

长白山几种主要森林群落木本植物 细根生物量及其动态

郭忠玲¹, 郑金萍¹, 马元丹², 韩士杰³, 李庆康⁴, 于贵瑞⁴, 范春楠¹, 刘万德¹, 邵殿坤¹

(1. 北华大学林学院, 吉林市 132013; 2. 南京大学生物学院, 南京 210093;

3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 2005 年在长白山北坡选择 5 种垂直植被带典型植物群落类型阔叶红松林、白桦林、山杨林、云冷杉林和岳桦林, 利用钻取土芯法对细根分布及细根生物量进行了研究。研究表明, 不同森林群落细根现存生物量存在一定的差异, 其中白桦林最高, 月平均细根现存生物量为 5.1340 t/hm^2 、其次为云冷杉林 (5.0530 t/hm^2)、岳桦林 (4.9255 t/hm^2)、阔叶红松林 (4.4919 t/hm^2) 和山杨林 (3.9372 t/hm^2) ; 不同群落细根现存量月动态变化也有较大差异, 月均最高最低相差阔叶红松林约为 72 %、白桦林近 73 %、山杨林 26 %、云冷杉林 56 %、岳桦林 144 %。在生长季节内不同群落细根发生和死亡也是不均匀的, 春季所有群落都会产生大量的细根, 一些群落在初秋 (9 月份) 出现另一个较高的峰值, 同时发现每次细根大量发生后, 都随之产生大量细根的死亡, 生长季末群落死亡细根生物量往往是最高的。调查群落 72.9 % 以上的细根集中于土壤表层 0 ~ 10 cm 的范围内, 不同群落略有差别, 在所研究的 5 种森林群落中, 不同月份 0 ~ 10 cm 土层中细根生物量几乎都表现出白桦林 > 阔叶红松林 > 云冷杉林 > 岳桦林 > 山杨林。

关键词: 长白山; 细根; 生物量

文章编号: 1000-0933(2006)09-2855-08 **中图分类号:** Q14, Q948, S718.556 **文献标识码:** A

A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China

GUO Zhong-Ling¹, ZHENG Jin-Ping¹, MA Yuan-Dan², HAN Shi-Jie³, LI Qing-Kang⁴, YU Gui-Rui⁴, FAN Chun-Nan¹, LIU Wan-De¹, SHAO Dian-Kun¹ (1. College of Forestry, Beihua University, Jilin 132013, China; 2. College of Biology, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2855 ~ 2862.

Abstract: Fine root distribution and biomass were examined in 2005 using auger/soil core method in five forest communities along the northern slope of Changbai Mountain. Selected forest communities are Broad-leaved Korean Pine forest, Asian white birch forest, David poplar forest, Spruce-fir forest and Ermans Birch forest and belong to different vegetation belts of different altitudes. The results show that fine root biomass and seasonal dynamics vary among different forest communities. Asian white birch forest has the highest monthly mean biomass (5.1340 t/hm^2), followed by Spruce-fir forest (5.0530 t/hm^2), Ermans Birch forest (4.9255 t/hm^2), Broad-leaved Korean Pine forest (4.4919 t/hm^2) and David poplar forest (3.9372 t/hm^2). The difference between highest and lowest monthly mean values is about 72 % in Broad-leaved Korean Pine forest, 73 % in Asian white birch forest, 26 % in David poplar forest, 56 % in Spruce-fir forest, and 144 % in Ermans Birch forest. Along growing season, fine root growth is

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30470293); 中国科学院知识创新课题资助项目 (KZCX1-SW-01-03); 中国科学院知识创新课题资助项目 (CX0G-E01-02)

收稿日期: 2006-03-20; **修订日期:** 2006-07-26

作者简介: 郭忠玲 (1965 ~), 男, 吉林省吉林市人, 博士, 教授, 主要从事森林生态系统结构和功能、生态恢复研究. E-mail: gzl65@163.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30470293); the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (CAS) (No. KZCX1-SW-01 and CX0G-E01-02)

Received date: 2006-03-20; **Accepted date:** 2006-07-26

Biography: GUO Zhong-Ling, Ph. D., Professor, mainly engaged in structure and function of forest ecosystem and ecological restoration. E-mail: gzl65@163.com

generally at the highest level in spring in all forest communities and reaches another peak in the early fall (September) in some communities. Fine root mortality usually follows new root growth and total biomass of dead fine roots reaches its maximum level at the end of growth season. Over 72.9 % of fine roots are distributed within 0 ~ 10 cm of soil surface, which varies slightly among different communities. The fine root biomass in top 10 cm of forest soil surface follows the sequence of Asian white birch forest, Broad-leaved Korean Pine forest, Spruce-fir forest, Ermans Birch forest and David poplar forest from high to low.

Key words: fine root; biomass; Changbai Mountain

细根(fine root,多指直径 $\leq 2\text{mm}$ 的根)^[1-7]具有巨大的吸收表面积,是林木吸收水分和养分的主要器官。据研究林木细根虽然占林木根系总生物量中的比例不足 30 %^[2,3,5,6,8],但由于细根生长和周转迅速,为维持它的动态过程需要消耗的碳水化合物总量占净初级生产力的 40 % ~ 85 %^[1,4,8-10],对林木碳分配和养分循环起着十分重要的作用。细根的研究直接影响林分及整个生态系统的碳平衡和养分循环研究结果的真实程度,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 %^[2]。因此细根在养分循环以及能量流动中的重要作用的研究正日益受到人们的重视^[11,12]。

20 世纪 70 年代初以来,关于林木细根生长、死亡、寿命、生物量、生产力、周转量、分布、季节动态及细根对森林生态系统 C 和养分循环的贡献等研究迅速增加^[8-10,13,15-19],并逐渐成为国际性研究热点之一^[20-23]。90 年代初,微根管(Minirhizotron)技术开始在林木细根研究中得到广泛应用,推动细根研究进一步深入^[24-26]。特别是近年来由于构造气候模型的目的,许多研究重点集中于分配在细根中的 C 以及无机环境对细根生长的影响的研究上^[4,6,9,27,28]。大量的研究者通过模拟大气 CO_2 浓度、 O_3 浓度、气温升高及酸沉降等,探讨细根对全球变化的响应^[29-31]。近两、三年内,国内很多学者又把重点集中在细根的养分动态、能量动态、空间分布及生物量的研究上^[32-43],为进一步研究细根在养分循环及能量流动中的作用提供大量的理论依据。

本文通过对长白山不同群落类型的细根现存量、层次分布及其月动态的研究,为全面系统的了解长白山主要森林群落及主要树种的细根周转动态和相关机制,特别是研究它们在森林生态系统养分循环、碳平衡中的作用等方面提供理论参考依据。

1 研究地的自然概况

研究主要集中在长白山北坡自然保护区内地理位置为 $41^{\circ}42'45''\sim 42^{\circ}45'18''\text{N}$, $127^{\circ}33'30''\sim 128^{\circ}16'48''\text{E}$,选择的森林群落类型包括:阔叶红松林(Broadleaved Korean pine forest, BLKPF)。红松(*Pinus koraiensis*)约占 4 成,阔叶树种主要包括蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等,林分郁闭度 0.8,海拔 740m,土壤类型为暗棕色森林土。白桦林(Asian white birch forest, AWBF)。白桦(*Betula platyphylla*)为主,混有少量的紫椴(*Tilia amurensis*)、山杨(*Populus davidiana*)等。郁闭度 0.6,海拔 740m,土壤为棕色森林土。山杨林(David poplar forest, DPF)。山杨近乎于纯林,林分郁闭度 0.7,海拔 760m,土壤为棕色森林土。云冷杉林(Sprucefir forest, SF)。乔木树种主要为鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红皮云杉(*Picea koyamai* var. *koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)等,林分郁闭度 0.9 以上,林下草本植物较少,苔藓和地衣占优势;海拔 1250m,土壤为棕色针叶林土。岳桦林(Subalpine birch forest, SBF)。乔木树种主要为岳桦(*Berula ermanii*),混有少量耐寒的长白落叶松(*Larix olgensis*)等,下木稀少,草本层发达。林分郁闭度 0.7,海拔 1800m,土壤为山地生草森林土^[44]。

2 研究内容及方法

2004 年 4 ~ 9 月,于每月底用内径 7.5cm 的土钻在所选的各群落内沿相距 10m 的 3 条线走“S”形,等距离地钻取土芯 30 个(每条线取 10 个)。钻孔深度近 30cm(根据实际调查,调查区域细根主要集中在土壤 20cm 以上的土壤层中),取出的土柱按 0 ~ 10cm,10cm 以下分割土芯,用塑料袋装好后带回实验室,放置在 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm 土壤套筛上,用流动水冲洗直至洗净为止;仔细检出细根(直径 $\leq 2\text{mm}$),同时依据根的外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度等区分死活细根,剔除草根^[20]。将挑出的细根放置在 80 的烘箱中

烘干至恒重后称重 ,利用公式(1)对细根生物量进行统计 :

$$\text{生物量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \text{平均每根土芯细根重}(\text{g}) \times 100 / [\pi(7.5(\text{cm})/2)^2](\text{cm}^2)$$

(1)

由于各树种细根鉴别十分困难 ,因此本实验没有对不同树种细根种类进行鉴别。

统计分析用 SPSS(11.0) 软件进行。用双因素方差分析和最小差异显著性法检验月份间的生物量差异 ($p < 0.05$) ,配对 t 检验不同林分间的差异 ($p < 0.05$)^[45]。

3 结果与分析

3.1 不同森林群落细根生物量的动态变化

根据公式(1) 计算出不同森林群落内不同月份细根现存生物量见表 1。

表 1 不同森林群落细根现存生物量状况

Table 1 Fine root biomass in different forest communities (t/hm²)

森林类型 Forest type	细根现存生物量 Fine root biomass						平均 Mean
	4 月末 End of Apr.	5 月末 End of May	6 月末 End of Jun.	7 月末 End of Jul.	8 月末 End of Aug.	9 月末 End of Sep.	
BL KPF	3.4114 ±0.6383	3.8056 ±0.8827	5.0443 ±1.2587	3.8091 ±1.1209	5.0009 ±1.1167	5.8805 ±1.1202	4.4919 ±1.0229
AWBF	4.5552 ±0.8012	5.3378 ±1.1444	3.6405 ±0.7975	5.2405 ±0.5885	5.7003 ±0.8372	6.3298 ±1.6131	5.1340 ±0.9637
DPF	3.8232 ±0.7890	3.7735 ±1.2912	3.5002 ±0.7603	4.3930 ±1.1667	4.3804 ±0.9027	3.7527 ±1.2443	3.9372 ±1.0257
SF	—*	5.4962 ±1.1167	3.8332 ±1.1875	5.6787 ±1.1598	4.2582 ±1.1090	5.9985 ±0.8222	5.0530 ±1.0790
SBF	—*	—*	7.4464 ±1.8002	3.0486 ±1.1005	4.7809 ±0.8799	4.4260 ±0.9609	4.9255 ±1.1854

* 因积雪覆盖、土壤未解冻等原因没有取样 The samples couldn't be taken because of snow and frozen soil

从表 1 中可看出不同群落类型内的细根现存生物量存在差异 , 5 个森林群落类型细根现存生物量月平均值最高为白桦林(5.1340 t/hm²) ,其次为云冷杉林(5.0530 t/hm²)、岳桦林(4.9255 t/hm²)、阔叶红松林(4.4919 t/hm²) ,山杨林(3.9372 t/hm²)。从细根现存量本身来看 ,还看不出与海拔因素的直接关系 ,但明显与群落类型特别是优势种组成有密切关系。

从细根现存量月动态来看 ,不同群落也有较大差异 ,方差分析结果显示不同月份各森林群落类型内的细根现存生物量差异显著 ($p < 0.05$) (山杨林除外) 。阔叶红松林在 6、8、9 月末出现较高值 (其中 9 月末达到最高) ,其它各月相对较低 (4 月末最低) ,最高和最低相差 72 %左右 ;白桦林在 5、7、8、9 月份末较高 (其中 9 月末最高) ,最低的为 6 月末 ,最高最低差近 73 % ;山杨林除 7、8 月份末较高外 ,其它相对较低且变化不大 ,最高最低相差仅 26 % ;云冷杉林在 5、7、9 月份末较高 ,在 6、8 月末则较低 ,其中 6 月末达到最低值 ,最高最低差 56 % ;受调查条件限制 ,岳桦林是从 6 月末开始的调查 ,细根现存量表现为 6 月末最高 ,7 月末下降近 100 % ,然后有所上升 ,随后又开始下降 ,最高最低差 144 %。

显然 ,细根现存量与细根的发生和死亡分解有密切关系 ,从而导致在生长季节不同时间里有较大的变化 ,所调查的不同群落最高和最低相差在 26 % ~ 144 %之间。这一点将在对死、活细根现存量的月动态分析中进一步加以分析。

3.2 不同森林群落活细根和死细根现存生物量的月动态

根据统计结果 ,可以看到在生长季节里不同群落活、死细根在不同群落类型内的动态变化较大 (见图 1)。

从图 1 中可以看出 ,在阔叶红松林活细根生物量总的来看在整个生长季节里有不断上升的趋势 ,其中 9 月份最高 ,7 月份最低 ,在 6、8 ~ 9 月份有明显增加 ,说明这两个时期有细根大量的发生 ;死细根生物量变化趋势与活细根相似 ,4 月份最低 ,7 月份最高 ,在 9 月份又有大量死细根的产生。白桦林活、死细根生物量总体变化相似 ,除 6 月份有所下降之外 ,整个生长季节都呈现上升的趋势。山杨林活细根生物量尽管在 7 月份有所升高 ,但全年月平均变化不大 ;死细根在调查过程中发现有较大变幅 ,其中 5、9 月份有大量死细根的产生 ,4、7 月份相对较低。云冷杉林活细根生物量在调查期间呈现周期性的变动 ,其中在 5、7、9 月份末较高 ,而 6、8 月份末较低 ,死细根则逐渐升高 ,到 9 月末时达到最高值。岳桦林活细根生物量 6 月份显著高于其它各月 ,显然与地面解冻后细根大量发生有关 ,随后大量死亡 ,7 月末后又开始缓慢升高 ,但升幅变化较小 ;死细根生物量

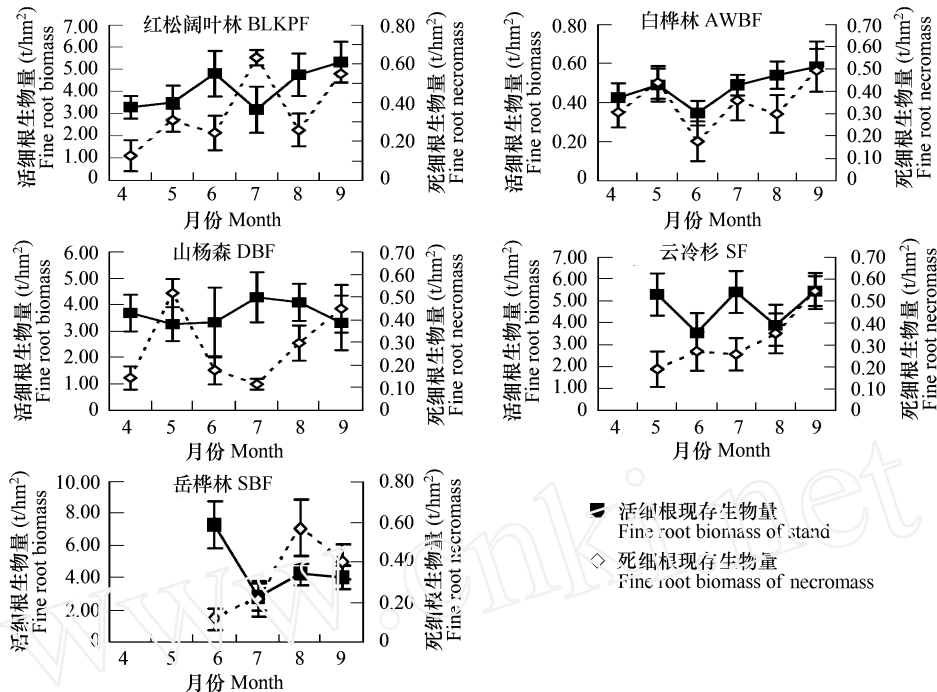


图1 不同群落类型活、死细根现存生物量的月变化

Fig. 1 Month patterns of fine root biomass and necromass (t/hm²) in the different forest type

从6月末开始逐渐增加,到8月末时增长了近3倍,随后开始下降。

从以上的结果可以说明,活细根在生长季节里是不断发生的,但由于物种组成特别是优势种不同,不同群落细根发生规律有很大的区别,阔叶红松林大量发生的时间为6、8月份;白桦林除6月份外,其它时间都不断有新细根的产生;山杨林4、7月份细根发生相对较多,但变化不大;云冷杉林则有明显的周期性变化;岳桦林细根大量发生的主要在地面解冻后的一段时间内,其它时间相对较少。生长季节内死细根生物量的变化较大。阔叶红松林内死细根生物量变化与活细根变化趋势相同,但明显的有时滞现象;白桦林则与活细根生物量变化近同步;山杨林变化剧烈的原因可能与死细根分解速率的变化较快有关,特别在6、7月份,死细根量明显较其它月份低;云冷杉林死细根在整个生长季节内表现出不断累积的特征;岳桦林与云冷杉林有相似的现象,但在9月末却表现出略有下降的现象,说明有一定量的死细根已经被分解了。所有调查的群落内死细根生物量都表现出在春季调查时远远低于秋季的现象,上述调查群落在生长季节第1次调查与最后一次(9月末)死细根生物量比值分别为0.23、0.62、0.32、0.35和0.29,说明在冬季和早春阶段,由于温度、土壤冰冻和融化等物理因素的作用,对林内土壤死细根的碎化是有明显作用的,尽管不同群落有较大的差别,但相关机制还需要今后进一步的研究。

3.3 不同森林群落不同土层深度细根分布状况

细根在土壤不同深度的分布同树种种类(深根、浅根树种)和土壤的结构及其养分的分布等有关。将调查的各群落不同层次的细根生物量分别求其平均值,发现所有调查群落70%以上都集中在土壤0~10cm范围内(见表2)。

从表2中可以看到,岳桦林内在土壤0~10cm层中细根生物量所占全部细根生物量的比例最高,达到86.3%,10cm以下仅占13.7%,阔叶红松林、白桦林、云冷杉林在0~10cm都高于78%,山杨林稍低,为72.9%。从各层死活细根生物量所占的比例来看,在0~10cm层各群落类型基本相同,在10cm以下略有差别,其中处于同一海拔高度的阔叶红松林、白桦林和山杨林稍高,活细根生物量分别占93.0%、93.6%和96.0%,而处于较高海拔高度的云冷杉林和岳桦林稍低,活细根生物量分别占87.1%和89.8%。

表 3 不同群落细根生物量在土壤中的垂直分布

Table 3 Vertical distribution of fine root biomass (t/hm²) in the soil of the different forest types

森林类型 Forest type	0 ~ 10cm			> 10cm		
	合计 Total	活细根生物量 Fine root biomass	死细根生物量 Fine root necromass	合计 Total	活细根生物量 Fine root biomass	死细根生物量 Fine root necromass
BLKPF	3. 5141 (78. 2) *	3. 3190 (94. 4) **	0. 1951 (5. 6) **	0. 9777 (21. 8)	0. 9093 (93. 0)	0. 0685 (7. 0)
AWBF	4. 1401 (78. 4)	3. 9010 (94. 4)	0. 2307 (5. 6)	1. 1406 (21. 6)	1. 0675 (93. 6)	0. 0730 (6. 4)
DPF	2. 9226 (72. 9)	2. 7072 (92. 6)	0. 2154 (7. 4)	1. 0839 (27. 1)	1. 0410 (96. 0)	0. 0429 (4. 0)
SF	3. 9371 (78. 4)	3. 7035 (94. 1)	0. 2336 (5. 9)	1. 0840 (21. 6)	0. 9444 (87. 1)	0. 1396 (12. 9)
SBF	4. 2521 (86. 3)	3. 9976 (94. 0)	0. 2545 (6. 0)	0. 6732 (13. 7)	0. 6047 (89. 8)	0. 0684 (10. 2)

括号中的数值为百分含量, * 合计中的为总体百分比, ** 死、活细根中的为在这一层的比率 It is the percent concent in the blank; * It is the whole percent rate in the total, ** It is the ratio of this layer in the fine root biomass and fine root necromass

通过以上分析可以发现,尽管在调查区域内不同群落生长季节内细根月平均生物量有较大差别,但主要分布于土壤 0 ~ 10cm 层中,占细根总生物量的 72. 9 % ~ 86. 3 %,且这一层内死活细根所占比例基本相等;10cm 以下细根生物量占总细根生物量的 13. 7 % ~ 27. 1 %,同时表现出活细根现存量所占比例有随海拔的升高略有下降的趋势。

根据调查结果上述 5 个群落调查区域内 A 层土壤厚度分别为 11. 0cm、8. 0cm、10. 0cm、11. 0cm 和 9. 5cm,土壤厚度较薄,也就是说森林内营养物质主要集中在土壤表层 10cm 的范围内,这是细根主要分布在 0 ~ 10cm 的重要原因。

4 讨论

林木细根生物量与其所在气候带有很大关系^[46,47]。根据国内部分研究成果,热带落叶阔叶林细根生物量的 40. 684 t/hm²、暖温带落叶阔叶林的 13. 713 t/hm²、寒温带落叶阔叶林的 6. 553 t/hm²、寒温带常绿针叶林的 7. 311 t/hm² 和北方常绿针叶林的 7. 657 t/hm²^[12],说明随纬度的升高,细根现存量逐渐减小。本研究位于寒温带针阔混交林区域,总体结果基本符合这一规律,但由于群落类型特别是优势种组成上的差别,细根现存量也有差别,但具体影响机制还有待于今后有针对性的研究。另外杨丽韬^[41]对长白山原始阔叶红松林细根生物量的研究结果为 827. 8g/m²,这比本研究结果高近 80 %,一方面与所选择具体群落有关,另一方面可能还与研究方法等因素有关,特别是本研究中没有对草本植物细根进行统计。

从细根现存量的月动态变化来看,不同的群落也有较大差别。从已获得的研究结果看,以下几点是肯定的: 不同时期细根生物量现存量与构成群落优势种的细根发育和死亡规律、细根分解速率以及环境条件如土壤的理化性质和土壤动物、土壤微生物的种类和活性有密切关系。 树种在生长季节内细根发生是不均匀的,春季是所有树种大量细根发生的季节,但受树种特性及外界环境条件(如降水量、土温、养分有效性等)综合影响,细根生物量动态会有一定程度的波动^[8,16,20,22,24,48,49],一些群落类型会出现 1 或 2 个峰值。早春细根的旺盛生长可能与土温回升、含水量升高(雨季开始)和碳水化合物供应充足(由于地上部分尚未进入旺盛生长期,而前一个生长季节所储存的碳水化合物首先供给地下部分生长)有关^[48,49]。一些群落活细根生物量在初秋(9 月份)出现另一个较高的峰值,可能与 8 月份各林地部分由于高温干旱出现生长间歇期有关^[50]。 研究结果显示每次细根大量发生后,都随之产生大量细根的死亡,生长季末群落死亡细根生物量往往是最高的,春季相对较低的死细根现存生物量说明该区域不同群落在冬季和初春死细根生物量损失是非常大的,本文统计过程中没有对非生长季节内活细根死亡的因素进行分析。 在研究过程中得到的仅是在生长季节里定时(每个月末)调查的结果,实际上由于细根的高分解速率^[14,51],在两次调查期间可能有一些细根已完成从发生到分解的整个过程,因为有的细根生命周期短至数天或几周^[52~55],活细根存留、死细根分解等时间也无法从本次调查结果中进行准确推算,所以本文没有对年细根生产量、死亡量、分解量和周转率等进行分析,本文作者拟通过已经设立“细根埋藏分解实验”、“埋藏生长袋”等方法,对这些问题进行深入的研究,相关成果将在今后的文章中发表。

细根生物量在土壤不同深度的垂直分布受到群落主要优势树种细根发生过程中的生物学、生态学特性以

及土壤理化性质的影响的研究结果已经有很多的报道^[18,23,24,51,56]。本文研究表明调查群落 72 %以上的细根集中于土壤表层 0 ~ 10cm 的范围内,不同群落略有差别,在所研究的 5 种森林群落中,不同月份 0 ~ 10cm 土层中细根生物量几乎都表现出白桦林 > 阔叶红松林 > 云冷杉林 > 岳桦林 > 山杨林。但细根发生量与该层土壤理化性质之间的定量关系还有待于进一步研究。

References :

- [1] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests. *Plant and Soil* , 1983 ,71 :75 ~ 85.
- [2] Zhang X Q, Wu K H, Dieter Murach. A review of methods for fine root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica* , 2000 ,20(5) : 875 ~ 883.
- [3] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems ground by climate , climatic forest type and species. *Plant and Soil* , 1996 , 187 :159 ~ 219.
- [4] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* , 1983 ,71 :87 ~ 101.
- [5] Bauhus J, Bartsch N. Fine root growth in beech *Fagus sylvatica* forest gaps. *Can.J. For. Res.* , 1996 ,26:2153 ~ 5159.
- [6] Ruess R W, Van Cleve K, Yarie J, *et al.* Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Can.J. For. Res.* ,1996 ,26:1326 ~ 1336.
- [7] Comeau P G, Kimmins J P. Above and below ground biomass and production of lodgepole pine on sites with differing soil moisture regimes. *Can.J. for Res.* , 1989 ,19:447 ~ 454.
- [8] Shan J P, Tao D Li, Wang M, *et al.* Fine roots turnover of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chin. T. Appl. Ecol.* ,1993 ,4(3) :241 ~ 245.
- [9] Shan J P, Tao D L. Over seas researches on tree fine root. *Chinese Journal of Ecology* ,1992 ,11(4) :46 ~ 49.
- [10] Liu J J. A review on root ecology of forest trees. *Journal of Northwest Forestry College* , 1998 ,13(3) :74 ~ 78.
- [11] Smit A L, *et al.* *Root Methods(A Handbook)* . Springer , 2000.
- [12] Lin Y M, Lin P, Yang Z W. A study on fine root turnover. *Journal of Xiamen University(Natural Science)* , 1998 ,37(3) :429 ~ 435.
- [13] Huang J H, Han X G, Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19(2) :270 ~ 277.
- [14] Liao L P, Chen C Y, Zhang J W. Turnover of fine roots in pure and mixed Chinese fir and *Michelia macclurei* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 1995 ,6(1) :7 ~ 10.
- [15] Li L H, Lin P, Xin X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eydei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,1998 ,9(4) : 337 ~ 340.
- [16] Wen D Z, Wei P, Kong G H, *et al.* Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forests itesat Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica* , 1999 ,23(4) :361 ~ 369.
- [17] Yang Y S, Chen G S, He Z M, *et al.* Production, distribution and nutrien treturn of fine roots in amixed and apure forest in subtropical china. *Chinese Journal of Applied and Envionmental Biology* ,2002 ,8(3) :223 ~ 233.
- [18] Yang Y S, Chen G S, He Z M, *et al.* Study on spatial distribution of fine roots in amixed *Cunning hamialanceolata Tsoongiodendron odorum* plantation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* ,2002 ,10(2) :111 ~ 117.
- [19] Yang Y S, Chen G S, Xie J S, *et al.* Dynamics of Nitrogen and Phosphorus concentrations of fine roots in amixed forest of *Cunung hamialanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journalof Forestry Research* ,2001 ,12(2) :105 ~ 108.
- [20] McClaugherty C A, Aber J D, Melillo J M. The role of fine roots in the organicmatter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology* ,1982 ,63(5) : 1481 ~ 1490.
- [21] Vogt K A, Gier C C, Vogt D J. Production ,turnover ,and nutrient dynamics of aboveand below ground detritus of world forests. *Advancesin Ecological Research* ,1986 ,15 :303 ~ 377.
- [22] Santantonio D, Grace J C. Estimating fine root production and turnover from biomass and decomposition data :acompartment flow model. *Canadian Journal of Forestry Research* ,1987 ,17 :900 ~ 908.
- [23] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* ,1983 ,71 :87 ~ 101.
- [24] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depthrelated patterns of fine root dynamics in northern hard wood forest. *Ecology* ,1996 ,77(1) :167 ~ 176.
- [25] Arunachalam A, Maithani K, Pandey H N, *et al.* The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinuskesiya* forest in north east India. *Forest Ecology and Management* ,1996 ,88 :273 ~ 282.
- [26] Zogg G P, Zak D R, Burton A J. Fine root respiration in northern hard wood forests in relation to temperature and nitrogen availability. *Tree Physiology* ,1996 , 16(8) :719 ~ 725.
- [27] Ding A F, Yu Y C, Chen P P. Effects of aluminum in soil on the tree root growth. *Journal of Zhejiang Forestry College* ,2001 ,18(2) :119 ~ 122.

- [28] Liao L Y, Ding M X, Zhang Z P, *et al.* Root biomass and its nitrogen dynamic of some communities in Ding hushan. *Acta Phylaeologica et Geobotanica*, Sinica, 1993, 17(1): 56 ~ 60.
- [29] King J S, Thomas R B, Strain B R. Growth and carbon accumulation in root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* seedlings as affected by varying CO₂ ,temperature and nitrogen. *Tree Physiology*, 1996, 16(7): 635 ~ 642.
- [30] Janssens I A, Crookshanks M, Ceulemans R. Elevated atmospheric CO₂ increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and soil CO₂ efflux in Scots pine seedlings. *Global Change Biology*, 1998, 4(8): 871 ~ 878.
- [31] Pregitzer K S, Zak D R, Maziasz J. Interactive effects of atmospheric CO₂ and soil N availability on fine roots of *Populus tremuloides*. *Applied Ecology*, 2000, 10(1): 18 ~ 33.
- [32] Yang Y S, Cai L P, Chen G S, He Z M, Chen Y X. Dynamics of Standing Crop of N and P for Roots of Mixed Forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Forest Research*, 2002, 15(5): 575 ~ 581.
- [33] Zhai M P, Jiang S N, Jia L M. Study on Fine Root Nutrient Dynamic in the Mixed Plantation of Poplar and Black Locust. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(4): 46 ~ 51.
- [34] Fan S H, Li P Z, Wang L H, Xu S M. Nitrogen cycling and its dynamic feature in fine roots of poplar trees and herbs. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 387 ~ 390.
- [35] Liu J J, Wang D X, Lei R D, Wu Q X. Turnover process and energy change of fine roots of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *Acuteserrata* natural forests in qinling mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 1 ~ 6.
- [36] Zou S Q. Energy Change during Decomposition of Fine Roots of Chinese Fir and *Tsoongiodendron odorum* in a Mixed Forest. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 21(3): 61 ~ 64.
- [37] Shi J P, Tang W D. Fine root dynamics of several types of tropical communities in Xishuangbanna. *Guihaia*, 2002, 22(6): 509 ~ 512.
- [38] Chen G S, Yang Y S, He Z M, Xie J S, Jiang Z K. Comparison on Fine Root Production, Distribution and Turnover Between Plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(4): 15 ~ 21.
- [39] Liu J J, Wang D X, Lei R D, Wu Q X. Fine Roots Biomass and Spatial Dynamic in the Natural Stands of Sharptooth Oak Chinese Pine at Huoditang Forest Region. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(1): 1 ~ 4.
- [40] Zhao Z, Li P, Xue W P, Gao S W. Study on Relation of Growth and Vertical Distribution of Fine Root System of Main Planting Tree Species to Soil Density in the Weiwei Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5): 50 ~ 55.
- [41] Yang L Y, Li W H. Fine root distribution and turnover in a broad-leaved and Korean pine climax forest of the Changbai Mountain in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 1 ~ 5.
- [42] Chen G S, Yang Y S, He Z M, Xie J S, Gao R, Zeng H D. Effects of proximity of stems and tree diameters on fine root density in plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1007 ~ 1011.
- [43] Zhang L, Luo T X, Deng H M, Dai Q, Huang Y, Jiang Z F, Tao M Y, Zeng K Y. Biomass and net primary productivity of secondary evergreen broad-leaved forest in Huangnian Forest Farm. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2029 ~ 2033.
- [44] Du X J, Liu C F, *et al.* Root biomass of main forest ecosystems in Changbai Mountain. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1998, 7, 29(3): 229 ~ 232.
- [45] Yang Y S, Chen G S, Lin P, Huang R Z, Chen Y X, He Z M. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1719 ~ 1729.
- [46] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1996, 187: 159 ~ 219.
- [47] Idol T W, Pope P E, Ponder Jr F. Fine root dynamics across achronological sequence of upland temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 2000, 127: 153 ~ 167.
- [48] López B, Sabatés, Gracia C A. Annual and seasonal changes in fine root biomass of *Quercus ilex* L. *Plant and Soil*, 2001, 230: 125 ~ 134.
- [49] Mallonen K, Helmisäari H S. Seasonal and yearly variations of fine root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management*, 1998, 102: 283 ~ 290.
- [50] Yang Y S. Sustainable management of Chinese fir plantations. Beijing: China Forestry Press, 1998.
- [51] Liao L P, Deng S J, Yu X J, *et al.* Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 569 ~ 573.
- [52] Reid J B, Sorensen I, Petrie R A. Root demography in kiwifruit-*Actinidia deliciosa*. *Plant Cell Environ.*, 1993, 16: 949 ~ 957.
- [53] Hooker J E, Black K E, Perry R L, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi induced alteration to root longevity of poplar. *Plant and Soil*, 1995, 172: 327 ~ 329.
- [54] Black K E, Harbron C G, Franklin M, *et al.* Differences in root longevity of some tree species. *Tree Physiology*, 1998, 18: 259 ~ 264.

- [55] Coleman M D, Dickson R E, Isebrands J G, *et al.* Root growth and physiology of potted and field-grown trembling aspen exposed to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, 1996, 16:145 ~ 152.
- [56] Sundarapandian S M, Swamy P S. Fine root biomass distribution and productivity pattern under open and closed canopies of tropical forest ecosystems at Kodayarin Western Ghats, South India. *Forest Ecology and Management*, 1996, 86:181 ~ 192.

参考文献:

- [2] 张小全, 吴可红, Dieter Murach. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, 20(25): 875 ~ 883.
- [8] 单建平, 陶大立, 王森, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 241 ~ 245.
- [9] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态. *生态学杂志*, 1992, 11(4): 46 ~ 49.
- [10] 刘建军. 林木根系生态研究综述. *西北林学院学报*, 1998, 13(3): 74 ~ 78.
- [12] 林益明, 林鹏, 杨志伟. 绿竹细根周转的研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1998, 37(3): 429 ~ 435.
- [13] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, 19(2): 270 ~ 277.
- [14] 廖利平, 陈楚莹, 张家武. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 7 ~ 10.
- [15] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 337 ~ 340.
- [16] 温达志, 魏平, 孔国辉, 等. 鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转. *植物生态学报*, 1999, 23(4): 361 ~ 369.
- [17] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林和杉木纯林群落细根生产力、分布及养分归还. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(3): 223 ~ 233.
- [18] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林细根的分布. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(2): 111 ~ 117.
- [27] 丁爱芳, 俞元春, 陈萍萍. 土壤铅对林木根系的影响. *浙江林学院学报*, 2001, 18(2): 119 ~ 122.
- [28] 廖兰玉, 丁明懋, 张祝平, 等. 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*, 1993, 17(1): 56 ~ 60.
- [32] 杨玉盛, 蔡丽平, 陈光水, 何宗明, 陈银秀. 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.
- [33] 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.
- [34] 范世华, 李培芝, 王力华, 许思明. 杨树人工林下根系的氮素循环与动态特征. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 387 ~ 390.
- [35] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 吴钦孝. 秦岭林区天然油松、锐齿栎林细根周转过程与动态变化. *林业科学*, 2002, 38(4): 1 ~ 6.
- [36] 邹双全. 混交林杉木观光木细根分解过程能量变化. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 21(3): 61 ~ 64.
- [37] 施济普, 唐建维. 西双版纳不同热带森林群落土壤表层的细根年动态. *广西植物*, 2002, 22(6): 509 ~ 512.
- [38] 陈光水, 杨玉盛, 何宗明, 谢锦升, 蒋宗培. 福建柏和杉木人工林细根生产力、分布及周转的比较. *林业科学*, 2004, 40(4): 15 ~ 21.
- [39] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 吴钦孝. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 1 ~ 4.
- [40] 赵忠, 李鹏, 薛文鹏, 郭生武. 渭北主要造林树种细根生长及分布与土壤密度关系. *林业科学*, 2004, 40(5): 50 ~ 55.
- [41] 杨丽韞, 李文华. 长白山原始阔叶红松林细根分布及其周转的研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 1 ~ 5.
- [42] 陈光水, 杨玉盛, 何宗明, 谢锦升, 高人, 曾宏达. 树木位置和胸径对人工林细根水平分布的影响. *生态学报*, 2005, 25(5): 1007 ~ 1011.
- [43] 张林, 罗天祥, 邓坤枚, 戴强, 黄永, 蒋正富, 陶明友, 曾开益. 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一性生产力. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2029 ~ 2033.
- [44] 杜晓军, 刘常富, 等. 长白山主要森林生态系统根系生物量研究. *沈阳农业大学学报*, 1988, 29(3): 229 ~ 232.
- [45] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 黄荣珍, 陈银秀, 何宗明. 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*, 2003, 9(23): 1719 ~ 1730.
- [50] 杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [51] 廖利平, 邓仕坚, 于小军, 等. 不同连栽代数杉木人工林细根生长、分布与营养物质分泌特征. *生态学报*, 2001, 21(4): 569 ~ 573.