



林分密度对思茅松人工林根系生物量空间分布的影响

李帅锋^{1,2}, 贾呈鑫卓³, 杨利华⁴, 黄小波^{1,2},
郎学东^{1,2}, 刘万德^{1,2}, 苏建荣^{1,2*}

(1 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224; 2 国家林业局普洱森林生态系统定位研究站, 昆明 650224; 3 西南林业大学, 昆明 650224; 4 云南省普洱市林业科学研究所, 云南普洱 665000)

摘要:以云南省普洱市思茅松人工林中 14a 龄林为研究对象, 对 5 种造林密度($1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$)的思茅松人工林的林分特征及其根系生物量空间分布进行调查分析, 以明确林分密度对思茅松人工林细根生物量空间分布的影响, 为思茅松人工林经营管理提供理论依据。结果表明:(1)树高和胸径随着林分密度的减少呈增大趋势, 而生物量呈减少趋势。(2)14 a 思茅松人工林的细根生物量随林分密度的增大而减少, 单株细根生物量随林分密度的减小而增大, 但粗根与死根生物量在 5 个林分密度之间无显著差异。(3)细根生物量主要分布在土壤上层, 其中 40.21%~54.73% 的细根集中在 0~10 cm 土壤深度, 不同林分密度的细根生物量随土层深度的增加而减少的趋势较为明显, 随着林分密度的减小, 土壤上层的细根生物量比例呈先增加后减少的趋势。(4)林分密度和土壤深度对细根生物量有显著影响, 而且乔木个体大小差异与细根生物量具有极显著的负相关关系, 而单株细根生物量与林分密度、乔木个体大小差异、地下生物量及胸高断面积之间呈显著或极显著的负相关关系, 而与树高和胸径之间呈显著正相关关系。

关键词:思茅松; 人工林; 林分密度; 细根; 粗根; 生物量

中图分类号:Q945.79; Q948.118 **文献标志码:**A

The Effect of Stand Density on the Spatial Distribution of Root Biomass of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* Plantation

LI Shuaifeng^{1,2}, JIA Chengxinzhuo³, YANG Lihua⁴, HUANG Xiaobo^{1,2},
LANG Xuedong^{1,2}, LIU Wande^{1,2}, SU Jianrong^{1,2*}

(1 Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China; 2 The Pu'er Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Bureau, Kunming 650224, China; 3 Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 4 Forestry Research Institute of Pu'er Municipality, Pu'er, Yunnan 665000, China)

Abstract: Based on 5 afforestation densities ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$, $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, $2\text{ m} \times 1\text{ m}$, $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ and $2\text{ m} \times 3\text{ m}$ respectively), we determined the effect of stand density on the spatial distribution fine root biomass and provided theoretical supports for plantation management and operation in a 14-year-old plantation of *Pinus*

收稿日期:2017-07-10;修改稿收到日期:2017-10-17

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2014QA014);云南省科技计划项目(2013RA004);林业公益性行业科研专项(201404211)

作者简介:李帅锋(1982—),男,副研究员,主要从事群落生态学、生物多样性与生态系统结构与功能的研究。E-mail: shuaifengli@163.com

* 通信作者:苏建荣,研究员,博士生导师,主要从事种群生态学、恢复生态学及生态系统功能与结构的研究。E-mail: jianrongsu@vip.sina.com

kesiya var. *langbianensis* in Pu'er City, Yunnan Province. The result showed that: (1) tree height and the diameter at breast height (DBH) increased with the decrease of stand density, while stand biomass increased with the increase of stand density. (2) The fine root biomass decreased with the development of stand density in the 14-year-old *P. kesiya* var. *langbianensis* plantations, while the fine root biomass per single tree increased with the reduction of stand density. Meanwhile, the coarse and dead root biomass had no significant difference in five stand densities. (3) The fine root biomass mainly distributed in the soil surface, and 40.21%—54.73% of fine root biomass focused on 0—10 cm of soil depth. The fine root biomass indicated the trend with decreased accompanied by the increase of soil depth in the different stand densities. (4) With the increase of stand density, the proportion of fine root biomass showed firstly increase, then decrease in the soil upper layer, stand density and soil depth had significant effect on the fine root biomass. Tree individual size inequality had a negative influence on the fine root biomass, while fine root biomass per single tree had significant negative influences on the stand density, individual size inequality, belowground biomass and basal area at the DBH, with the positive influences on the DBH and height.

Key words: *Pinus kesiya* var. *langbianensis*; plantation; stand density; fine root; coarse root; biomass

根系作为森林生态系统重要的动态组成部分,在森林生态系统物质和能量循环中具有十分重要的作用^[1-2]。细根是指植物根系较小、木质化程度较低且具有吸收水分和养分功能的那部分根系,通常是由直径≤2 mm 的根系组成,多数细根具有菌根侵染,是植物体最活跃和敏感的营养器官^[3]。研究表明,林木细根生产量约占全球净初级生产力的30%^[4],地下部分净初级生产力常高于地上部分,而通过细根每年输入到土壤的C 和养分也常高于叶片^[5],尽管细根生物量对乔木生物量的贡献相对较小(通常<5%),但是细根却是土壤C 输入的主要贡献者,这主要归功于细根较快的周转率,细根生物量的变化在一定程度上可以决定森林是否是大气CO₂ 的源或者汇^[6],因而对细根生物量的精确估算对理解生态系统地下C 储量和C 循环十分必要^[7]。林分密度是林分经营的首要环节之一,直接影响到人工林群落的光、热及水分等生态因子的分配,使林分下的物种多样性及结构发生变化^[8-9],植物群落组成、林分结构、土壤理化性质和养分含量会影响到细根生物量的组成和空间分布^[10-11],马尾松(*Pinus massoniana*)人工林研究中发现细根生物量呈现出随密度增加而逐渐减少的趋势^[12]。

思茅松(*Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen)主要分布在云南省的南部和西南部,具有生长迅速、材质优良、松脂产量高等优良特点,是云南省重要的材脂兼用树种和主要造林树种之一,思茅松作为阳生树种,是南亚热带群落演替的早期优势树种,在区域林业发展中占举足轻重的作用^[13-14]。随着全球气候变化研究的日益深入,对思茅松人工林的生物量及土壤有

机碳储量已经进行了大量研究^[14-15],也探讨了思茅松根系生物量模型的构建^[16],但是对思茅松人工林细根生物量的研究仍未开展。20世纪90年代以来,经过多年的森林采伐后,云南省开始思茅松的大规模人工造林,营造了大面积人工纯林,由于初植密度不一,且密度普遍较大,严重影响了森林综合效益的发挥^[3]。本试验以云南省普洱市清水河林区2000年营造的思茅松人工林为研究对象,通过对5种林分密度的思茅松人工林根系生物量空间分布变化的研究,探讨南亚热带区域思茅松人工林生态系统根系生物量空间与垂直分布的变异特征,为今后思茅松人工林健康发展和碳汇增强能力提供一定的经营模式参考,同时也为提高思茅松人工林经营管理水平提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于云南省普洱市思茅区清水河,地理坐标为100°57' E、22°41' N,海拔范围在1 143~1 247 m之间,受湿润的西南季风和干暖的西南风支急流交替控制,属南亚热带季风气候,干湿季分明,年平均气温为17.7℃,最热月均温为21.7℃,最冷月均温为11.4℃,降雨主要集中在5~10月,年均降雨量为1 351.63 mm^[17]。土壤为赤红壤,pH值为4.1~5.0之间,该区域的思茅松人工林为2000年在思茅松天然林植被皆伐后全面清理林地而营建^[15],林下植被主要组成物种有红木荷(*Schima wallichii*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、茶梨(*Anneslea fragrans*)、小果栲(*Castanopsis fleuryi*)、黑面神(*Breynia fruticosa*)、多花野牡丹(*Melastoma*

polyanthum)、艾胶算盘子(*Glochidion lanceolarium*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、羊耳菊(*Inula cappa*)和红球姜(*Zingiber zerumbet*)等。

1.2 数据收集

1.2.1 试验设计及样地调查 林分密度试验采用随机区组设计,共设置5个处理,3个重复,共计15个样地,样地大小为20 m×20 m,每个样地之间有500 m的间隔。2014年对样地所有高度>1.3 m的乔木进行每木调查,记录其胸径及树高等林分因子。林分密度类型以初始造林密度进行代表,分别为1 m×1 m(初始造林密度为10 000株/hm²)、1.5 m×1.5 m(初始造林密度为4 447株/hm²)、2 m×1 m(初始造林密度为5 000株/hm²)、2 m×2 m(初始造林密度为2 500株/hm²)、2 m×3 m(初始造林密度为1 668株/hm²)。对调查数据进行统计分析,样地中自然条件和土壤特征基本一致。

1.2.2 细根取样 采用根钻进行野外根系生物量取样,于2014年10月在每个林分密度类型随机取9个土样,使用内直径8.5 cm、筒长10 cm以及有锋利边缘的根钻进行根系取样,取样范围位于株行距的中间位置,然后呈之字形在林分内取样。每个点分3个垂直土层进行取样,深度分别以0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm。野外所取土壤样品挑出石砾后装入保鲜袋内,做好标记储存在4℃的冷藏箱中,带回实验室放入-3℃的冰箱中对不同类型不同土层深度的样品进行统一处理与分析。

在实验室中,将野外采集土样用水浸泡5 h,经筛孔为0.2 mm的分析筛用水反复淘洗,进行根的挑拣。将洗净后的根放入白色的盘中,注入少量水分,根据思茅松根系特征(思茅松根系呈暗紫红色,根表皮有皱裂,不易折断),用镊子将思茅松和其他植物的根系进行归类整理。将根系分为以下3个类型:(1)细根,根径≤2 mm;(2)粗根,根径>2 mm;(3)死根,根据细根的颜色、外形、弹性、根皮与中柱分离的难易程度并结合漂浮法进行活根和死根的区分。将区分好的细根样品放置烘箱65℃下烘干至恒重,用电子天平称重(精确到0.001 g),根据以下公式计算细根、粗根和死根的生物量^[3]:

$$B_{\text{root}} = m \times 100 / [\pi(r/2)^2]$$

$$B_{\text{single tree}} = B_{\text{root}} / N$$

式中, B_{root} 为林分的细根、粗根及死根的生物量(t/hm²), m 为平均每个土芯的根干质量(g), r 为根

钻的直径(cm),本文为8.5 cm; $B_{\text{single tree}}$ 为单株细根生物量(kg/株), N 为林分密度(株/hm²)。

1.3 数据分析

根据思茅松异速生长方程计算不同林分密度的全株、地上及地下生物量的大小,其中全株生物量异速生长方程为 $W = 0.043D^{2.755}$, 根系生物量为 $W = 0.01D^{2.543}$, 其中, D 为胸径(cm)^[14], 地上生物量为全株生物量减去根系生物量。乔木个体大小差异为每个样地胸径标准差与平均值的比例^[18]。对不符合正态分布的细根数据进行对数转化,使其服从正态分布,对不同造林密度林分的林分密度、胸径、树高、胸高断面积、乔木个体大小差异、全株生物量、地上生物量、根系生物量、细根生物量、粗根生物量以及死根生物量进行单因素方差分析(ANOVA),并对其进行最小显著法(LSD)多重比较。利用有交叉作用的双因子方差分析,将思茅松粗根、细根及死根生物量作为因变量,林分密度和土层深度作为固定因素,分析所有因素对思茅松根系生物量分布的影响效应。此外,采用相关分析林分特征、乔木大小个体差异以及林分生物量对细根、单株细根、粗根以及死根生物量的影响。所有数据分析在R 3.4.0中完成。

2 结果与分析

2.1 林分特征

思茅松人工林林分特征见表1。14 a林龄的思茅松人工林林分密度与造林密度的变化趋势一致,5个林分密度之间差异显著,其大小顺序分别为1 m×1 m>1 m×2 m>1.5 m×1.5 m>2 m×2 m>2 m×3 m,其林分存活密度分别为7 337、3 712、3 340、2 275和1 630株/hm²;胸径与树高随林分密度减少而增加,其中1 m×2 m和1.5 m×1.5 m栽植密度之间无显著差异;1 m×1 m栽植密度的胸高断面积要显著高于其它林分类型,2 m×3 m栽植密度的林分个体大小差异要显著小于1 m×2 m;随着栽植密度的减少,地上和根系生物量呈减少趋势。

2.2 细根、粗根及死细根生物量分布

从表2可以看出,在0~30 cm土层深度中,林分密度类型对思茅松人工林细根生物量具有显著影响,细根生物量随林分密度的减小呈增加的趋势,其中细根生物量最大的林分密度类型为2 m×3 m[(6.53±2.5)t·hm⁻²],是林分密度类型1 m×2 m的2.48倍,是林分密度类型1 m×1 m的1.79倍。随着林分栽植密度的减小,单株林木所占有的营养空间却由0.22 t·株⁻²增加到0.59 t·株⁻²,即林

表1 不同造林密度14a思茅松人工林林分特征的调查结果

Table 1 The results of stand traits of 14-year-old *P. kesiya* var. *langbianensis* plantation in different stand densities

指标 Index	林分栽植密度 Stand density type				
	1 m×1 m	1 m×2 m	1.5 m×1.5 m	2 m×2 m	2 m×3 m
林分存活密度 Stand survival density/(trees·hm ⁻²)	7 337±283a	3 712±13b	3 340±9c	2 275±5d	1 630±5e
胸径 DBH/cm	9.12±2.26d	10.11±2.79c	10.15±2.29c	11.58±2.38b	13.33±2.54a
树高 Height/m	9.79±1.3c	10.12±1.4c	10.04±1.34c	10.58±1.22b	10.94±10.05a
胸高断面积 Basal area at DBH/(m ² ·hm ⁻²)	50.98±11.65a	32.06±6.92b	28.37±6.17b	24.94±1.78b	23.56±4.5b
林分个体大小差异 Stand size inequality	0.23±0.06ab	0.26±0.02a	0.2±0.03ab	0.2±0.03ab	0.17±0.02b
生物量 Total biomass/(t·hm ⁻²)	161.07±51.19a	111.02±32.83ab	95.59±29.88b	91.66±9.05b	95.47±23.96b
地上生物量 Aboveground biomass /(t·hm ⁻²)	138.25±44.53a	95.69±28.65ab	82.28±26.08b	79.2±7.92b	82.83±21b
根生物量 Root biomass/(t·hm ⁻²)	22.85±6.67a	15.33±4.18ab	13.31±3.8b	12.46±1.3b	12.64±2.97b

注:同行数据后不同小写字母表示不同栽植密度林分间差异显著($P<0.05$);表2同

Note: Different normal letters after the data mean significant difference at 0.01 level in different afforestation densities; The same as Table 2

表2 不同造林密度下14a思茅松人工林细根、粗根和死细根生物量

Table 2 Fine root biomass, coarse root biomass and dead root biomass in different stand densities of *P. kesiya* var. *langbianensis* plantation

项目 Item	林分栽植密度 Stand afforestation density				
	1 m×1 m	1 m×2 m	1.5 m×1.5 m	2 m×2 m	2 m×3 m
细根生物量 Fine root biomass/(t·hm ⁻²)	3.65±1.45bc	2.63±1.13c	4.24±2.26bc	4.81±3.21ab	6.53±2.5a
单株细根生物量 Fine root biomass of a single tree/(kg·plant ⁻¹)	0.5±0.2c	0.71±0.3c	1.27±0.68b	2.11±1.41b	4±1.53a
粗根生物量 Coarse root biomass/(t·hm ⁻²)	1.2±0.97a	1.05±0.61a	0.87±1.24a	1.08±1.46a	1.61±1.32a
死根生物量 Dead root biomass/(t·hm ⁻²)	1.29±1.14a	0.45±0.55a	0.95±0.89a	1.2±2.06a	0.62±0.58a
合计 Total root biomass/(t·hm ⁻²)	6.14±2.28ab	4.13±1.42b	6.06±2.98ab	7.09±5.03ab	8.76±3.06a

分密度越小,单株林木所占有地下营养空间越大。作为根系生长发育的最直接指示,单株细根生物量是反映地下部分生长的重要指标^[3],由于单株占有的地下营养空间不一致,单株细根生物量随林分密度的减小而增大,从林分密度类型1 m×1 m的0.52 kg·株⁻²增加到2 m×3 m的4 kg·株⁻²。粗根与死根生物量在不同林分密度类型之间无显著差异。

2.3 细根、粗根与死根生物量的垂直分布

思茅松人工林的细根、粗根与死根生物量在不同土壤深度的空间分布见图1。林分密度类型为1 m×1 m、2 m×1 m、1.5 m×1.5 m、2 m×2 m和2 m×3 m的思茅松人工林中,细根生物量垂直分布总体呈随土层深度的增加而减少的趋势,其中林分密度类型为1 m×1 m和1.5 m×1.5 m的林分趋势更为明显;而粗根和死根生物量在不同林分密度的3个土层深度中无显著差异,而林分密度为1 m×1 m的林分中,土壤深度10~20 cm的死根生物

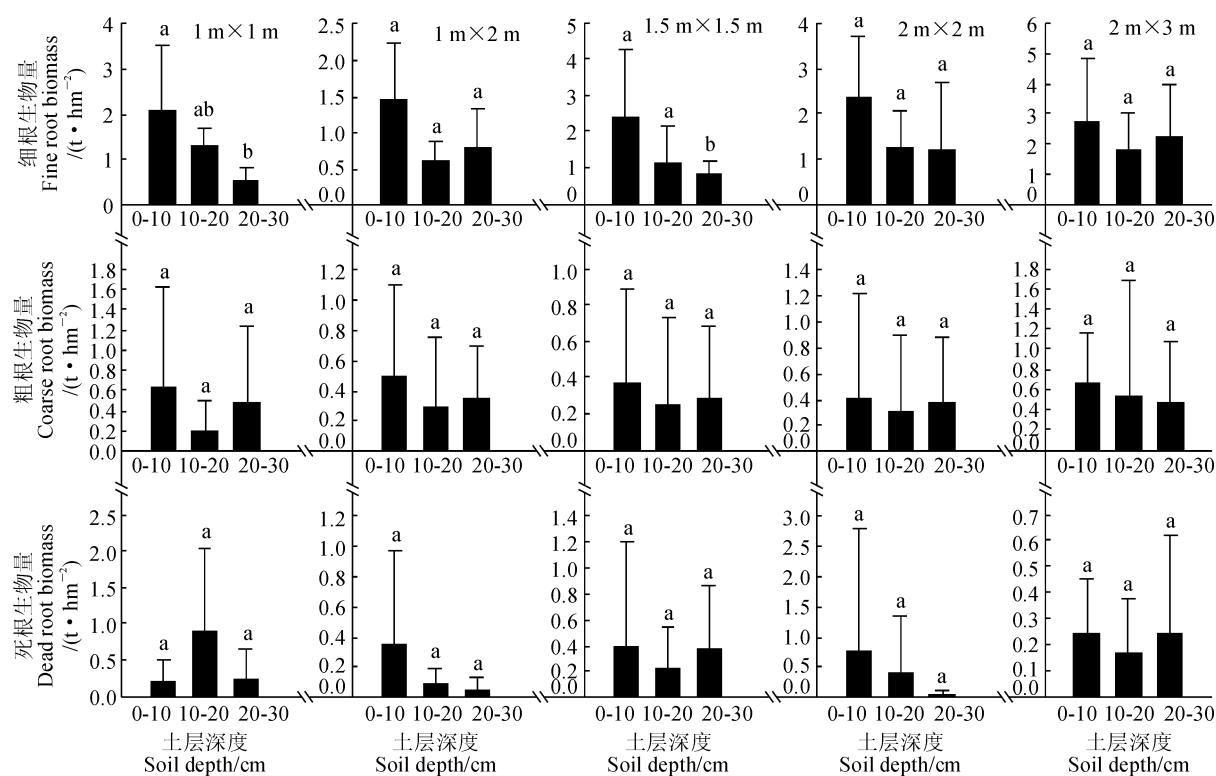
量的平均值要高于其他2个土壤层次。土层深度为0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm的细根分别占总细根生物量的范围为40.21%~54.73%、21.61%~33.61%和13.71%~32.85%,随着林分密度减小,土壤上层中的细根生物量比例呈先增加后减少的趋势,土壤下层呈逐渐增加趋势。

2.4 林分密度及土壤深度对细根生物量的影响

思茅松人工林中不同土层根系生物量与土壤深度和林分密度的综合分析见表3。结果显示,思茅松人工林细根生物量主要受林分密度和土壤深度的影响,而土壤深度和林分密度类型则对粗根和死根生物量的大小无显著影响;同时,细根、粗根和死根生物量的大小受林分密度和土壤深度的交互作用均未达到显著水平。

2.5 林分因子与细根生物量的相关分析

将林分密度、乔木个体大小差异、树高、胸径、胸高断面、林分生物量、地上生物量及地下生物量作为林分因子与细根、粗根和死根生物量的大小进行相



图内不同小写字母表示土层间差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同造林密度下 14 a 思茅松人工林细根、粗根和死根生物量的垂直分布

Different normal letters mean significant difference at 0.05 level

Fig. 1 The vertical distribution of fine root, coarse root and dead root biomass in different stand densities of 14-year-old *P. kesiya* var. *langbianensis* plantation

表 3 土壤深度和林分密度对 14 a 思茅松人工林细根、粗根和死根生物量交互影响的方差分析

Table 3 The influence of different soil depth and stand densities on the fine root, coarse root and dead root biomass of 14-year-old *P. kesiya* var. *langbianensis* plantation

项目 Item	变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	Ⅲ平方和 Ⅲ type sum of square	均方 Mean square	F	差异显著性 Significance
细根生物量 Fine root biomass	林分密度 Stand density	4	0.109	0.109	11.463	<0.001
	土壤深度 Soil depth	2	0.195	0.195	20.616	<0.001
	林分密度×土壤深度 Stand density×Soil depth	8	0.004	0.004	0.431	0.513
粗根生物量 Coarse root biomass	林分密度 Stand density	4	0.003	0.003	0.814	0.369
	土壤深度 Soil depth	2	0.004	0.004	1.422	0.235
	林分密度×土壤深度 Stand density×Soil depth	8	0.0001	0.00006	0.019	0.889
死根生物量 Dead root biomass	林分密度 Stand density	4	0.002	0.002	0.425	0.516
	土壤深度 Soil depth	2	0.007	0.007	1.815	0.18
	林分密度×土壤深度 Stand density×Soil depth	8	0.001	0.001	0.248	0.619

关分析,结果见表 4。其中,林分密度和乔木个体大小差异与思茅松人工林细根生物量之间呈显著或极显著的负相关关系,而其他林分因子与细根、粗根及死根生物量之间无显著相关性;单株细根生物量与

林分密度、乔木个体大小差异、地下生物量及胸高断面积之间呈显著或极显著的负相关,而与树高和胸径之间呈显著的正相关。

表4 林分因子与细根、粗根、死根及单株细根生物量的相关分析

Table 4 Correlation analysis between stand factors and fine root biomass, coarse root biomass, dead root biomass and fine root biomass of a single tree

项目 Item	细根生物量 Fine root biomass	粗根生物量 Coarse root biomass	死根生物量 Dead root biomass	单株细根生物量 Fine root biomass of a single tree
林分密度 Stand density	-0.568*	-0.149	-0.426	-0.858**
乔木个体大小差异 Tree size inequality	-0.681**	-0.23	0.095	-0.591*
树高 Height	0.429	-0.116	-0.238	0.625*
胸径 DBH	0.484	0.094	-0.33	0.763*
林分生物量 Stand biomass	-0.378	-0.152	-0.973	-0.467
地上生物量 Aboveground biomass	-0.372	-0.151	-0.015	-0.456
地下生物量 Belowground biomass	-0.413	-0.155	0.024	-0.534*
胸高断面积 Basal area at DBH	-0.146	-0.16	0.104	-0.677**
粗根生物量 Coarse root biomass	0.335	-	-	0.3
死根生物量 Dead root biomass	0.027	0.028	-	-0.21

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平相关显著

Note: * and ** represent significant correlation at the 0.05 level and 0.01 level, respectively

3 结论与讨论

思茅松人工林中龄林的土壤 0~30 cm 深度的林分细根生物量在 2.63~6.53 t·hm⁻² 之间,思茅松中龄林的细根生物量显示出较高的生长量^[1],要低于常绿阔叶林和针阔混交林的细根生物量^[19-20],高于马尾松人工林^[12]和油松(*Pinus tabuliformis*)人工林^[7]的细根生物量。作为南亚热带重要的暖热性针叶林植被类型,由于该区域优越的水热条件,思茅松作为速生树种,其人工林可以较短时间积累较高的碳储量^[15],其细根在提高思茅松人工林生产力方面具有十分重要的作用,这是因为思茅松细根在其外生菌根的帮助下从土壤中吸取水分和养分,参与物质循环,加快思茅松生物量的积累。林分密度对思茅松人工林的粗根和死根生物量无显著影响,而对细根生物量有显著影响,表现为随林分密度的增大而细根生物量减少的趋势,与马尾松人工林细根生物量的研究一致^[12]。

林木细根生物量及空间分布与生长季节、生长发育阶段、土壤类型和立地条件等因子有紧密联系,同时还与细根生长的微环境有重要联系^[10]。在人工林生态系统中,密度较小的林分中根系对生长空间和土壤资源的竞争强度要低于较大的林分密度^[21],这是因为林分密度越小,林分开阔度随之增加,林分郁闭度降低,导致直射到林地的光照增加,土壤表面温度上升,水分和养分转化迅速,土壤的有效养分增加,有利于细根的生长和吸收^[2-3],同时种

间竞争减弱,林内生物多样增加,也有利于林下植被细根的生长,细根生物量增加^[3,9],使得密度小的林分中思茅松单株有充足的生长空间,因而林分密度小的思茅松人工林细根生物量更大;而林分密度大的思茅松人工林中林木存在较为强烈的种内竞争,个体之间对光照、养分和空间等竞争激烈,导致自然整枝、自然稀疏以及树冠减小^[17],林木需要根系吸收水分和矿质元素等保证地上部器官的生长,加之林木间隙较小,根系对地下资源的竞争较为激烈,地上和地下部分生长过程对资源的竞争,导致林分密度较大的林分有较低的细根生物量。

同时物种内乔木个体大小差异可以反映在不同变化环境下的生态位差异,从而对森林生物量生产有显著的影响^[18],林分密度较大的思茅松林分具有较高的乔木个体大小差异,这是由于密度较大的林分个体较多,有较高的种内竞争,对细根生物量有较大的负面影响。在密度较大的思茅松中龄林中,本研究还发现林木个体的数量弥补了林木竞争带来的影响,依然可以获得较高的细根生物量,即密度最大的林分由于林木株数最多从而使其细根生物量较大。

研究表明,不同林分密度的思茅松人工林细根生物量具有明显的垂直分布特点,不同林分密度中细根生物量随土层深度的增加而减少,且集中分布在 0~10 cm 土层的细根生物量大约占 40.21%~54.73%,结论与印度东北部分布的思茅松林有超过 77% 细根生物量分布在土壤深度 0~20 cm 中的规

律一致^[22]。思茅松人工林细根生物量的垂直分布由树种本身生物学特性和外界环境共同决定,一方面在思茅松根系组成中,一般主根明显,而侧根主要分布在土壤表层,同时有交汇连生现象^[23],细根在土壤深度中的不对称分布也能为了避免直接的竞争以最大化获取资源^[9];另一方面,森林中的细根主要分布在0~10 cm的枯落物层和矿质土壤表层,因为土壤表层集中了大量的凋落分解物,温度适宜,水分充足,土壤疏松,适合细根的生长^[24],而思茅松人工林中土壤表层具有较小的土壤容重,表层土层土壤容重较小,土质疏松多孔,加上凋落物在分解过程中养分不易渗透到深层土壤,土壤养分在表层聚集,树木根系为获得更多养分,趋于土壤表层^[25];此外,土壤表层具有较大的土壤含水量、土壤有机质、全碳和全磷含量^[15],思茅松细根为更好地吸收土壤养分,因而主要分布在土壤表层中。同时,人工林造林时,初植密度对根系的垂直和水平分布有较大影响。当初植密度增大时,根系向深层土壤生长^[12],但深层土壤深度的养分资源匮乏引起细根的生长不良而出现较多的死亡,这可能是大的林分密度的死根生物

量在土壤深度10~20 cm较多的原因。

不同林分密度的思茅松人工林细根生物量研究表明,初值密度为2 m×3 m的林分中细根生物量要高于其他类型,这对思茅松人工林的林地管理具有较高的参考价值。思茅松中龄林的最适宜的初值密度就是2 m×3 m^[17],密度小的林分材质好,保存率高,种植成本高,适合培育大径级的木材,同时也能够更好发挥思茅松人工林森林生态系统服务功能,即拥有更高碳储量增加能力,尤其是人工林抚育措施对土壤表层的有机碳储量影响最大。细根生产是土壤有机碳储量的主要来源,因而较小林分密度的思茅松人工林也能更好地吸收全球气候变化中排放的CO₂,本研究对制定合理有效的以减排增汇为目标的森林管理措施显得尤为重要。同时,思茅松是深根性物种,在不同林分密度上由于其根系的生长盘根错节,取样区域由于环境异质性导致根样品取样上有差异,从而对细根生物量评估不可避免地产生差异,而不同生长季的思茅松细根生长差异较大,因而应在未来增加取样数量以及不同时期细根生物量的研究。

参考文献:

- [1] DOMISCH T, FINÉR L, DAWUD S M, et al. Does species richness affect fine root biomass and production in young forest plantations? [J]. *Oecologica*, 2015, **177**: 581-594.
- [2] LETHTONEN A, PALVIAINEN M, OJANEN P, et al. Modelling fine root biomass of boreal tree stands using site and stand variables[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **359**: 361-369.
- [3] 刘运科,范川,李贤伟,等.间伐对川西亚高山粗枝云杉人工林细根生物量及碳储量的影响[J].植物生态学报,2012, **36**(7): 645-654.
LIU Y K, FAN C, LI X W, et al. Effects of thinning on fine root biomass and carbon storage of subalpine *Picea asperata* plantation in Western Sichuan province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(7): 645-654.
- [4] 陈云玉,熊德成,黄锦学,等.中亚热带不同演替阶段的马尾松和米槠人工林的细根生物量的研究[J].植物生态学报,2015, **39**(11): 1 071-1 081.
CHEN Y Y, XIONG D C, HUANG J X, et al. Fine root production of *Pinus massoniana* plantation and *Castanopsis carlesii* plantation at different successional stages in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(11): 1 071-1 081.
- [5] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Fine root dynamics with stand development in the boreal forest[J]. *Functional Ecology*, 2012, **26**: 991-998.
- [6] BØRJA I, WIT H A D, STEFFENREN A, et al. Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway[J]. *Tree Physiology*, 2012, **28**: 773-784.
- [7] JIA Q Q, LIU Q J, LI J Q. Individual-based fine root biomass and its functional relationship with leaf for *Pinus tabuliformis* in northern China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2015, **134**(4): 705-714.
- [8] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤形质的影响[J].应用生态学报,2009, **20**(10): 2 323-2 331.
KANG B, LIU S R, CAI D X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(10): 2 323-2 331.
- [9] FU X, WANG J, DI Y, et al. Differences in fine-root biomass of trees and understory vegetation among stand types in subtropical forests[J]. *Plos one*, 2012, **10**(6): e0128894.
- [10] 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): 64-73.
YANG X Y, HAN Y Z, ZHANG Y X, et al. Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of *Larix principis-rupprechtii*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 64-73.

- [11] OLESINSKI J, LAVIGNE M B, JR J A K, et al. Fine-root dynamics change during stand development and in response to thinning in balsam fir (*Abies balsamea* L. Mill.) forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, **286**: 48-58.
- [12] 张艳杰,温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量[J]. 林业科学,2011, **47**(3):75-81.
- ZHANG Y J, WEN Z W. Root biomass of *Pinus massoniana* plantations under different planting densities[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47**(3):75-81.
- [13] LI S F, SU J R, LIU W D, et al. Changes in biomass carbon and soil organic carbon stocks following the conversion from a secondary coniferous forest to a pine plantation[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(9):e0135946.
- [14] 李帅锋,苏建荣,刘万德,等. 思茅松人工林土壤有机碳和氮储量变化[J]. 林业科学研究,2015, **28**(5):810-817.
- LI S F, SU J R, LIU W D, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen stocks in *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation[J]. *Forest Research*, 2015, **28**(6):810-817.
- [15] 陈伟,孟梦,李江,等. 思茅松人工林土壤有机碳库特征[J]. 中国水土保持科学,2014, **12**(2):105-112.
- CHEN W, MENG M, LI J, et al. Soil organic carbon pool characteristics of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, **12**(2):105-112.
- [16] 贾呈鑫卓,李帅锋,苏建荣,等. 思茅松人工林根系特征与生物量分配[J]. 生态学杂志,2017, **36**(1):21-28.
- JIA C X Z, LI S F, SU J R, et al. Root characteristics and biomass allocation for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(1): 21-28.
- [17] 杨利华,徐玉梅,杨德军,等. 不同造林密度对思茅松中龄林生长量的影响[J]. 江苏林业科技,2013, **40**(6):43-46.
- YANG L H, XU Y M, YANG D J, et al. The effect of different afforestation density on the growth in the middle-aged *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2013, **40** (6): 43-46.
- [18] ZHANG Y, CHEN H Y H. Individual size inequality links forest diversity and above-ground biomass [J]. *Journal of Ecology*, 2015, **130**:1 245-1 252.
- [19] 刘波,余艳峰,张贊齐,等. 亚热带常绿阔叶林不同林龄细根生物量及其养分[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2008, **32**(5):81-84.
- LIU B, YU Y F, ZHANG Y Q, et al. Fine-root biomass and related nutrients in different aged stands of subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2008, **32**(5):81-84.
- [20] 温达志,魏平,孔国辉,等. 鼎湖山南亚热带森林细根生产力与周转[J]. 植物生态学报,1999, **23**(4):361-369.
- WEN D Z, WEI P, KONG G H, et al. Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, **23**(4): 361-369.
- [21] 邸楠,席本野, JEREMIAH R P, 等. 宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J]. 植物生态学报,2013, **37**(10):961-971.
- DI N, XI B N, JEREMIAH R P, et al. Root biomass distribution of triploid *Populus tomentosa* under wide- and narrow-row spacing planting schemes and its responses to soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(10): 961-971.
- [22] JOHN B, PANDEY H N, TRIPATHI R S. Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex. Gordon forest of three different ages [J]. *Acta Oecologica*, 2011, **22**:293-300.
- [23] 吴兆录. 思茅松研究现状的探讨[J]. 林业科学,1994, **30**(2):151-157.
- WU Z L. A review of the research status of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* in southwestern China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1994, **30**(2):151-157.
- [24] GILL R A, BURKE I C, LAUENROTH W K, et al. Longevity and turnover of roots in the shortgrass steppe: influence of diameter and depth[J]. *Plant Ecology*, 2002, **159** (2):241-251.
- [25] 张治军,王彦辉,于澎涛,等. 不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2008, **32**(4):71-75.
- ZHANG Z J, WANG Y H, YU P T, et al. Characteristics of biomass and root distribution of *Pinus massoniana* with different dominance[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition),2008, **32**(4):71-75.

(编辑:潘新社)