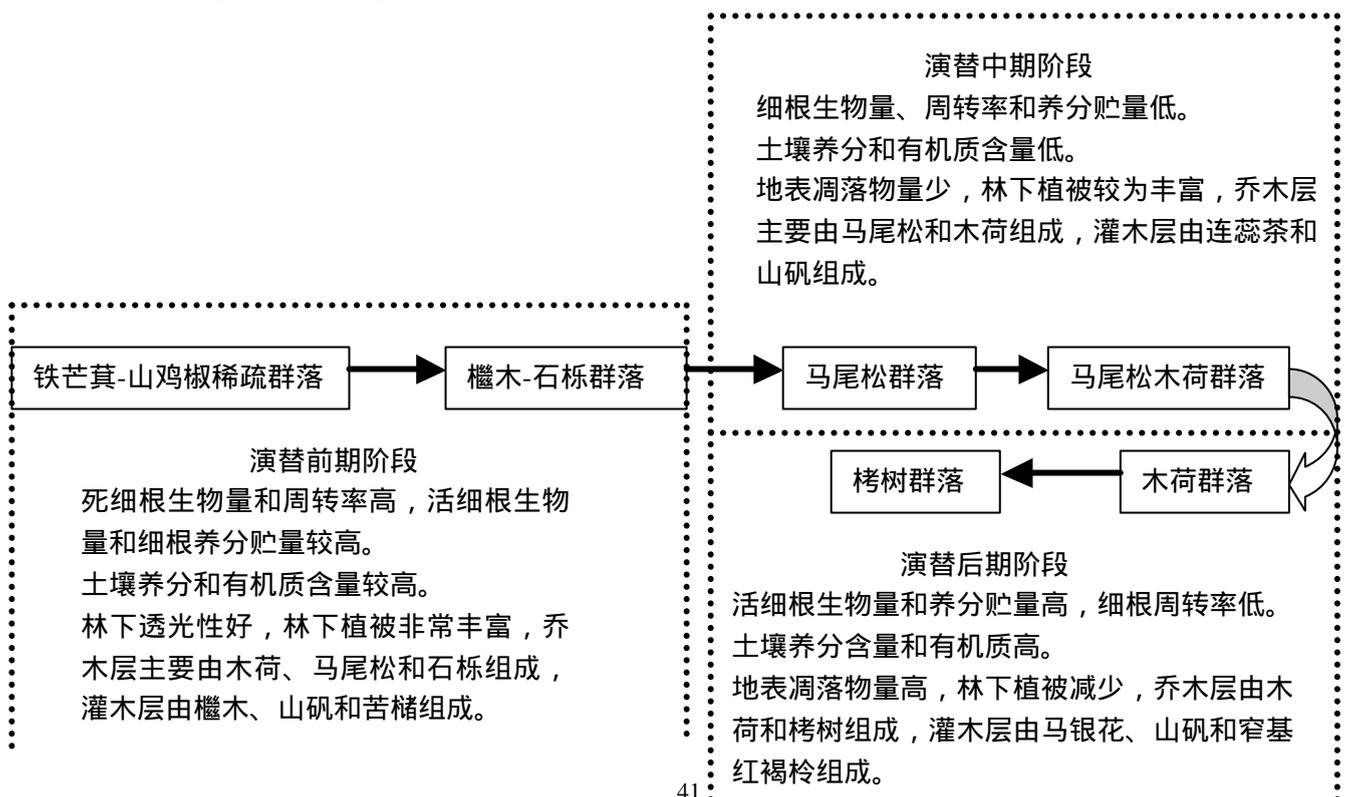


图 5-2 不同演替阶段细根特征、土壤环境和群落物种组成

Fig.5-2 The characters of fine root,soil environment and species composition in different succession stages

5.2.4 细根与群落的物质循环

随着群落演替的进展，群落内物质循环应逐渐趋向稳定，顶级群落的物质循环应处于最稳定的状态，群落的生物量、种的多样性以及层次结构的复杂性都趋向于增大，生物量累积率（年净生产量与生物量之比）和群落净生产量较低，营养物质的主要贮存库在生物体（宋永昌,2000）。据此规律，细根的物质循环是群落物质循环的一部分，群落演替至顶级群落阶段，细根的物质循环是否与群落演替趋于一致？本文对常绿阔叶林不同演替阶段细根的物质循环特征研究发现，演替后期群落细根的生物量最高，而净生产量较低；常绿阔叶林不同演替阶段细根的生物量累积率（随进展演替各阶段 P/B 为：1.721,1.492,1.526,0.769,0.824,0.546）在演替前期阶段较高，演替后期较低；演替后期活细根生物量较高，所以演替后期细根的营养物质主要贮存库保留在生物体中。因此，该地区常绿阔叶林细根的物质循环随着群落演替逐渐趋于稳定状态。

第六章 研究结论与展望

1 结论

1.1 常绿阔叶林演替过程中细根生物量及生产力

(1) 细根生物量在常绿阔叶林演替初期和演替后期较高, 演替中期细根生物量较低; 细根生物量的季节变化与地上部分物候节律一致, 细根生物量高峰期出现在 4 月或 7 月; 细根生物量在土壤中的分布具有明显的不均匀性, 细根主要集中在表层, 不同演替阶段细根表层富集无明显的规律性。

(2) 细根净生产力及周转率在演替前期最高, 演替后期阶段细根周转率比演替中期低, 但细根净生产力比演替中期高。

1.2 常绿阔叶林演替过程中细根养分贮存量

(1) 活细根和死细根养分含量在铁芒萁-山鸡椒稀疏群落和栲树群落较高, 从櫟木-石栎群落向栲树群落演替过程中, 活细根和死细根养分含量逐渐增加, 活细根与死细根养分含量无明显差异。

(2) 细根养分贮存量在演替前期和演替后期较高, 演替中期群落最低; 细根养分年归还量和养分年释放量与养分贮存量相似, 演替前期和演替后期细根养分归还量较高, 演替中期养分归还量较低。

1.3 常绿阔叶林演替过程中细根分解

(1) 细根分解同地上凋落叶一样, 受细根质量、土壤理化性质以及分解时期的水热条件的影响, 不同演替阶段, 细根分解速率存在一定差异, 演替前期和演替后期群落细根分解速率高; 细根分解过程中营养成分发生了一定的变化, 在分解初期, 演替前期群落细根发生了养分富集, 而演替中、后期表现为营养释放,

但分解 240 天后细根养分都表现了富集。

(2) 不同树种细根的分解速率存在一定差异, 落叶树种和顶级树种细根分解速率比较高; 细根分解速率与细根初始养分含量密切相关, 初始养分含量高, 分解速率加快。

1.4 细根特征与常绿阔叶林次生演替的关系

群落演替过程中土壤环境条件、群落结构和物种组成对细根生物量亦具有重要的影响, 细根生物量与马尾松重要值呈显著的负相关关系, 与栲树、木荷重要值呈显著的正相关关系; 植物密度对细根生物量也有重要影响, 细根生物量与乔、灌木层密度呈非常显著的正相关关系; 土壤 N 含量、有机质以及地表凋落物量也与细根生物量呈显著的正相关关系。细根随群落演替的周转特征与群落演替过程中植物获取资源的策略有关, 演替初期细根周转率随较高, 但投入到细根净初级生产力也较高, 细根获取资源效率仍较低, 演替中期群落细根低周转率与群落环境状况差及植物获取资源方式改变有关, 而演替后期群落细根周转率虽较低, 但细根获取资源的效率最高, 即以投入较少的净初级生产力获得更多的资源。细根的物质循环也会随着群落的演替达到稳定状态, 顶级群落细根的生物量累积率、净生产力较低, 群落生物量达到最大, 细根营养物质主要存贮在生物体中。

2 研究展望

本文主要对天童地区常绿阔叶林次生演替过程中不同演替阶段的细根生物量及生产力、细根养分贮存量及分解、细根特征与次生演替关系进行了研究, 但在研究中仍存在一定的问题和不足, 未来需要在以下方面加强研究。

(1) 尽管本研究取样是分季度进行, 但从结果来看, 不同季度生物量差异较大, 因此细根取样误差较大, 应该缩短细根取样间隔时间, 如每月取样或每 2 个月取样一次, 这样会比较准确估算地下细根特征的变化; 细根在地下的分布具有较大的异质性, 虽然每个样地每次取样都进行了大量的重复, 但同一样地不同取样点数据差异较大, 通过扩大取样的重复次数并不是解决问题的根源, 因此, 通过改进更加准确的取样方法是迫切需要解决的问题。。

(2) 细根寿命和形态也是细根重要的特征之一, 细根寿命反映了细根生长周期, 细根的周转率取决于细根寿命, 细根形态反映了植物地下的生长策略, 因此对细根寿命及形态学研究具有重要的生态学意义。

参考文献

1. 陈光水.2001.杉木观光木混交林群落细根生态学研究.福建农林大学硕士学位论文.
2. 黄建辉 ,韩兴国 ,陈灵芝.1999. 森林生态系统根系生物量研究进展. 生态学报 , 19(2):270-277.
3. 黄建军.2002.天童国家森林公园常见植物叶片的营养生态学研究.华东师范大学硕士学位论文.
4. 李凌浩 , 林鹏 , 邢雪荣. 1998.武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究.应用生态学报 , 9(4):337-340.
5. 李凌浩 , 王其兵 , 邢雪荣.1998. 森林生态系统研究中几个重要方面的进展. 植物学通报 , 15 (1) :17-26.
6. 廖利平 , 陈楚莹 , 张家武. 1995.杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. 应用生态学报 , 6(1):7-10.
7. 廖兰玉 , 丁明懋 , 张祝平等. 1993.鼎湖山某些植物群落根系生物量及其氮素动态.植物生态学与地植物学报 , 17(1):56-60.
8. 廖利平 , 杨跃军 , 汪思龙 , 高洪. 1999.杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、火力楠(*Michelia macclurei*)纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还. 生态学报 , 19(3):342-346.
9. 单建平 , 陶大立. 1992.国外对树木细根的研究动态.生态学杂志 , 11(4):46-49.
10. 单建平 , 陶大立 , 王 淼 , 赵士洞. 1993.长白山阔叶红松林细根动态.应用生

- 态报 , 4(3):241-245.
11. 宋永昌,王祥荣. 1995.浙江天童国家森林公园的植被和区系.上海:上海科学技术文献出版社.
 12. 宋永昌. 2000.植被生态学.上海:华东师范大学出版社.
 13. 郑金萍,郭忠玲等.2004.长白山5种主要森林群落细根现存生物量研究.北华大学学报(自然科学版), 5(5):458-461.
 14. 温达志,魏平,张佑昌.1998.鼎湖山南亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态.生态学杂志, 17(2):1-6.
 15. 温达志,魏平,孔国辉,叶万辉.1999.鼎湖山南亚热带森林细根生产力与周转.植物生态学报, 23(4):361-369.
 16. 王希华,黄建军,阎恩荣. 2004.天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究.植物生态学报, 28(4): 457-467.
 17. 王政权,张彦东,王庆成.1999.氮、磷对胡桃楸幼苗根系生长的影响.东北林业大学学报, 27(1):11-14.
 18. 薛德榕,谭协麟.1985.根系研究法.北京:科学出版社.
 19. 杨丽韞.2003.长白山森林植被细根动态及其对地下碳、氮贮量贡献.中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文.
 20. 杨玉盛,陈光水,林鹏等.2003. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力.生态学报, 23(9):1719-1730.
 21. 张小全.2001. 森林细根生产和周转研究.林业科学, 37(3):126-138.
 22. 杨玉盛,蔡丽平,陈光水等.2002. 杉木、观光木混交林群落细根N、P养分现存量动态变化.林业科学研究, 15(5):575-581.
 23. 杨玉盛,陈光水,谢锦升等.2002. 杉木-观光木混交林群落N、P养分循环的研究.植物生态学报, 26(4):473-480.
 24. 张小全,吴可红,DieterMurach.2000. 树木细根生产与周转研究方法评述.生态学报, 20(5):875-883.
 25. 张庆费,宋永昌,吴化前,由文辉.1999. 浙江天童常绿阔叶林演替过程凋落物数量及分解动态.植物生态学报, 23(3):250-255.
 26. 张庆费,徐绒娣.1999. 浙江天童常绿阔叶林演替过程的凋落物现存量.生态学杂志, 18(2):17-21.
 27. Aber J D,Mellilo J M,Nadelhoffer K J.1985.Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability:a comparison of two methods.Oecologia.66:317-321.
 28. Aerts R, Hannie D C. 1997.Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter

- decomposition of carex species. *Ecology*.78(1):244-260.
29. Aerts R, Chapin F S. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances ecological research*.30:1-67.
 30. Amin M, Flowers T H. 2004. Evaluation of Kjeldahl digestion method. *Journal of research*. 15(2):159-177.
 31. Arunachalam A *et al.*1996. Fine root decomposition and nutrient mineralization patterns in a subtropical humid forest following tree cutting. *Forest Ecology and Management*.86:141-150.
 32. Arunachalam A, Maithani K, Pandey H N, Tripathi R S. 1996. The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north-east India. *Forest Ecology and Management*.88:273-282.
 33. Berg B. 1984. Decomposition of root litter and some factors regulating the process: Long-term root litter decomposition in a Scots pine forest. *Soil Biology. Biochem.* 16: 609-617.
 34. Berish C W. 1982. Root biomass and surface area in three successional tropical forests. *Canada Journal Forest Research*..12:699-704.
 35. Bloomfield J, Vogt K A, Vogt D J. 1993. Decay rate and substrate quality of fine root and foliage of two tropical tree species in the Luquillo experiment forest. *Plant and soil*.150:233-245.
 36. Burke M K, Raynal D J. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*.162:135-146.
 37. Buttner V, Leuschner C. 1994. Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak-beech forest. *Forest Ecology and Management*. 70:11-21.
 38. Cannell M G R. 1985. Dry matter partitioning in tree crops, In: Cannell M G R, Jackson J E (eds.), *Attributes of Terrestrial Ecology*, Edinburgh. 160-193.
 39. Caldwell M M, Richards J H. 1986. On the economy of plant form and function. *Cambridge University Press Cambridge*.251-273.
 40. Conn C E, Day F P. 1996. Response of root and cotton strip decay to nitrogen amendment along a barrier island dune chronosequence. *Canada Journal Botany*.74:276-284.
 41. De Catanzaro S B, Kimmins J P. 1985. Changes in the weight and nutrient composition of litter fall in three forest ecosystem types on coastal British Columbia. *Canada Journal Botany*. 63: 1046-1056.
 42. Edwards N T, Harris W F. 1977. Carbon cycling in a mixed deciduous forest

- floor. *Ecology*, 1977, 58:431-437.
43. Eissenstat D M, Van Rees K C J. 1994. The growth and function of fine roots. *Ecology Bull.* 43: 76–91.
 44. Fahey T J, Hughes J W. Fine root 1994. dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal. Ecology.* 82:533-548.
 45. Finer L, Messier C, De Grandpre L. 1997. Fine root dynamics in mixed boreal conifer-broad-leaved forest stands at different successional stages after fire. *Canada Journal Forest.* 27:304-314.
 46. Fischer S, Brienza S Jr, Vielhauer K *et al.* 1998. Root distribution in enriched fallow vegetations in NE Amazonia, Brazil. Preceeding of the. Shift-Workshop Manaus. Hans-Hermann Wulff GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH. 181-184.
 47. Fogel R. 1983. Turnover and productivity of coniferous forests. *Plant and Soil.* 71:75-85.
 48. Grime J P, Cambell B D, Mackey J M L *et al.* 1991. Root plasticity, nitrogen capture and competitive ability. In: Atkinson D (ed) *Plant Root Growth, an Ecological Perspective*, Blackwell Scientific Publisheer, London. 381-397.
 49. Grier C C, Vogt K A, Keyes M R *et al.* 1981. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabis* zone ecosystems of the washington Casades. *Canada Journal Research.* 11:381-397.
 50. Gill R A, Jackson R B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist.* 147:13–32.
 51. Harris W F, Kinerson R S, Edwards N T. 1977. Comparison of below ground biomass in natural deciduous forests and loblolly pine plantation. *Pedobiologia.* 17: 369-381.
 52. Harley J L, Smith S E. 1983. *Mycorrhizal Symbiosis.* Academic Press, London. 483-487.
 53. Hahn G, Marschner H. 1998. Cation concentrations of short roots of Norway spruce as affected by acid irrगतon and liming. *Plant and soil.* 199:23-27.
 54. Hasegawa M, Takeda H. 1996. Carbon and nutrient dynamics in decomposing pine needle liter in relation to fungal and faunal abundances. *Pedobiologia.* 40: 171-184.
 55. Hendrick R L , Pretitzer K S. 1993. The dynamics of fine root, length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood forests. *Ecoscience.* 4(1):99~105
 56. Hendrick R L, Pregitzer K S. 1996. Applications of minirhizotrons to understand

- root function in forest and other natural ecosystems. *Plant and Soil*.185:293-304.
57. Hooker J E, Black K E, Perry R L. 1995. Arbuscular mycorrhizal fungi induced alteration to root longevity of poplar. *Plant and Soil*.172:327-329.
 58. Jackson R B, Mooney H A , Schulze E D. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents. *Proceedures of the National Academy of Science USA* .94:7362-7366.
 59. Joslin J D, Henderson G S. 1987. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand.. *Forest Science* 33: 330-346.
 60. Kabenagh T, Kellman M. 1992. Seasonal pattern of fine root proliferation in a tropical dry forest. *Biotropica*.24:157-165.
 61. Kelly J M, Joslin J D. 1989. Mass and chemical composition of roots in two second-growth oak forests in eastern Tennessee. *Forest Ecology and Management*.27:87-92.
 62. Keplin B, Hutl R E .2001. Decomposition of root litter in *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* stands on carboniferous substrates in the Lusatian lignite mining district. *Ecological Engineering*.17:285-296.
 63. Khiewtam R S, Ramakrishnan P S. 1993. Litter and fine root dynamics of a relict sacred grove forest at Cherrapunji in north-eastern India. *Forest Ecology and Management*.60:327-344.
 64. Lawson G J. 1995. Roots in tropical agroforestry system (Appendix 1), In: Cannell M G R, Crout N M J, Dewar R C et al (eds), Annual Report June 1993-June 1994 of Agroforestry Modelling and Research Coordination, ODA Forestry Research Programme RS651.1-25.
 65. Lopez B, Sabat S , Gracia .2001. Annual and seasonal changes in fine root biomass of a *Quercus ilex* L. forest.. *Plant and Soil*.230:125-134.
 66. Majdi H, Nylund J E. 1996. Does liquid fertilization affect fine root dynamics and lifespan of mycorrhizal short roots? *Plant and Soil*.185:305-309.
 67. Marshall J D, Waring R H. 1985. Predicting fine root production and turnover by monitoring root starch and soil temperature. *Canda Journal Forest*.15:791-800.
 68. McClaugherty C A, Aber J D, Melillo J M .1984 .Comparative root and soil dynamics on a white pine watershed and in the hardwood forest in the Coweeta Basin. *Oikos*. 42 :378-386.
 69. McClaugherty C A, Aber J D , Melillo J M .1982 .The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*. 63(5), 1481-1490.

70. Mengel K, Schmeer H. 1985. Effect of straw, cellulose and lignin on the turnover and availability of labeled ammonium nitrate. *Biology and Fertility of soils*.1: 175-18.
71. Vogt K A, Grier C C, Gower S T *et al.* 1986a. Overestimation of net root production: A real or imaginary problem? *Ecology*.67:577-579.
72. Nadelhoffer K J. 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist*.147:131–139.
73. Nadelhoffer K J, Aber J D, Melillo J M. 1985. Fine roots, net primary production, and soil-nitrogen availability—a new hypothesis. *Ecology* .66:1377–1390.
74. Nadelhoffer K J, Raich J W. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*. 73:1139-1147.
75. Olson J S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*. 44: 322-331.
76. Ostertag R, Hobbie S E. 1999. Early stages of root and leaf decomposition in Hawaiian forests: effects of nutrient availability. *Oecologia*.121:564-573.
77. Persson H. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*. 71:87–101.
78. Persson H. 1979. Fine root production, mortality, and decomposition in forest ecosystems. *Vegetation*.41:101-109.
79. Pregitzer K S, Hendrick R L, Forgel R. 1993. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New phytologist*.125:575-580.
80. Pregitzer K S, Zak D R, Curtis P S *et al.* 1995. Atmospheric CO₂, Soil nitrogen and turnover of fine roots. *New phytologist*.129:579-585.
81. Raich J W. 1980. Fine root regrow rapidly after forest felling. *Biotrop*. 12: 231-232.
82. Robinson D .1994. The response of plants to non-uniform supplies of nutrients. *New Phytologist*. 127:635-674
83. Rytter R M, Hansson A C. 1996. Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. *Biomass and Bioenergy*.11:129-137.
84. Ruijter F J, Veen B W, Van Oijen M. 1996. A comparison of soil core sampling and minirhizotrons to quantify root development of field grown potatoes. *Plant and Soil*.182:301-312.
85. Santantonio D, Hermann R K. 1985. Standing crop, production and turnover of fine roots on dry, moderate and wet sites of mature Douglas fir in western Oregon. *Ann*

- Sci For. 42:113-142.
86. Santantonio D, Hermann R K, Overton WS. 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia*, BD. 17:1-31.
 87. Samson B K , Sinclair T R. 1994 .Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant and Soil* .161:225-232.
 88. Steele S J, Gower S T, Vogel J G and Norman J M.1997. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiologist*. 17:577-578.
 89. Strong W L, Laroi G H.1983.Root depths and successional development of selected boreal forest communities. *Canda Journal Forest*.13:577-588.
 90. Singh J S, Gupta S R.1997. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem. *Botany Review*. 43:449-528.
 91. Silver W, Miya R. 2001. Global patterns in root decomposition:Comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia* .129:407–419.
 92. Sundarapandian S M,Swamy P S.1996.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*.86:181-192.
 93. Steele S J, Gower S T, Vogel J G, Norman J M.1997. Rootmass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiol*. 17:577–587.
 94. Travis W I, Phillip E, Pope.2000.Felix Ponder Jr. Fine root dynamics across a chronosequence of upland temperate deciduous forests. *Forest Ecology and Management*.127 :153-167.
 95. Tryon P R,Chapin F S.1983.Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees. *Canda Journal Forest*.18:245-263.
 96. Torquebiau E F,Kwesiga F.1996.Root development in a Sesbattla sesban fallow-maize system in Eastern Zambia. *Agrofor Systems*.34:193-211.
 97. Usman S,Singh S P,Rawat Y S,Bargali S S.2000.Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya. *Forest Ecology and Mangement*.131:191-199.
 98. Vogt KA ,Grier C C,Meier C E *et al*.1982.Myconhizal role in net primary and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington. *Ecology*.63:370
 99. Vogt KA ,Persson H .1991 .Measuring growth and developmentof roots. In *Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology*.Eds. J P Lassoie and T M Hinckley. 477–501.

100. Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate. *Plant and Soil*. 187:159–219.
101. Vogt K A, Vogt D J, Bloomfield J. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and reduction of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil*. 200:71–89.
102. Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. 1986b. Production, turnover and nutrient dynamics of above and below ground detritus of world forest. *Advance ecology research*. 15:303-377.
103. Witkamp M. 1966. Decomposition of leaf litter in relation to environment, microflora, and microbial respiration. *Ecology*. 47:194-201.
104. Yin X, Pery J A, Dixon R K. 1989. Fine-root dynamics and biomass distribution in a *Quercus* ecosystem after harvest. *Forest Ecology and Management*. 27: 159-177.

后 记

本论文是在我尊敬的导师王希华副教授悉心指导下完成的，从论文的选题、定题、试验过程及成文都倾注了导师大量的心血。另外，导师在平时学习和生活中都给予我极大的关心和支持，在此表示由衷的感谢！

三年的学习，经历了无数的坎坷和波折，在学习过程中得到生态组所有老师无微不至的关怀和帮助，系仪器室钱晓海老师在仪器使用和资料复印上提供了很多方便，值此论文完成之际向他们表示最为衷心的感谢！

特别感谢师兄闫恩荣博士三年中给予我学习和生活上极大的鼓舞，在论文的完成过程中，无论在野外取样还是室内试验，他都给予我极大的帮助。

感谢师弟方晓峰、戴慧、姜良才及师妹陈卫娟、杨玲、高玉平在野外取样和试验过程中给予我的帮助，感谢同窗王希波在工作和学习上的支持，同时感谢学弟程铭华和学妹王婷在试验中给予的帮助，在野外取样过程中，天童林场王阿昌和王良衍两位场长在工作和生活上给予大量帮助，在此表示感谢！

最后，我要感谢我的家人，他们的理解、关心、支持和鼓励永远是我前进的动力！

