

择伐对阔叶红松林细根生物量及其时空分布的影响

张 犇, 金光泽*

(东北林业大学生态研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:以择伐40年后的阔叶红松林过伐林(以下简称为择伐林)和未砍伐的典型阔叶红松林(以下为原始林)为研究对象,探讨了择伐对细根生物量时空分布的影响。结果表明生长季原始林和择伐林死细根生物量、活细根生物量和总细根年平均生物量没有显著差异($P > 0.05$);总细根生物量以及活细根在6月以及9月存在显著差异($P < 0.05$),死细根在5月、7月以及8月存在显著差异($P < 0.05$);原始林和择伐林的细根生物量随土层深度的增加逐渐减少,80%的活细根和75%以上的死细根分布在0~20 cm的土层中,其总细根生物量、活根和死根仅在30~40 cm存在显著差异($P < 0.05$);原始林和择伐林的不同直径级(2~5 mm和 ≤ 2 mm)的活细根的生物量比、死细根的生物量比以及总细根生物量比在相同土层内没有显著差异($P > 0.05$)。

关键词:小兴安岭;阔叶红松林;择伐林;细根生物量;时空分布

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

Effects of Selective Cutting on the Spatial and Temporal Distribution of Fine Root Biomass in Mixed Broadleaved Korean Pine Forest

ZHANG Ben, JIN Guang-ze

(Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The spatial and temporal distribution of fine roots biomass was studied using the sequential soil coring method in a virgin broadleaved-Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest and a selection forest (40 years after commercial selective cutting) in Xiaoxing'anling Mountains, Northeast China. The results showed that in the growing season there was no significant difference between the virgin forest and selection forest on dead fine root biomass, living fine root biomass and annual average total fine root biomass ($P > 0.05$), while the total fine root biomass and living biomass of fine roots had significant differences in June and September ($P < 0.05$). The dead fine root biomass had significant difference in May, July and August ($P < 0.05$). The biomass of fine roots decreased with increasing soil depth in the two kinds of forest, 80% of the living fine roots and more than 75% of dead fine root biomass distributed in the soil layer with the depth of 0 cm to 20 cm. The total biomass, living biomass and dead fine root biomass merely had significant difference in the soil layer with the depth of 30 cm to 40 cm in the two kinds of forest ($P < 0.05$). There is no significant difference among the ratio of living fine root biomass, the ratio of dead fine root biomass and the ratio of total fine root biomass in different diameter class (2–5 mm and ≤ 2 mm) at the same depth of soil in virgin and selection forest ($P > 0.05$).

Key words: Xiaoxing'anling Mountains; mixed broadleaved-Korean pine forest; selection forest; fine root biomass; spatial and temporal distribution

收稿日期: 2013-03-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金; 干扰对典型阔叶红松林碳动态的影响(DL13EA05)、国家科技支撑计划: 东北森林碳增汇效应调控技术研究(2011BAD37B01)、长江学者和创新团队发展计划: 森林碳增汇理论与育种技术(IRT1054)

作者简介: 张 犇, 硕士研究生。主要研究方向: 森林生态学。E-mail: zhangben.8888@163.com

* 责任作者: 博士, 教授。主要研究方向: 森林生态学。E-mail: taxus@126.com

细根是林木摄取、运输水分和养分的主要器官^[1-2],是森林生态系统中地下生态过程最活跃的部分^[3-4]。仅占林分根系总生物量3%~30%的细根在周转中要消耗掉约占总量的50%~80%的净初级光合产物来维持其动态过程^[5-6],显著地影响光合产物在其它器官中的分配,从而调节林分生产力^[7-10]。细根生产向土壤输入的生物量占总输入(细根生产和地上枯落物输入)的6.2%~88.7%^[11-13],是森林生态系统的地下部分“凋落物”的主要组成部分^[14],是构成生物地球化学循环的重要环节。

细根生物量及其时空分布受众多因素的影响。Finer 等用已发表的从寒带到热带的521个林分文献数据分析得出:环境因子(纬度,年平均降水量,海拔高度,温度)或林分因子(生活型,林龄,胸高断面积,密度)不能解释林分水平上的总细根生物量的显著变化以及至多能说明林分水平上30%乔木的细根生物量,然而林分的平均断面积可以解释林分水平上的49%的总细根生物量和个体水平上79%的乔木的细根生物量^[15]。在同一地区细根生物量受林型^[16]、林龄^[17]、演替^[18]、择伐等人类经营活动^[19-20]的影响。细根生物量的季节动态与土壤水分动态一致^[21],我国北方的张广才岭和南方武夷山等地的林分细根生物量均受到温度、土壤含水率和降水量等的显著影响^[16,22]。细根生物量的垂直分布与植物种以及其所处环境条件密切相关,土壤的理化性质,例如土壤密度、水分、温度和碳、氮含量等均是影响细根垂直分布的重要因素^[23]。近年来随着人类经营活动的增加,对森林生态系统各组分的影响愈来愈大。

阔叶红松林的主伐方式和更新问题曾是20世纪50—60年代我国东北三省林业研究的热点。学者们通过调查提出了很多科学、可行的报告和建议,然而生产上一直采用了皆伐和人工更新为主的模式,极少数采用了择伐^[24]。择伐不仅对其主要组成

树种的种群结构、分布格局产生显著影响^[25],而且显著促进了主要树种的径向生长^[26],因此细根生物量组成和垂直分布也会随之改变。目前择伐等经营活动对细根生物量的影响,主要集中在短期影响上^[27],而较长时间尺度的研究未见报道。本研究通过分析40年前择伐过的阔叶红松林(以下称择伐林)和未择伐的阔叶红松林(以下称原始林)细根生物量的时空分布的差异,探讨择伐对阔叶红松林细根生物量时空分布的影响、为揭示干扰对阔叶红松林碳循环的影响提供基础数据和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究样地位于黑龙江凉水国家级保护区(47°10'50" N,128°52'20" E)内。保护区地处小兴安岭南坡达里带岭支脉的东坡,海拔高度在280~707.3 m之间,山地坡度一般在10°~15°之间,为典型的低山丘陵地貌。该区地处欧亚大陆东缘,属温带大陆性夏雨季风气候,年平均气温-0.3℃,年均最高气温7.5℃,年均最低气温-6.6℃,正值积温在2 200~2 600℃之间。春季多大风,降水少;夏季短,多雨水,占全年降水量的60%以上;秋季降温快,多出现早霜;冬季长且寒冷干燥。年平均降水量676 mm,年平均蒸发量805 mm,无霜期100~120 d,积雪期130~150 d,地带性土壤为暗棕壤,非地带性土壤为草甸土、沼泽土和泥炭土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置 选择1971年被择伐的地势较为平坦的阔叶红松林择伐迹地(择伐对象为大径级红松,择伐强度约30%),并以地形相似的未砍伐阔叶红松林为对照(以下称原始林),各设置3个20 m×30 m的样地,对每个样地内所有胸高直径≥2 cm的物种记录种名,测量胸高直径、树高和坐标,并挂铝制树牌。样地概况见表1。

表1 原始林和择伐林的样地概况*

项目	主要组成树种、灌木和草本**	密度 /(株·hm ²)	胸高断面积 /(m ² ·hm ⁻²)	平均胸径 /cm	坡位	坡向	坡度
原始林	7红松+五角槭+冷杉+枫桦+水曲柳+紫椴+裂叶榆+红皮云杉;光萼溲疏、毛榛子、刺五加、黄花忍冬、东北山梅花、瘤枝卫矛;粗茎鳞毛蕨、毛缘苔草、唐松草、酢浆草、舞鹤草、喷呐草	1 178 ± 324	32.3 ± 4.2	13.1 ± 1.9	下坡	W	< 6°
择伐林	5红松+1枫桦+1冷杉+1五角槭+紫椴+裂叶榆+水曲柳+青楷槭;光萼溲疏、东北山梅花、毛榛子、黄花忍冬、刺五加、瘤枝卫矛;粗茎鳞毛蕨、毛缘苔草、乌苏里黄芩、舞鹤草、喷呐草、七瓣莲	1 639 ± 994	28.9 ± 3.3	12.3 ± 5.2	下坡	W	< 6°

*:起测胸径为2 cm; **:灌木和草本为盖度顺序。红松: *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc., 五角槭: *Acer mono* Maxim., 冷杉: *Abies fabri* (Mast.) Craib., 枫桦: *Betula costata* Trautv., 水曲柳: *Fraxinus mandshurica* Rupr., 紫椴: *Tilia amurensis* Rupr., 裂叶榆: *Ulmus laciniata* (Trautv.) Mayr., 红皮云杉: *Picea koraiensis* Nakai, 毛榛子: *Corylus mandshurica* Maxim., 刺五加 *Acanthopanax senticosus* (Rupr. et Maxim.) Seem., 东北山梅花: *Philadelphus schrenkii* Rupr., 瘤枝卫矛: *Euonymus verrucosus* Scop.

1.2.2 细根生物量调查 于2011年5月至9月,每月末利用内径7.5 cm、筒长50 cm的根钻,采用完全随机设计在每个样地内取10个土芯(每月共60个土芯),每点按0~10、10~20、20~30和30~40 cm 4个层次取样,放入编号的土壤袋中,带回室内进行处理分析。

对每一个根系样品先浸泡1天再用筛孔为0.1 mm的筛子反复淘洗。洗净根系上的土壤颗粒后放入蒸发皿中,用镊子将细根($< 5\text{ mm}$)^[28]从杂质中分离,用流动水浸泡、漂洗、过筛,分成 $\leq 2\text{ mm}$ 和2~5 mm 2个径级。根据根系外形、颜色和弹性区分活、死根,放在烘箱内,置于65℃下烘干(至少48 h)后进行称质量,精确至0.000 1 g。

利用以下公式对细根生物量进行统计:

$$\text{生物量} = \text{土柱细根质量} \times 100 / [\pi(7.5/2)^2]$$

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。

1.3 数据分析

采用独立样本 *t* 检验分析择伐林与原始林总细根生物量、活、死细根生物量各个月份差异以及各个土层之间细根生物量差异;采用 Duncan 多重检验比较两林型总细根生物量及活、死根生物量在不同月份、不同土层之间的差异;利用方差分析比较原始林和择伐林的不同直径级(2~5 mm 和 $\leq 2\text{ mm}$)的活细根的生物量比、死细根的生物量比以及总细根生物量比的差异。以上统计分析均使用了 SPSS16.0。

2 结果

2.1 总细根生物量

原始林和择伐林的总细根年平均生物量分别为 $2.15 \pm 0.50\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.08 \pm 0.67\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中原始林的死细根生物量($0.39 \pm 0.06\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)小于择伐林($0.42 \pm 0.08\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),活细根生物量($1.76 \pm 0.23\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高于择伐林($1.67 \pm 0.20\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),然而原始林和择伐林的活、死细根,总细根的年平均生物量均没有显著差异($P < 0.05$)(图1)。

2.2 细根现存生物量的季节动态

生长季原始林和择伐林的总细根生物量、活细根和死细根的季节动态变化均较大,总细根生物量以及活细根在6月和9月存在显著差异($P < 0.05$),死细根在5、7、8月存在显著差异($P < 0.05$)(图2和图3)。

原始林活细根生物量在生长季节呈“M”型的

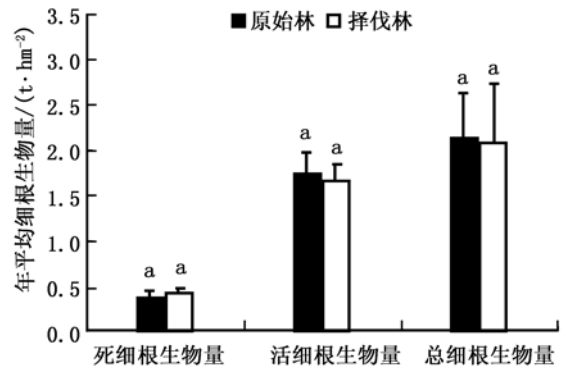
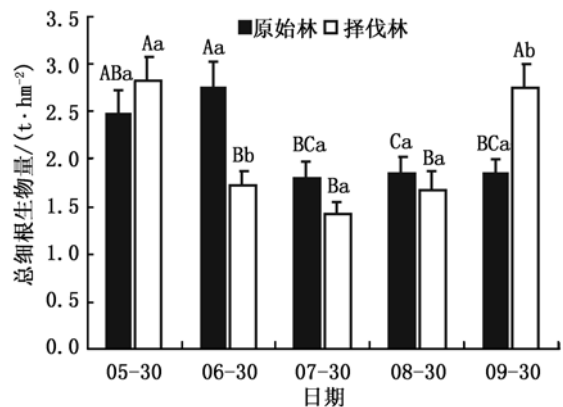


图1 原始林和择伐林总细根生物量



注:同林型不同大写字母表示各月份间差异显著($P < 0.05$),同月份不同小写字母表示林型间差异显著($P < 0.05$)

图2 原始林和择伐林总细根生物量季节动态

变化趋势,出现两次高峰,春季(6月份: $2.49 \pm 0.35\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和秋季(8月份: $1.46 \pm 0.20\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(图3左);9月份值为最低($1.21 \pm 0.19\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。死细根生物量呈“W”趋势变化,5月份最低,9月又有大量死细根的产生。择伐林活细根生物量则呈“V”型的变化趋势,即在5月份($2.16 \pm 0.28\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和9月份($1.99 \pm 0.32\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)出现2个峰值,7月份($1.22 \pm 0.17\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最低;死细根生物量也呈“V”型,但最低点在8月份,5月份和9月份表现出较高的值。

原始林总细根生物量6月与7、8、9月,5月与8月之间差异显著,择伐林总细根生物量5、9月与6、7、8月之间存在显著差异(图2)。原始林活细根生物量5、6月与7、8、9月之间差异显著,择伐林活细根生物量5月与6、7月,7月与9月之间差异显著。原始林死细根生物量9月与其余各月存在显著差异,择伐林死细根生物量5、9月与6、7、8月之间差异显著(图3)。

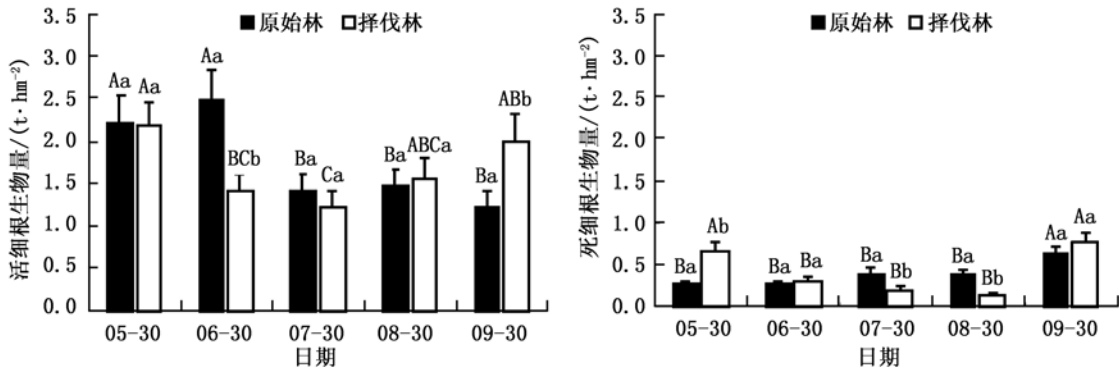
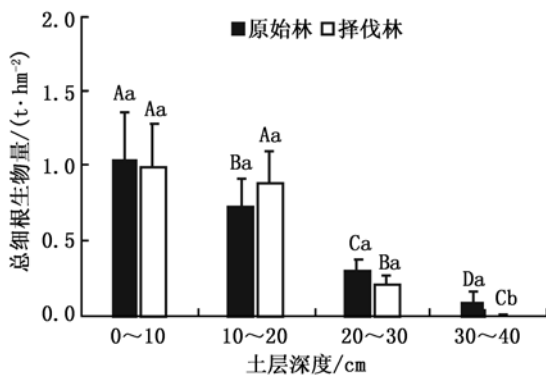


图 3 原始林和择伐林活、死细根生物量的季节动态

2.3 细根生物量的垂直分布

原始林和择伐林的总细根生物量随土层深度的加深而减少,除 30~40 cm 外均无显著差异 ($P > 0.05$)。原始林总细根生物量在 4 个土层均差异显著,而择伐林 1、2 层与 3 层,4 层三者间差异显著;原始林和择伐林的活细根生物量占总细根生物量的比例均大于 75%,80% 的活细根和 75% 以上的死细根分布在 0~20 cm 的土层中(图 4)。



注:同林型不同大写字母表示各土层间差异显著 ($P \leq 0.05$),
同土层不同小写字母表示林型间差异显著 ($P \leq 0.05$)

图 4 原始林和择伐林总细根生物量的垂直分布

原始林和择伐林的活、死细根生物量的分布模式与总细根生物量相似,即只有在 30~40 cm 处差异显著;在 0~20 cm 处活、死根比例较大,而在 20~40 cm 处其比例相对较小。原始林活细根生物量第 1 层,第 2 层与第 3、4 层之间差异显著;择伐林活细根生物量,原始林死细根生物量以及择伐林死细根生物量均为第 1、2 层与第 3 层,第 4 层三者之间差异显著(图 5)。

对总细根生物量、活细根生物量、死细根生物量在不同土层的分布进行了拟合,发现细根生物量在土壤中的垂直分布符合指数曲线;原始林和择伐林的细根总生物量和活细根生物量与土壤深度具有显著的相关性, R^2 值均大于 0.8,而其他均小于 0.8(表 2)。

表 2 细根平均生物量深度分布的曲线回归方程

项目	指数方程	N	R^2
原始林	总细根生物量 $y = 11.424e^{-0.6861x}$	30	0.9709
	活细根生物量 $y = 9.0229e^{-0.6736x}$	30	0.9630
	死细根生物量 $y = 2.8475e^{-0.863x}$	30	0.7645
择伐林	总细根生物量 $y = 77.615e^{-1.8307x}$	30	0.8096
	活细根生物量 $y = 60.331e^{-1.8094x}$	30	0.8206
	死细根生物量 $y = 19.041e^{-1.9807x}$	30	0.7599

注: x 为土层深度(cm), y 为不同深度的细根生物量($g \cdot m^{-2}$)

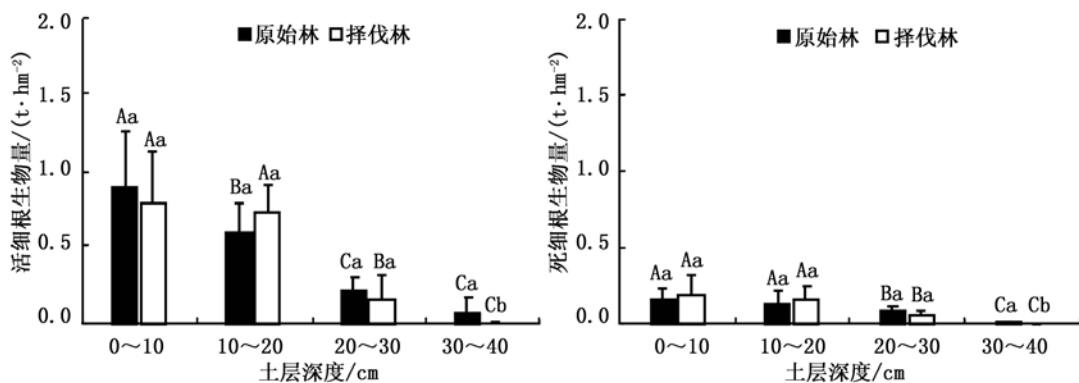


图 5 原始林和择伐林活、死细根生物量的垂直分布

2.4 不同直径级细根生物量比

方差分析表明:原始林和择伐林的不同直径级(2~5 mm 和 ≤ 2 mm)的活细根的生物量比、死细根

的生物量比以及总细根生物量比在相同土层内没有显著差异;取样时间、处理及其交互作用对细根生物量比影响不显著,只有土层对其比例影响显著(表3)。

表3 各指标重复测定方差分析结果

项目	活细根 2~5 mm: ≤ 2 mm				死细根 2~5 mm: ≤ 2 mm				总细根 2~5 mm: ≤ 2 mm						
	0~10	10~20	20~30	30~40	0~10	10~20	20~30	30~40	0~10	10~20	20~30	30~40			
原始林	0.31 ± 1.86Aab	0.30 ± 1.86Aa	0.27 ± 1.64Aab	0.27 ± 1.56Ac	0.20 ± 2.76Ab	0.21 ± 2.79Ab	0.21 ± 2.82Aa	0.18 ± 2.46Ab	0.35 ± 1.77Aab	0.35 ± 1.79Aa	0.31 ± 1.64Aab	0.32 ± 1.72Ac			
择伐林	0.28 ± 1.57Ab	0.29 ± 1.60Aa	0.29 ± 1.62Ac	0.29 ± 1.64Ac	0.18 ± 2.49Aab	0.18 ± 2.53Aab	0.18 ± 2.56Aa	0.17 ± 2.56Ab	0.32 ± 1.68Aa	0.33 ± 1.70Aa	0.34 ± 1.73Aa	0.34 ± 1.75Ab			
D		P=0.067					P=0.215					P=0.209			
T		P=0.090					P=0.365					P=0.286			
L		P=0.000					P=0.008					P=0.001			
D×T		P=0.074					P=0.818					P=0.490			
T×L		P=0.484					P=0.118					P=0.875			
D×L		P=0.727					P=0.746					P=0.638			
D×T×L		P=0.129					P=0.937					P=0.080			

注:同一列大写字母同表示同深度不同林型差异显著,同一行小写字母表示同林型不同深度之间差异显著($P < 0.05$);D:采样时间;T:处理;L:土层。

3 讨论

众多研究表明干扰将显著减少细根生物量,通常干扰越大,其细根生物量越小^[19],地上结构的改变,特别是胸高断面面积的减少将引起细根生物量的减少^[29]。随着保留木的生长及幼苗更新,森林细根生物量将逐渐恢复,恢复速度与干扰类型及强度有关^[30]。本研究结果表明:在阔叶红松林30%左右的大径级红松择伐后经过40年的恢复,其总细根生物量与原始林没有显著差异,而其季度动态有差异。即原始林的总细根生物量大致呈双峰“M”型曲线,而择伐林大致呈双峰“V”型曲线,总细根生物量以及活细根在6月和9月存在显著性差异($P < 0.05$),死细根在5、7、8月三个月之间存在显著性差异($P < 0.05$)。这种差异可能是由于大径级红松被采伐后主要组成树种的种群结构、分布格局发生改变^[25],而主要组成树种展叶、落叶等物候^[31]、生长节律的差异引起细根生物量季节变化的模式不同^[12]。

树木根系的垂直分布受树种、年龄、地下水位和土壤水分、养分等理化性质的影响^[32]。通常择伐作业不仅对剩余树木的地上部分产生一定程度的损害,重型机械的痕迹将直接影响表层细根生物量^[33];森林土壤被重型机械压实或破坏,进而导致根穿透土壤阻力相应增大,对树根部的延伸发展不利,而且将阻碍土壤中养分、空气、水分等传输;同

时,压实的土壤降低地表水的渗透能力,加大了地表径流强度,加剧了水土流失;变化后的土壤还作用于保留树木,阻碍其根部发展并降低摄取生长所需的必要水分、养分和空气的速率,对干扰后样地细根生长起到抑制作用^[34]。阔叶红松林大径级红松择伐后,主林层的冠层面积减少,林内的光照强度和时间得到有效增加,有利于枫桦、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)等喜光树种的更新,而幼苗的根系多分布于土壤表层,随着树木的生长根系将逐渐加深。本研究结果显示:原始林和择伐林的总细根生物量、活细根生物量和死细根生物量均随土层深度的加深而减少,10~20 cm,20~30 cm没有显著差异,而30~40 cm差异显著($P > 0.05$),说明深层土壤的细根生物量还没有恢复到择伐前水平。

本研究以小兴安岭地区40年前择伐过的阔叶红松林和未择伐的典型阔叶红松林为研究对象,分析了其细根生物量的时空分布。由于受条件限制,未能解释择伐林恢复过程中细根生物量的时空分布格局以及不同树种细根对细根生物量恢复的贡献;受论文篇幅的限制没能包括土壤密度、水分、温度和碳、氮含量等理化性质对细根生物量时空分布的影响。而择伐对阔叶红松林细根寿命、细根形态及分解速率的影响将是后续进行的研究。

参考文献:

[1] Munoz-Romero V, Benitez-Vega J, Lopez-Bellido L, et al. Monitoring

- wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect [J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33: 182 - 187
- [2] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响 [J]. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 566 - 573
- [3] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests [J]. *Plant and Soil*, 1983, 71: 75 - 85
- [4] 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 [J]. *Plant and Soil*, 1996, 187: 159 - 219
- [5] Silver W L, Thompson A W, McGroddy M E, *et al.* Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 290 - 306
- [6] Vogt K A, Vogt D J, Bloomfield J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at an ecosystem level [J]. *Plant and Soil*, 1998, 200: 71 - 89
- [7] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 13 - 31
- [8] Persson H A. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests [J]. *Plant and Soil*, 1983, 71: 87 - 101
- [9] 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 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 337 - 340
- [10] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389 - 411
- [11] 单建平, 陶大立, 王 森, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究 [J]. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 241 - 245
- [12] 陈光水, 杨玉盛, 何宗明, 等. 福建柏和杉木人工林细根生产力分布及周转的比较 [J]. *林业科学*, 2004, 40(4): 15 - 21
- [13] Stover D B, Day F P, Frank P, Drake B G, *et al.* The long-term effects of CO₂ enrichment on fine root productivity, mortality, and survivorship in a scrub-oak ecosystem at Kennedy Space Center, Florida, USA [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69: 214 - 222
- [14] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态 [J]. *生态学杂志*, 1992, 11(4): 46 - 49
- [15] Finer L, Ohashi M, Noguchi K, *et al.* Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261: 265 - 277
- [16] 朱胜英, 周 彪, 毛子军, 等. 帽儿山林区6种林分细根生物量的时空动态 [J]. *林业科学*, 2006, 42(6): 13 - 19
- [17] 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 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 337 - 340
- [18] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松林及次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3609 - 3617
- [19] Leuschner C, Hartevelde M, Hertel D. Consequences of increasing forest use intensity for biomass, morphology and growth of fine roots in a tropical moist forest on Sulawesi, Indonesia [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 2(4): 474 - 481
- [20] Rodriguez M V, Bertiller M B, Sain C L. Spatial patterns and chemical characteristics of root biomass in ecosystems of the Patagonian Monte disturbed by grazing [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 70(1): 137 - 151
- [21] 英 慧, 殷 有, 于立忠, 等. 土壤水分、养分对树木细根生长动态及周转影响研究进展 [J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(3): 36 - 42
- [22] 权 伟, 连洪燕, 徐 侠, 等. 武夷山不同海拔植被土壤细根生物量季节变化 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(3): 146 - 150
- [23] 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 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 1 - 5
- [24] 李景文. 红松混交林生态与经营 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1997, 298
- [25] 蒋子涵, 金光泽. 择伐对阔叶红松林主要组成树种种内、种间竞争的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2179 - 2186
- [26] 蒋子涵, 金光泽. 择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5843 - 5852
- [27] 杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等. 采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 65 - 73
- [28] Van Praag H J, Sougnez-Remy S, Weissen F, *et al.* Root turnover in a beech and a spruce of the Belgian Ardennes [J]. *Plant and Soil*, 1988, 105: 87 - 103
- [29] Leuschner C, Wiens M, Hartevelde M, *et al.* Patterns of fine root mass and distribution along a disturbance gradient in a tropical montane forest, central Sulawesi (Indonesia) [J]. *Plant and Soil*, 2006, 283: 163 - 174
- [30] 杨玉盛, 陈光水, 林 鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力 [J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1719 - 1730
- [31] Liu Z L, Jin G Z, Qi Y J. Estimate of leaf area index in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(3): e32155
- [32] 张小全, 吴可红. 森林细根生产与周转研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(3): 126 - 138
- [33] Malo C, Messier C. Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(4): 892 - 897
- [34] 王立海, 孙墨珑. 森林采伐的环境约束 [J]. *东北林业大学学报*, 1994, 22(6): 79 - 82