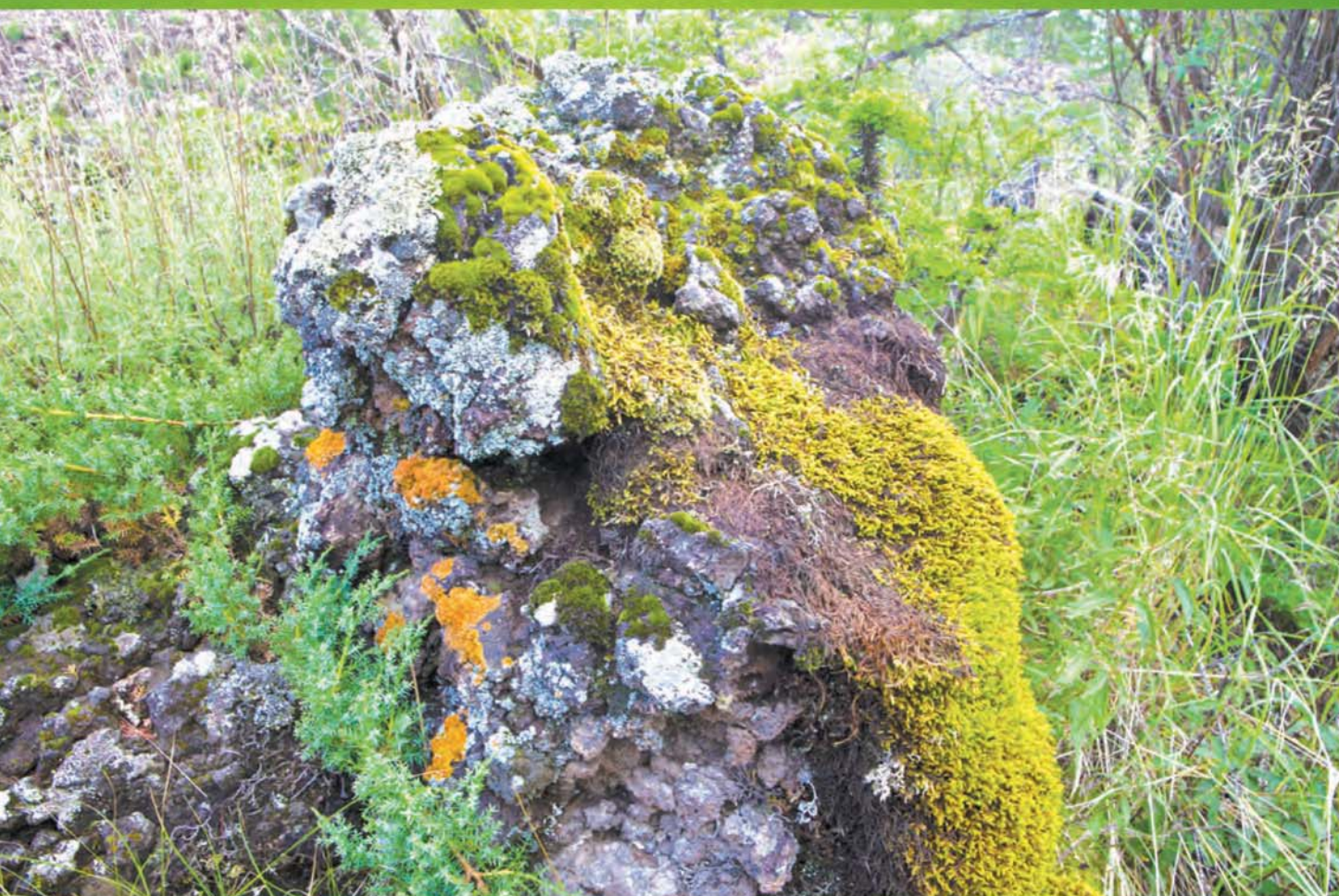


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

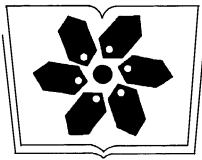
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 6 期

2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例.....	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价.....	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用.....	杞金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系.....	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究.....	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征.....	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学特性.....	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析.....	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响.....	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择.....	赵宪南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象.....	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响.....	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响.....	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用.....	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.....	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析.....	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分部分布特征.....	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素.....	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素.....	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图.....	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征.....	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响.....	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划.....	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现.....	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析.....	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定.....	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响.....	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究.....	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素.....	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究.....	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析.....	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述.....	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响.....	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 34 * 2012-03	

封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103040263

熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 卢正立, 陈光水, 杨玉盛. 亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征. 生态学报, 2012, 32(6): 1888-1897.

Xiong D C, Huang J X, Yang Z J. Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1888-1897.

亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征

熊德成^{1,2}, 黄锦学^{1,2}, 杨智杰^{1,2}, 卢正立^{1,2}, 陈光水^{1,2,*}, 杨玉盛^{1,2}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

摘要:以福建省建瓯市万木林自然保护区内占优势的 6 种天然林树种(沉水樟 *Cinnamomum micranthum*, CIM; 观光木 *Tsoongiodendron odorum* Chun, TOC; 浙江桂 *Cinnamomum chekiangense*, CIC; 罗浮栲 *Castanopsis fabri*, CAF; 细柄阿丁枫 *Altingia gracilipes*, ALG; 米槠 *Castanopsis carlesii*, CAC)为研究对象,对其 1—5 级细根的结构,形态特征及生物量进行了分析。结果表明:沉水樟,细柄阿丁枫和米槠细根分支比表现出在 1, 2 级(4 倍以上)明显大于其它序级(3 倍左右);其余 3 种树种则是在 3, 4 级的细根分支比最大,其中浙江桂达到 8.65 倍,其它序级则大致为 3 倍左右。6 种树种 1, 2 级细根数量占到总数的 70%—90%。6 种树种细根直径,根长,组织密度随序级升高逐渐增大,比根长减小,生物量未表现出一致的变化规律,6 种树种生物量主要集中在高级根部分。方差分析表明,树种对细根分支比例有显著影响($P<0.05$),浙江桂和米槠细根分支水平对分支比例有极显著影响($P<0.01$),其余 4 种树种分支水平对分支比例有显著影响($P<0.05$),树种和分支水平的交互作用对 6 种树种细根分支比均有极显著的影响($P<0.01$);树种对细根根长,直径以及生物量均有极显著影响($P<0.01$),对比根长有显著影响($P<0.05$),而对组织密度的影响则不显著($P>0.05$);树种和序级的交互作用对细根根长,直径以及生物量均有极显著影响($P<0.01$),对组织密度有显著影响($P<0.05$),对比根长影响不显著($P>0.05$)。序级对 6 种树种细根根长,直径,比根长以及生物量的影响并未达到一致,对 6 种树种细根组织密度有极显著影响($P<0.01$)。树种间 1—4 级根的比根长变异主要由组织密度引起,而 5 级根的比根长变异则由直径引起,同时在 1 级根中组织密度与直径呈现出权衡的关系。6 种树种细根数量,直径,根长,比根长,组织密度以及生物量与序级之间回归分析发现它们与序级之间具有指数函数,线性函数,二次函数,三次函数或者幂函数关系。

关键词:亚热带;细根;序级;细根结构;细根形态;生物量

Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species

XIONG Decheng^{1,2}, HUANG Jinxue^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2}, LU Zhengli^{1,2}, CHEN Guangshui^{1,2,*}, YANG Yusheng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

2 Institute of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Fine roots play an important role in the function of individual plants. Recent studies indicated large heterogeneity in architecture, morphology, anatomy, physiology, and longevity within the fine root pool which can be systematically described by branching order. To date, while it is remarkable how little we know about the architecture and morphology in fine roots of subtropical evergreen broad-leaf forest. So in this study intact fine root segments of six dominant tree species (*Cinnamomum micranthum*, CIM; *Tsoongiodendron odorum* Chun, TOC; *Cinnamomum chekiangense*, CIC; *Castanopsis fabri*, CAF; *Altingia gracilipes*, ALG; and *Castanopsis carlesii*, CAC) were collected by excavation in an evergreen broadleaved forest located at the Wanmulin Nature Reserve, Jian'ou, Fujian province. Individual roots were dissected

基金项目:国家自然科学基金项目(30972347);福建省自然科学基金项目(2008J0124)

收稿日期:2011-03-04; **修订日期:**2011-05-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gshuichen@163.com

according to the branching order, starting from the distal end of the root system that was numbered as the first order and then increasing sequentially with each branch from the first order to fifth order roots. Then, fine root samples were scanned by the Espo scanner, used Win-RHIZO system to analyze root architecture and morphology. We attempted to address the following questions: (1) the effect of root order and tree species on fine root architecture and morphology; and (2) the relationship between specific root length, tissue density and diameter across root order and tree species. The result showed that: for CIM, ALG and CAC, the branching ratios (Rb) was higher between the first two root orders (over 4) than between the other orders (about 3); while for TOC, CIC and CAF, Rb were higher between the third and forth orders than between the other orders (about 3), with the highest Rb value of 8.65 between the third and forth orders of CIC. For all species, 70% to 90% of total root number comprised the first two orders. Root diameter, length, and tissue density increased and specific root length (SRL) decreased with increase in order for all species. Though there was no consistent changed with root order, root biomass was mainly concentrated in the higher root orders. The ANOVA demonstrated that both tree species ($P < 0.05$ for all cases) and tree species $\times$ branching level ($P < 0.01$ for all cases) had significant effect on Rb . The branching level had significant effect on Rb for CIC and CAC ($P < 0.01$) and for the other four species ($P < 0.05$). Tree species had significant effect on root length, diameter, biomass ($P < 0.01$) and SRL ($P < 0.05$), but had no significant effect on tissue density ($P > 0.05$). The tree species $\times$ root order interaction had significant effect on root length, diameter, biomass ($P < 0.01$) and tissue density ($P < 0.05$), but had no significant effect on SRL ($P < 0.01$). Though root order had no consistent effect on root length, diameter, SRL and biomass, it had significant effect on tissue density for all species ($P < 0.01$). The variations in SRL of the first to the forth orders among species were mainly caused by tissue density, while those of the fifth order caused by root diameter. A trade-off between root diameter and tissue density occurred in the first order. For individual species, changes in root number, diameter, length, SRL, tissue density and biomass with root order can be represented by exponential, linear, quadratic, cubic or power functions.

Key Words: subtropical; fine root; root order; fine root architecture; fine root morphology; biomass

林木细根是陆地碳循环的重要部分,其占有年初级净生产力的大部分^[1],也是植物吸收水分和养分的主要途径^[2]。据估计,森林生态系统中地下部分(主要是细根)的年净初级生产力要大于地上部分,而且研究表明,虽然细根占林木根系总生物量的比例不足 30%,但由于细根周转迅速,每年通过枯死细根向土壤归还碳、养分和能量甚至超过地上部分枯落物^[1,3]。大多数研究都把直径 < 2 mm 根作为同一个单元进行研究,而相关的研究表明这部分的根在形态和功能上都有大量的变化^[4-5]。依据 Fitter 根系发育顺序,采用根序则能较好的预测细根结构与功能的关系^[6]。相关的研究也表明细根系统包含有许多独立的根系,这些根系在形态和功能上具有差异性,而细根形态特征更是直接与功能特征相关^[7-8]。根的分支或分支比是一个重要的结构参数,分支比不但控制所有的根结构,而且能指示分支密度以及在不同序级间分支的分割^[9]。根长是根系生长发育的重要特征之一,植物根系的总长度在获取养分和水分的功能上是很重要的^[10]。根的组织密度被认为是反应根功能情况的一个特征,因为其和根的生理活动紧密相连^[11]。细根比根长表示单位生物量上的细根长度,是细根形态特征中最常用的形态参数,并作为环境变化的指示器进行研究^[12],并且比根长可能是评估细根呼吸的一个关键形态参数,对研究细根呼吸具有很好的参考价值^[13],对土壤的探究也具有重要的指示作用^[14]。细根系统中关于不同序级的结构和形态的异质性还缺乏定量的信息^[15],而大多数生物量的研究主要集中在对土壤垂直分层细根总生物量的研究,对细根不同序级生物量的研究尚不多见,完整的根系需要从土壤中分离出来所以要估计不同序级的生物量更是很困难。

我国亚热带森林带无论在森林结构还是森林生态系统过程等方面都有别于其它森林类型的独特性质,其典型的植被主要为常绿阔叶林,而目前对亚热带常绿阔叶林不同树种间细根不同序级的根结构,形态特征以及影响因素方面的研究还比较少。为此,本研究在福建万木林自然保护区选取 6 片天然林群落采集完整根系

样品,并进行分级测定树种细根结构和形态的相关参数,主要是细根数量,分支比,直径,根长,组织密度,比根长以及生物量,并重点研究树种,序级及其交互作用对这些指标的影响,以期为研究亚热带细根结构,形态特征及生物量的变异规律提供参考数据,为根系序级分类提供一定的理论依据。

1 试验地概况

研究地万木林自然保护区位于福建省北部建瓯市房道镇境内,处于武夷山东南侧,地理位置在 27°03'N, 118°09'E,最高峰海拔 556 m,相对高差 322 m,面积 189 hm²。区域气候属东亚的亚热带湿润季风气候,年平均温度 18.7 ℃,年均降雨量 1663.8 cm,年蒸发量 1466 mm,相对湿度 81%,无霜期长达 277 d。地貌为典型的东南低山丘陵地貌,区域地带性土壤为红壤和黄壤,区内植被为典型的中亚热带常绿阔叶林,以喜暖的樟科 (*Lauraceae*)、木兰科 (*Magnoliaceae*)、壳斗科 (*Fagaceae*)、杜英科 (*Elaeocarpaceae*)、山茶科 (*Theaceae*)、冬青科 (*Aquifoliaceae*)、山矾科 (*Symplocaceae*) 和金缕梅科 (*Hamamelidaceae*) 等为主,区中的优势种主要有米槠 (*Castanopsis carlesii*)、罗浮栲 (*Castanopsis fabri*)、浙江桂 (*Cinnamomum chekiangense*)、细柄阿丁枫 (*Altingia gracilipes*) 等。

2 研究方法

2.1 根系采样与处理

细根样品取自 6 片天然林群落,分别是沉水樟,观光木,浙江桂,罗浮栲,细柄阿丁枫和米槠群落,树种采样集中在 2010 年 7 月份,采样时每种树种选取胸径大小相近的 3 棵成年树,根据 Guo 等^[15]的完整土块法在每棵树树干基部 1—1.5 m 范围用铁铲挖取 1 个 20 cm×20 cm×20 cm 大小的土块,将包含在里面的所有根段全部取出,并放置在湿纱布中以保持其活性,并立即带回实验室,用低温去离子水分别清理掉根表面上的土壤和杂质,装进贴有标签的自封袋中并装入自制的冷藏箱内以保持其活性。根据 Pregitzer 等^[8]的分级方法,每个土块选取 1 个完整根系分成 5 级,最远端的根尖定为 1 级根,两 1 级根交汇处为 2 级根,依次类推到 5 级根,然后计算出 3 个完整根系各级细根的数量,进而推算出各分支水平分支比例,分支比例=高级根数量/低级根数量。其余剩下的所有根系根据同样的方法进行分级处理,不同等级的根经处理后分别装入已标记好的玻璃皿中,并放入冷藏箱保存。

2.2 根系样品的指标测定

待细根的前期处理好之后,对细根的相关形态指标进行测定。主要是用数字化扫描仪 Espon scanner 对分级处理好的根系分别进行扫描(各序级均进行 3 次重复实验),扫描完成后运用 Win RHIZO(Pro 2005b)根系图像分析软件对扫描后的细根图像进行形态指标的分析,各级细根扫描后的数量,直径以及体积通过图片分析可以直接获得,扫描完成后称量所有根系各个级别的湿重并记录,然后将所有样品分别放入 65 ℃ 的烘箱 48h 烘至恒重,以计算出各个序级的干重。然后进一步得到根长,组织密度,比根长以及生物量数据,计算公式为:根长=总长度/细根数量;组织密度(g/cm³)=干重(g)/体积(cm³);比根长=根长(m)/干重(g);生物量(kg/m³)=各土块各序级总干重(kg)/各土块体积(m³)。

2.3 数据分析

利用 SPSS13.0 软件采用单因素方差分析方法和双因素方差分析方法分别对树种,序级和分支水平以及树种和序级,分支水平的交互作用对 6 种树种细根相关结构和形态指标以及生物量的影响进行分析;采用相关性分析分析 6 种树种同一序级及总的序级比根长与组织密度,比根长与直径平方,组织密度与直径平方之间的关系;采用回归分析方法分析 6 种树种细根数量,直径,根长,比根长,组织密度及生物量与序级之间的关系。相关图表用 Excel 完成。

3 研究结果

3.1 6 种树种细根分支结构特征

通过对 6 种树种细根不同序级分支结构的研究发现:沉水樟,细柄阿丁枫和米槠细根分支比均表现出 1、2 级之间的比例在各分支水平中最大,均在 4 倍以上,其它大致在 3 倍左右变化,其余 3 种树种则是 3、4 级之

间比例最大,其中浙江桂达到 8.65 倍,其它比例也大致集中在 3 倍;就分支比例均值而言除浙江桂最高达到 4.48 倍外,其余 5 种树种平均值比较接近,均在 3 倍左右(表 1)。通常分支比例决定着不同序级独立根的数量,通过对 6 种树种完整根系研究发现,各序级根数占总数量的比例均是 1 级根部分所占比例最大,大致在 60%—80% 之间,其次是 2 级根,比例在 10%—20% 之间。方差分析发现,树种对细根分支比例有显著影响 ($P<0.05$),细根分支水平对浙江桂和米楮分支比有极显著影响 ($P<0.01$),对其余 4 种有显著影响 ($P<0.05$),树种与分支水平的交互作用对 6 种树种细根分支比均有极显著影响 ($P<0.01$) (表 2)。回归分析发现 6 种树种各级细根数量与序级之间均呈现出指数关系(表 3)。

表 1 6 种树种细根各分支水平分支比例及平均值

Table 1 The branching ratio and the mean branching ratio of each level of branching for the six tree species

树种 Tree species	分支水平 Level of branching				平均值 Average
	1—2	2—3	3—4	4—5	
沉水樟 CIM	5.60±0.61a	2.75±0.19b	4.32±0.46ab	2.92±0.60b	3.90±0.82
观光木 TOC	1.77±0.37a	3.19±0.53b	4.11±0.54b	2.05±0.16ab	2.78±0.68
浙江桂 CIC	3.03±0.37a	3.74±0.43a	8.65±0.70b	2.49±1.16a	4.48±1.77
罗浮栲 CAF	2.17±0.17a	1.71±0.29a	3.78±0.75ab	3.50±0.24a	2.79±0.63
细柄阿丁枫 ALG	4.67±0.32a	3.57±0.66a	2.23±0.25ab	2.83±0.35ab	3.33±0.71
米楮 CAC	4.88±0.21a	3.03±0.24b	2.31±0.16bc	3.05±0.18b	3.32±0.77

小写字母表示各个树种细根各分支水平分支比例横向比较

表 2 树种,序级,分支水平及树种与序级,分支水平的交互作用对细根结构和形态的影响

Table 2 The effect of tree species, root order, the level of branching and the interaction between tree species with root order, the level of branching on the fine root architecture and morphology

P 变异来源 Source of variation		df	分支比例 Branching ratio	根长 Length	直径 Diameter	比根长 SRL	组织密度 Tissue density	生物量 Biomass
沉水樟 CIM	树种	5	0.046	<0.0001	0.001	0.014	0.062	<0.0001
	树种×序级	20	—	<0.0001	0.005	0.358	0.045	0.001
	树种×分支水平	15	<0.0001	—	—	—	—	—
	序级	4	—	0.129	0.006	0.0001	0.002	0.010
	分支水平	3	0.011	—	—	—	—	—
观光木 TOC	序级	4	—	0.011	0.021	0.0001	0.003	0.434
	分支水平	3	0.017	—	—	—	—	—
浙江桂 CIC	序级	4	—	0.110	0.056	0.0001	0.003	0.368
	分支水平	3	0.001	—	—	—	—	—
罗浮栲 CAF	序级	4	—	0.0001	0.018	0.039	0.008	0.006
	分支水平	3	0.044	—	—	—	—	—
细柄阿丁枫 ALG	序级	4	—	0.0001	0.202	0.0001	0.002	0.020
	分支水平	3	0.019	—	—	—	—	—
米楮 CAC	序级	4	—	0.0001	0.002	0.001	0.001	0.003
	分支水平	3	<0.0001	—	—	—	—	—

3.2 6 种树种细根形态特征

3.2.1 6 种树种细根直径,根长,比根长,组织密度特征

研究发现随着序级的升高细根直径,根长和组织密度均升高,而比根长则降低(图 1)。沉水樟细根直径的变化从 0.50—0.70 mm,观光木从 0.51—0.98 mm,浙江桂从 0.50—0.94 mm,罗浮栲从 0.36—0.95 mm,细柄阿丁枫从 0.45—0.98 mm,米楮从 0.37—1.08 mm,其中只有米楮的 5 级根直径超过 1 mm(图 1);细根直径随序级的升高呈有系统的变化,其中观光木,浙江桂,罗浮栲可用指数函数表征,细柄阿丁枫和米楮可用三次函数表征,沉水樟可用幂函数进行表征(表 3)。细根根长的变化沉水樟从 0.88—46.01 cm,观光木从

表3 细根数量,直径,根长,比根长,组织密度及生物量与序级之间的回归关系($n=15$)

Table 3 Relationships of fine root number, diameter, length, specific root length, tissue density, biomass with branch order by means of regression for the six tree species. Y is fine root number, diameter, length, specific root length, tissue density, biomass respectively and x is root order ($n=15$)

树种 Tree species	指标 Index	回归模型 Regression model	R^2	P
沉水樟 CIM	细根数量	$Y=547.533 \exp^{-1.083x}$	0.981	<0.0001
	直径/mm	$Y=0.501 x^{0.136}$	0.525	0.005
	根长/cm	$Y=0.804 x^{2.392}$	0.945	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=41.499-21.240x+3.964x^2-0.262x^3$	0.978	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.102 \exp^{0.0602x}$	0.886	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=0.034 x^{0.848}$	0.620	<0.0001
观光木 TOC	细根数量	$Y=629.131 \exp^{-1.223x}$	0.941	<0.0001
	直径/mm	$Y=0.415 \exp^{0.134x}$	0.635	0.001
	根长/cm	$Y=-13.692+23.794x-11.116 x^2+1.825x^3$	0.935	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=41.265-21.290x+4.869x^2-0.442x^3$	0.976	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.130 \exp^{0.410x}$	0.838	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=0.029 x^{0.875}$	0.348	0.021
浙江桂 CIC	细根数量	$Y=936.984 \exp^{-1.360x}$	0.965	<0.0001
	直径/mm	$Y=0.435 \exp^{0.155x}$	0.659	0.001
	根长/cm	$Y=0.315 \exp^{1.109x}$	0.946	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=33.406-10.023x-0.380x^2+0.217x^3$	0.967	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.095 \exp^{0.597x}$	0.925	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=-0.002+0.025x$	0.316	0.029
罗浮栲 CAF	细根数量	$Y=260.161 \exp^{-0.830x}$	0.890	<0.0001
	直径/mm	$Y=0.321 \exp^{0.221x}$	0.873	<0.0001
	根长/cm	$Y=0.378 \exp^{1.026x}$	0.936	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=47.087 \exp^{-0.850x}$	0.920	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.335 x^{1.040}$	0.725	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=0.009 x^{2.550}$	0.798	<0.0001
细柄阿丁枫	细根数量	$Y=197.188 \exp^{-0.954x}$	0.944	<0.0001
ALG	直径/mm	$Y=0.143+0.395x-0.098 x^2+0.011 x^3$	0.915	<0.0001
	根长/cm	$Y=2.065x^{1.516}$	0.681	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=13.935 x^{-1.667}$	0.942	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.393 \exp^{0.289x}$	0.776	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=0.025 x^{1.956}$	0.878	<0.0001
米槎 CAC	细根数量	$Y=310.551 \exp^{-1.093x}$	0.933	<0.0001
	直径/mm	$Y=-0.139+0.705x-0.229 x^2+0.027x^3$	0.981	<0.0001
	根长/cm	$Y=0.756x^{1.849}$	0.877	<0.0001
	比根长/(m/g)	$Y=59.058 \exp^{-0.869x}$	0.941	<0.0001
	组织密度/(g/cm ³)	$Y=0.694-0.447x+0.181 x^2-0.011x^3$	0.810	<0.0001
	生物量/(kg/m ³)	$Y=0.041 x^{1.763}$	0.755	<0.0001

1.06—55.86cm, 浙江桂从0.85—54.05 cm, 罗浮栲从0.94—45.28 cm, 细柄阿丁枫从1.55—35.44 cm, 米槎从0.74—14.55 cm(图1); 根长随序级的升高也具有系统性, 沉水樟, 细柄阿丁枫和米槎可用幂函数函数表征, 浙江桂和罗浮栲可用指数函数表征, 而观光木可用三次函数表征(表3)。6种树种细根比根长随序级的降低沉水樟从24.16—1.97 m/g, 观光木从24.38—1.26 m/g, 浙江桂从23.10—0.82 m/g, 罗浮栲从31.86—0.88 m/g, 细柄阿丁枫从13.12—0.89 m/g, 米槎从26.02—0.72 m/g, 罗浮栲降幅最大(图1); 其中细根比根

长随序级的变化沉水樟,观光木,浙江桂可用三次函数表征,罗浮栲和米槠则可用指数函数表征,细柄阿丁枫可用幂函数表征(表 3)。6 种树种细根组织密度沉水樟变化于 $0.208\text{--}1.801\text{ g/cm}^3$,观光木变化于 $0.208\text{--}1.184\text{ g/cm}^3$,浙江桂从 $0.220\text{--}2.170\text{ g/cm}^3$,罗浮栲从 $0.450\text{--}1.687\text{ g/cm}^3$,细柄阿丁枫从 $0.537\text{--}1.159\text{ g/cm}^3$,米槠则从 $0.416\text{--}1.609\text{ g/cm}^3$,其中浙江桂变化幅度最大,沉水樟和观光木 1 级根组织密度大致相同(图 1);组织密度随序级的变化沉水樟,观光木,浙江桂,细柄阿丁枫,米槠可用指数函数进行表征,罗浮栲可用幂函数表征(表 3)。

方差分析表明:树种对细根根长,直径有极显著影响($P<0.01$),对比根长有显著影响($P<0.05$),对组织密度的影响则不显著($P>0.05$);树种和序级的交互作用对细根根长,直径有极显著影响($P<0.01$),对组织密度有显著影响($P<0.05$),而对比根长影响不显著($P>0.05$);序级对沉水樟和浙江桂细根根长的影响不显著($P>0.05$),对罗浮栲,细柄阿丁枫和米槠有极显著影响($P<0.01$),对观光木有显著影响($P<0.05$),序级对沉水樟和米槠细根直径有极显著的影响($P<0.01$),对观光木和罗浮栲有显著影响($P<0.05$),而对浙江桂和细柄阿丁枫影响不显著($P>0.05$),序级对罗浮栲细根比根长有显著影响($P<0.05$),对其余 5 种均有极显著影响($P<0.01$),序级对 6 种树种细根组织密度均有极显著影响($P<0.01$)(表 2)。

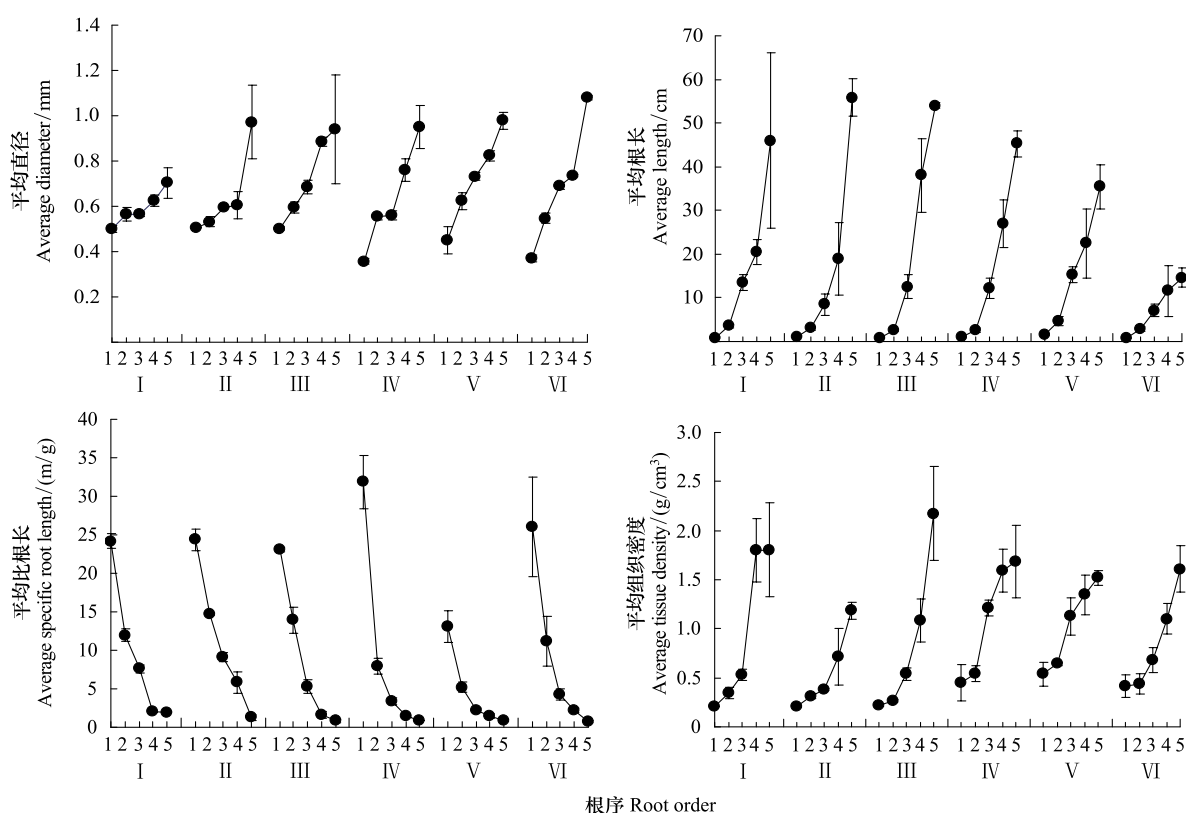


图 1 6 种树种 1—5 级根平均直径,平均根长,平均比根长,平均组织密度

Fig. 1 Average diameter, length, specific root length, tissue density of the first five root branch orders for the six tree species

I. 沉水樟; II. 观光木; III. 浙江桂; IV. 罗浮栲; V. 细柄阿丁枫; VI. 米槠

3.2.2 组织密度与直径对树种间比根长变异的影响

根直径和组织密度是比根长的两个组成参数,可能对不同的环境条件做出不同的反应,可以较好地解释比根长变化的机理。通过树种间不同序级比根长与根直径平方、组织密度的相关分析表明:1—4 级细根的比根长与组织密度呈显著或极显著负相关($P<0.05$; $P<0.01$),且相关系数均高于比根长与直径平方的关系;而 5 级细根的比根长则与直径平方呈显著负相关($P<0.05$),与组织密度相关性不显著($P>0.05$)(表 4)。这表明:树种间较低级细根比根长的变异主要由组织密度引起,而最高级细根的比根长的变异则主要由直径

引起。同时,相关分析表明:树种间 2—5 级细根的组织密度与直径平方的相关性不显著 ($P>0.05$),但 1 级根的组织密度与直径平方则呈显著的负相关 ($P<0.05$) (表 4),表明在最低级根中组织密度与直径呈现出一种权衡关系。

表 4 6 种树种同一序级及总的序级细根比根长,组织密度,直径平方之间的相关分析

Table 4 The relationship between specific root length, tissue density and the square of diameter in the same root order and within root order of the six tree species

根级序 Root order	比根长×组织密度 SRL × Tissue density	比根长×直径平方 SRL × Square of diameter	组织密度×直径平方 Tissue density × Square of diameter
1	-0.859* (0.016)	-0.242 (0.366)	-0.586* (0.017)
2	-0.901** (<0.0001)	-0.432 (0.073)	0.090 (0.721)
3	-0.834** (<0.0001)	-0.556* (0.017)	0.149 (0.555)
4	-0.662** (0.007)	-0.446 (0.080)	-0.133 (0.636)
5	-0.027 (0.926)	-0.795** (0.001)	-0.495 (0.072)
总序级 Root order of the total	-0.676** (<0.0001)	-0.593** (<0.0001)	0.543** (<0.0001)

括号内数字为 P 值; * 表示相关性达到显著水平 ($P<0.05$); ** 表示相关性达到极显著水平 ($P<0.01$)

3.3 6 种树种细根生物量特征

本实验对 6 种树种不同根序生物量的测定发现:6 种树种细根生物量随序级变化规律并不一致,只有浙江桂随着序级的升高生物量增加,沉水樟和罗浮栲前 4 级根生物量均升高,而到 5 级则下降,观光木,细柄阿丁枫和米槠前 3 级根生物量升高,而后开始下降,但差异均不显著,6 种树种生物量的共同点为 1 级根最小,最大值都在 4 级或 5 级根,只有米槠出现在 3 级 (图 2)。5 个序级细根总生物量米槠最高 (1.764 ± 0.328) kg/m^3 ,阿丁枫其次,为 (1.351 ± 0.237) kg/m^3 ,浙江桂最小,只有 (0.371 ± 0.118) kg/m^3 ,其它依次为罗浮栲>观光木>沉水樟,最大值是最小值的 4.76 倍。各树种 1—5 级细根生物量对总生物量的贡献分别为:沉水樟 7.6%, 12.5%, 28.9%, 29.1%, 21.9%; 观光木 6.0%, 17.0%, 24.8%, 23.1%, 29.1%; 浙江桂 6.7%, 11.9%, 22.4%, 24.8%, 34.2%; 罗浮栲 1.1%, 4.2%, 26.4%, 38%, 30.3%; 细柄阿丁枫 1.6%, 7.3%, 27.9%, 23.8%, 39.4%; 米槠 2.1%, 8.3%, 34.3%, 31.9%, 23.4%, 因此可以看出这 6 种树种对细根总生物量的贡献主要集中在高级根,低级根贡献较小。

方差分析发现:树种及与根序的交互作用对细根生物量有极显著的影响 ($P<0.01$),通过序级对每种树种细根生物量影响的方差分析,发现序级对沉水樟,罗浮栲,米槠细根生物量有极显著影响 ($P<0.01$),对细柄阿丁枫细根生物量有显著影响 ($P<0.05$),对观光木和浙江桂细根生物量的影响并不显著 ($P>0.05$) (表 2)。回归分析表明:除浙江桂细根生物量与序级之间可用线性函数表征外其余 5 种均可用幂函数表征 (表 3)。

4 讨论

4.1 6 种树种细根结构的比较

植物相对生长理论^[16-17]假设整个根系统中分支比例是固定的,Fitter 等^[18]先前的相关研究也发现禾本和草本植物根系统的分支比例是固定的,而 Fahey 等^[19]对美国北方阔叶林树种的研究发现分支比例的变化范围为 2.6—5.1,Wang 等^[19]对水曲柳和落叶松的研究发现 5 级到 2 级根的分支比例相对比较接近,在 3 倍左

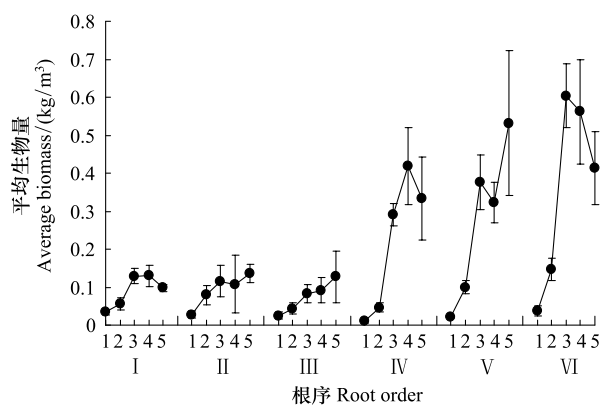


图 2 6 种树种 1—5 级根平均生物量

Fig. 2 Average biomass of the first five root branch orders for the six tree species

I, 沉水樟; II, 观光木; III, 浙江桂; IV, 罗浮栲; V, 细柄阿丁枫; VI, 米槠

右变化,1、2 级之间则较大,均超过 10 倍,其对 Pregitzer 等^[8]在北美 9 种树种中分支比例的计算发现 1、2 级之间的比例小于 6 倍。本研究结果与上述研究基本一致,这也表明植物相对生长理论的假设并不是对各个树种各个分支水平都适合。尤其是低级根部分可能受到根际生物体的强烈影响,相关研究还得出可能是由于它们与菌根紧密相连具有独特的解剖特点^[20]。通过树种,分支水平及其交互作用对分支比的方差分析可以看出树种,分支水平对分析细根分支比例具有重要的作用,而树种与分支水平的交互作用对其的影响更为明显。Wang 等^[9]研究指出季节和土壤深度也会对细根分支比例造成影响。本研究中 1、2 级根在细根总数量上占据了绝对优势,Pregitzer 等^[8],Guo 等^[15]的研究结果也具有相同特征。而低级根表现出的根系数量上的绝对优势,这与它们本身的结构和功能都有一定的关系,这也保证了它们能够充分的吸收水分和养分并且传输到其它部分,因此在研究细根的时候可以将低级根作为一个独立的单元进行研究。根系数量和序级之间的指数关系特征也为研究树种不同序级细根数量的变化提供了借鉴。

4.2 6 种树种细根形态的比较

细根不是一个均质的周转很快的系统,而是由形态、寿命、生理上差异巨大的不同个体组成的高度异质的混合体^[21],研究细根形态的异质性是认识细根动态,了解细根功能和准确估计细根寿命的前提^[22-23]。本研究根据 Fitter 等^[6]分级结构方法,对亚热带 6 种树种研究发现细根的形态异质性比较复杂,6 种树种均表现出 1 级根直径,根长和组织密度最小,比根长最大,5 级根直径,根长和组织密度最大,比根长最小。相关的研究也有相同的结果,例如 Pregitzer 等^[8]对北美 9 个针叶和阔叶树种前 3 级根构型的研究,Guo 等^[15]对美国长叶松细根直径,根长和比根长的研究,师伟等^[24]对我国东北帽儿山天然次生林 20 种阔叶树种前 5 级细根形态的研究,刘佳等^[25]对湖南会同 5 个亚热带树种细根直径,比根长的研究,此外 Huang 等^[26]对我国东北科尔沁沙地 3 种矮灌木树种细根直径,根长,比根长的研究也得出相同的结论。一般情况下,较低的根序尤其是根尖,通常直径都小于 0.3 mm,根长会小于 2 mm^[8]。本研究中的 6 种树种 1 级根直径都要大于 0.3 mm,根长都显著大于 2 mm,这可能与本研究中的树种有关。而高级根直径较低级根大这对碳储存具有重要作用。Pregitzer 等^[8]认为 1 级根和 2 级根的平均根径和平均根长相似,而 2 级根之后平均根径和根长随着根序等级的增加而显著增大。本研究中细根平均直径部分树种在 1、2 级之间表现出一定的相似性,平均根长相似特征并不是很明显,而 2 级之后平均直径和平均根长随着根序的变化增加比较明显。贾淑霞等^[27]对东北水曲柳和落叶松的研究发现,细根比根长在 1.81—117.74 m/g 之间变化,Makita 等^[13]对德国光叶桦 <2 mm 细根研究发现比根长变化范围从 1.05 m/g 到 80.39 m/g,本研究大部分结果都在这些范围内,只有部分树种最小比根长与这些研究略有不同。同时从树种及与序级的交互作用及序级对 6 种树种形态指标的方差分析可以看出树种及与序级的交互作用在分析细根直径和根长时可能具有更重要的作用,而序级对细根比根长和组织密度的研究可能具有更好的效果。此外于立忠等^[28]通过对日本落叶松进行施肥处理发现施肥对各级细根平均直径、根长和比根长的影响主要表现在 1、2 级根上,对 3 级根序以上的细根影响不显著。刘金梁等^[29]研究发现施氮肥后水曲柳和落叶松细根直径,比根长均发生了变化,而对根长影响不显著。Wang 等^[9]对东北兴安落叶松和水曲柳前 5 级根的研究发现土壤深度和季节对直径,组织密度都有影响。Comas 等^[14]对 6 种温带树种的研究以及 Ostonen 等^[11]对欧洲北方森林 3 种树种的研究表明细根的比根长还受到细根生长环境以及纬度位置,气候条件和生物因素影响。另外本研究中细根直径,根长,比根长,组织密度与序级之间均呈现出较好的指数函数,幂函数,二次函数或三次函数关系,表明序级可以对细根形态特征进行很好的表征。

目前有关细根组织密度和直径对树种间比根长变异的贡献如何尚不清楚。本实验研究表明:较低级细根的组织密度对树种间的比根长变异起主要贡献,而直径则对 5 级根的比根长变异起主要贡献,这说明控制树种间比根长变异的主要因子可能随序级而发生变化,因而在今后研究细根对生物及非生物因子的响应时,应充分考虑序级间的差异。另外,细根的组织密度与直径之间是否存在相关性目前尚不确定,Ostonen 等^[12]通过对整个欧洲不同树种细根的 12 个数据集的分析发现,只有 3 个数据集中的细根直径和组织密度呈现显著的相关性。本研究中,虽然 2—4 级细根的组织密度与直径不呈显著的相关性,但最低级细根的组织密度与直

径之间则存在明显的权衡关系,这种权衡关系,可能与最低级根受到碳水化合物供应的限制有关。由于最低级根处于根系的最末端,离地上的碳源最远,碳水化合物供给相对困难,因而在最低级根中,增加组织密度和直径两者中一方的投入,必然将降低对另外一方的投入。

4.3 6 种树种细根生物量的比较

已有对细根生物量的研究都是以细根直径大小为基础,通过划分不同直径等级的细根来进行的,忽视了细根分枝特点对根系结构和功能的作用^[30]。目前研究根系生物量的方法主要包括收获法,钻土芯法,平衡法,挖土块法,间接法等^[31],本研究主要采用挖土块法对细根不同序级的生物量进行研究。根据相对生长理论^[16-17]各个序级的生物量会随序级的升高而单调上升,研究中 6 种树种细根不同序级生物量变化并未表现出这种变化,研究结果只有浙江桂表现出了这种规律,沉水樟和罗浮栲前 4 级表现出了这种规律,到 5 级却下降了,其它几种树种变化规律也不明显。Guo 等^[15]对美国长叶松细根生物量的研究发现随着根序不同生物量有显著变化,且 5 级根生物量显著高于其它序级,而且其它 4 级并没有显著不同,王向荣等^[32]对水曲柳和落叶松细根生物量研究发现在不同等级的根序中差异明显,水曲柳 1 级根序的生物量明显高于 2 级和 3 级根序,落叶松 1 级根序仅高于 2 级根序的生物量,两个树种 5 级根序的生物量明显高于其它 4 个等级。本研究部分结果与这些相同,但最高级生物量并不一定显著高于其它序级,且各树种细根生物量主要集中在高级根部分。此外 Huang 等^[26]对我国东北科尔沁沙地 3 种矮灌木研究发现前两级的细根生物量占到前 4 级细根生物量的 63%,这可能与树种的不同具有很大的关系。研究中序级对各个树种细根生物量的影响并不统一,部分达到了极显著或显著水平,而部分影响不显著,树种及和序级的交互作用对细根生物量具有极显著的影响,也表明在分析不同序级细根生物量时考虑树种的差异及与序级的交互作用可能具有更好的效果。总的来说林木细根生物量与其所在气候带、土壤类型、群落结构、树龄及干扰程度等有关^[33],本研究只对样地内占优势的一种树种细根序级的生物量进行研究,且都集中在保护区内,因此气候条件,树龄影响可能较小,从分析来看可能与树种及树种和序级的交互作用关系更大,另外地形,土壤类型等条件可能也具有一定的影响。而根据 Wang 等^[9]对中国两种温带树种的研究发现 1 级根部分的生物量比较高,甚至高于其它高级根,并指出这可能与前两级根分支比例较高有关,于立忠^[28]等通过对日本落叶松进行施氮肥,磷肥以及同时施氮磷肥处理发现对不同土层各根序的生物量均有影响,刘金梁等^[29]研究发现施氮肥后降低了水曲柳和落叶松前 3 级根的生物量。本研究中几种树种细根生物量与序级之间也具有很好的回归关系,这也为研究细根不同序级生物量的变化提供了借鉴。通过分析<2 mm 的根中各个根序所占生物量的比例,从而推知不同根序的生物量,以便在计算各个根序及整个根系的周转时提供参考。完整的细根系统从土壤中分离出来比较困难,所以估计不同序级的生物量可能存在一定误差。

References:

- [1] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production turnover and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 303-377.
- [2] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [3] Santantnio D, Grace J C. Estimating fine-root production turnover from biomass and decomposition data: a compartment flow model. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 900-908.
- [4] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, Lessard V C, Zak D R. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth. *Tree Physiology*, 1998, 18(10): 665-670.
- [5] Wells C E, Eissenstat D M. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. *Ecology*, 2001, 82(3): 882-893.
- [6] Fitter A H, Stickland T R. Architectural analysis of plant root systems III. Studies on plants under field conditions. *New Phytologist*, 1992, 121(2): 243-248.
- [7] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D, Whitbeck J L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 33-42.
- [8] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine north American trees. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [9] Wang Z Q, Guo D L, Wang X R, Gu J C, Li M. Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species. *Plant Soil*, 2006, 288(1/2): 155-171.

- [10] Essenstat D M. On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks. *New Phytologist*, 1991, 118(1): 63-68.
- [11] Ostonen I, L  hmus K, Helmsaari H S, Truu J, Meel S. Fine root morphological adaptations in Scots pine, Norway spruce and silver birch along a latitudinal gradient in boreal forests. *Tree Physiology*, 2007, 27(11): 1627-1634.
- [12] Ostonen I, P  ttsepp   , Biel C, Alberton O, Bakker M R, L  hmus K, Majdi H, Metcalfe J D, Olsthoorn A F M, Pronk A A, Vanguelova E, Weih M, Brunner I. Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems*, 2007, 141(3): 426-442.
- [13] Makita N, Hirano Y, Dannoura M, Kominami Y, Mizoguchi T, Ishii H, Kanazawa Y. Fine root morphological traits determine variation in root respiration of *Quercus serrata*. *Tree Physiology*, 2009, 29(4): 579-585.
- [14] Comas L H, Eissenstat D M. Patterns in root trait variation among 25 co-existing North American forest species. *New Phytologist*, 2009, 182(4): 919-928.
- [15] Guo D L, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, 140(3): 450-457.
- [16] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 1997, 276(5309): 122-126.
- [17] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature*, 1999, 400(6745): 664-667.
- [18] Fitter A H. Morphometric analysis of root systems: application of the technique and influence of soil fertility on root system development in two herbaceous species. *Plant, Cell and Environment*, 1982, 5(4): 313-322.
- [19] Fahey T J, Hughes J W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of Ecology*, 1994, 82(3): 533-548.
- [20] Hishi T, Takeda H. Dynamics of heterorhizic root systems: protoxylem groups within the fine-root system of *Chamaecyparis obtuse*. *New Phytologist*, 2005, 167(2): 509-521.
- [21] Wang Z Q, Guo D L. Root ecology. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [22] Trumbore S E, Gaudinski J B. The secret lives of roots. *Science*, 2003, 302(5649): 1344-1345.
- [23] Guo D L, Li H, Mitchell R J, Han W X, Hendricks J J, Fahey T J, Hendrick R L. Heterogeneity by root branch order: exploring the discrepancy in root longevity and turnover estimates between minirhizotron and C isotope methods. *New Phytologist*, 2008, 177: 443-456.
- [24] Shi W, Wang Z Q, Liu J L, Gu J C, Guo D L. Fine root morphology of twenty hardwood species in Maoershan natural secondary forest in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1217-1226.
- [25] Liu J, Xiang W H, Xu X, Chen R, Tian D L, Peng C H, Fang X. Analysis of architecture and functions of fine roots of five subtropical tree species in Huitong, Hunan Province, China. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 938-945.
- [26] Huang G, Zhao X Y, Zhao H L, Huang Y X, Zuo X A. Linking root morphology, longevity and function to root branch order: a case study in three shrubs. *Plant Soil*, 2010, 336(1/2): 197-208.
- [27] Jia S X, Zhao Y L, Ding G Q, Sun Y, Xu Y, Wang Z Q. Relationship among fine-root morphology, anatomy, tissue nitrogen concentration and respiration in different branch root orders in *larix gmelinii* and *fraxinus mandshurica*. *Bulletin of Botany*, 2010, 45(2): 174-181.
- [28] Yu L Z, Ding G Q, Shi J W, Yu S Q, Zhu J J, Zhao L F. Effects of fertilization on fine root diameter, root length and specific root length in *Larix Kaempferi* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 957-962.
- [29] Liu J L, Mei L, Gu J C, Quan X K, Wang Z Q. Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass and morphology of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*: a study with in-growth core approach. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 1-6.
- [30] Cheng Y H, Han Y Z, Wang Q C, Wang Z Q. Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation. *Acta Phytocologica*, 2005, 29(3): 403-410.
- [31] Huang J H, Han X G, Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 270-277.
- [32] Wang X R, Gu J C, Mei L, Han Y Z, Yu S Q, Shi J W, Yu L Z. Fine root order morphology and proportion between mother roots and daughter roots in *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1686-1692.
- [33] Idol T W, Pope P E, Ponder F Jr. Fine root dynamics across a chronosequence of upland temperate deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 2000, 127(1/3): 153-167.

参考文献:

- [21] 王政权, 郭大立. 根系生态学. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [24] 师伟, 王政权, 刘金梁, 谷加存, 郭大立. 帽儿山天然次生林 20 个阔叶树种细根形态. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1217-1226.
- [25] 刘佳, 项文化, 徐晓, 陈瑞, 田大伦, 彭长辉, 方晰. 湖南会同 5 个亚热带树种的细根构型及功能特征分析. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 938-945.
- [27] 贾淑霞, 赵妍丽, 丁国泉, 孙玥, 许旻, 王政权. 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. *植物学报*, 2010, 45(2): 174-181.
- [28] 于立忠, 丁国泉, 史建伟, 于水强, 朱教君, 赵连富. 施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 957-962.
- [29] 刘金梁, 梅莉, 谷加存, 全先奎, 王政权. 内生长法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 1-6.
- [31] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, 19(2): 270-277.
- [32] 王向荣, 谷加存, 梅莉, 韩有志, 于水强, 史建伟, 于立忠. 水曲柳和落叶松细根形态及母根与子根比例关系. *生态学报*, 2006, 26(6): 1686-1692.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China	ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China	YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao	YANG Jinpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau	QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China	JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir	REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of <i>Amphidinium carterae</i>	JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in <i>Strongylocentrotus intermedius</i>	QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China	ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system	YANG Li, LI Weide (1773)
Effects of insect-resistant transgenic <i>Bt</i> rice with a fused <i>Cry1Ab+Cry1Ac</i> gene on population dynamics of the stem borers, <i>Chilo suppressalis</i> and <i>Sesamia inferens</i> , occurring in paddyfield	LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of <i>Frankliniella Occidentalis</i> (Pergande)	FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV)	WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China	LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil	QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau	DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
N ₂ O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions	YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China	WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale	LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition	YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO ₃ -N migration in wheat	WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province	WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China	GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak	FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> and its closely related genera	SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
Effect of the parasitic <i>Cuscuta australis</i> on the community diversity and the growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i>	WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning	CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
Fine root longevity and controlling factors in subtropical <i>Alingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images	DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics	LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
Review and Monograph	
Review of the ecological compensation efficiency	ZHAO Xueyan (1960)
Scientific Note	
The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying	CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元