

文章编号: 1008-2786-(2015)1-33-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000005

千年桐(*Aleurites montana*) 人工林细根特征 及其与细根 N、C 含量的关系

巢林¹ 林晗^{1,2} 吴承祯^{1,2,3*} 刘艳艳¹ 贾兰霞¹ 洪滔^{1,2} 谢安强^{1,2} 陈建忠⁴ 洪伟^{1,2}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002;

3. 武夷学院生态与环境学院, 福建 武夷山 354300; 4. 福建省建阳市林业局, 福建 建阳 354200)

摘 要: 采用完整土块法, 以千年桐(*Aleurites montana*) 人工林为研究对象, 测定了 1~5 级细根的形态、生物量和组织碳(C)、氮(N)含量, 分析了不同径级和序级与细根形态指标的差异性, 对序级与细根生物量、碳氮含量及它们之间的关系进行探讨。结果表明: 直径 ≤ 1 mm 的细根根尖数、根系累计长度、根系累计表面积分别占据总量的 99.66%、88.42%、69.82%; 随着根序从 1 级根到 5 级根升高, 千年桐细根直径由 0.86 mm 增加到 1.35 mm, 组织密度由 0.11 g/cm³ 上升到 0.47 g/cm³, 根表面积密度由 0.46 m²/m³ 降低到 0.085 m²/m³, 比根长由 32.04 m/g 减少到 16.41 m/g; 千年桐细根直径、比根长、根表面积密度、根组织密度及生物量与序级之间回归分析发现它们与序级之间具有二次函数、指数函数、线性函数、三次函数及高斯峰值函数关系; 1~5 级细根生物量对总生物量的贡献分别为: 18.7%、30.9%、27.1%、16.6%、6.7%; N 含量随着根序升高由 16.73 mg/g 下降到 11.83 mg/g, C 含量则由 454.97 mg/g 上升到 494.43 mg/g; 千年桐细根 C/N 比的变异受根组织 N 含量的影响程度达到 93%, 而受 C 含量的影响程度仅为 50%。上述结果证明, 千年桐细根的结构特征、生物量和碳氮含量之间存在密切联系, 为了解千年桐根系结构与功能提供重要依据。

关键词: 千年桐; 细根; 细根特征; 细根碳氮含量

中图分类号: Q948

文献标志码: A

树木细根是吸收养分和水分的功能器官, 在森林生态系统 C 和 N 循环中扮演着重要角色^[1-2]。为适应环境, 根系在长期的进化过程中形成复杂的分枝结构, 不同等级分枝(根序)的根有着不同的生理生态功能^[3], 低级根主要发挥养分和水分吸收功能, 而高级根是典型的运输和储藏根^[4]。近年来, 根系生态学家从根系形态、解剖结构和养分等方面对林木细根作了大量研究, 取得了一些重要的研究成果^[5-8], 对认识根系结构与功能的关系、了解细根在生态系统及树木生长发育过程中的重要作用、揭

示细根生产和周转的影响因子及机制具有重要的理论意义^[9-10]。

千年桐(*Aleurites montana*) 属大戟科(*Euphorbiaceae*) 落叶乔木, 种仁含油率高达 60%~70%, 是一种造林成本低、生长快、抗病性强、生态效益好、经济效益高的乡土树种^[11]。千年桐果实可以开发为生物质柴油及其他工业原料, 其木材也是中纤维板的优良原料, 在工业、农业、军事、医药等研究领域均有广泛的用途^[12]。目前对千年桐的研究相对较少, 韦如萍探讨了叶面喷施稀土对千年桐幼苗生长和生理

收稿日期(Received date): 2014-03-11; 改回日期(Accepted): 2014-06-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(30671664)、教育部博士学科专项基金(200803890010)、福建省科技厅重点项目(2011N0002)。

[The National Natural Science Foundation of China(No. 30671664); The National Ministry of Education Foundation For Ph.D program (200803890010); Science Foundation of the Committee of Science and Technology of Fujian Province(No. 2011N0002).]

作者简介(Biography): 巢林(1988-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事数量森林经理研究。[Chao Lin, (1988-), Male, born in Lu'an of Anhui Province, master degree student, mainly engaged in forest management.] E-mail: fjchaolin@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 吴承祯, 博士, 教授, 主要从事森林生态学等方面研究。[Wu Chengzhen, Ph.D, professor, mainly engaged in forest ecology.] Tel: 0591-87640103, E-mail: fjwcz@126.com

的影响^[13], 研究成果显示用 50 ~ 150 mg/L 混合硝酸稀土溶液喷施叶片对促进千年桐幼苗生长的效果最佳; 陈建忠等对千年桐的栽培技术作了研究, 为生态公益林树种的更新与补植提供参考^[14]; 林晗等分析千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响, 为准确了解千年桐人工林以及混交林营造的林地土壤性质提供科学依据^[11]; 洪滔等研究了千年桐人工林乔木层生物量特征及其分配规律, 建立了千年桐各个器官及总生物量的回归模型, 为千年桐作为短轮伐期的原料林树种的可行性提供科学证明^[15]; 林晗等从内源激素对千年桐生长的影响角度进行优良种源的选择研究, 为种源早期选择提供新方法^[16], 又对千年桐种源叶片 δ^{13} 与环境及叶碳氮含量的关系进行研究, 为不同地区选择适宜的千年桐种植区域提供参考^[12]。但有关千年桐根系结构的研究仍属空白, 对千年桐不同序级细根的生物量、碳氮含量及它们之间的变化关系也尚未了解。为此, 本研究对千年桐细根的结构、生物量、以及组织 C、N 含量进行测定, 旨在分析不同径级细根的根尖数、根长、表面积及根体积的差异性, 揭示千年桐细根的直径、比根长、根表面积密度、组织密度及生物量特征和 C、N 含量随根序的变化格局以及探讨千年桐细根结构、生物量及 C、N 之间的关系。

1 研究地概况

研究地点位于福建省北部的建阳市, 是千年桐的适生区。该区域位于武夷山南麓 $27^{\circ}06' \sim 27^{\circ}43' N$, $117^{\circ}31' \sim 118^{\circ}38' E$, 总面积 3 383 km², 地形以丘陵为主, 土壤以红壤为主, 兼有黄壤、紫色土、水稻土、潮土等 6 个土类, 属中亚热带季风性气候, 光热资源丰富, 冬短夏长, 温差大, 雨季集中, 年平均气温 18.1℃, 无霜期 282 d, 年平均降雨量 1 742 mm, 年平均日照 1 802 h。植被属中亚热带常绿阔叶林区, 森林覆盖率 72.5%, 主要植被类型: 常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林、竹林、经济林、灌丛、草甸和草地。

研究样地设在建阳溪东国有林场 6 a 生千年桐和杉木混交林, 在混交林中设置一块标准样地 (20 m × 20 m), 所在坡向南偏西 15°, 坡度 21°, 海拔 352 m, 林分密度为 2 375 株/hm², 千年桐平均胸径为 5.1 cm, 平均树高为 5.4 m, 杉木平均胸径为 8.4 cm, 平均树高 4.6 m。

2 研究方法

2.1 根系取样

2013 年 7 月, 在建阳市溪东国有林场确定采样林分后, 在 6 a 生千年桐与杉木混交林中设置 1 块 20 m × 20 m 的样方, 分上坡、中坡和下坡各选取 1 株千年桐。根据 Guo 等完整土块法^[17], 在每株千年桐的树干基部 1 ~ 1.5 m 范围内用平板利铲挖取 1 个 20 cm × 20 cm × 20 cm 大小的土块, 从与主根相连的侧根上判断千年桐的根系特征 (表皮和颜色等), 然后进行根系样品的采集。为保持根的活性, 连同土块整体带回实验室, 用低温去离子水冲洗土块, 将包含在土块中的所有根段全部取出, 小心清除根系表面的土壤和杂质, 然后将根系样品装进贴有标签的封口袋中, 放入冰箱中冷冻保存 ($< -10^{\circ}C$)。本研究在取样过程中主要选取分枝结构比较完整的活根, 根据根的颜色、表皮和韧性等指标^[8] 将死根挑出弃之。

2.2 样品处理和分析

2.2.1 细根形态测定

按照 Pregitzer 等介绍的分级方法, 进行根系分级^[18]。采用 Epson 数字化扫描仪 (Expression 10000XL) 对分级后的各个根序的根进行扫描, 然后放入 65℃ 烘箱, 烘干 48 h 至恒重, 测定各个根序生物量干重 (精确到 0.000 1 g), 再密封储存在编号的塑料瓶中, 以便于后期细根 C、N 分析。扫描根系图像采用 WinRHIZO (Pro 2009c) 根系图像分析软件进行根系形态特征分析。测量的指标主要包括各个根序直径、总长度、总表面积和根体积; 根表面积密度^[19]、比根长^[20]和根组织密度^[21]通过计算得到, 计算公式为: 根表面积密度 (m^2/m^3) = 根系表面积 (m^2) / 土壤体积 (m^3), 比根长 (m/g) = 根长 (m) / 生物量 (g), 根组织密度 (g/cm^3) = 生物量 (g) / 根体积 (cm^3)。

2.2.2 C、N 含量测定

将密封储存在编号塑料瓶中的各级细根用玛瑙研钵进行粉碎处理, 过 2 mm 孔径筛。然后分别取适量样品用 EA3000 元素分析仪测定各根序的 C、N 含量, 直接读取数据。

2.3 数据分析

对千年桐形态测定数据统计不同径级细根的根系长度、根系表面积、根体积等; 计算各个根序的平均直径、比根长、根表面积密度和根组织密度及对应

的标准误差;对 C、N 含量测定数据计算各个根序的平均组织氮含量、碳含量和碳氮比。采用简单方差分析方法,比较各个根序形态、生物量和 C、N 含量的差异,通过 LSD 检验比较各个根序的细根分别在形态、生物量和 C、N 含量之间的差异($\alpha = 0.05$)。采用回归分析方法研究根序与形态、生物量、根组织 N 和 C 含量的关系。所有数据采用 SPSS13.0 for Windows 软件完成,图表用 Sigmaplot 10.0 绘制。

3 结果与分析

3.1 细根结构

千年桐细根的形态结构特征是由自身的遗传特性和环境条件决定的,呈人字形(herringbone system),主根发达,主根长而粗,侧根长而细,呈人字形排列,表皮呈暗黄色。

3.1.1 不同径级根系与根系结构指标的关系

千年桐根系的根尖数量随着根系径级的增大大幅度的降低,直径较小的细根的根尖数占绝对大的份额,在根系根尖数与直径变化关系图上表现为累计根尖数量达到平稳所对应的直径较小[图 1

(A)]。从表 1 可以看出,直径 ≤ 0.5 mm 的细根根尖数量最大,占总根尖数量的 96.38%;当直径 > 2 mm 时,根系没有根尖。

根系的累计长度和累计表面积是决定根系吸收范围的重要因素,通常细根($d < 2$ mm)所占的比例越大,根系的累计长度和累计表面积越大^[21]。千年桐细根的根系长度和表面积占其根系总长度和总表面积的主体[图 1(B)和图 1(C)],其中直径为 0~1 mm 的根系长度占总长度的 88.42%,直径为 1~2 mm 的根系长度只占总长度的 9.29%(表 1)。这表明数量最大的根系($d < 1$ mm)主要为根毛或极短的小根。从图 1(C)可以看出,累计根系表面积达到平稳时所对应的直径较小,这表明直径较小的根系的表面积占有较大份额。千年桐 ≤ 1 mm 细根的表面积占总表面积的 69.82%,其中 ≤ 0.5 mm 根系的表面积只占总表面积的 16.05%。

千年桐直径在 0~1 mm 和 1~2 mm 的根系体积占根系总体积的 64.55%。在 < 2 mm 范围内,千年桐累计根系体积随直径增大而提高的幅度小于其他指标[图 1(D)],表明 > 2 mm 径级根系体积在根系总体积中占有相当的比重。

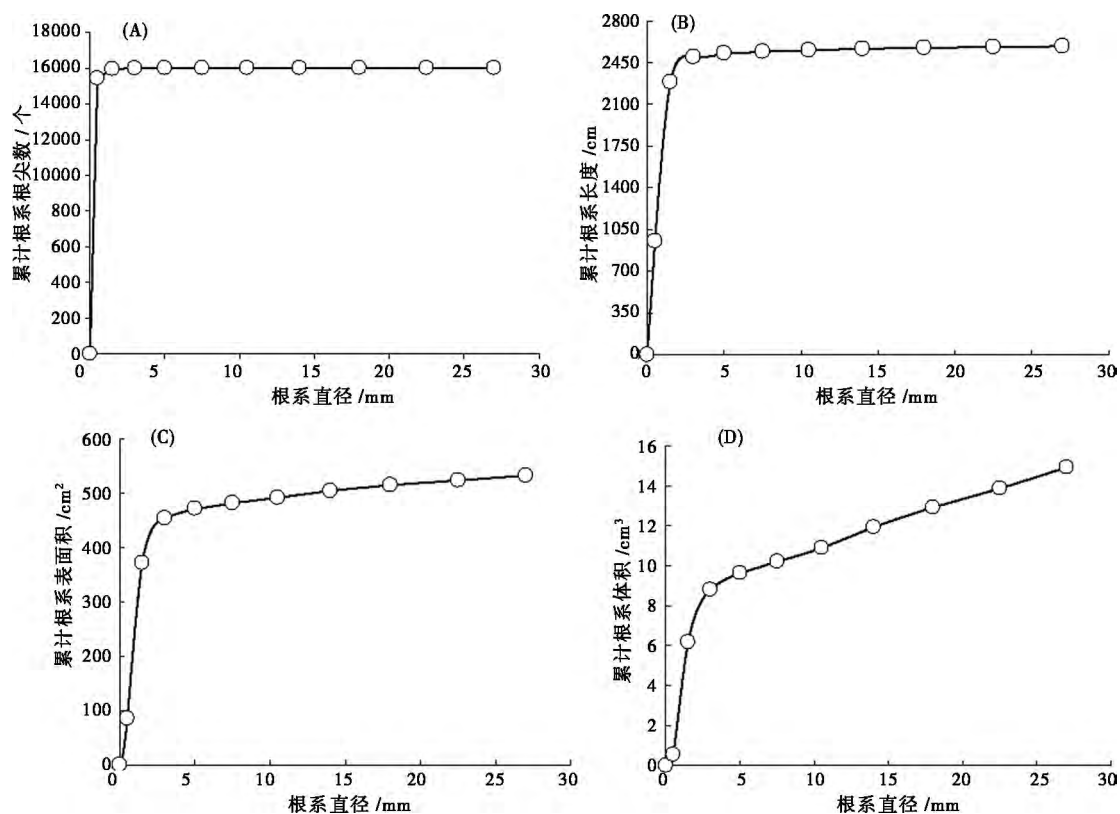


图1 根系径级与根系结构指标之间的关系

Fig.1 Relationship between root diameter and morphological parameters

表 1 不同径级根系各结构指标占总量的比例

Table 1 Proposition of root tips , root length , root surface area and root volume in different classes to total roots

根系指标 Root Index	根系直径 Root diameter /mm									
	≤0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	2 ~ 2.5	2.5 ~ 3	3 ~ 3.5	3.5 ~ 4	4 ~ 4.5	>4.5
根尖数	96.38	3.28	0.27	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
根系长度	36.83	51.59	8.12	1.17	0.55	0.45	0.46	0.34	0.26	0.23
根系表面积	16.05	53.77	15.49	3.29	1.93	1.87	2.29	1.98	1.69	1.64
根系体积	3.65	37.72	17.57	5.61	3.86	4.57	6.89	6.61	6.43	7.09

3.1.2 不同序级根系与根系形态指标的关系

研究发现随着千年桐细根序级的升高,根直径和根组织密度均增加[图 2(A) 和图 2(C)],根表面积密度降低[图 2(D)],而比根长则先降低后升高的趋势[图 2(B)]。千年桐根直径的变化为 0.86 ~ 1.35 mm,根组织密度变化为 0.11 ~ 0.47g/cm³,千年桐细根直径随序级的升高呈现的变化可用二次函数表征,组织密度随序级升高呈现的变化可用三次函数表征(表 2)。前 3 级细根比根长随着序级的升高均降低,而到 4 级则升高,而后又降低,比根长随序级的升高呈现的变化可用指数函数表征(表 2)。根表面积密度随着序级的升高由 0.46 m²/m³降低到 0.085 m²/m³,随序级升高呈现的变化可用一次

函数表征(表 2)。

方差分析表明:千年桐细根序级对直径有显著影响($P < 0.05$),对比根长影响不显著($P > 0.05$),对根表面积密度和组织密度均有极显著影响($P < 0.01$)。

3.2 千年桐细根生物量

3.2.1 细根生物量特征

本实验对千年桐不同根序生物量的测定发现:细根生物量随序级的升高,前 2 级根生物量增加,而后开始下降(图 3)。1 ~ 5 级细根生物量对总生物量的贡献分别为:18.7% ,30.9% ,27.1% ,16.6% ,6.7% ,因此可以看出 2 级根和 3 级根对千年桐细根总生物量的贡献最大。

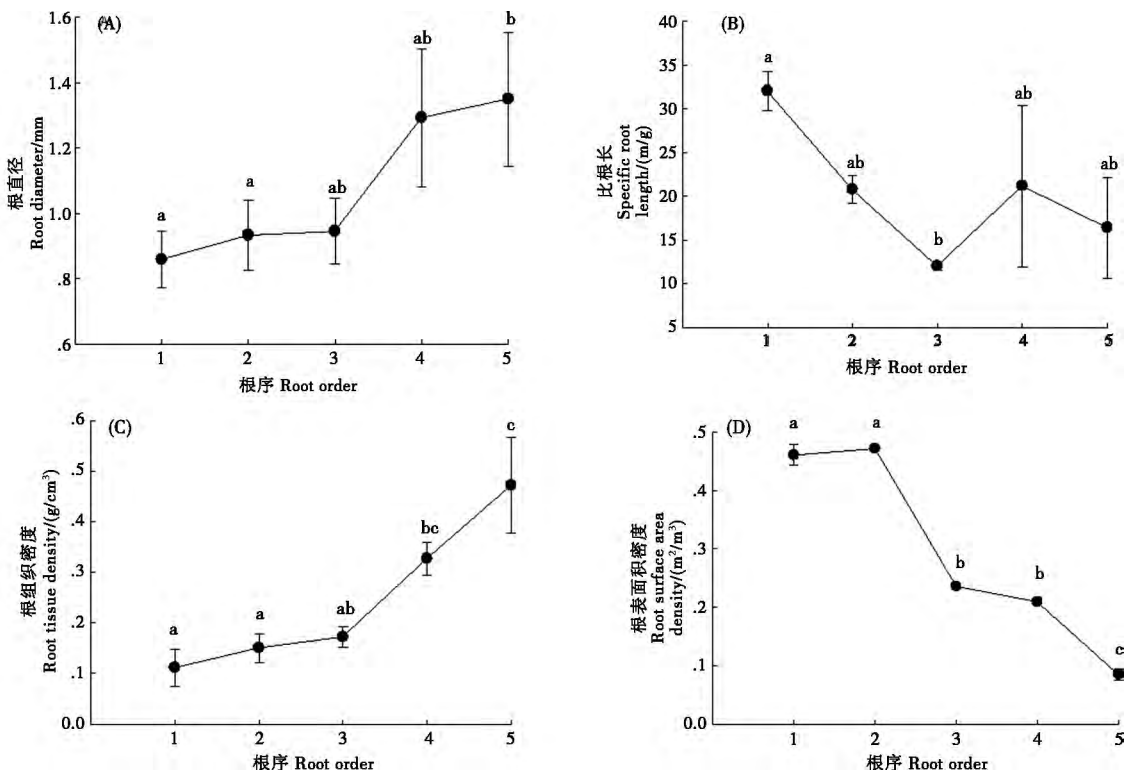


图 2 千年桐 1 ~ 5 级细根形态指标(平均值 ± 标准误差)(不同字母表示根序间的差异显著($P < 0.05$))

Fig. 2 Fine root morphology of *Aleurites montana* from the first to fifth order (mean ± SE) . Different letters indicate significant difference among root orders at $P < 0.05$ level

表 2 千年桐细根形态特征及生物量与序级之间的回归关系

Table 2 Relationships of root morphology , biomass with root order by means of regression for *Aleurites montana*. Y is root diameter , specific root length , root surface area density , tissue density , biomass respectively and x is root order

指标 Index	回归模型 Regression model	R^2	P
根直径/mm	$Y = 0.8239 + 0.0046x + 0.0216x^2$	0.902	<0.05
比根长/(m/g)	$Y = 8.6038 + 48.5365\exp^{-0.7244x}$	0.945	>0.05
根表面积密度/(m^2/m^3)	$Y = 0.5959 - 0.1012x$	0.905	<0.01
根组织密度/(g/cm^3)	$Y = 0.9040 - 0.0045x - 0.0004x^2 + 0.0042x^3$	0.995	<0.01
生物量/(kg/m^3)	$Y = 0.0641\exp(-0.5((x - 2.3880)/1.4458)^2)$	0.990	<0.01

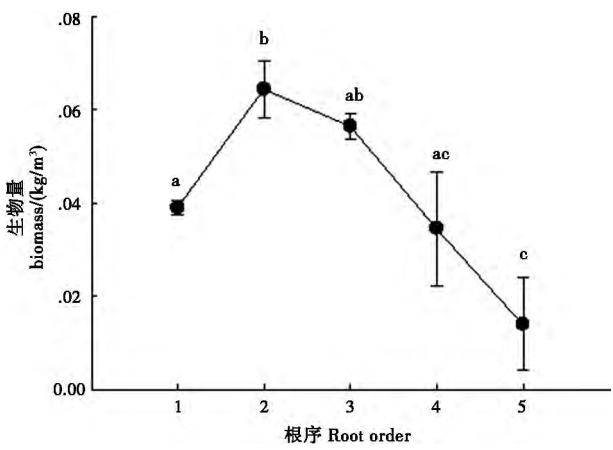


图 3 千年桐 1 ~ 5 级细根生物量
不同字母表示根序间的差异显著($P < 0.05$)

Fig . 3 Biomass of the first five fine root branch orders for *Aleurites montana*. Different letters indicate significant difference among root orders at $P < 0.05$ level

方差分析发现: 序级对千年桐细根生物量有极显著的影响($P < 0.01$) ,采用高斯峰值函数进行拟合 其相关系数 R 高达 0.99 拟合效果高度显著 ,与序级之间的回归模型见表 2。

3.2.2 细根生物量与细根形态及碳氮的关系

回归分析表明 细根生物量与比根长、根表面积

密度、根组织密度、组织 N、C 含量及 C/N 比之间有着不同的相关性(表 3) 。细根生物量与比根长、根组织密度、组织 N 含量和 C/N 比的相关性均不显著($P > 0.05$) ,相关系数分别为 0.126 ,0.258 ,0.129 和 0.169。细根生物量与根表面积密度和 N 含量呈正相关 ,而与比根长、根组织密度、C 含量和 C/N 比呈负相关。生物量与 C 含量有显著的相关性($P < 0.05$) ,与根表面积密度有极显著的相关性($P < 0.01$) 相关系数分别为 0.568 和 0.438。

3.3 细根 N、C 含量

千年桐细根的 N 含量随着根序升高而降低 ,C 含量则增加 [图 4(A)] ,而 C/N 比随着根序的升高表现为先升高后降低的趋势 [图 4(B)]。细根的 N 含量变化为 16.73 ~ 11.83 mg/g ,C 含量变化为 454.97 ~ 494.43 mg/g ,C/N 比变化为 28.10 ~ 42.58。根组织 N 含量对 C/N 比的影响达到 93% [图 5(A)] 组织 C 的影响仅为 50% [图 5(B)]。

4 结论与讨论

1. 不同径级千年桐细根特征具有较大的差异 ,直径 0 ~ 1.5 mm 细根根尖数、根系长度、根系表面积

表 3 细根生物量与细根形态及碳氮的关系

Table 3 Relationships of fine root morphology , C and N concentration with biomass by means of regression for *Aleurites montana*. Y is specific root length , root surface area density , tissue density , N concentration , C concentration , C/N ratio respectively and x is fine root biomass

变量 variable (x)	因变量 dependent variable (Y)	回归方程 regression equation	R^2	P
生物量/(kg/m^3)	比根长/(m/g)	$Y = 26.7710 - 167.8324x$	0.126	>0.05
	根面积密度/(m^2/m^3)	$Y = 0.0871 + 4.7889x$	0.438	<0.01
	根组织密度/(g/cm^3)	$Y = 0.4073 - 3.8812x$	0.258	>0.05
	N 含量/(mg/g)	$Y = 11.4526 + 56.0702x$	0.129	>0.05
	C 含量/(mg/g)	$Y = 499.3169 - 617.2567x$	0.568	<0.05
	C/N 比	$Y = 43.5636 - 172.3622x$	0.169	>0.05

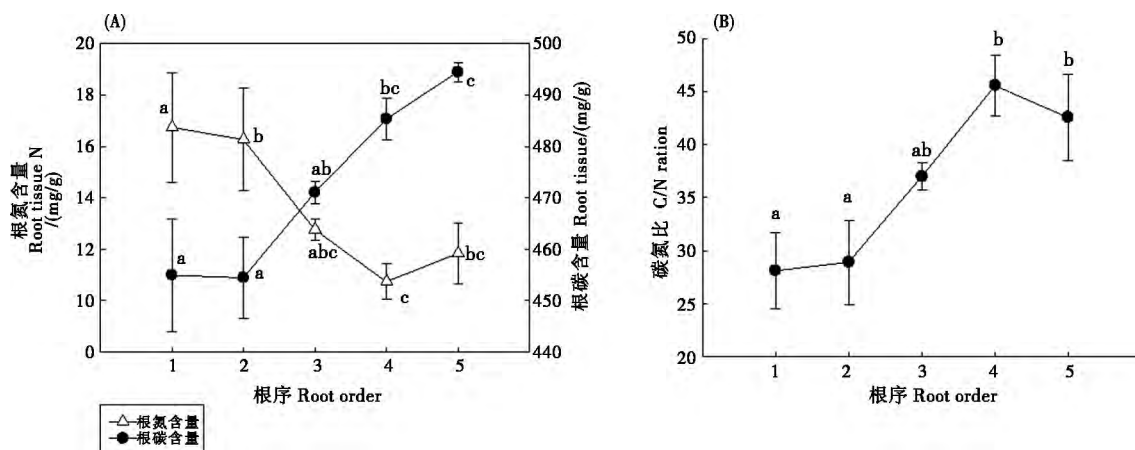


图4 千年桐 C、N 含量及 C/N 比随根序的变化(不同字母表示根序间的差异显著($P < 0.05$))

Fig. 4 C, N content, and C/N ratio in fine roots with the first five root order of *Aleurites montana*.

Different letters indicate significant difference among root orders at $P < 0.05$ level

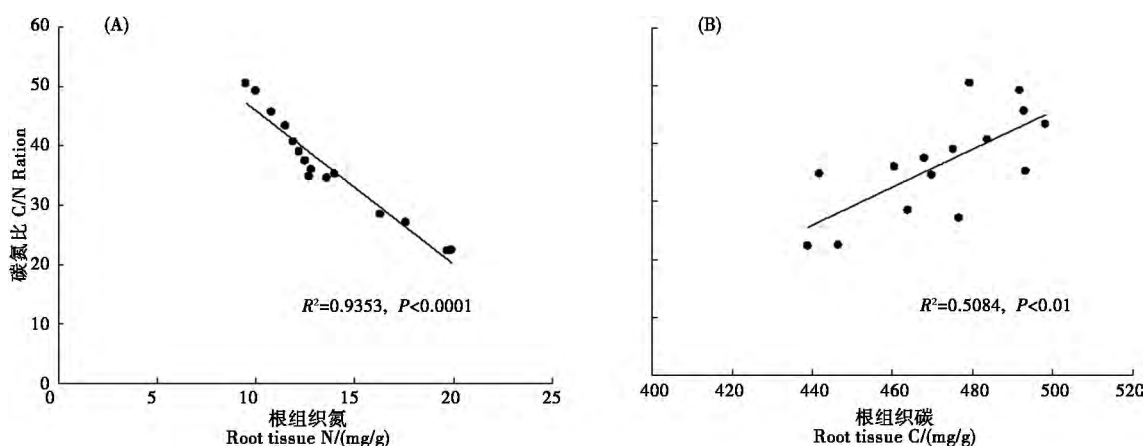


图5 千年桐细根碳氮比与根组织氮和碳含量的相关关系

Fig. 5 Correlations of C/N ratio of fine roots with root tissue N and root tissue C in *Aleurites montana*

和根系体积均最大,直径 ≤ 0.5 mm 细根根尖数占总根尖数量的 96.38%;直径 ≤ 1 mm 细根表面积占总表面积的 69.82%,直径 ≤ 2 mm 细根体积占总体积的 64.55%。这与刘丽娜等对白皮松、侧柏和油松根系构型分析的结果相比较^[22],千年桐直径 ≤ 1 mm 细根长度、表面积等占总体的比例更大,这和千年桐自身的生理生态特征密切相关,可能通过直径 ≤ 1 mm 细根长度及表面积的增加来提高其养分捕获能力,还可能与取样方法、面积及样本株数的不同有关。

2. 千年桐细根直径、根组织密度随着序级从 1 级到 5 级根升高均增加,比根长和根表面积密度呈降低趋势;细根直径、比根长、根表面积密度、根组织密度与序级之间呈现出较好的二次函数、指数函数、线性函数及三次函数关系,表明序级可以对细根特

征进行很好的表征。

这与熊德成等研究显示亚热带 6 种树细根直径、组织密度随序级升高而增大,比根长减小的结论相一致,但其发现细根直径、比根长、根组织密度与序级之间具有指数函数、二次函数或三次函数关系^[23],跟千年桐细根特征指标与序级之间的回归关系有所差异,这可能与树种的不同具有较大的关系。

3. 随着序级升高,千年桐细根生物量呈现先升高后降低的趋势(图 3),千年桐细根生物量与序级之间具有很好的回归关系,为研究千年桐不同序级生物量变化提供参考;同时对细根生物量与细根结构及碳氮含量之间的关系进行分析,对千年桐细根生产和周转的研究有一定的参考意义。本研究采用完整土块法对千年桐不同序级生物量进行研究,考虑到了细根分枝特点对根系结构和功能的作用,是

对已往以细根直径大小为基础研究细根生物量存在不足的一个补充^[23-24]。根据相对生长理论^[25-26], 各个序级的生物量会随着序级的升高而单调递增, 然而研究中千年桐不同序级生物量变化并未表现出这种规律。王祖华等对杉木不同序级生物量的研究符合相对生长理论^[27]; 熊德成等对亚热带 6 种树种细根生物量进行研究时发现, 序级对细根生物量有极其显著的影响, 其中 1 级根生物量最小, 4 级或 5 级根生物量最大^[23]; Wang 等对中国温带水曲柳和落叶松细根生物量的研究表明, 部分低级根生物量较高, 甚至高于其他高级根, 并指出这可能与低级根分枝比例较高相关^[26]。此外, 采用土块法只能保存一部分根系的完整, 将细根从土壤中分离出来也会损坏细根系统的完整性, 所以对不同序级千年桐细根生物量的估算存在一定误差。

4. 千年桐细根 N 含量随序级升高而降低, C 含量则增加 [图 4 (A)]; 千年桐细根 93% 的 C/N 比变异受根组织 N 含量影响 [图 5 (A)], 而受 C 含量的影响程度仅为 50% [图 5 (B)]; 根组织 N 含量是影响千年桐细根寿命的重要因素, 千年桐前 2 级细根 N 含量最高, 其生产和周转相对于高级根更快。千年桐细根 N 和 C 含量随序级变化的规律与刘佳等和许旻等的研究结果相一致。许旻等对影响根组织 N 浓度和 C 浓度的因素进行了探讨, 发现维管束-根直径比(维根比)大小影响根组织 N 浓度和 C 浓度, 可以解释 N 浓度变异的 38%, C 浓度变异的 23%, 并从根系解剖结构作出相关解释。同时, 许旻等对海南岛 4 个热带树种根组织碳氮含量研究时发现 76% 的 C/N 比变异受根组织 N 含量影响, 而受 C 含量的影响程度不到 10%。前人研究表明, 根组织 N 含量影响细根寿命^[17-18], 细根寿命与 C/N 比呈显著正相关^[28]。细根 N 含量高, 相应地呼吸速率也高, 如果投入的光合产物不能满足细根的呼吸需求, 便会加快细根的衰老和死亡^[29-30]。此外, 土壤温度、水分及养分等非生物因素和土壤生物、细根解剖结构等生物因素对千年桐细根寿命的影响还有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Wang Zhengquan, Guo Dali. Root ecology [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1213-1216 [王政权, 郭大立. 根系生态学 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1213-1216]
- [2] Norby R J, Jackson RB. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective [J]. New Phytologist, 2000, 147: 3-12
- [3] Pregitzer K S, Kubiske M E, Yu C K, et al. Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species [J]. Oecologia, 1997, 111: 302-308
- [4] Guo Dali, Xia Mengxue, Wei Xing, et al. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. New Phytologist, 2008, 180: 673-683
- [5] Liu Ying, Gu Jiacun, Wei Xing, et al. Variations of morphology, anatomical structure and nitrogen content among first-order roots in different positions along branch orders in tree species [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(11): 1336-1343 [刘颖, 谷加存, 卫星, 等. 树木不同着生位置 1 级根的形态、解剖结构和氮含量 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1336-1343]
- [6] Guo Dali, Mitchell RJ, Withington JM, et al. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates [J]. Journal of Ecology, 2008, 96: 737-745
- [7] Valenzuela-Estrada LR, Vera-Caraballo V, Ruth LE, et al. Root anatomy, morphology, and longevity among root orders in *Vaccinium corymbosum* [J]. American Journal of Botany, 2008, 95: 1506-1514
- [8] Chang Wenjing, Guo Dali. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1248-1257 [常文静, 郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1248-1257]
- [9] Wei Xing, Zhang Guozheng. Progress and prospect in the main research realms of tree fine roots [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(5): 143-147 [卫星, 张国珍. 树木细根主要研究领域及展望 [J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 143-147]
- [10] Wang Ruili, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa, et al. Influencing factors of fine root production and turnover in forest ecosystem [J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 19-24. [王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等. 森林细根生产和周转的影响因素 [J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 19-24]
- [11] Lin Han, Chen Hui, Wu Chengzheng, et al. Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescens* mixed foliage litter on activity of soil enzymes [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2012, 18(4): 539-545 [林晗, 陈辉, 吴承祯, 等. 千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 539-545]
- [12] Lin Han, Chen Hui, Wu Chengzheng, et al. Relationship between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and environmental factors and foliar C and N contents of *Aleurites montana* in Fujian Province [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1328-1336. [林晗, 陈辉, 吴承祯, 等. 福建千年桐种源叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与环境及叶碳氮含量的关系 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1328-1336]
- [13] Wei Ruping, Xu Li, Chen Hongyue, et al. Effects of foliage spraying with rare earth on growth and physiological index of *Vernicia montana* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 164-168 [韦如萍, 薛立, 陈红跃, 等. 叶面喷施稀土对千年桐幼苗生长和生理的影响 [J]. 林业科学, 2005, 41(2): 164-168]

- [14] Chen Jianzhong, Zhang Shuisheng. A leuities montana the renewal repairing wood species in ecological public welfare forests [J]. Sub-tropical agriculture research 2008, 4(2): 101 – 104 [陈建忠, 张水生. 生态公益林更新和补植树种——千年桐[J]. 亚热带农业研究 2008, 4(2): 101 – 104]
- [15] Hong Tao, Wu Chengzheng, Lin Yongming, et al. Biomass characteristics in the arbor layer of Aleurites montana plantation [J]. Mountain Research 2012, 30(6): 648 – 654 [洪滔, 吴承祯, 林勇明, 等. 千年桐人工林乔木层的生物量特征[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 648 – 654]
- [16] Lin Han, Chen Hui, Wu Chengzhen, et al. Provenance selection Aleurites montana based on endogenous hormone [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(11): 1937 – 1941 [林晗, 陈辉, 吴承祯, 等. 内源激素驱动下的千年桐种源优选[J]. 热带作物学报 2012, 33(11): 1937 – 1941]
- [17] Guo Dali, Mitchell RJ, Hendricks JJ. Fine root branch orders respond differentially to carbon source – sink manipulations in a longleaf pine forest [J]. Oecologia, 2004, 140: 450 – 457
- [18] Pregitzer KS, De Forest JL, Burton AJ, et al. Fine root architecture of nine North American trees [J]. Ecological Monographs, 2002, 72: 293 – 309
- [19] Huang Jingjing, Jing Jialin, Cao dechang, et al. Cloning root system distribution and architecture of different forest age Populus euphratica [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4331 – 4342 [黄晶晶, 井家林, 曹德昌, 等. 不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型[J]. 生态学报 2013, 33(14): 4331 – 4342]
- [20] Liu Jia, Xiang Wenhua, Xu Xiao, et al. Analysis of architecture and functions of fine roots of five subtropical tree species in Huitong, Hunan Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology 2010, 34(8): 938 – 945 [刘佳, 项文化, 徐晓, 等. 湖南会同 5 个亚热带树种的细根构型及功能特征分析[J]. 植物生态学报 2010, 34(8): 938 – 945]
- [21] Xu Yang, Gu Jiacun, Dong Xueyun, et al. Fine root morphology, anatomy and tissue nitrogen and Carbon contents of the first five orders in four tropical hardwood species in Hainan Island, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(9): 955 – 964 [许阳, 谷加存, 董雪云, 等. 海南岛 4 个热带阔叶树种前 5 级细根的形态、解剖结构和组织碳氮含量[J]. 植物生态学报, 2011, 35(9): 955 – 964]
- [22] Liu Lina, Xu Chengyang, Duan Yonghong, et al. Root morphology of three greening conifer species in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University 2008, 30(1): 34 – 39 [刘丽娜, 徐程扬, 段永宏, 等. 北京市 3 种针叶绿化树种根系结构分析[J]. 北京林业大学学报 2008, 34(1): 34 – 39]
- [23] Xiong Decheng, Huang Jinxue, Yang Zhijie, et al. Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species [J]. Acta Ecologica Sinica, 32(6): 1888 – 1897 [熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 等. 亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征[J]. 生态学报 2012, 32(6): 1888 – 1897]
- [24] Cheng Yunhuan, Han Youzhi, Wang Qingcheng, 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 Phytocologica Sinica, 2005, 29(3): 403 – 410 [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): 303 – 310]
- [25] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology [J]. Science, 1997, 276(5309): 122 – 126
- [26] Zhengquan Wang, Dali Guo, Xiangrong Wang, et al. Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species [J]. Plant Soil, 2006, 288: 155 – 171
- [27] Wang Zuhua, Li Ruixia, Guan Qingwei. Effects of thinning on fine-root morphology, biomass and N concentration of different branch order of Chinese fir [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1487 – 1493 [王祖华, 李瑞霞, 关庆伟. 间伐对杉木不同根序细根形态、生物量和氮含量的影响[J]. 应用生态学报 2013, 24(6): 1487 – 1493]
- [28] Withington JM, Reich PB, Oleksyn J, Eissenstat DM. Comparisons of structure and life span in roots and leaves among temperate trees [J]. Ecological Monographs, 2006, 76: 381 – 398
- [29] Jia Shuxia, Zhao Yanli, Ding Guoquan, et al. Relationship among fine root morphology, anatomy, tissue nitrogen concentration and respiration in different branch root orders in Larix gmelinii and Fraxinus mandshurica [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(2): 174 – 181 [贾淑霞, 赵妍丽, 丁国泉, 等. 落叶松和水曲柳不同根序细根形态结构、组织氮浓度与根呼吸的关系[J]. 植物学报 2010, 45(2): 174 – 181]
- [30] Mei Li, Wang Zhengquan, Cheng Yunhuan, et al. A review: factors influencing fine root longevity in forest ecosystems [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(5): 704 – 710 [梅莉, 王政权, 程云环, 等. 林木细根寿命及其影响因子研究进展[J]. 植物生态学报 2004, 28(5): 704 – 710]

Fine Root Characteristics and Relationship among Morphology , Biomass and Tissue N and C Contents of *Aleurites montana* Plantation

CHAO Lin¹ , LIN Han^{1 2} , WU Chengzhen^{1 2 3} , LIU Yanyan¹ , JIA Lanxia¹ , HONG Tao^{1 2} ,
XIE Anqiang^{1 2} , CHEN Jianzhong⁴ , HONG Wei^{1 2}

(1. College of Forestry , Fujian Agriculture and Forestry University , Fuzhou 350002 , China;

2. Key Laboratory of Fujian Forest Ecological System Process and Management , Fuzhou 350002 , China;

3. College of Ecology Resources Engineering , Wuyi University , Wuyishan 354300 , China;

4. Forestry Bureau of Jianyang City , Jiangyang , Fujian 354200 , China)

Abstract: Taking *Aleurites montana* plantation as the object , measured root morphology , biomass , carbon and nitrogen concentration of the first five orders roots. Analyzed differences between different diameter , root orders and morphological parameter , relationships of fine root biomass , C and N concentration with fine root orders by means of regression were discussed. The results showed that the root tips , accumulative root length and surface area of root $d \leq 1\text{ mm}$ accounted for the majority of total roots , accounting for the total respectively as 99.66% , 88.42% , 69.82% ; Along with the fine root ascending from the first to fifth order , root diameter increased from 0.86 mm to 1.35 mm , tissue density rose from 0.11 g/cm^3 to 0.47 g/cm^3 , root surface area density decreased from $0.46\text{ m}^2/\text{m}^3$ to $0.085\text{ m}^2/\text{m}^3$, specific root length reduced from 32.04 m/g to 16.41 m/g ; Fine root diameter , specific root length , surface area density , tissue density , biomass with root order can be represented by quadratic , exponential , linear , cubic or Gaussian peak functions ; From the first to fifth fine root order contribution to the total biomass respectively as 18.7% , 30.9% , 27.1% , 16.6% , 6.7% ; Fine root tissue N concentration reduced from 16.73 mg/g to 11.83 mg/g , C concentration increased from 454.97 mg/g to 494.43 mg/g with ascending fine root order ; Moreover , C/N ratio in roots was mainly affected by tissue N rather than tissue C concentrations , the former affected reached 93% , the later only reached 50% ; These results suggested that there are systematic differences in fine root morphology and structure , biomass , and tissue carbon and nitrogen contents among different root orders , this provides an important basis for understanding fine root architecture and function of *Aleurites montana*.

Key words: *Aleurites montana*; fine root; fine root characteristics; fine roots tissue carbon and nitrogen contents