

毛竹细根分布特征研究

刘广路, 范少辉*, 蔡春菊*, 刘希珍, 李雁冰, 罗天磊

(国际竹藤中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102)

摘要: 为了解毛竹(*Phyllostachys edulis*)细根的分布规律, 对不同水平距离和土层深度 0~1 mm 和 1~2 mm 细根的生物量、比根长、组织密度和根长密度进行了分析。结果表明, 随着毛竹年龄的增加, 细根生物量和根长密度先上升后降低, 根组织密度先降低后升高, 比根长呈降低的趋势。细根生物量和根长密度以距竹秆 60 cm 处最大, 根组织密度以 20 cm 处最大, 比根长在 40 cm 处最大, 但他们在距竹秆不同距离间的差异不显著。细根生物量以 10~20 cm 土层最大, 根组织密度以 20~30 cm 土层最大, 细根生物量、比根长、组织密度和根长密度在不同土层间的差异不显著。与 1~2 mm 细根相比, 0~1 mm 细根生物量和根组织密度更小, 比根长和根长密度更大。因此, 毛竹年龄对细根生长具有显著的影响, 1 年生毛竹有最大的比根长和较大的根组织密度, 具有更强的资源利用率。毛竹细根在一定的土层范围内呈均匀分布状态, 可更有效地利用特定区域的水肥资源。

关键词: 毛竹; 细根; 年龄; 分布

doi: 10.11926/jtsb.3714

Fine Root Biomass Distribution of Moso Bamboo at Different Ages

LIU Guang-lu, FAN Shao-hui*, CAI Chun-ju*, LIU Xi-zhen, LI Yan-bing, LUO Tian-lei

(Key Laboratory for Bamboo and Rattan Science and Technology, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: The aim was to elucidate fine root biomass distribution differences of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) at different ages. The fine root biomass (W_{FRB}), specific root length (L_{SRL}), root tissue density (D_{RTD}), and root length density (D_{RLD}) were analyzed in the horizontal and vertical direction of different age moso bamboo. The results showed that along the age of moso bamboo, the W_{FRB} and D_{RLD} increased at first and then decreased, the L_{SRL} decreased, and the D_{RTD} decreased at first and then increased. The W_{FRB} and D_{RLD} were the biggest at 60 cm from main stem, the D_{RTD} and the L_{SRL} were at 20 cm and 40 cm, respectively. The differences of W_{FRB} , L_{SRL} , D_{RTD} and D_{RLD} were not significant among different horizontal distances from bamboo stem. The W_{FRB} was the biggest at 10–20 cm soil layer, and the D_{RTD} was at 20–30 cm soil layer. The differences of W_{FRB} , L_{SRL} , D_{RTD} and D_{RLD} were not significant among different soil depths, too. The W_{FRB} and D_{RTD} of 0–1 mm fine roots were smaller than those of 1–2 mm fine roots, while the L_{SRL} and D_{RLD} were bigger. Therefore, the age of moso bamboo had significant effects on the growth of fine roots. The L_{SRL} and D_{RTD} of 1-year-old bamboo were bigger, which display greater resource utilization efficiency. The even distribution of fine roots of moso bamboo could more efficient use water and fertilizer resources in a particular area.

Key words: Moso bamboo; Fine root; Age; Distribution

根系与土壤直接接触, 并且以其极高的可塑性来影响和决定植物对土壤中水分和养分的吸收利用效

率, 因此在种间竞争及演替过程中占有重要的地位^[1]。植物细根吸收表面积大、生理活性强, 在森林生态系

收稿日期: 2016-12-26

接受日期: 2017-03-27

基金项目: 林业公益性行业科研专项项目(201404408)资助

This work was supported by the Special Fund for Public Welfare Forestry Industry Research (Grant No. 201404408).

作者简介: 刘广路(1975~), 男, 博士, 副研究员, 主要致力于竹林生态和培育理论与技术研究。E-mail: liuguanglu@icbr.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fansh@icbr.ac.cn, caicj@icbr.ac.cn

统中的能量流动和物质循环中起着重要的作用。研究表明,森林系统内高达75%的碳水化合物被用于供给细根生长与周转^[2]。细根分布的时空动态直接影响到植物对水分、养分的摄取,并且细根不断衰老、死亡与分解,它的分布也会对土壤碳氮分布与物质循环产生较大的影响。其根系分布除了与根系自身的遗传特性有关外,还与土壤、气候、立地条件等因子相关^[3-5]。一般情况下,养分及水分会集中在森林土壤的上层,使得土壤上层的生长条件更为优越。植物体在土壤上层能够以更少的投入,获取更多的养分和水分,因而根系,尤其是细根主要分布于土壤上层,但是不同物种根系垂直分布特征也不尽相同,温带阔叶林树种在0~30 cm土层内根系的生物量达到细根总生物量的80%~90%,温带针叶林的树种占到了50%之多^[6-7]。养分及水分条件在水平方向上的变化,使得细根还存在水平空间上的异质性,阔叶红松林(*Pinus koraiensis*)表层土壤变程为5~15 m^[8],华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林中,细根生物量的分布和季节变化不仅随土层深度而变化,距树干水平距离的不同对其也有很大的影响^[9]。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是中国南方重要的森林类型之一,是仅次于马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的第三树种。因竹产业的迅速发展,为获取更高的经济效益,出现了大面积人工竹林,近20年来平均面积增长率超过3%。毛竹作为大型单轴散生型竹种,具有很强的向周边系统扩展的能力^[10]。毛竹的扩展有效增加了竹资源供给能力,但也产生了群落内物种丰富度、Simpson指数、生物多样性下降等负面影响^[11-13]。毛竹作为大型单轴散生型竹种,具有很强的向周边系统扩展的能力^[13]。毛竹扩展可以分为4个阶段:竹鞭扩展进入相邻系统、竹笋萌发生长、快速生长达到林冠层、新竹占据地上空间很长时期^[14]。毛竹能够较容易地侵入到相邻的郁闭林分,与其独特的生长特征有关^[12],研究表明毛竹笋对光的极度忍耐力使其能够进入相邻的林地,竹笋的生长基本不受光照的影响^[15],其生长所需的碳水化合物主要来自于鞭根系统母竹和根系的传输供给^[16]。毛竹每天的生长可达30~100 cm,在2~3个月的时间内达到最大高度^[17-18],同时竹根也快速发展^[19]。竹笋生长所需的水分和矿质养分除了依靠母竹鞭根系统输入,新竹细根对毛竹能够在新的环境中生长可能也起着关键的作用。研究不同年龄毛竹细根在水平和垂直方向

的生长特征,可以揭示毛竹细根生长策略和分布规律,为新竹为什么能快速生长达到林冠层并占据地上空间提供部分支撑。本文对福建永安竹林生态定位观测研究站的不同年龄毛竹细根分布规律进行研究,为南方竹林经营和可持续利用提供科学参考。

1 研究地概况

试验地位于福建永安竹林生态定位观测研究站天宝岩国家级自然保护区,地理位置为117°28'03"~117°35'28" E, 25°50'51"~26°01'20" N,隶属福建省永安市东部的西洋、上坪、青水三乡(镇)交界处。保护区为戴云山余脉,属中低山地貌,海拔高580~1604.8 m,气候属中亚热带东南季风气候型。据永安市气象局资料记录,保护区年平均气温15℃,极端最低温度-11℃,极端最高温度40℃;年平均相对湿度80%以上,无霜期290 d左右。在海拔800 m以下,竹林覆盖率达96.8%。土壤为红壤,主要竹种为毛竹。

2 方法

2.1 试验设计

根据研究区毛竹分布特征,选取不同立地条件毛竹纯林,设置30 m×30 m试验样地,共设置3块样地(表1)。记录样地内毛竹年龄、胸径和株高,根据平均胸径和株高,分别选取1年、2年、4年和6年生标准竹,共48株。

2.2 细根样品的选取

以标准竹为中心,分别在半径为20、40、60 cm的弧线南北方向上各确定一个取样点,用内径为65 mm的根钻由上至下,分3层钻取土芯样品,每层10 cm(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm),每株标准竹获取18份样品,将南北方向获取的样品合并,共获得根系样品432份。

用孔径为2.0 mm的土壤筛初步分离根系和土壤,将分离出的根系置于0.85 mm筛网在流水中冲洗。洗净后的根系放入蒸发皿,利用游标卡尺、镊子、放大镜等工具进行根系分类。根据根系构型特征、颜色、弹性、气味等区分活根和死根。本研究将直径小于2 mm的根定义为细根,并分为两个级别:0~1 mm和1~2 mm。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of plots

| 样地 Plot | 坡度 Slope (°) | 坡向 Aspect | 林分密度 Density (ind. hm ⁻²) | 胸径 DBH (cm) | 取样株数 Number of sample | 有机质 Organic matter (g kg ⁻¹) | 全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹) | 全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹) | 全钾 Total potassium (g kg ⁻¹) | 水解氮 Hydrolyzed nitrogen (mg kg ⁻¹) | 有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹) | 速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹) |
|------------|--------------------|--------------|---|-------------------|-----------------------------|---|--|--|---|---|--|---|
| I | 20 | SW | 1958 | 11.89 | 20 | 42.21 | 1.31 | 0.20 | 32.09 | 74.64 | 2.71 | 44.43 |
| II | 15 | SE | 1962 | 10.3 | 16 | 61.74 | 1.89 | 0.26 | 20.72 | 96.09 | 7.10 | 55.41 |
| III | 11 | NE | 2052 | 9.36 | 12 | 31.32 | 1.55 | 0.43 | 19.16 | 98.08 | 7.47 | 38.91 |

2.3 细根参数计算

将各级别约 1/3 的新鲜根系利用 WinRHIZO TRON 软件进行扫描并计算根长后烘干称重, 用于计算比根长。剩余约 2/3 样品直接烘干称重, 将两部分烘干样品混合。根据细根根长、生物量和取样体积计算细根生物量(W_{FRB})、比根长(L_{SRL})、根组织密度(D_{RTD})和根长密度(D_{RLD})^[20-21]。

W_{FRB} (g m⁻³)=细根质量(g)×10⁶/[$\pi(d/2)^2 \times h$];
 L_{SRL} (m g⁻¹)=细根长(m)/细根质量(g); D_{RTD} (g cm⁻³)=细根质量(g)/($s \times l$); D_{RLD} (m m⁻³)=细根长(m)×10⁶/[$\pi(d/2)^2 \times h$], 式中, 细根质量指单位体积内所有活细根的干重。 π 为圆周率, d 为土钻内径(cm), h 为土钻高度(cm), s 为细根断面积, l 为细根长度。

3 结果和分析

3.1 毛竹细根的主要影响因子

毛竹细根分布特征主要受到年龄的影响, 其中对比根长、细根组织密度和根长密度的影响达到显著或极显著水平(表 2)。在距竹秆水平 60 cm 范围内, 细根生物量、比根长、组织密度、根长密度随着距离竹秆距离的增加, 差异未达显著水平。在 0~30 cm 土层深度范围内, 随着土层深度的增加,

除 1~2 mm 细根组织密度的差异显著外, 细根生物量、比根长、根长密度的差异均未达到显著水平。交互分析表明, 年龄×距离竹秆距离、年龄×土层深度、距竹秆距离×土层深度、年龄×距竹秆距离×土层深度等交互作用对毛竹细根分布的影响较小, 几个因子的交互作用对毛竹细根特征的影响均未达显著水平($P>0.05$)。

3.2 年龄对细根特征的影响

毛竹 0~1 mm 和 1~2 mm 细根生物量均随毛竹年龄的增长呈先增加后降低的趋势, 其中 1 年生毛竹的细根生物量最低, 2 年生时达到最大, 随着年龄的继续增长呈降低的趋势(图 1)。其中, 除 1 年生细根生物量与 2、4、6 年生细根生物量的差异达极显著水平外($P<0.01$), 2、4、6 年生细根生物量的差异不显著。1~2 mm 和 0~1 mm 细根生物量分别为(947.91±83.12) g m⁻³和(1156.64±163.77) g m⁻³, 前者比后者高 22.02%。0~1 mm 和 1~2 mm 细根的根长密度的变化趋势与细根生物量的相同, 呈先增加后降低的趋势, 1 年生毛竹根长密度与 2、4、6 年生的差异极显著($P<0.01$), 2、4、6 年生毛竹细根根长密度的差异不显著。与细根生物量不同的是, 0~1 mm 细根的根长密度远远高于 1~2 mm 细根的, 达 4.02 倍, 他们的根长密度分别为(8104.73±637.64) m m⁻³

表 2 毛竹细根性状主要影响因子分析(P 值)Table 2 Main factors (P value) of fine root traits by Two-Way ANOVA

| | 细根生物量 Fine root biomass (W_{FRB}) | | 比根长 Specific root length (L_{SRL}) | | 细根组织密度 Root tissue density (D_{RTD}) | | 根长密度 Root length density (D_{RLD}) | |
|---------------------|--|--------|---|--------|---|--------|---|--------|
| | 0~1 mm | 1~2 mm | 0~1 mm | 1~2 mm | 0~1 mm | 1~2 mm | 0~1 mm | 1~2 mm |
| | 年龄 Age (A) | 0.00** | 0.06 | 0.00** | 0.03* | 0.33 | 0.07 | 0.02* |
| 距竹秆距离 Distance (B) | 0.44 | 0.32 | 0.27 | 0.77 | 0.59 | 0.17 | 0.90 | 0.58 |
| 土层深度 Soil depth (C) | 0.74 | 0.07 | 0.87 | 0.53 | 0.31 | 0.00** | 0.90 | 0.94 |
| A×B | 0.53 | 0.59 | 0.99 | 0.93 | 0.47 | 0.16 | 0.86 | 0.89 |
| A×C | 0.35 | 0.59 | 0.38 | 0.69 | 0.32 | 0.16 | 0.81 | 0.82 |
| B×C | 0.21 | 0.10 | 0.72 | 0.36 | 0.71 | 0.72 | 0.40 | 0.47 |
| A×B×C | 0.97 | 0.75 | 0.65 | 0.88 | 0.77 | 0.76 | 0.46 | 0.39 |

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

和(2013.74 ± 169.47) m m⁻³。0~1 mm 和 1~2 mm 细根组织密度随毛竹年龄增加呈先降低后升高的趋势, 4 年生的细根组织密度最低, 与 1 年生的差异显著($P < 0.05$)。1~2 mm 细根木质化程度更高, 细根组织密度更大, 是 0~1 mm 细根组织密度的 10.53 倍。

比根长的变化趋势与细根生物量的相反, 随着毛竹年龄的增加呈降低的趋势。其中, 1 年生毛竹细根的比根长与 2 年、4 年和 6 年生的差异显著($P < 0.05$), 其他年龄毛竹之间比根长的差异不显著。0~1 mm 细根比 1~2 mm 细根的比根长高 270.08%。

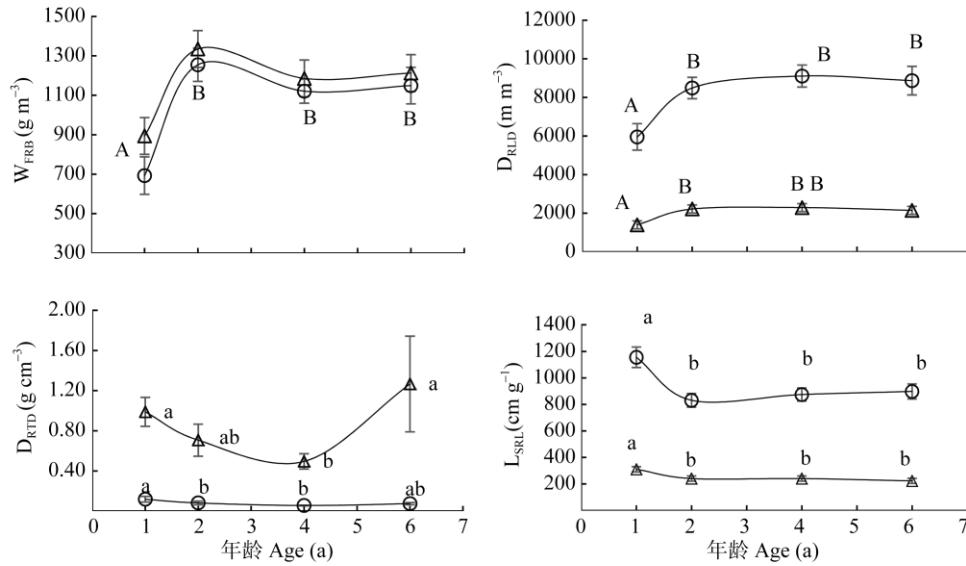


图 1 不同年龄毛竹的细根特征。不同大写和小写字母分别表示差异极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)。下图同。

Fig. 1 Fine root characters of moso bamboo at different ages. The difference capital letters and small letters upon line indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same is following Figures.

3.3 毛竹细根水平分布特征

0~1 mm 和 1~2 mm 细根生物量均以距竹秆 60 cm 处最高, 分别为 997.69 和 1254.23 g m⁻³; 20 cm 处次之, 分别为 932.85 和 1153.36 g m⁻³; 40 cm 处的最低, 分别为 908.62 和 1099.25 g m⁻³ (图 2), 但差异不显著($P > 0.05$)。0~1 mm、1~2 mm 根长密度随距竹秆距离的变化趋势呈增加的趋势, 差异也不显著。0~1 mm、1~2 mm 细根组织密度的变化规律不明显, 以距离竹秆 20 cm 处的根组织密度最大, 分别为 0.10 和 1.04 g cm⁻³。0~1 mm 和 1~2 mm 细根的比根长随距竹秆距离的增加变化趋势不明显, 分别为(937.78 ± 68.46) cm g⁻¹ 和 (256.80 ± 32.27) cm g⁻¹。

957.84、966.62 和 923.65 g m⁻³; 1~2 mm 细根生物量分别为 1085.62、1286.18 和 1078.60 g m⁻³ (图 3)。随着土层深度的增加, 细根根长密度呈降低的趋势, 0~10 cm 土层的 0~1 mm 细根根长密度比 20~30 cm 土层的高 8.34%; 0~10 cm 土层的 1~2 mm 根长密度比 20~30 cm 土层的高 7.22%。细根组织密度随着土层深度的增加呈增加的趋势, 0~1 mm 和 1~2 mm 细根组织密度在 20~30 cm 土层最大, 分别为 0.10 和 1.14 g cm⁻³。细根比根长随着土层深度的增加呈降低的趋势, 0~1 mm 细根的比根长在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层分别为 941.72、950.77 和 908.81 cm g⁻¹; 1~2 mm 细根的分别为 264.26、254.27 和 245.85 cm g⁻¹。

3.4 毛竹细根垂直分布特征

随着土层深度的增加, 细根生物量先上升后降低, 以 10~20 cm 土层细根生物量最大, 0~10 cm 土层次之, 20~30 cm 土层最低, 0~1 mm 细根生物量在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层分别为

4 结论和讨论

树种不同, 细根生物量随年龄的变化趋势不同, 有的树种细根生物量随年龄的增长呈增加的趋势, 如樟子松(*Pinus sylvestris*)^[22]、欧洲赤松(*P.*

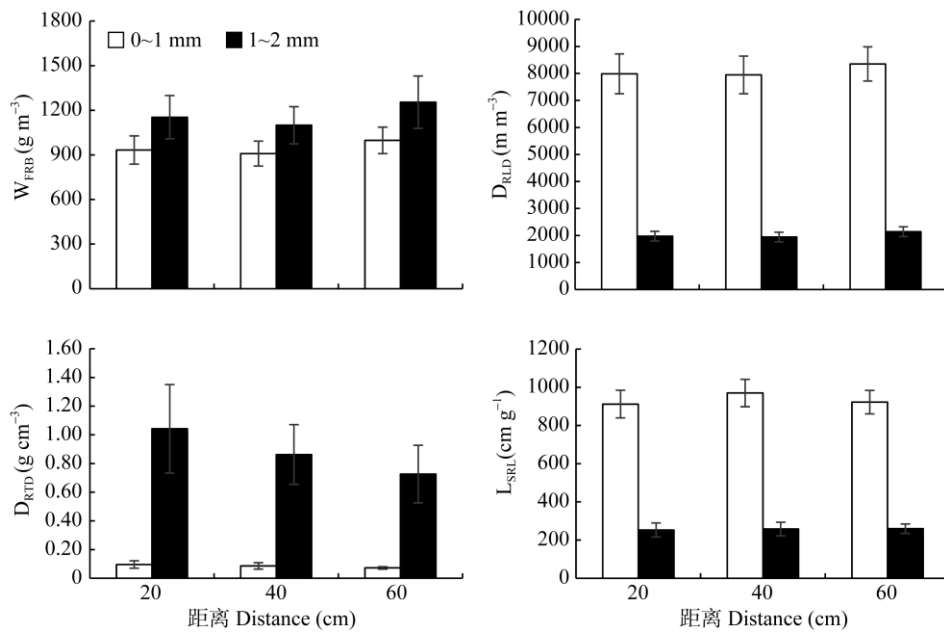


图 2 毛竹细根水平分布特征

Fig. 2 Fine root characteristics of moso bamboo in the horizontal direction

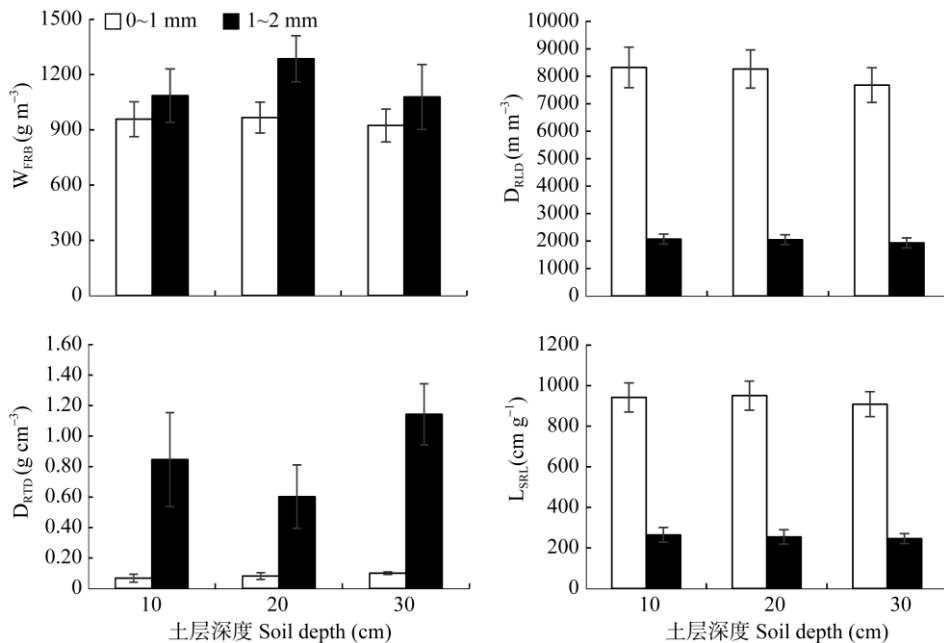


图 3 毛竹细根垂直分布特征

Fig. 3 Fine root characters of moso bamboo in vertical direction

sylvestrics)^[23]、杉木^[24]；有的则呈降低的趋势，如欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)^[23]。毛竹细根生物量随年龄的增加先升高后降低，这和毛竹的生长特性有关。植物地上生物量和细根生物量存在着极显著相关性^[23]，毛竹具有地下茎，竹鞭扩展进入相邻区域，竹笋萌发快速生长成新竹^[14]，新竹生长过程中新根

快速生长，新根生物量增加；新竹一旦成竹，胸径和树高都不再变化，养分需求降低，细根生物量降低。比根长是根长与生物量的比值，对环境的变化尤为敏感^[2]。单位生物量构建的比根长越大，植物吸收水分以及养分的效率就越高。比根长越大的根，直径越细，根系的活力越强^[25]，1年生毛竹较

大的比根长确保了其较高的养分和水分吸收效率。根长密度可以在一定程度上反映单位体积内根系的吸收表面积,植物的根长密度越大,养分及水分吸收的表面积就越大。2年生及以上毛竹较大的细根生物量、根长密度,使其在土壤中具有较大的养分及水分吸收的表面积。毛竹扩展前期竹笋对光不敏感和母竹鞭竹系统的养分、水分供应使竹笋快速生长,同时细根也快速生长,较高的比根长确保其新的生长环境中能有效地吸收养分和水分。和毛竹林相似,桉树(*Eucalyptus robusta*)具有很高的生产力,在用作工业原料林时具有较短的轮伐期。袁渭阳等^[26]对6年轮伐期的巨桉(*E. grandis*)人工林细根碳储量进行研究,认为1~6年生巨桉细根生物量呈先下降后上升的趋势,以6年生的细根生物量最高,与毛竹细根生物量随年龄的变化规律不同,反映了巨桉在6年生时还处在速生阶段,而毛竹则处于成熟阶段。

毛竹细根在一定空间范围内呈均匀分布状态,使其能更有效地利用特定区域的水肥资源。毛竹的鞭根主要分布在0~30 cm土层,可以达到根系生物量的90%以上^[27-28]。本研究结果表明,在距竹秆60 cm的水平范围内,除毛竹细根组织密度随着距竹秆距离的增加呈降低的趋势外,毛竹细根生物量、比根长、根长密度的变化趋势不明显,而与毛竹相伴生长的针阔叶树根系生物量通常随距样木距离的增加而逐渐减少^[27]。本研究中,10~20 cm土层的细根生物量较大,0~10 cm和20~30 cm次之,但差异不显著,与杉木林^[26]、台湾桤木(*Alnus formosana*)^[29]等细根生物量均随土层深度的增加而减小的趋势存在较大差异,反映毛竹根系的广布性可能更好,与刘骏等关于竹阔界面两侧细根生物量、养分密度及养分回归量差异明显,毛竹林细根生物量高达1201.60 g m⁻²,是常绿阔叶林的5.86倍,毛竹根系具有较好的广布性^[30]的研究结果相同。

综上所述,毛竹年龄对细根生长具有显著影响,1年生毛竹具有最小的细根生物量和根长密度,但具有最大的比根长和较大的根组织密度,具有更强的资源利用能力;此外,毛竹细根在土层0~30 cm垂直范围和距竹秆60 cm水平范围内呈均匀分布状态,能更有效地利用特定区域的水肥资源,在竞争性的环境中处于有利地位。0~1 mm细根具有比1~2 mm细根更大的比根长和根长密度,具有更强的养分利用效率。

参考文献

- [1] CRAINE J M, LEE W G, BOND W J, et al. Environmental constraints on a global relationship among leaf and root traits of grasses [J]. *Ecology*, 2005, 86(1): 12-19. doi: 10.1890/04-1075.
- [2] OSTONEN I, PÜTTSEPP Ü, BIEL C, et al. Specific root length as an indicator of environmental change [J]. *Plant Biosyst*, 2007, 141(3): 426-442. doi: 10.1080/11263500701626069.
- [3] SILVA S, REGO F C. Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal [J]. *Plant Soil*, 2003, 255(2): 529-540. doi: 10.1023/A:1026029031005.
- [4] CHENG Y H, HAN Y Z, WANG Q C, et al. Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2005, 29(3): 403-410. doi: 10.17521/cjpe.2005.0053.
程云环, 韩有志, 王庆成, 等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 403-410. doi: 10.17521/cjpe.2005.0053.
- [5] VERMA K S, KOHLI S, KAUSHAL R, et al. Root structure, distribution and biomass in five multipurpose tree species of Western Himalayas [J]. *J Mount Sci*, 2014, 11(2): 519-525. doi: 10.1007/s11629-013-2479-x.
- [6] WANG L, WU F J, DENG W X, et al. Biomass and nutrient of fine-root in masson pine mixed forest [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2013, 40(2): 225-232. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352X.2013.02.025.
王力, 吴福金, 邓文鑫, 等. 马尾松混交林细根生物量研究 [J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(2): 225-232. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352X.2013.02.025.
- [7] SU J S, CHENG J M, GAO Y, et al. Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(3): 626-632. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0235.
苏纪帅, 程积民, 高阳, 等. 宁夏大罗山4种主要植被类型的细根生物量 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 626-632. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0235.
- [8] WANG S T, HAN S J, ZHANG J H, et al. Woody plant fine root biomass and its spatial distribution in top soil of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(3): 583-589. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0108.
王树堂, 韩士杰, 张军辉, 等. 长白山阔叶红松林表层土壤木本植物细根生物量及其空间分布 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 583-589. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0108.
- [9] YANG X Y, HAN Y Z, ZHANG Y X. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamics in *Larix principis-rupprechtii*

- plantation [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(6): 1277–1284. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.06.008.
- 杨秀云, 韩有志, 张芸香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1277–1284. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.06.008.
- [10] SHI J M, YE X H, CHEN F S, et al. Adaptation of bamboo to heterogeneous habitat: Phenotypic plasticity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(20): 5687–5695. doi: 10.5846/stxb201308062036.
- 施建敏, 叶学华, 陈伏生, 等. 竹类植物对异质生境的适应—表型可塑性 [J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5687–5695. doi: 10.5846/stxb201308062036.
- [11] BAI S B, ZHOU G M, WANG Y X, et al. Plant species diversity and dynamics in forests invaded by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in Tianmu Mountain Nature Reserve [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(3): 288–295. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.08258.
- 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 等. 天目山保护区森林群落植物多样性对毛竹入侵的响应及动态变化 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 288–295. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.08258.
- [12] LIN Q Q, WANG B, MA Y D, et al. Effects of *Phyllostachys pubescens* forest expansion on biodiversity in Tianmu Mountain National Nature Reserve [J]. *J NE For Univ*, 2014, 42(9): 43–47, 71. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.09.010.
- 林倩倩, 王彬, 马元丹, 等. 天目山国家级自然保护区毛竹林扩张对生物多样性的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(9): 43–47, 71. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.09.010.
- [13] YANG Q P, YANG G Y, SONG Q N, et al. Ecological studies on bamboo expansion: Process, consequence and mechanism [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(1): 110–124. doi: 10.17521/cjpe.2015.0012.
- 杨清培, 杨光耀, 宋庆妮, 等. 竹子扩张生态学研究: 过程、后效与机制 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 110–124. doi: 10.17521/cjpe.2015.0012.
- [14] KLEINHENZ V, MIDMORE D J. Aspects of bamboo agronomy [J]. *Adv Agron*, 2001, 74: 99–153. doi: 10.1016/S0065-2113(01)74032-1.
- [15] WANG Y X, BAI S B, BINKLEY D, et al. The independence of clonal shoot's growth from light availability supports moso bamboo invasion of closed-canopy forest [J]. *For Ecol Manag*, 2016, 368: 105–110. doi: 10.1016/j.foreco.2016.02.037.
- [16] WANG Y K, JIN A W, ZHU Q G, et al. Effects of fertilization on the relations of diameter at breast height between different-aged ramets of *Phyllostachys edulis* population [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(3): 289–297. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00026.
- 王意锬, 金爱武, 朱强根, 等. 施肥对毛竹种群不同年龄分株间胸径大小关系的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 289–297. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00026.
- [17] LI R, ZHONG Z C, WERGER M J A. Studies on the dynamics of the bamboo shoots in *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1997, 21(1): 53–59.
- 李睿, 钟章成, 维尔格 M J A. 毛竹(*Phyllostachys pubescens*)竹笋群动态的研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(1): 53–59.
- [18] LI R, ZHONG Z C, WERGER M J A. The relationship between the clonal growth and the density of adult shoots with different leaf age in *Phyllostachys pubescens* Mazel [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1997, 21(6): 545–550.
- 李睿, 钟章成, 维尔格 M J A. 毛竹的无性系生长与立竹密度和叶龄结构的关系 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(6): 545–550.
- [19] JIANG Z H. Bamboo and Rattan in the World [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002: 88.
- 江泽慧. 世界竹藤 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 88.
- [20] WANG Y P, XU T, ZHU W R, et al. Seasonal dynamics of quantitative and morphological traits of poplar fine roots and their differences between successive rotation plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(2): 395–402. doi: 10.13287/j.1001-9332.201602.027.
- 王延平, 许坛, 朱婉芮, 等. 杨树人工林细根数量和形态特征的季节动态及代际差异 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 395–402. doi: 10.13287/j.1001-9332.201602.027.
- [21] WANG W W, HUANG J X, CHEN F, et al. Effects of tree species diversity on fine-root biomass and morphological characteristics in subtropical *Castanopsis carlesii* forests [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(2): 318–324.
- 王伟伟, 黄锦学, 陈锋, 等. 树种多样性对亚热带米栎林细根生物量和形态特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 318–324.
- [22] BØRJA I, NILSEN P. Long term effect of liming and fertilization on ectomycorrhizal colonization and tree growth in old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands [J]. *Plant Soil*, 2009, 314(1/2): 109–119. doi: 10.1007/s11104-008-9710-5.
- [23] FINÉR L, HELMISAARI H S, LÖHMUS K, et al. Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. *Plant Biosyst*, 2007, 141(3): 394–405. doi: 10.1080/11263500701625897.
- [24] TU H T, WAN J, SUN Y J, et al. Root biomass of the Chinese fir at different ages and its compatible models [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2015, 39(6): 81–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.06.015.
- 涂宏涛, 万杰, 孙玉军, 等. 不同林龄杉木人工林根生物量及其相容性模型 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 81–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.06.015.
- [25] PREGITZER K S, LASKOWSKI M J, BURTON A J, et al. Variation

- in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth [J]. *Tree Physiol*, 1998, 18(10): 665–670. doi: 10.1093/treephys/18.10.665.
- [26] YUAN W Y, LI X W, ZHANG J, et al. Preliminary studies on carbon reserves of litterfall and fine root in an age series of *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *For Res*, 2009, 22(3): 385–389. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2009.03.013.
- 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 等. 不同年龄巨桉人工林枯落物和细根碳储量研究 [J]. *林业科学研究*, 2009, 22(3): 385–389. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2009.03.013.
- [27] SHEN R, BAI S B, ZHOU G M, et al. The response of root morphological plasticity to the expansion of a population of *Phyllostachys edulis* into a mixed needle- and broad-leaved forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(2): 326–334. doi: 10.5846/stxb201401190143.
- 沈蕊, 白尚斌, 周国模, 等. 毛竹种群向针阔林扩张的根系形态可塑性 [J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 326–334. doi: 10.5846/stxb201401190143.
- [28] LI Y H, BAI S B, ZHOU G M, et al. Study on the dynamic growth of *Phyllostachys pubescens* rhizomes in nature reserve [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, 38(18): 9834–9835,9837. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.18.151.
- 李燕华, 白尚斌, 周国模, 等. 自然保护区内毛竹竹鞭的动态生长研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(18): 9834–9835,9837. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.18.151.
- [29] MIAO Y, CHEN Y L, LI X W, et al. Effects of fertilization on *Alnus formosana* fine root morphological characteristics, biomass and issue content of C, N under *A. formosana-Hemarthria compressa* compound mode [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, 37(7): 674–683. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00070.
- 苗宇, 陈栎霖, 李贤伟, 等. 施肥对台湾栲木-扁穗牛鞭草复合模式下栲木细根形态特征、生物量及组织碳氮含量的影响 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 674–683. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00070.
- [30] LIU J, YANG Q P, YU D K, et al. Contribution of fine root to soil nutrient heterogeneity at two sides of the bamboo and broadleaved forest interface [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, 37(8): 739–749. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00077.
- 刘骏, 杨清培, 余定坤, 等. 细根对竹林-阔叶林界面两侧土壤养分异质性形成的贡献 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(8): 739–749. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00077.