

滨海沙地木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 人工林 细根养分与能量动态

叶功富^{1,4}, 张立华^{2*}, 林益明², 侯杰³, 卢昌义⁴, 曾国强⁵

(1 福建省林业科学研究院, 福州 350012; 2 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005; 3 闽江学院, 福州 350108;
4 厦门大学海洋与环境学院, 厦门 361005; 5 福建省惠安赤湖林场, 惠安 362100)

摘要: 2005 年 1 月到 2005 年 11 月对福建省惠安县赤湖林场不同林龄木麻黄人工林细根养分和能量的季节动态进行了观测, 结果表明: (1) 6 种元素的含量在不同林龄木麻黄细根中都具有明显的季节变化。各林龄细根的 N 含量一般在冬夏季节较高, 且死细根的 N 浓度高于相同林龄的活细根, 除 12 林龄活细根 P 浓度在 7 月份有最大值外, 其他各林龄活、死细根在一年中呈波动性下降, K 含量在冬季较高, 而在其他季节变化幅度不大, 除 5 林龄活细根和 18 林龄死细根在 3 月份和 7 月份有两个峰值外, 其他林龄细根 Ca 含量随季节变化较小, Mg 含量随季节变化总体呈下降趋势, 而在 11 月份上升; 各林龄 C 则呈波浪形变化; (2) 随着林龄的增大, 细根 N、P、Mg 含量的变化模式相似, 都呈先增加, 后降低, 再增加的趋势, K 和 Ca 含量变化趋势相似, 但变动幅度存在差别, C 则呈波浪形变化; (3) 随着季节的变化, 灰分、干重热值和去灰分热值呈“V”形变动, 一年中都存在两个峰值, 分别在 3 月份和 7 月份或 9 月份; (4) 灰分、干重热值和去灰分热值随林龄的增大表现为波浪形增加。由此可见, 不同森林类型的细根养分和能量动态具有季节和林龄的特殊性, 在进行整个地区森林生态系统物质循环和能量流动研究时, 应考虑不同森林类型的特性。

关键词: 木麻黄; 细根; 养分; 能量; 季节动态

文章编号: 1000-0933(2007)09-3874-09 中图分类号: Q945; S718.5 文献标识码: A

Dynamics of nutrient and energy for fine roots of *Casuarina equisetifolia* plantations on coastal sandy soil

YE Gong-Fu^{1,4}, ZHANG Li-Hua^{2*}, LIN Yi-Ming², HOU Jie³, LU Chang-Yi⁴, ZENG Guo-Qiang⁵

1 Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China

2 School of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

3 Minjiang College, Fuzhou 350108, China

4 College of Oceanography and Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China

5 Chihu Forestry Farm of Hui'an County, Fujian Province, Hui'an 362100, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27(8): 3874~3883

Abstract The seasonal dynamics of nutrient and energy of fine roots in *C. equisetifolia* plantations of different ages was studied at Chihu forestry farm of Hui'an county, Fujian province from January to November in 2005. We obtained the

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAB03A14-01); 福建省科技重大资助项目 (2006NZ001-2); 国家林业局南方山地用材林培育重点实验室资助项目

收稿日期: 2006-07-11; 修订日期: 2007-06-30

作者简介: 叶功富 (1966-), 男, 福建政和人, 博士, 教授级高工, 主要从事森林生态学、防护林学研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlh800522@163.com

Foundation item: The project was financially supported by the National Eleventh-five year project (No. 2006BAB03A14-01), Fujian Provincial Major Special Program of Science and Technology (No. 2006NZ001-2) and southern mountain timber forest cultivation laboratory

Received date: 2006-07-11; **Accepted date:** 2007-06-30

Biography: YE Gong-Fu, Ph. D., Professor mainly engaged in forest ecology and protection forest

following results (1) There was significant seasonal dynamics of six elements in the fine roots of different aged *C. equisetifolia* plantations. N concentration of dead fine roots was higher than that of living fine roots, and was relatively higher in summer and winter. P concentration of fine roots fluctuated with a decreasing trend except for the living fine roots of 12 year-old plantation. K concentration was higher in winter than in the other seasons. The highest Ca concentration in March and July was found in living fine roots of 5 year-old plantation and dead fine roots of 18 year-old plantation, while Ca concentration remained little change for other aged plantations. Mg concentration decreased from January to September and then increased in November. C content fluctuated with time. (2) The similar trend was found for N, P and Mg, and for K and Ca, respectively. C concentration fluctuated with plantation age. (3) The ash content, gross caloric values and ash free caloric values changed with "V" type, and were relatively high in March and July or September, respectively. (4) The ash content, gross caloric values and ash free caloric values tended to increase with the increasing plantation age. It was concluded that the nutrient and energy dynamics of fine roots varied with seasons and plantation ages. To discuss matter cycling and energy flow of forest ecosystems, we should pay attention to these characteristics of different stands.

Key Words *Casuarina equisetifolia*; fine root; nutrient; energy; seasonal dynamics

细根 (fine root, 多数定义为直径 ≤ 2 mm) 是森林生态系统生物量和养分库中重要的动态组成部分, 在森林生态系统能量流动和物质循环中起着关键性的作用^[1]。许多林分年净初级生产力的 50% 以上均用于细根的生产 and 维持^[2-3], 全球平均约为 33%^[4]; 通过细根周转对土壤 C 和养分的归还量可能等于甚至超过地上部分枯落物^[5-7]。研究表明, 对于森林生态系统, 如果忽略根 (尤其是细根) 的作用, 有机质及养分归还将被低估 20% ~ 80%^[8]。因此, 细根既是森林净初级生产力重要的“汇”^[4, 9, 10], 又是土壤 C 和养分主要的“源”^[11-13], 是研究森林生态系统能量流动和物质循环的关键环节。

木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 是东南沿海主要的防护树种之一, 主要生长于干旱、贫瘠的滨海沙地上。近年来, 由于自然环境和人类的影响, 木麻黄防护林存在老化、生长衰退、树种单一、林带结构不理想、低值和低效林分增加、防护效能降低等突出问题, 对沿海防护林体系的可持续发展影响极大。其中, 林地养分状况是决定其生长状况的主要因素之一, 而林地养分来源主要是地上凋落物及根系, 尤其是细根的分解。因此, 对木麻黄防护林细根养分的研究具有特殊的重要意义。国外对树木细根的研究日益受到研究人员的重视, 取得了丰硕的研究成果, 关于细根的养分和能量, 国内也开展了少量的研究^[14-18]。对于木麻黄防护林, 仅见于对其地上部分养分和能量的研究^[19-22], 对于地下部分尤其是细根的研究尚未见报道。本文从 2005 年 1 月到 2005 年 11 月, 对福建省滨海沙地上木麻黄人工林细根养分浓度及能量的季节变化动态进行了系统的研究, 旨在探讨不同林龄木麻黄细根对养分和能量吸收和固定的季节规律, 从养分的角度来探讨木麻黄防护林的衰退问题, 对更好地估计木麻黄人工林养分循环和能量流动是非常重要的, 有利于检验木麻黄对贫瘠养分生境的适应能力是否随林龄的增加而降低, 使人们更清楚的了解提高木麻黄人工林的生产力和产生良好生态效益的机制, 为该地区木麻黄防护林营林措施提供理论依据。

1 试验地概况

实验地设在福建省沿海中部惠安县崇武赤湖国有防护林场 ($118^{\circ}55'E$, $23^{\circ}45'N$)。属南亚热带海洋性季风气候, 年平均气温 $19.8^{\circ}C$, 绝对最高气温 $37^{\circ}C$, 绝对最低气温 $2.2^{\circ}C$, 全年无霜期 320 d, 年均降水 1029 mm, 年均蒸发 2000 mm, 蒸发量大于降雨量, 全年干湿季节明显, 夏季 (7~9 月份) 多台风和暴雨天, 秋冬东北风强盛, 8 级以上的大风天达 105 d, 年平均风速 $7.0 m \cdot s^{-1}$, 最大风速 $32.6 m \cdot s^{-1}$, 干湿季明显, 干旱的频率高。土壤以滨海沙土为主, 主要是潮积沙土、红壤性风积沙土、泥炭性风积沙土等, 本试验地土壤为均一性风积沙土, 沙土层厚度 80~100 cm, 土壤 pH 5.00, 阳离子交换总量 4.51 cmol/kg , 土壤养分含量, 有效磷 0.25 mg/kg , 速效钾 13.27 mg/kg , 全氮 0.24 g/kg , 全碳 2.48 g/kg 。试验样地设置在 5, 12, 18, 24, 30a 和 42a 生木麻黄人工纯林内, 株行距 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$, 样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 木麻黄初始密度 $2500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 林下灌木、草

本稀少。目前各林龄木麻黄林分主要特征见表 1。

表 1 不同林龄木麻黄人工林的主要特征

Table 1 Community main characteristics of *C. equisetifolia* plantations of different ages

林龄 Forest ages (a)	5	12	18	24	30	42
密度 Density (individual hm^{-2})	2350	1725	1648	1497	1157	985
胸径 DBH (cm)	5.28	9.93	13.78	18.57	20.37	23.18
树高 Height (m)	8.12	11.75	13.97	16.89	17.75	19.32

2 研究方法

2.1 取样方法

2005年 1月到 11月,隔月月初在 5年生、12年生、18年生木麻黄人工林样地(20 m × 20 m)内根据离树体的远近随机选择 20个样点,每样点用内径为 80 mm 的土钻钻取长度为 70 cm 的土芯,使土芯保存完整,带回实验室,或者当场按每 10 cm 一个层次分割土芯,共分为 7层,分别在土壤套筛上过筛,拣出直径小于 2 mm 的细根,用清水冲洗干净,并根据外形、颜色、弹性及根皮与中柱分离的难易程度来区分活死根。2005年 11月在 24年生、30年生和 42年生林地内按上述方法取样。

2.2 养分分析方法

将所取细根样品置于 80°C 烘箱中烘干,用植物样品粉碎机粉碎,并通过 0.5 mm 筛孔,然后装于自封袋中备用。

全 C、N 测定采用岛津 GC-8A 全自动碳氮分析仪;全 P 采用钼锑比色法测定;K、Ca、Mg 经湿消化后,用原子吸收光谱仪分析;热值测定仪器采用上海昌吉地质仪器有限公司生产的 XYR-1A 型微电脑氧弹式热量计。样品热值以干重热值(每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量,简称 GCV)和去灰分热值(AFCV)表示。测定环境是在空调控制 20°C 左右,每次实验对仪器进行标定。

灰分测量采用干灰化法,样品在马福炉中 550°C 下灰化 5 h 后测定灰分含量。去灰分热值 = 干重热值 / (1 - 灰分含量)。去灰分热值去除了因灰分含量不同而造成的干扰,更能够反映植物体各组分热值情况。

3 结果与分析

3.1 木麻黄人工林细根养分含量及其动态

3.1.1 细根 N、P、K、Ca、Mg、C 含量季节动态

图 1 示各林龄木麻黄细根全 N 浓度的季节变化,每个林龄细根 N 浓度都随季节变化而发生波动,但各林龄之间以及死、活根之间的变化规律并不相同。另外,活细根和死细根 N 浓度的峰值交替出现,且一般死细根的 N 浓度高于相同林龄的活细根。各林龄木麻黄细根 P 浓度的月变化没有相似的变化模式。就活细根而言,5 林龄中 P 浓度在一年中有两个峰值,分别出现在 3 月份(0.27 g/kg)和 7 月份(0.24 g/kg);12 林龄和 18 林龄 P 浓度的月变化模式都表现为一条单峰曲线,峰值分别出现在 7 月份(0.33 g/kg)和 5 月份(0.26 g/kg)。5 林龄、18 林龄死细根中 P 浓度都有两个峰值,分别出现在 1 月份(0.30 g/kg)、7 月份(0.28 g/kg)和 5 月份(0.31 g/kg)、9 月份(0.26 g/kg);12 林龄死细根在一年中只在 5 月份有 1 个峰值(0.26 g/kg)。从季节上看,冬春季养分浓度较低,而夏秋季较高。细根养分浓度的这种变化与细根一年的活动规律及外界的气候条件有关,冬季较低的养分浓度与细根活动的停止而导致养分吸收少有关,而早春 3 月份细根浓度偏低与细根养分被大量新生长的根物质所稀释有关,之后进入初夏后,随细根活动的增强,其吸收养分能力也增强,因而细根养分浓度上升。至秋季,地上部分停止生长,使细根吸收的养分分配到地上部分的比重下降,从而导致细根中养分浓度有所上升。各林龄木麻黄细根 K 浓度的月变化模式较为相似;关于 Ca 浓度的季节变化,除了 18 林龄木麻黄死细根和 5 林龄活细根分别在 3 月份(5.71 g/kg 和 2.54 g/kg)和 7 月份(4.68 g/kg 和 2.16 g/kg)出现两个峰值外,其他各项在一年中变化平缓;关于 Mg 浓度的月变化模式,除 12 林龄木麻黄活细根在 7 月份出现 1 个峰值(0.51 g/kg)以外,其他各项具有相似的变化趋势。各林龄死、活细根全 C 含量随季节变

化的变动模式基本相似, 均呈“V”型, 且死细根的全 C 含量高于相同林龄的活细根。

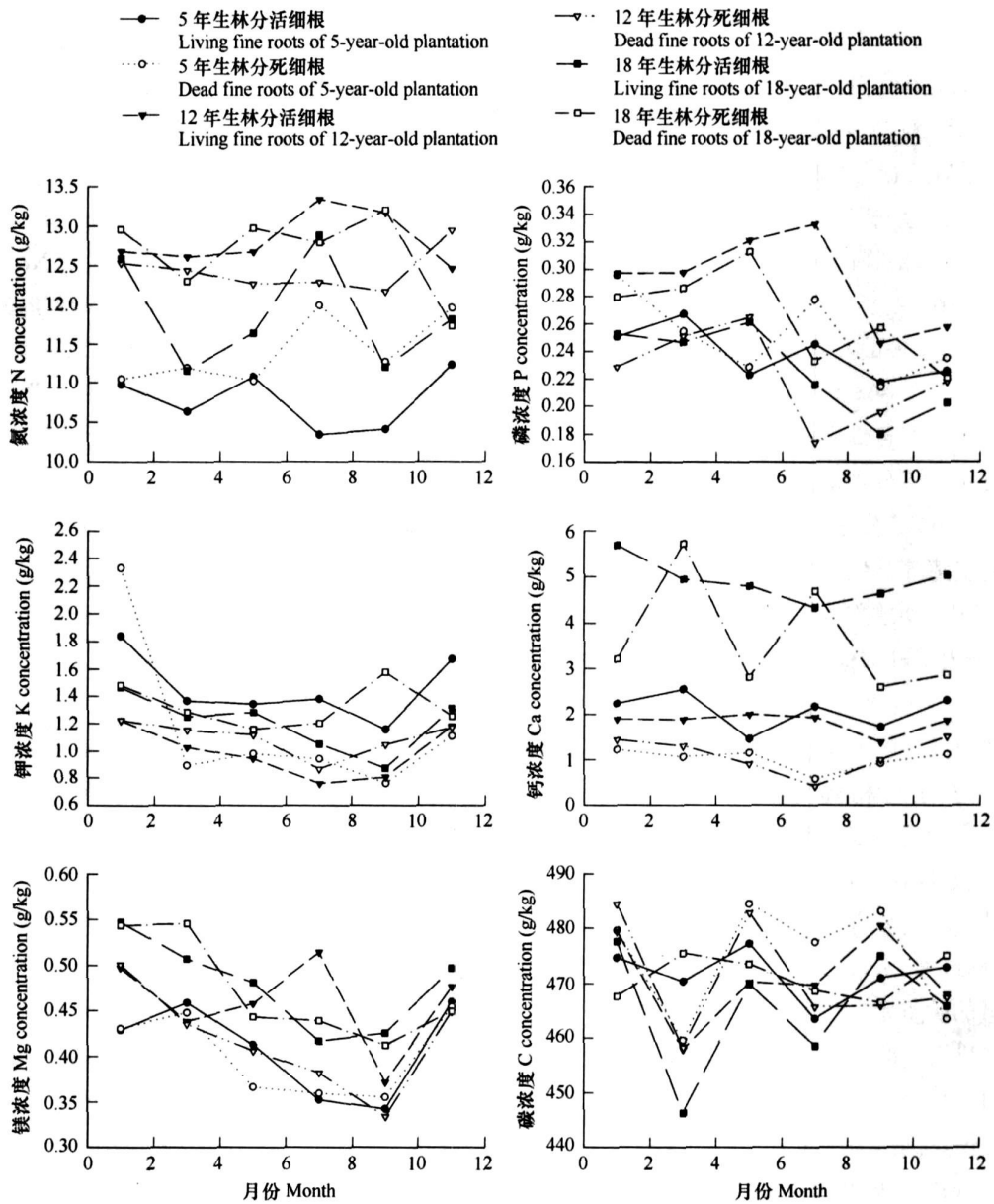


图 1 不同林龄木麻黄人工林细根各养分元素季节变化

Fig 1 The seasonal change of nutrient elements for fine roots in *C. equisetifolia* plantations of different age

总之, 各林龄细根中 K、Ca、Mg 浓度除了在生长季节略有波动之外, 最大值均出现在木麻黄停止生长的岁末年初, 这是由于在秋季细根里养分的不断积累而使养分浓度达到最高。而在生长季节根系将吸收的一部分养分输送到地上部分以满足其生长需要, 由于各月份水分、温度、光照等因素的差异又导致养分浓度略有波动。另外, 不同季节木麻黄细根中的养分有的表现为再吸收 (即死细根中的养分浓度低于活细根), 有的表现为累积 (即活细根中的养分浓度低于死细根), 如 5 林龄木麻黄死细根的大部分养分浓度在 1 月份高于活细根, 而在其他月份低于活细根, 这是由于 1 月份木麻黄生长缓慢, 对养分的需求较少, 使得养分在死细根中累积; 而进入春季, 气候条件有利于木麻黄迅速生长, 对养分的需求随之增多, 为了适应贫瘠的滨海沙地, 死细根中养分的再吸收也开始增加。至于不同林龄之间的差别, 可能是由于不同的立地类型造成的。

3.1.2 细根养分浓度随林龄变化动态

由图 2 可见,木麻黄活细根全 N、P 浓度随林龄的变化趋势基本相同。起初随林龄升高 N、P 浓度逐渐增加,到 12 林龄达到 1 个峰值 (12.45 g/kg 和 0.26 g/kg), 继而下降,并在 24 林龄达到最低 (10.59 g/kg 和 0.17 g/kg), 然后又直线上升,直至 42 林龄达到最高 (14.11 g/kg 和 0.36 g/kg)。5 林龄活细根 K 浓度最高为 1.67 g/kg 然后下降,到 12 林龄达到 1.18 g/kg 后又开始上升,至 18 林龄 (1.31 g/kg) 又下降,30 林龄达到最小值 0.89 g/kg 最后又有上升趋势,12 林龄后,活、死细根 K 浓度变化模式相似。木麻黄活细根 Ca 浓度在 5 林龄较高,为 2.30 g/kg 随林龄增大而下降,在 12 林龄后上升幅度较大,到 18 林龄达到一个峰值 5.03 g/kg 后又急剧下降至 24 林龄很低的水平,然后随林龄的增大表现极弱的上升趋势。Mg 的浓度在 5 至 18 林龄逐渐上升,然后下降,在 24 至 42 林龄又逐渐上升,且活、死细根的变化模式一致。总体而言,各林龄死细根的 C 浓度高于活细根,活细根的 C 浓度随林龄的增加而逐渐减小,至 24 林龄达到低谷 (445.74 g/kg), 然后上升,在 30 林龄达到一个峰值 468.07 g/kg 后又下降,而死细根 C 浓度在前期一直升高,18 林龄后与活细根的变化趋势类似。整体上木麻黄细根的养分含量并未表现出随树木年龄变化而出现有规律的增减。造成这种现象的原因可能是细根的养分含量受到其生长立地土壤养分可利用状况和土壤含水量等的差异影响^[23]。随着林龄的增加,死细根中的养分浓度比活细根增加较快,表明木麻黄细根的养分富集随着林龄的增加而增强,随年龄增加木麻黄对贫瘠养分生境的适应能力逐渐降低,反映了木麻黄细根养分保存方面的衰退特征,这与曾德慧等人^[23]对樟子松叶片的研究结果相似。

3.2 木麻黄人工林细根灰分含量、干重热值、去灰分热值及其动态

3.2.1 细根灰分含量、干重热值、去灰分热值的季节动态

灰分含量随植物种类、器官、部位和季节的变化而变化。由图 3 可见,除 18 林龄木麻黄人工林死细根灰分含量以外,其他各林龄活、死细根的灰分含量随季节的变化具有相似的变化趋势。木麻黄细根灰分含量在一年中的动态变化呈双峰型,1 月份较低,之后逐渐升高,到 3 月份达到第 1 个峰值,而后又下降,在 5 月份达到 1 个低峰,然后在 7 月份又出现第 2 个峰值,之后下降并在秋冬季节有所回升。

木麻黄细根灰分含量的这种变动模式与其地上和地下部分的年生长规律有关。冬末春初气温和地温开始回升,降雨增多,土壤中养分有效性增大,细根大量吸收土壤中的养分,而此时地上部分生长量较小,因此细根吸收大量的矿质元素贮留在细根中,此时灰分含量在一年中最高。随后,木麻黄地上部分进入快速生长期,需要细根提供大量的矿质元素,细根中的灰分含量降低。进入仲夏,由于高温干旱,林木生长速度变慢,但木麻黄根系由于长期适应滨海沙地干旱贫瘠的环境,仍能继续生长,从而使矿质元素集中在细根中,使细根灰分含量在 7 月份达到另一个峰值,之后进入 9 月份,高温有所缓和,木麻黄地上部分开始迅速生长,吸收了大量的矿质元素,使细根的灰分含量显著降低。此后,气温继续下降,木麻黄林分及与林分争夺养分的灌草生长缓慢甚至停止,使细根中灰分的含量又有所上升,死细根灰分含量的月变化模式基本与活细根相一致。

各林龄木麻黄细根的干重热值和去灰分热值随季节的变化动态几乎完全一致。木麻黄细根的干重热值在冬季较低,进入初春,由于细根生物量总体仍表现为下降趋势,导致分配到单位质量细根中的干重热值较高,进入 5 月份地上部分处于旺盛生长阶段,干重热值处于一年中的最低值,之后,由于气温较高,光合作用增强,分配给地下的光合产物增多,细根干重热值含量开始回升。进入秋季后虽然光合作用有所减弱,但细根的生物量又处于较低的水平,因而单位质量细根的干重热值仍较高,至秋季,光合作用更低,虽然地上部分上升较为缓慢,分配给地下部分的光合物质增多,但细根也处于快速生长的时期,所以干重热值含量下降或增加不明显。

3.2.2 细根灰分含量、干重热值、去灰分热值随林龄的变化动态

木麻黄活细根和死细根灰分含量随林龄的变化模式相似(图 4),起初随林龄增加而增大,到 12 林龄后有所下降,至 18 林龄开始上升,24 林龄达到最大值(活细根 191.87 g/kg 死细根 237.93 g/kg)后又下降,30 林龄后又有所上升。细根灰分含量基本与林龄成反比,且活细根的灰分含量低于相应林龄的死细根,这说明随林

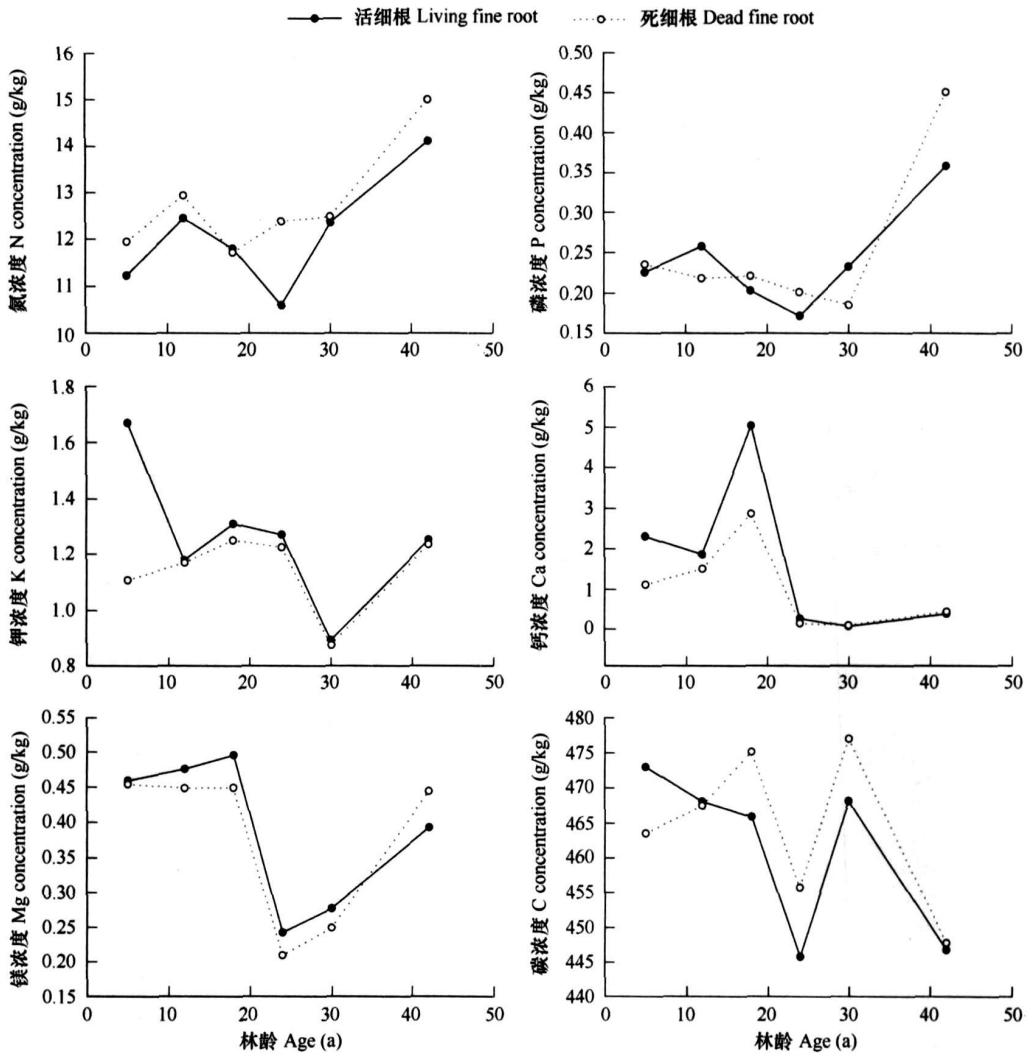


图 2 木麻黄人工林各养分元素随林龄变化动态

Fig 2 The dynamic of nutrient elements for fine roots in *C. equisetifolia* plantations with ages

龄的增大, 根系木质化程度得到加强, 随着细根的死亡和分解, 干物质重减少, 而灰分却在死细根里得到不断的积累。细根的干重热值基本上与林龄成正比, 这可能与林龄的增加导致木质化程度加强和灰分含量增加有关。木麻黄细根干重热值和去灰分热值随林龄变化动态基本相一致, 只是 24 林龄死细根的去灰分热值明显较高, 这与 24 林龄死细根灰分含量较高有关, 导致了死细根去灰分热值的增加, 甚至超过 24 林龄的活细根。

4 结论与讨论

木麻黄人工林细根 N、P、K、Ca、Mg、C 等元素的浓度随着季节变化的变动模式不同, 死细根与活细根之间也存在差异, 随着林龄的变化, 各种养分元素浓度的变化动态也不一样, 死细根与活细根之间的变化趋势类似。除 18 年生木麻黄人工林的死细根灰分含量以外, 其他各林龄活、死细根的灰分含量随季节的变化具有相似的变化趋势, 各林龄木麻黄细根的干重热值和去灰分热值随季节的变化动态几乎完全一致。活细根和死细根灰分含量随林龄的变化模式相似, 且活细根的灰分含量低于相应林龄的死细根。木麻黄细根干重热值和去灰分热值随林龄变化动态基本相一致, 基本上随林龄的增加而呈现波浪式增大的趋势。该研究中各林龄林分细根中各种养分含量没有明显相似的季节变化, 国外也有部分学者的研究表明细根养分浓度无明显季节变化或变化很小, 如 McClaugherty 等^[24] 报道阔叶林的细根 N 的浓度有一些季节模式, 但这种变动很小且不显著, 在西加云杉人工林直径小于 1 mm 的活根里的 N 浓度表现相对小的季节变动。这种差异可能与所研究的

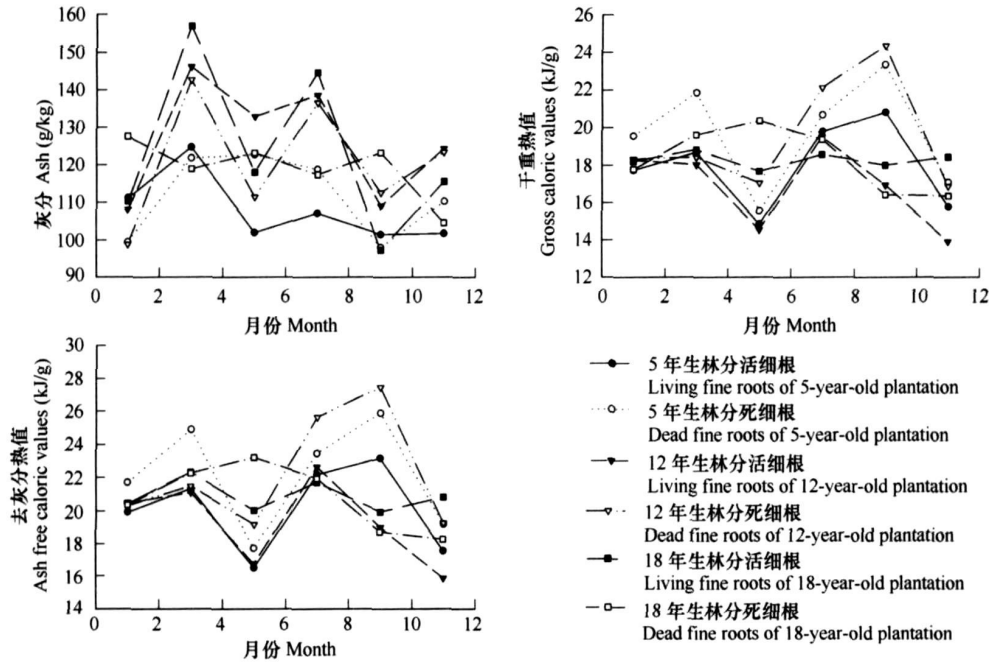


图 3 不同林龄木麻黄人工林细根灰分、干重热值和去灰分热值季节变化动态

Fig 3 The seasonal change of ash, gross caloric values and ash free caloric values of fine roots in *C. equisetifolia* plantations of different ages

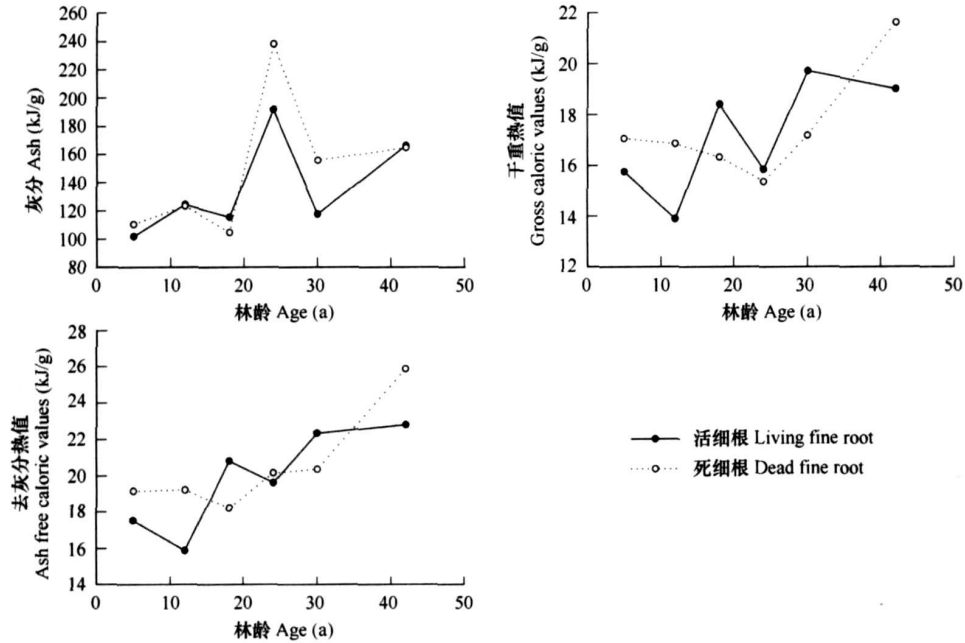


图 4 木麻黄人工林细根灰分、干重热值和去灰分热值随林龄变化动态

Fig 4 The dynamic of ash, gross caloric values and ash free caloric values for fine roots in *C. equisetifolia* plantations with ages

树种特性和所处的气候条件不同有关。至于不同林龄木麻黄防护林细根养分含量的季节变化模式不同,可能与它们所处的立地条件不同有关。对于不同的养分种类,如 12 林龄木麻黄细根中的 N、P 和 Mg, 5 林龄的 K, 以及所有林龄的 Ca 在死细根中的浓度低于活细根,表明在细根的死亡过程中养分发生了转移,但也有些养分,甚至同一种养分在不同季节或不同林龄细根中表现为富集,即死细根大于活细根中的浓度,这可能是导

致木麻黄防护林衰退的原因之一。

由于不同季节气候条件以及不同林龄木麻黄细根木质化程度的差异, 不同林龄的细根在不同季节对养分和能量的吸收和固定规律不同, 因而, 季节和林龄变化都对其有较大影响。随着年龄的增长, 木麻黄细根热值存在增长的趋势, 增长的原因应该是群落光能利用效率的增加^[25]。春夏季节是木麻黄林分生长较快, 对养分需求较旺盛的时候, 且雨水较多, 此时, 在条件具备的情况下可采用人工施肥等方法补充营养, 来促进现有防护林的生长, 改善林地土壤肥力, 为根系乃至整个林分的生长创造良好的条件, 使木麻黄防护林发挥更佳的效能。

References

- [1] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, *et al.* Fine root decomposition and nitrogen mineralization patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Haryana. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131: 191-199.
- [2] Fogel R, Hunt G. Fungal and arboreal biomass in a western Oregon Douglas-fir ecosystem: distribution patterns and turnover. *Canadian Journal of Forest Research*, 1979, 9: 245-256.
- [3] Grier C C, Vogt K A, Keyes M R, *et al.* Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystem of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, 1981, 11: 155-167.
- [4] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents. *Ecology*, 1997, 94: 7362-7366.
- [5] Pregitzer K S, Hendrick R L, Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist*, 1993, 125: 575-580.
- [6] Arthur M A, Fahey T J. Biomass and nutrients in an Engelmann spruce subalpine fir forest in north central Colorado: pool annual production and internal cycling. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22: 315-325.
- [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] Vogt K A, Grier C C, Gower S T, *et al.* Overestimation of net root production: A real or imaginary problem?. *Ecology*, 1986, 67: 577-579.
- [9] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 2507-2520.
- [10] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147: 13-31.
- [11] 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, Canada. *Tree Physiology*, 1997, 17: 577-587.
- [12] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 123(3): 389-399.
- [13] King J S, Aibaugh T & Allen *et al.* Belowground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 2002, 154(3): 389-398.
- [14] Zhai M P, Jiang S N, Jia L M. Study on fine root nutrient dynamics in the mixed plantation of Poplar and Black Locust. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(4): 46-51.
- [15] Liao L P, Yang Y J, Wang S L, *et al.* Distribution, decomposition and nutrient return of the fine root in pure *Cunninghamia lanceolata*, *Michelia macclurei* and the mixed plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 342-346.
- [16] Liao L P, Gao H, Yu X J, *et al.* Nutrient retranslocation in fine roots of *Cunninghamia lanceolata*, *Alnus cremastogyne* and *Kalopanax septemlobum* in the mixed plantations—a pilot study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 161-164.
- [17] Yang Y S, Chen G S, Lin R Y, *et al.* Dynamics of energy for fine roots in mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(1): 31-34.
- [18] Yang Y S, Chen G S, Lin R Y, *et al.* Dynamics of standing crop of N and P for fine roots of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Forest Research*, 2002, 15(5): 575-581.
- [19] Ye G F, Long X W, Pan H Z, *et al.* Dynamics of litter and its decomposition in *Casuarina equisetifolia* plantation. *Protection Forest Science and Technology* the monograph, 30-34, 76.
- [20] Ye G F, Zhang Q H, Lu C Y, *et al.* Energy characteristics of *Casuarina equisetifolia* ecosystem on coastal sand in Dongshan County, Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1812-1816.

- [21] Zhang Q H, Ye G F, Lin Y M. Dynamic Caloric Value of *Casuarina equisetifolia* Litter During Decomposition on Coast Sandy Land. *Forest Research*, 2005, 18(4): 455-459.
- [22] Zhang Q H, Ye G F, Lin Y M, *et al*. Study on biomass and energy of *Acacia crassicarpa* forest and *Pinus elliotii* forest on the coast sandy soil site. *Journal of Xiamen University(natural science)*, 2005, 44(1): 123-127.
- [23] Zeng D H, Chen G S, Chen F S, *et al*. Foliar nutrients and their resorption efficiencies in four *Pinus sylvestris* var *mongolica* plantations of different ages on sandy soil. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 21-27.
- [24] McLaugherty C A, Aber J D and Melillo J M. The role of fine root in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 1982, 3(5): 1481-1490.
- [25] Qiao X J, Cao M, Lin H. Caloric values allocation of dominant species in four secondary forests at different ages in Xishuangbanna, southwest China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 326-332.

参考文献:

- [14] 翟明普, 蒋三乃, 贾黎明. 杨树刺槐混交林细根养分动态研究. *林业科学*, 2004, 40(4): 46~ 51.
- [15] 廖利平, 杨跃军, 汪思龙, 等. 杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、火力楠 (*Michelia acclurei*) 纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还. *生态学报*, 1999, 19(3): 342~ 346.
- [16] 廖利平, 高洪, 于小军, 等. 人工混交林中杉木、桉木和刺楸细根养分迁移的初步研究. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 161~ 164.
- [17] 杨玉盛, 陈光水, 林瑞余, 等. 杉木、观光木混交林群落细根能量动态变化. *北京林业大学学报*, 2002, 24(1): 31~ 34.
- [18] 杨玉盛, 蔡丽平, 陈光水, 等. 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*, 2002, 15(5): 575~ 581.
- [19] 叶功富, 隆学武, 潘惠忠, 等. 木麻黄的凋落物动态及其分解. *防护林科技*, 1996, (专辑), 30~ 34, 76.
- [20] 叶功富, 张清海, 卢昌义, 等. 福建东山滨海沙地木麻黄林生态系统的能量特征. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1812~ 1816.
- [21] 张清海, 叶功富, 林益明. 滨海沙地木麻黄凋落物分解过程中热值的动态变化. *林业科学研究*, 2005, 18(4): 455~ 459.
- [22] 张清海, 叶功富, 林益明. 福建东山县赤山滨海沙地厚荚相思林与湿地松林生物量和能量的研究. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2005, 44(1): 123~ 127.
- [23] 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 等. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率. *林业科学*, 2005, 41(5): 21~ 27.
- [25] 乔秀娟, 曹敏, 林华. 西双版纳不同林龄次生植物群落优势树种的热值. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 326~ 332.