

网络出版时间:2020-09-27 11:52 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2021.03.005
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200924.1246.005.html

不同林龄亚热带次生林细根生物量和形态分布差异

王静波^{a,b}, 于水强^{a,b}, 郝倩葳^{a,b}, 曹雨婷^{a,b}, 葛之葳^{a,b}, 毛岭峰^{a,b}

(南京林业大学 a 南方现代林业协同创新中心, b 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

【摘 要】 【目的】研究不同林龄亚热带次生林主要树种细根的生物量、形态特性及其与土壤养分的相关关系, 探讨不同林分细根生长特性差异及树种间的竞争作用, 为亚热带森林的经营提供理论依据。【方法】在浙江省黄岩山选取经过皆伐后人工播种造林恢复的 23 年生林分及未经过人为干扰的 60 年生林分, 每个林分中设置 10 个 10 m×10 m 的样方, 每个样方中随机选取 3 个采样点, 使用根钻法对 0~20 cm 土层中林分主要树种(青冈、木荷、石栎、其他木本植物)的根系样品及土壤样品进行采集, 测定 3 个不同直径等级(D1. >0~≤0.5 mm, D2. >0.5~≤1 mm, D3. >1~≤2 mm)细根的生物量及其形态特征(比根长、根长密度), 以及土壤铵态氮、硝态氮、全磷及有机质含量, 并分析细根生物量及其形态特征与土壤养分的相关性。【结果】(1)细根总生物量随林龄的增加而增大, 60 年生林分细根总生物量显著($P<0.05$)高于 23 年生林分, 是 23 年生林分的 1.3 倍, 这种显著性差异主要由杂根(其他木本植物根系)生物量引起, 而青冈、木荷、石栎的细根总生物量在 2 个林龄林分间无显著差异。(2)各径级细根生物量因树种和林分不同而存在差异, 60 年生林分青冈 D1 和 D2 径级细根生物量分别比 23 年生林分高 82.1% 和 51.1%, 差异显著($P<0.05$); 木荷各径级细根生物量在 2 个林分间无显著差异; 60 年生林分石栎 D1 径级细根生物量是 23 年生林分的 55.5%, 差异显著($P<0.05$); 杂根各径级生物量均表现为 60 年生林分显著($P<0.05$)高于 23 年生林分, 分别是 23 年生林分的 1.5 倍(D1)、1.9 倍(D2)和 1.9 倍(D3)。(3)木荷、石栎各径级细根的比根长和根长密度在 2 个林龄林分间均无显著差异($P>0.05$), 但青冈和杂根的细根形态在不同林龄林分间差异显著($P<0.05$), 其中 60 年生林分 D3 径级比根长分别是 23 年生林分的 1.4 和 1.3 倍, 60 年生林分青冈 D1、D2、D3 径级根长密度分别较 23 年生林分增加了 58.36%、41.96% 和 49.57%, 杂根根长密度分别较 23 年生林分增加了 44.76%、120.21% 和 111.31%。(4)细根总生物量与土壤养分呈显著相关关系, 但在树种间和林分间有所差异, 在 23 年生林分中, 细根总生物量与土壤铵态氮、硝态氮和有机质含量呈显著或极显著正相关关系; 在 60 年生林分中, 细根总生物量与土壤铵态氮、硝态氮、全磷和土壤有机质含量呈显著或极显著正相关关系。【结论】未经过人为干扰的 60 年生林分细根总生物量显著高于皆伐后人工播种造林恢复的 23 年生林分, 但更容易出现养分短缺的现象; 随林龄的增加, 青冈可能具有更好的适应能力和竞争能力。

【关键词】 亚热带次生林; 林龄; 细根生物量; 细根形态; 土壤养分

【中图分类号】 S718.5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)03-0038-09

Distribution differences of fine root biomass and morphology in subtropical secondary forest at different forest ages

WANG Jingbo^{a,b}, YU Shuiqiang^{a,b}, HAO Qianwei^{a,b},
CAO Yuting^{a,b}, GE Zhiwei^{a,b}, MAO Lingfeng^{a,b}

(a Co-Innovation Center of the Sustainable Forestry in the Southern China, b College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

【收稿日期】 2020-02-22

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31270489)

【作者简介】 王静波(1994—), 男, 河北玉田人, 硕士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: shaolai1014@163.com

【通信作者】 于水强(1977—), 男, 辽宁大连人, 副教授, 主要从事森林生态学研究。E-mail: ysqiang_7@163.com

Abstract: 【Objective】 This paper studied the fine root biomass and morphological characteristics among main tree species at different forest ages, understood their correlation with soil nutrients in subtropical secondary forest and investigate the difference among different stands and competition among tree species to provide basis for the management of subtropical forests. **【Method】** In this study, the 23-year stand with artificial seeding after clear-cutting and 60-year stand without disturbance were selected in Huangyan Mountain, Zhejiang Province. Ten 10 m×10 m quadrats were set in each stand with 20 quadrats in total. Three sampling points were randomly selected from each quadrat. Root-drill method was used to collect root samples and soil samples of main tree species in the 0–20 cm soil layer (*Cyclobalanopsis glauca*, *Schima superba*, *Lithocarpus glaber* and other woody roots). Biomass and morphological characteristics (specific root length and root length density) of fine roots with different diameters (D1, >0–≤0.5 mm, D2, >0.5–≤1 mm and D3, >1–≤2 mm) were studied. Ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus and organic matter of soil were studied, and their correlations with biomass and morphological characteristics of fine roots were also analyzed. **【Result】** (1) Total fine root biomass increased with forest age. The total fine root biomass in the 60-year old stand was significantly higher than that in the 23-year stand, and that of 60-year stand was 1.3 times of that of the 23-year stand. This significant difference was only reflected on total biomass of other woody roots. There was no significant difference in total fine root biomass for three main tree species between the two stands. (2) There were significant differences in fine root biomass with different diameters, but the differences varied by tree species and forest age. Fine root biomass of *C. glauca* with D1 and D2 diameter classes in the 60-year stand was 82.1% and 51.1% higher than those of the 23-year stand with significant differences ($P<0.05$) between them. There was no significant difference in fine root biomass of different diameters of *S. superba* between two stands. Fine root biomass of *L. glaber* with D1 diameter class in the 60-year stand was 55.5% of that in the 23-year stand with significant differences. The fine root biomass of other woody roots with different diameter classes in the 60-year stand was significantly higher ($P<0.05$) than that of the 23-year stand. Fine root biomasses of the 60-year stand were 1.5 times (D1), 1.9 times (D2) and 1.9 times (D3) higher compared to those of the 23-year stand. (3) There was no significant difference in specific root length and root length density of *S. superba* and *L. glaber* between two stands ($P>0.05$). However, there were significant differences in fine root morphology of *C. glauca* and other woody roots between the two stands with different forest ages ($P<0.05$). Specific root length with D3 diameter class in the 60-year stand was 1.4 times and 1.3 times of that of the 23-year stand. Compared with the 23-year stand, root length density of *C. glauca* in the 60-year stand was increased by 58.36% (D1), 41.96% (D2) and 49.57% (D3), respectively. Compared with that of the 23-year stand, root length density of other woody roots in the 60-year stand was increased by 44.76% (D1) 120.21% (D2) and 111.31% (D3), respectively. (4) There was significant correlations between total fine root biomass and soil nutrients, and the correlations were different between two stands and among tree species. In the 23-year stand, total fine root biomass showed significant or highly significant positive correlations with soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and soil organic matter. In the 60-year stand, there were significant or highly significant positive correlations between total fine root biomass and soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus and soil organic matter. **【Conclusion】** The total fine root biomass in the 60-year stand without disturbance was significantly higher than that of the 23-year stand with artificial seeding after clear-cutting, but nutrient shortage was more likely to occur. With the increase of forest age, *C. glauca* had better adaptability and competitiveness.

Key words: subtropical secondary evergreen forest; forest age; fine root biomass; fine root morphology; soil nutrients

细根(直径 ≤ 2 mm 的根)是森林生态系统中养分和物质循环过程的重要组成部分,是土壤碳、氮的主要来源^[1-2]。细根具有巨大的吸收表面积和较强的生理活性,是树木最为活跃和敏感的部位^[3-5],极易受养分、水分等环境因子以及相邻植物竞争的影响。森林群落内的不同植物可能通过调整细根的生物量、形态结构等来适应彼此间的竞争,从而对植物生长和群落结构组成产生影响。因此,对森林生态系统细根生物量和形态特征进行研究,将有助于深入了解植物群落组成和生态系统的地下竞争作用,是探讨森林生态系统碳输入和循环过程的重要内容。

森林生态系统细根生物量及形态特征的变化与林分类型、演替阶段、土壤环境因子等因素密切相关^[6]。不同林龄的林分,其立地条件、土壤养分等会表现出一定程度的异质性,这造成了不同林龄条件下细根生物量及形态特征的差异性。如针对单一树种而言,通常在林龄较低、土壤较为贫瘠的林分中细根生物量较高,而在郁闭后和土壤养分肥沃的林分中,细根生物量趋于稳定或下降后趋于稳定^[7-9]。余洁等^[10]对太行山南麓栓皮栎林细根形态研究后发现,细根比根长的分布表现出随林龄的增加而降低的趋势,根长密度则表现出 10 年生 $>$ 30 年生 $>$ 40 年生 $>$ 20 年生的趋势。而对于林分结构较为复杂、生物多样性较高的天然林分而言,细根生物量的差异规律有所不同。刘波等^[11]研究发现,不同林龄阶段常绿阔叶林的细根生物量表现出随林龄的增加而增加的趋势。森林生态系统中的环境因子和生物因子会随着林分的不断发展演替而发生改变,细根对周围环境的变化做出响应的一个重要途径就是调整自身的生物量和形态结构^[12-13],从而使树木细根具有不同的养分觅食策略,形成不同的细根生长特性^[14-15]。目前,国内外关于不同林龄常绿阔叶次生林树种生态适应机制的研究主要集中于地上部分,对地下部分的探索相对较少^[16-18]。细根的生物量和形态特征在不同林龄条件下存在很大差异,这阻碍了人们对亚热带森林生态系统结构与功能的理解和

准确评估。

本研究以典型亚热带常绿阔叶次生林为例,选取 23 年前经过皆伐后人工播种造林恢复过来的林分和 60 年生未经人为干扰的林分为试验对象,研究不同林龄主要树种的细根生物量、形态特征及其与土壤养分之间的相关性,探讨亚热带常绿阔叶林树种之间的竞争和共生关系,为亚热带森林的经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于浙江省衢州市龙游县黄岩山(N28°44′—29°17′,E119°02′—119°20′)。试验地气候为典型亚热带季风气候,年平均气温 17.1℃,最热月平均气温 28.8℃,最冷月平均温度 5.0℃,全年无霜期 257 d;年平均降雨量 1 602.6 mm,年平均相对湿度 79%,全年日照时数 1 761.9 h;土壤以红壤为主,偏酸性;林分在森林植被分区上属中亚热带东部常绿阔叶林亚带。样地林分在 1960 年之前作为薪材林被皆伐,后经过自然更新形成次生林,并作为乡村风水林保护起来,但在 20 世纪 90 年代,由于木材需求,一部分林分遭到皆伐,于 1997 年采用播种造林方式进行恢复,目前该试验区域林分属于生态公益林。样地林分主要树种包括木荷(*Schima superba*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等,主要灌木包括山矾(*Symplocos sumuntia*)、赤楠(*Syzygium buxifolium*)、菝葜(*Smilax china*)等,草本植物有半夏(*Pinellia ternata*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、地肤(*Kochia scoparia*)等。

本研究选取皆伐后经人工播种造林恢复 23 年的林分(23 年林龄)和 60 年未经人工干扰的林分(60 年林龄)作为试验林分。2 个林分的乔木树种均以青冈、木荷、石栎为主,所以本研究选取这 3 个主要树种的细根为研究对象。2 个林地的基本概况、林分主要树种和土壤特征见表 1~3。

表 1 供试 2 个不同林龄亚热带次生林地的基本概况

Table 1 Basic information of two subtropical secondary forests at different ages								
林龄/a Forest age	灌木覆盖度/% Coverage of shrub	灌木密度/ (株·hm ⁻²) Density of shrub	Simpson 指数 Simpson index		坡向 Exposure	坡位 Slope position	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude
			乔木 Arbor	灌木 Shrub				
60	40	5 025	2.01	0.79	西南 SW	中 Middle	17~20	55.7
23	27.5	4 375	1.49	0.73	西北 NW	下 Bottom	11~22	75.4

表 2 供试 2 个不同林龄亚热带次生林分主要树种概况

Table 2 Basic information of main tree species in two subtropical secondary forests at different ages

林龄/a Forest age	主要树种 Tree species	胸径/cm DBH	平均树高/m Mean height	冠幅/(m×m) Crown width	密度/ (株·hm ⁻²) Density	主要树种数量占林分总株数的比例/% Percentage of main tree species in the total number of arbor in stands
60	青冈 <i>C. glauca</i>	11.94	9.63	2.50×2.80	650	66.17
	木荷 <i>S. superba</i>	10.83	9.30	4.18×3.34	525	
	石栎 <i>L. glaber</i>	10.37	8.83	4.97×3.13	500	
23	青冈 <i>C. glauca</i>	11.60	8.60	5.89×4.26	250	86.82
	木荷 <i>S. superba</i>	11.01	7.43	4.18×3.48	475	
	石栎 <i>L. glaber</i>	11.04	8.60	4.20×3.63	800	

表 3 供试 2 个不同林龄亚热带次生林分样地土壤的基本特征

Table 3 Basic characteristics of soil in two subtropical secondary forests with different ages

林龄/a Forest age	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	土壤有机质/ (g·kg ⁻¹) Soil organic matter	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³) Soil bulk density	土壤含水率/% Soil moisture content
60	6.59±0.54 a	3.55±0.38 a	0.313±0.011 a	47.524±3.050 a	0.67±0.06 a	39.71±4.11 a
23	6.05±0.40 a	6.89±0.97 b	0.367±0.023 b	35.712±2.709 b	0.85±0.04 b	32.83±3.26 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters in the same column represent significant difference($P<0.05$).

1.2 样方设置及根系和土壤的采集

在 23 年生和 60 年生林分中,选取林相和立地条件相对一致的区域设置样方,每个林分中各设置 10 个 10 m×10 m 的样方,共 20 个样方。2019 年 7 月,在每个样方中随机选取 3 个采样点,样点须避开道路、林窗、大块石头、枯死木等特殊生境,并详细记录样点距周围树木的距离、树木名称和树木胸径,每个样方 3 个采样点的相关数据取平均值作为 1 个取样重复值,每个林分共 10 次重复。采用根钻(直径 6 cm)法在 0~20 cm 土层取样,采集到的土样和根系不分离,统一装入密封袋,在青冈、木荷、石栎的树干底部挖取较为完整的根系作为参考,低温带回实验室,于 4 ℃环境中保存待测。

1.3 根系和土壤样品的处理与相关指标的测算

将土壤中的根系挑出,用蒸馏水清洗干净,并以采样点所记录的树木胸径、距离等数据作为参考,结合不同树种完整细根的形态特征,将林分内青冈、木荷和石栎的根系区分开来,再将除主要树种根系之外的其他木本植物根系挑拣出来,并归类为杂根(仅包括木本植物根系)。青冈主根明显、长且粗、表皮粗糙,侧根细且短、表皮呈土褐色;木荷主根不明显、分枝程度高,侧根细且长、表皮较为光滑且呈黑褐色;石栎主根表面多结瘤,侧根须根较多、表皮呈土黄色。将分离出来的根系根据直径大小分为 3 个径级,分别是 D1(>0~≤0.5 mm)、D2(>0.5~≤1 mm)、D3(>1~≤2 mm)。将挑选出来的根系放入 Epson 数字化扫描仪(Expression 10000XL 1.0)中扫描,并用 WinRhizo 分析软件进行细根形态分析,

之后将根系样品放入 70 ℃烘箱烘干 48 h 至质量恒定,测定细根干质量,按下式计算细根生物量、比根长和根长密度:

细根生物量(单位土芯面积的根系质量, g/m²)=根干质量/取样面积;

比根长(m/g)=细根长度/细根干质量;

根长密度(m/m²)=细根长度/取样面积。

将挑出根系后的新鲜土壤样品过孔径 2 mm 筛,靛酚蓝比色法测定铵态氮含量,双波长(紫外)分光光度法测定硝态氮含量。随后将新鲜土壤样品风干后过孔径 0.2 mm 筛,钼锑抗吸光度法测定土壤全磷含量;过孔径 0.149 mm 筛,硫酸亚铁滴定法测定土壤有机质含量。

1.4 数据处理

使用 Excel 对试验数据进行整理,用 SPSS 19.0 对不同林分 and 不同树种之间的细根生物量、细根形态指标进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)并结合 LSD 检验比较各指标间的差异显著性($P<0.05$),采用 Spearman 相关分析比较细根生物量与土壤养分指标间的相关性,用 Origin 8.0 绘图。

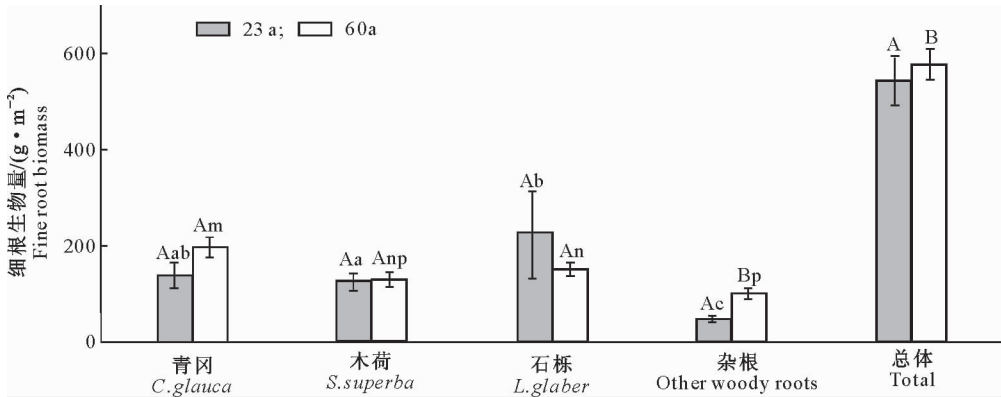
2 结果与分析

2.1 不同林分细根生物量的比较

由图 1 可以看出,2 个林龄林分细根总生物量存在显著差异($P<0.05$),60 年生林分细根总生物量显著($P<0.05$)高于 23 年生林分,是 23 年生林分的 1.3 倍。在 2 个林分间,3 个主要树种青冈、木

荷和石栎的细根生物量并未表现出显著差异($P>0.05$),但杂根生物量差异显著($P<0.05$),60 年生林分是 23 年生林分的 2.1 倍。3 个主要树种及杂根的细根生物量在 2 个林分中所占细根总生物量的比例存在差异,在 23 年生林分中,石栎细根生物量

占比最高,为 42.03%,青冈和木荷分别为 25.65%和 23.46%,杂根占比为 8.85%;而在 60 年生林分中,青冈细根生物量所占细根总生物量的比例最高,为 34.07%,显著高于石栎(26.10%)和木荷(22.39%),杂根生物量最少,占比为 17.43%。



图柱上标不同大写字母表示 2 个林分间相同树种细根生物量具有显著性差异($P<0.05$);
标不同小写字母表示同一林分不同树种细根生物量具有显著性差异($P<0.05$)
Different capital letters represent significant differences in fine root biomass of same tree species between two stands at different forest ages;
Different lowercase letters represent significant differences in fine root biomass of different tree species in same stands

图 1 2 个林龄亚热带次生林分主要树种细根生物量的比较

Fig. 1 Comparison of fine root biomass of main tree species in two subtropical secondary stands at different ages
2.2 不同林分各径级细根生物量的比较 表 4 所示。

2 个林龄林分主要树种不同径级细根生物量如

表 4 2 个林龄林分主要树种不同径级细根生物量的比较

Table 4 Comparison of fine root biomass of main tree species with different diameters in two subtropical secondary stands at different ages

树种 Tree species	林龄/a Forest age	细根生物量/(g·m ⁻²) Fine root biomass		
		D1(>0~≤0.5 mm)	D2(>0.5~≤1 mm)	D3(>1~≤2 mm)
青冈 C. glauca	23	15.27±2.16 Ac	41.35±8.16 Aa	78.19±14.55 Ab
	60	27.81±3.04 Ba	62.48±6.37 Ba	105.17±12.94 Aa
木荷 S. superba	23	26.47±4.27 Ab	38.38±5.08 Aa	56.83±6.60 Ab
	60	25.47±3.76 Aab	36.77±5.20 Ab	66.45±10.83 Ab
石栎 L. glaber	23	32.87±13.75 Aab	67.20±26.45 Aa	125.96±45.46 Aa
	60	18.25±1.78 Bb	51.34±4.83 Aab	81.04±8.09 Aab
杂根 Other woody roots	23	9.87±1.34 Ac	17.36±1.73 Ab	28.94±3.89 Ac
	60	14.76±1.68 Bc	33.52±3.55 Bc	55.09±6.41 Bc

注:同列数据后标不同大写字母表示同一树种的细根生物量在 2 个林龄林分间差异显著($P<0.05$),标不同小写字母表示同一个林分内不同树种间细根生物量差异显著($P<0.05$)。
Note: Different capital letters in the same column represent significant differences in fine root biomass of same tree species between two stands at different forest ages. Different lowercase letters in the same column represent significant differences in fine root biomass of different tree species in same stands.
由表 4 可知,在 2 个林分中,同一树种细根生物量均随细根径级的增加而增加,如在 23 年生林分中,青冈 D3 径级细根生物量分别是 D2、D1 径级的 1.9 和 5.1 倍。各径级细根生物量的差异因树种和林分林龄而不同,60 年生林分中青冈 D1、D2、D3 径级细根生物量均高于 23 年生林分,分别增加了 82.1%,51.1%和 34.5%,但只有 D1 和 D2 径级细根生物量在 2 个林分间存在显著性差异($P<0.05$),而 D3 径级细根生物量数据变异性较大,导致方差偏大,最终表现出在 2 个林分间差异不显著($P>0.05$);石栎则表现出相反的规律,即 60 年生林分中 D1、D2、D3 径级细根生物量均低于 23 年生林

分,分别为 23 年生林分细根生物量的 55.5%,76.4%和 64.3%,但 3 个径级中,只有 D1 径级细根生物量在 2 个林分间表现出显著性差异($P<0.05$);而木荷各径级细根生物量在 2 个林分之间均无显著差异($P>0.05$)。此外,60 年生林分中杂根 D1、D2、D3 径级细根生物量均显著高于 23 年生林分($P<0.05$),分别是 23 年生林分的 1.5、1.9 和 1.9 倍。

林分中 3 个主要树种细根及杂根的各径级生物量存在差异,但其在 2 个林分中的表现并不一致。在 23 年生林分中,石栎、青冈与木荷的细根生物量差异体现在 D1 径级,石栎、木荷分别是青冈的 2.2 和 1.7 倍;在 60 年生林分中,青冈 D2、D3 径级细根生物量是木荷的 1.7 和 1.6 倍,差异显著($P<0.05$)。在 23 年生林分中,石栎 D3 径级细根生物量显著高于青冈(1.6 倍)和木荷(2.2 倍),60 年生

林分中 D1 径级细根生物量显著($P<0.05$)低于青冈,为青冈的 65.62%。2 个林分中各径级杂根细根生物量均显著低于 3 个主要树种。

2.3 不同林分细根比根长和根长密度差异

经计算,23 年生林分各树种细根平均比根长为 11.7 m/g,60 年生林分为 12.27 m/g;23 年生林分各树种细根平均根长密度为 157.99 m/m²,60 年生林分为 129.12 m/m²;总体来看,比根长及根长密度在 2 个林分间不存在显著差异,但在不同树种、不同径级间存在显著差异。由表 5 可知,在 2 个林分中,同一树种细根的比根长及根长密度均随细根径级的增加而减小,如在 23 年生林分中,青冈 D1 径级细根的比根长是 D2 和 D3 径级的 4.3 和 23.7 倍,D1 径级细根的根长密度是 D2、D3 径级的 1.9 和 4.8 倍。

表 5 2 个林龄亚热带次生林分主要树种细根比根长和根长密度的比较

Table 5 Comparison of specific root length and root length density of main tree species in two subtropical secondary stands at different ages

树种 Tree species	林龄/a Forest age	比根长/(m·g ⁻¹) Special root length			根长密度/(m·m ⁻²) Root length density		
		D1	D2	D3	D1	D2	D3
		(>0~≤0.5 mm)	(>0.5~≤1 mm)	(>1~≤2 mm)	(>0~≤0.5 mm)	(>0.5~≤1 mm)	(>1~≤2 mm)
青冈 <i>C. glauca</i>	23	26.50±1.50 A	6.10±0.43 A	1.12±0.08 A	219.53±52.09 A	117.04±21.31 A	45.67±8.57 A
	60	24.55±1.29 A	5.59±0.32 A	1.61±0.15 B	347.64±46.81 B	166.15±19.41 B	68.31±9.92 B
木荷 <i>S. superba</i>	23	29.57±1.15 A	6.30±0.31 A	1.27±0.07 A	406.02±59.09 A	126.23±13.50 A	40.92±4.51 A
	60	33.17±1.86 A	7.37±0.40 A	1.47±0.15 A	457.29±96.79 A	145.58±34.07 A	53.13±10.53 A
石栎 <i>L. glaber</i>	23	27.81±2.32 A	5.46±0.47 A	1.16±0.24 A	480.72±213.44 A	153.94±44.41 A	82.53±32.15 A
	60	29.39±1.58 A	6.41±0.40 A	1.46±0.11 A	272.15±37.61 A	178.31±24.59 A	60.84±9.89 A
杂根 Other woody roots	23	27.76±1.23 A	6.07±0.31 A	1.24±0.08 A	151.98±23.79 A	52.39±5.60 A	18.92±2.45 A
	60	28.17±1.22 A	6.46±0.28 A	1.60±0.13 B	220.00±30.24 A	115.37±16.62 B	39.98±5.02 B

注:同列数据后标不同大写字母表示同一树种的比根长或根长密度在 2 个林龄林分间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters in the same column represent significant differences in specific root length or root length density of same tree species between two stands.

比根长在 2 个林分间的差异主要表现在青冈细根和杂根的 D3 径级上,60 年生林分是 23 年生林分的 1.4(青冈)和 1.3 倍(杂根)。根长密度在 2 个林分间的差异同样表现在青冈及杂根上,60 年生林分青冈 D1、D2、D3 径级根长密度分别较 23 年生林分显著($P<0.05$)增加了 58.36%,41.96%和 49.57%;60 年生林分杂根各径级根长密度分别较 23 年生林分增加了 44.76%,120.21%和 111.31%,但仅 D2、D3 径级在 2 个林分间表现出显著性差异($P<0.05$)。木荷和石栎在 2 个林分间的细根比根长和根长密度均无显著差异($P>0.05$)。

2.4 不同林分细根生物量与土壤养分的相关性

由图 2 可知,2 个林分细根总生物量与土壤养分含量有密切相关性,但在 2 个林分之间存在差异。在 23 年生林分中,细根总生物量仅与土壤铵态氮和

有机质含量呈显著或极显著正相关关系;而 60 年生林分中,细根总生物量与土壤铵态氮、硝态氮、全磷和土壤有机质含量均呈现极显著正相关关系。

由表 6 可知,细根生物量与土壤养分含量之间的相关关系因树种和林龄的差异而表现出不同的规律。在 23 年生林分中,各树种细根生物量与土壤养分含量之间的相关性较弱,木荷细根生物量与铵态氮含量呈显著正相关关系($P<0.05$);青冈细根生物量与硝态氮含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);有机质含量与青冈细根生物量呈显著正相关关系($P<0.05$),与木荷和杂根的细根生物量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。而在 60 年生林分中,青冈细根生物量与铵态氮含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),石栎和杂根的细根生物量与铵态氮含量呈显著正相关关系($P<0.05$);木荷细根生物量

与硝态氮含量呈显著正相关关系($P<0.05$);青冈、木荷及杂根的细根生物量均与全磷含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);青冈、石栎以及杂根的细根生物量均与土壤有机质含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);青冈、木荷细根生物量与土壤有机质含量呈显著($P<0.05$)正相关关系。

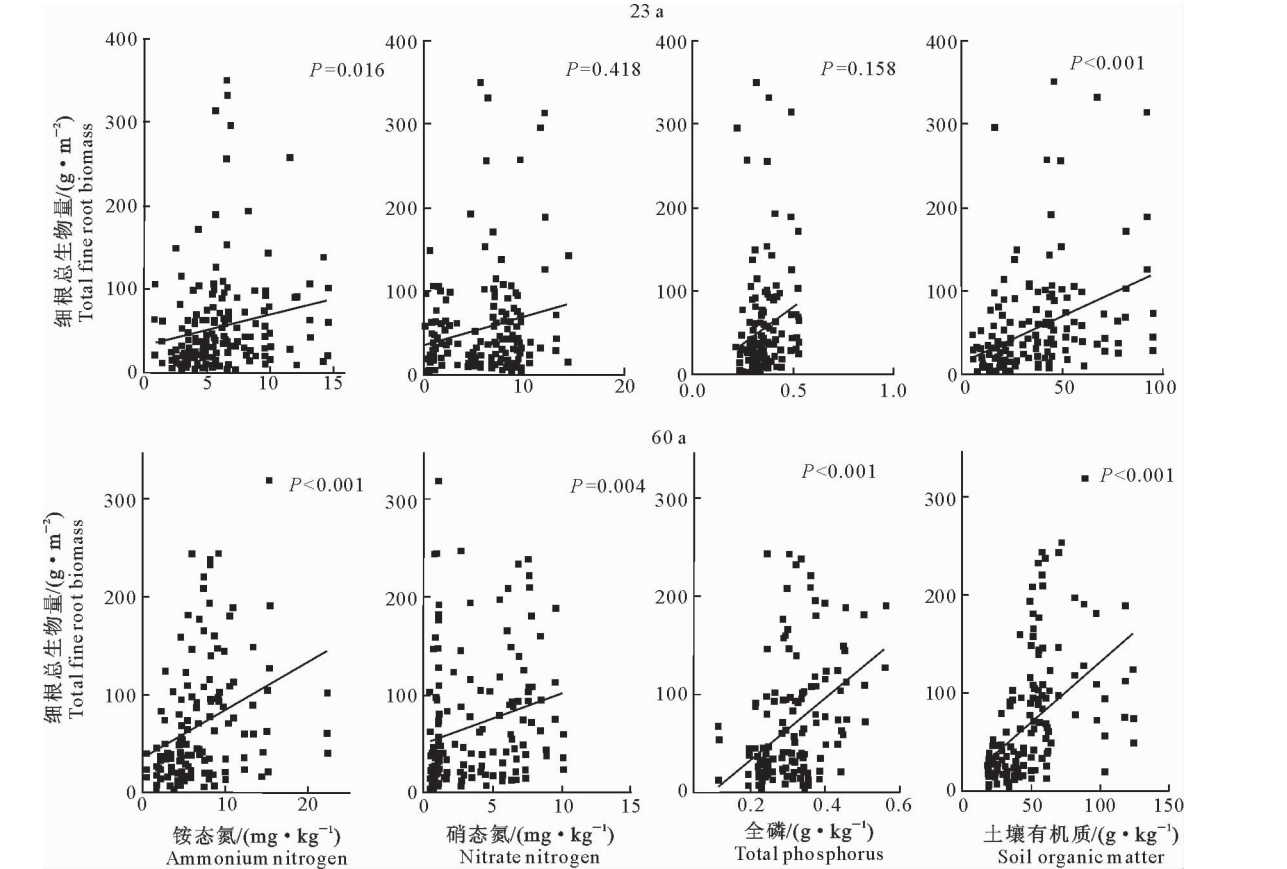


图 2 2 个林龄亚热带次生林细根总生物量与土壤养分含量的相关性

Fig. 2 Correlations between total fine root biomass and soil nutrients in two subtropical secondary stands at different ages

表 6 2 个林龄亚热带次生林分主要树种细根总生物量与土壤养分含量之间的相关性

Table 6 Correlations between total fine root biomass and soil nutrients in two subtropical secondary stands at different ages

林龄/a Forest age	树种 Tree species	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	全磷 Total phosphorus	土壤有机质 Soil organic matter
23	青冈 <i>C. glauca</i>	0.085	<0.001**	0.476	0.012*
	木荷 <i>S. superba</i>	0.039*	0.848	0.159	<0.001**
	石栎 <i>L. glaber</i>	0.054	0.236	0.924	0.181
	杂根 Other woody roots	0.453	0.956	0.054	<0.001**
60	青冈 <i>C. glauca</i>	0.002**	0.127	0.001**	0.001**
	木荷 <i>S. superba</i>	0.323	0.025*	<0.001**	0.017*
	石栎 <i>L. glaber</i>	0.017*	0.260	0.053	<0.001**
	杂根 Other woody roots	0.012*	0.058	<0.001**	<0.001**

注:*. 显著相关($P<0.05$), ** . 极显著相关($P<0.01$).
Note: *. Significant correlation ($P<0.05$), ** . Highly significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

随着林分的不断发展,立地状况及土壤养分条件也不断变化,林分内物种的多样性提高,竞争激烈,导致树木对水分和养分的需求不断增加。多数

研究表明,细根生物量随林龄的增加而增大^[19-21],这种规律在本研究中也有所体现,即 60 年生林分细根总生物量要显著高于 23 年生林分。其原因可能是 23 年生林分经历人工皆伐后,林下灌木及草本植物较少,森林地下竞争较弱,可能存在许多空白生态

位,因此细根生物量较低;而60年生林分未经过人为干扰,林分已发展至相对稳定的状态,林下灌木、草本植物繁多,相比23年生林分地下竞争更为激烈。本研究发现,2个林分细根总生物量的差异不是由主要树种细根生物量引起的,而主要体现在杂根生物量的差异上。

细根的生长与土壤环境密切相关,且细根会根据土壤的空间异质性而改变其功能性状,以更高效地适应土壤环境,因而土壤养分的有效性也是影响细根生物量的重要因素^[22-23]。有研究表明,土壤全氮、全碳、硝态氮、总有效氮和土壤有机质含量与林木细根生物量显著正相关,土壤容重与细根生物量存在显著负相关关系^[24-27]。在本研究中,2个林分土壤养分和土壤容重存在显著差异,如23年生林分土壤全磷、硝态氮、土壤容重显著高于60年生林分,而土壤有机质含量则显著低于60年生林分。土壤特性的差异导致2个林分植物的生长对养分需求有所不同,60年生林分植物对养分需求更强烈。本研究对2个林分细根生物量与土壤养分含量进行相关分析发现,60年生林分各树种细根生物量与铵态氮、硝态氮、全磷和有机质含量大多呈显著或极显著正相关关系,其中青冈和木荷的细根生物量及杂根的细根生物量与土壤全磷含量呈极显著($P<0.01$)正相关关系,青冈和石栎的细根生物量及杂根的细根生物量与土壤有机质含量呈极显著($P<0.01$)正相关关系。而23年生林分中细根生物量与土壤养分的相关性较弱,木荷细根生物量与铵态氮含量呈显著($P<0.05$)正相关关系;青冈细根生物量与硝态氮含量呈极显著($P<0.01$)正相关关系;有机质含量与青冈细根生物量呈显著($P<0.05$)正相关关系,与木荷和杂根的细根生物量呈极显著($P<0.01$)正相关关系。60年生林分林下植被较多,地下竞争激烈,养分需求量大,土壤养分含量较低,植被对土壤养分的需求更强烈,所以细根生物量与土壤养分和有机质含量的相关性大多达显著或极显著水平;而23年生林分林下植被较少,对养分需求量少,细根生长对养分响应不敏感,因此细根生物量与养分相关性大多不显著。

细根比根长和根长密度是细根功能性状的重要指标,是植物吸收养分和水分能力的重要标志,其变化可反映不同生长阶段的植物对地下环境的适应策略。总体而言,本研究2个林分细根根长密度的差异体现在青冈和杂根的细根上,木荷和石栎细根根长密度在2个林分间并无显著差异;比根长在2个

林分间变化不大。这说明与木荷和石栎相比,青冈的细根形态对于养分变化更为敏感,可塑性较强^[28]。本研究中,青冈细根总生物量呈现出随林龄的增加而增大的趋势。青冈通过增加较小径级($<1\text{ mm}$)的细根生物量和根长密度,使得根系更大面积地接触土壤,更有效地吸收水分和养分,来适应林分结构和土壤环境的改变,展示出了较强的根系调节能力,在林龄逐渐增加、土壤养分条件改变的情况下,青冈比木荷和石栎表现出更强的竞争作用和适应能力。

参考文献

- [1] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests [J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15(15): 303-377.
- [2] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [3] 郭大立, 王政权. 根系生态学 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1213-1216.
Guo D L, Wang Z Q. Root ecology [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [4] 高 祥, 丁贵杰, 翟帅帅, 等. 不同林分密度马尾松人工林根系生物量及空间分布研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(6): 71-75.
Gao X, Ding G J, Zhai S S, et al. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantations under different planting densities [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(6): 71-75.
- [5] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(3): 126-138.
Zhang X Q, Wu K H. Fine-root production and turnover for forest ecosystems [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3): 126-138.
- [6] 廖迎春, 庞英杰, 樊后保, 等. 树木细根生物量和形态特征对环境适应研究综述 [J]. *南昌工程学院学报*, 2016, 35(6): 1-5.
Liao Y C, Pang Y J, Fan H B, et al. Adaptation of fine root biomass and traits of tree species to environment [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2016, 35(6): 1-5.
- [7] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin [J]. *Tree Physiology*, 1995, 15(5): 317-325.
- [8] 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.
Li L H, Lin P, Xing X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 337-340.
- [9] Finér L, Messier C, De Grandpré L. Fine-root dynamics in mixed boreal conifer-broad-leaved forest stands at different successional stages after fire [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27(3): 304-314.

- [10] 余洁,胡启立,张志铭,等.太行山南麓地区不同林龄栓皮栎根根系生物量及形态特征研究[J].河南农业大学学报,2018,52(4):533-539.
Yu J, Hu Q L, Zhang Z M, et al. Study on root biomass and morphological characteristics of *Quercus variabilis* Bl. forest of different age in the south foot of Taihang Mountain [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(4): 533-539.
- [11] 刘波,余艳峰,张贇齐,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.
- [12] 李瑞霞,凌宁,郝俊鹏,等.林龄对侧柏人工林碳储量以及细根形态和生物量的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(2):21-27.
Li R X, Ling N, Hao J P, et al. Effects of stand ages on carbon storage, fine root morphology and biomass in *Platycladus orientalis* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(2): 21-27.
- [13] 童芳.八大公山亚热带常绿落叶阔叶混交林主要树种细根形态及其空间分布[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉植物园),2015.
Tong F. Morphology and spatial distribution of fine roots of major tree species in an evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Badagongshan, central China [D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Botanical Garden), 2015.
- [14] Tjoelker M G, Craine J M, Wedin D, et al. Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species [J]. New Phytologist, 2005, 167(2): 493-508.
- [15] Farrish K W. Spatial and temporal fine-root distribution in three *Louisiana forest* soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1752-1757.
- [16] Steven D D. Experiments on mechanisms of tree establishment in old-field succession: seedling survival and growth [J]. Ecology, 1991, 72(3): 1076-1088.
- [17] Bryndís, Marteinsdóttir, Thóra, et al. An experimental test of the relationship between small scale topography and seedling establishment in primary succession [J]. Plant Ecology, 2013, 214(8): 1007-1015.
- [18] Reich D S E B. Photosynthesis and leaf nitrogen in five Amazonian tree species during early secondary succession [J]. Ecology, 1996, 77(2): 581-594.
- [19] 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 and Soil, 2009, 314(1/2): 109-119.
- [20] 吴敏,邓平,赵英,等.不同林龄红锥人工林细根垂直分布和衰老生理特征[J].生态学报,2019,38(9):2622-2629.
Wu M, Deng P, Zhao Y, et al. Vertical distribution and physiological senescence characteristics of fine roots in *Castanopsis hystrix* Miq. plantations at different ages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(9): 2622-2629.
- [21] 匡冬姣,雷丕锋.不同林龄杉木人工林细根生物量及分布特征[J].中南林业科技大学学报,2015,35(6):70-74,79.
Kuang D J, Lei P F. Fine root biomass and vertical distribution of Chinese fir plantations (*Cunninghamia lanceolata*) at different stand ages [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(6): 70-74, 79.
- [22] 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.
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 gmelinii* plantation [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(3): 403-410.
- [23] Yuan Z Y, Chen H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2010, 29(4): 204-221.
- [24] 吴春荣,邢彩萍.祁连山三种主要乔木林细根生物量比较[J].水土保持研究,2015,22(5):325-330.
Wu C R, Xing C P. Comparison of fine root biomass of three main arbors in Qilian Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 325-330.
- [25] 苏纪帅,金晶炜,白于,等.宁夏油松林细根生物量和土壤特性研究[J].西北林学院学报,2014,29(4):1-7.
Su J S, Jin J W, Bai Y, et al. Studies of fine root biomass and soil properties of *Pinus tabulaeformis* forests in Ningxia [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 1-7.
- [26] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.
Lü D, Yang Y H, Zhao W H, et al. Fine root biomass distribution and coupling to soil physicochemical properties under different restored vegetation types [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [27] 郝丙青,夏莹莹,张乃燕,等.不同树龄油茶林分中土壤养分的变化特征及对细根生物量的影响[J].广西林业科学,2019,48(1):6-13.
Hao B Q, Xia Y Y, Zhang N Y, et al. Changes of soil nutrients and their effects on fine root biomass in different *Camellia oleifera* stands [J]. Guangxi Forestry Science, 2019, 48(1): 6-13.
- [28] 张中峰,尤业明,黄玉清,等.模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响[J].生态学报,2012,32(20):6318-6325.
Zhang Z F, You Y M, Huang Y Q, et al. Effects of drought stress on *Cyclobalanopsis glauca* seedlings under simulating karst environment condition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6318-6325.