

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **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 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

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

DOI: 10.5846/stxb201106280966

熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 卢正立, 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升. 亚热带六种天然林树种细根养分异质性. 生态学报, 2012, 32(14): 4343-4351.

Xiong D C, Huang J X, Yang Z J, Lu Z L, Chen G S, Yang Y S, Xie J S. Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4343-4351.

亚热带六种天然林树种细根养分异质性

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}, 谢锦升^{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常绿阔叶林 6 种优势树种为研究对象, 分析其 1—5 级细根养分特征及其与细根形态特征和叶片养分的关系。结果发现: 除沉水樟细根 C 含量表现为随序级升高而增加外, 其余 5 种树种均没有明显变化规律; 6 种树种 N、P 含量基本表现为随序级升高而降低, C/N 随序级升高而增加; 但 N/P 随序级升高均没有明显变化规律。单因素方差分析发现: 树种对 C、N、P 含量和 C/N、N/P 具有极显著影响 ($P < 0.01$), 序级对 6 种树种 N、P 含量和 C/N 有极显著或显著影响 ($P < 0.01$, $P < 0.05$), 对 C 含量和 N/P 影响并不显著 ($P > 0.05$); 双因素方差分析发现: 树种和序级的交互作用对 C、N、P 含量和 C/N 有极显著或显著的影响 ($P < 0.01$, $P < 0.05$), 对 N/P 影响不显著 ($P > 0.05$)。相关性分析表明: 在较高级根中 C、N 含量之间呈现相关性, 在较低级根中 N、P 含量呈现相关性, 同时 C/N、N/P 的变化均主要由 N 含量变化决定; 6 种树种细根比根长和 N、P 含量、C/N 有极显著相关性 ($P < 0.01$), 而与 C 含量和 N/P 相关性并不明显。一级根的 N、P 含量和 N/P 相比于整个细根更接近于叶片, 但一级根与叶片 N、P、N/P 之间并没有显著的相关性 ($P > 0.05$)。

关键词: 亚热带; 天然林; 细根; 叶片; 养分; 序级

Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural 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}, XIE Jinsheng^{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, commonly defined as roots < 2 mm in diameter, are often treated as a homogeneous mass compartment. However, this approach ignores the distinct branching structure of fine root systems, roots of different branch orders play different roles in belowground carbon and nutrient cycling. To date, it is remarkable how little we know about the chemical properties in fine root and the correlation between fine root and leaf in chemical properties, especially in subtropical evergreen broadleaved forest. So, in this study, intact fine root segments and leaves of six dominant tree species (*Cinnamomum micranthum*; *Tsoongiodendron odorum* Chun; *Cinnamomum chekiangense*; *Castanopsis fabri*; *Altingia gracilipes*; and *Castanopsis carlesii*) were sampled in an evergreen broadleaved forest located at the Wanmulin Nature Reserve, Jian'ou, Fujian province. We focused on: (1) the relationship between branch order and root nutrient concentrations; (2) the correlation between the chemical and morphological traits of fine root and between the chemical traits of root and leaf; (3) the effect of root order and tree species on root chemical traits. For *Cinnamomum micranthum*, C content increased as root order increased, while there was no distinct trend for the other five species. There was a negative relationship between root branch order and N and P concentration, and a positive relationship between root branch

基金项目:福建省海西杰出青年人才基金项目(2010J06009);福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10057);福建省自然科学基金项目(2009J01122)

收稿日期:2011-06-28; **修订日期:**2011-10-31

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

order and C/N ratios for the six tree species, while the N/P ratios had no distinct pattern with branch order. The one-way ANOVA demonstrated that tree species had significant effect on C, N, P concentration, C/N ratio, and N/P ratio ($P < 0.01$). Though root order had significant or marked effect on N, P concentration and C/N ratio ($P < 0.01$, $P < 0.05$), it had no significant effect on C concentration and N/P ratio ($P > 0.05$) for the six tree species. The two-way ANOVA showed that tree species $\times$ root order interaction had significant or marked effect on C, N, P concentration and C/N ratio ($P < 0.01$, $P < 0.05$), while it had no effect on N/P ratio ($P > 0.05$). The analysis of correlation revealed that variation in C/N ratio was determined by N concentration in the lower root order and by C concentration in the highest root order, and the variation in N/P ratio was determined by N concentration. Among tree species, C concentration was coupled with N concentration in the higher root order and the N concentration coupled with P concentration in the lower root order. Specific root length was correlated with N and P concentrations as well as C/N ratio ($P < 0.01$), but had no significant correlation with C concentration and N/P ratio for the six tree species. The comparison among first root order, bulk fine root and leaf for the six tree species indicated that, while there was no significant correlation, N, P concentration and N/P ratio of the first root order were more similar to those of leaf than those of bulk fine root. It concludes that there was large heterogeneity in nutrient traits among different root orders for these subtropical evergreen broadleaved species, especially N and P concentrations, and the root tip to some extent can serve as an analogue to leaf with regard to nutrient traits.

Key Words: subtropical; natural forest; fine root; leaf; nutrient concentration; root order

细根养分涉及整个生态系统内养分的循环,细根也是森林生态系统生物量和养分库中重要的动态组成部分,是消耗净初级生产(碳水化合物)的“汇”,同时又是供应植物水分和养分重要的“源”^[1]。所以,细根是研究森林生态系统养分循环和能量流动的关键环节。研究表明,对于森林生态系统,如果忽略根(尤其是细根)的作用,有机质及养分归还将被低估 20%—80%^[2]。细根对 C 和养分循环的贡献不仅受现存生物量库和周转速率的控制,还受其内在养分浓度的直接影响,因此,准确估计细根养分浓度是研究细根对森林生态系统物质循环贡献大小的关键^[3]。细根作为影响树木生长发育最为重要的器官之一,对细根氮磷吸收和碳的消耗研究一直是研究的重点,已往根系养分研究主要是根据直径大小测定细根(如直径 <2 mm)、中根(如直径 $2—5$ mm)和粗根(如直径 >5 mm)的养分含量^[4-5]。然而树木细根系统存在较大的形态和化学异质性,这种异质性既表现在同一树种不同级别之间,也表现在同一级别不同树种之间。通常 <2 mm 的细根包括不同根序等级,细根的根序级别不同,其养分含量不同,生理、生态功能具有较大差异^[6],研究不同树种不同根序的养分特征,对认识不同树种细根化学成分的变异格局有着重要意义。已有研究表明细根形态特征对细根养分具有显著影响,尤其是比根长与根系养分吸收以及根的寿命有关^[7]。植物的叶片与细根作为植物体地上和地下部分重要的营养器官,其很多性状具有一定的关联^[8-11],已有研究表明细根和叶片在化学养分含量上具有一定的联系,如果植物细根与叶片的养分具有确定的相互关系,则可以利用更加便于测量的叶片养分对细根的养分进行估算,从而加深对植物功能性状的理解。然而,最近的研究开始对细根和叶片这种性状关联的正确性表示怀疑,因为在同一分支系统中细根存在着一定的异质性^[11-12]。

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,目前对亚热带常绿阔叶林不同树种间细根序级养分含量的研究还比较缺乏。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不同序级的 C、N、P 含量,着重探讨细根序级和树种对细根 C、N、P 含量及化学计量学关系的影响,细根的化学性状与细根形态性状及叶片化学性状之间的关联,以期深入揭示亚热带常绿阔叶林细根结构与功能异质性提供参考数据,为科学评价细根在森林生态系统养分循环、碳平衡中的重要作用及根系序级分类提供理论依据。

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 样品采样与处理

细根样品主要是在沉水樟 *Cinnamomum micranthum*; 观光木 *Tsoongiodendron odorum* Chun; 浙江桂 *Cinnamomum chekiangense*; 罗浮栲 *Castanopsis fabri*; 细柄阿丁枫 *Altingia gracilipes*; 米槠 *Castanopsis carlesii* 6 片天然林样地进行选取,每片样地对相应树种的细根进行采集。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^[5]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;叶片的采集主要参照阎恩荣等^[13]的方法,即采集乔木叶片时利用攀登方法在树冠东、西、南、北、中 5 个部位采集叶片生长旺盛的典型枝条,连同叶片一起带回地面,在现场将每一种类同一个体 5 个枝条上所收集的新鲜叶片放在随身携带的托盘中进行合并,待混匀后利用四分法选取一定数量的叶片,装入纸袋。样品采集完成后立即带回实验室,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,根据 Pregitzer 等^[4]的分级方法将各个土块完整根系分成 5 级,位于根系最远端没有分支的最细小的根定为 1 级根,两 1 级根交汇处为 2 级根,两 2 级根交汇处为 3 级根,依次类推到 5 级根,另外对于着生于高级根(3、4、5 级根)上没有分枝的根也划归为一级根,分级时主要是用镊子或剪刀将各级细根仔细的分离,不同等级的根经处理后分别装入已标记好的玻璃皿中,然后立即用数字化扫描仪 (Espon scanner) 进行扫描,扫描时本研究中主要是将各个土块中各个序级的细根进行 3 次重复实验,3 个土块共计 9 个重复,扫描完成后用 Win RHIZO (Pro 2005b) 根系图像分析软件对扫描得到的图片进行分析以得到各级细根的总长度,而后将扫描后的细根分别放入 65℃ 烘箱烘至恒重后称重,计算出各级细根比根长 (总长度/干重, m/g), 叶片样品带回实验室后立刻放入烘箱进行杀青处理,然后在 65℃ 下烘至恒重。

2.2 样品养分含量测定

将烘干后的 3 个土块的相同序级的细根混合在一起,然后将细根和叶片样品分别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 C-N 元素分析仪测定 6 种树种各根序及叶片的 C、N 含量;另取适量样品采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法对样品进行处理,而后用分光光度计对细根和叶片的全 P 含量进行测定 (相关实验均通过 3 次重复实验完成)。

2.3 数据分析

利用 SPSS13.0 软件通过单因素和双因素方差分析对树种、序级及其交互作用对 6 种树种细根 C、N、P 含量及 C/N、N/P 的影响进行分析;运用 Pearson 相关分析方法对 6 种树种细根 C、N、C/N 及 N、P、N/P 之间的关系,细根比根长与 C、N、P 及 C/N、N/P 的关系进行分析,同时对细根和叶片 N、P、N/P 之间关系进行分析;相关图表采用 Excel 完成。

3 结果与分析

3.1 6 种树种细根养分含量变化特征

3.1.1 6 种树种细根 C、N、P 含量变化特征

细根平均 C 含量沉水樟为 461.97 g/kg, 观光木为 451.8 g/kg, 浙江桂为 467.28 g/kg, 罗浮栲为 441.74

g/kg,细柄阿丁枫为 446.1 g/kg,米槎为 462.44 g/kg;除沉水樟细根 C 含量随序级升高而增加外,其余 5 种树种均未表现出明显的变化规律(图 1);沉水樟,观光木细根不同序级 C 含量有极显著差异($P<0.01$),米槎有显著差异($P<0.05$),其余 3 种树种差异不显著($P>0.05$),方差分析也发现序级对沉水樟,观光木和米槎 C 含量具有极显著或显著影响($P<0.01$, $P<0.05$)(表 1)。细根平均 N 含量沉水樟为 15.85 g/kg,观光木为 13.25 g/kg,浙江桂为 13.58 g/kg,罗浮栲为 7.56 g/kg,细柄阿丁枫为 7.43 g/kg,米槎为 7.82 g/kg;6 种树种细根 N 含量随序级变化规律基本一致,大致表现为随序级升高 N 含量增加,6 种树种细根不同序级 N 含量均有极显著差异($P<0.01$)(图 1),方差分析也发现序级对 6 种树种细根 N 含量有极显著影响($P<0.01$)(表 1)。细根平均 P 含量沉水樟为 0.84 g/kg,观光木为 0.62 g/kg,浙江桂为 0.61 g/kg,罗浮栲为 0.55 g/kg,细柄阿丁枫为 0.57 g/kg,米槎为 0.47 g/kg;6 种树种细根 P 含量变化规律也基本表现为:随序级升高而下降,沉水樟细根不同序级 P 含量有显著差异($P<0.05$),其余 5 种树种均有极显著差异($P<0.01$)(图 1),方差分析也发现序级对 6 种树种 P 含量均有极显著或显著影响($P<0.01$, $P<0.05$)(表 1)。另外双因素方差分析发现树种,树种与序级的交互作用对 C、N、P 含量均有极显著的影响($P<0.01$)(表 1),这也表明因树种的不同 C、N、P 含量有显著的不同,树种和序级的综合作用对这些元素的分析也具有重要作用。

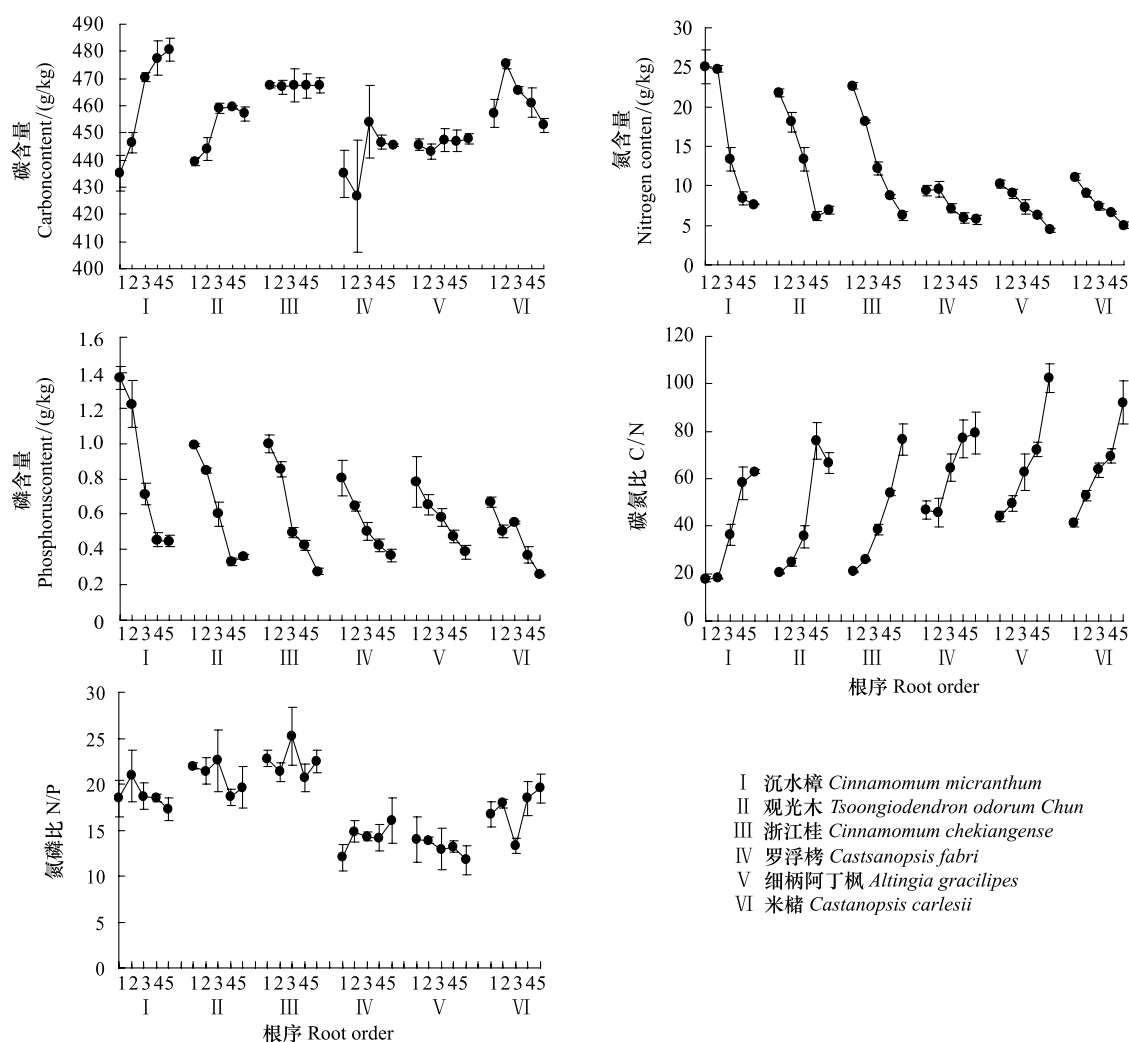


图 1 6 种树种细根 1—5 级 C、N、P、C/N、N/P 变化特征。

Fig. 1 C、N、P、C/N、N/P of the first five root branch orders for the six tree species

3.1.2 6 种树种细根 C/N 和 N/P 变化特征

细根平均 C/N 沉水樟为 38.62, 观光木为 44.60, 浙江桂为 43.06, 罗浮栲为 62.86, 细柄阿丁枫为 66.19,

米楮为 63.93;6 种树种细根 C/N 基本表现为随序级升高而升高,罗浮栲细根不同序级 C/N 有显著差异 ($P<0.05$),其余 5 种树种均有极显著差异 ($P<0.01$) (图 1),单因素方差分析也发现序级对罗浮栲 C/N 有显著影响 ($P<0.05$),对其余 5 种树种细根 C/N 均有极显著影响 ($P<0.01$) (表 1)。细根平均 N/P 沉水樟为 18.76,观光木为 20.72,浙江桂为 22.50,罗浮栲为 14.27,细柄阿丁枫为 13.14,米楮为 17.19;6 种树种细根 N/P 均未表现出明显的变化规律,不同序级间 N/P 差异也不显著 ($P>0.05$) (图 1),单因素方差分析也发现序级对 6 种树种细根 N/P 影响均不显著 ($P>0.05$) (表 1)。另外双因素方差分析发现树种对 C/N 和 N/P 均有极显著的影响 ($P<0.01$) (表 1),也表明因树种的不同 C/N 和 N/P 有很大的差异,而树种和序级的交互作用对 C/N 有显著影响 ($P<0.05$),而对 N/P 影响不显著 ($P>0.05$)。

表 1 树种、序级对 6 种树种细根 C、N、P、C/N、N/P 的影响
Table 1 The effect of tree species, root order on the C、N、P、C/N、N/P

树种 Tree species	变异来源 Source of variation	C	N	P	C/N	N/P
	树种	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	树种×序级	0.002	<0.0001	<0.0001	0.02	0.409
沉水樟 <i>Cinnamomum micranthum</i>	序级	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.701
观光木 <i>Tsoongiodendron odorum Chun</i>	序级	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.609
浙江桂 <i>Cinnamomum chekiangense</i>	序级	1.000	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.455
罗浮栲 <i>Castanopsis fabri</i>	序级	0.526	0.006	0.002	0.013	0.494
细柄阿丁枫 <i>Altingia gracilipes</i>	序级	0.816	<0.0001	0.032	<0.0001	0.881
米楮 <i>Castanopsis carlesii</i>	序级	0.013	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.062

C、N 含量及 C/N 之间相关分析发现:6 种树种细根 1—5 级 N 含量与 C/N 均呈极显著负相关性 ($P<0.01$),5 级根 C 含量与 C/N 之间呈显著负相关性 ($P<0.05$),其余几级间均没有相关性 ($P>0.05$),同时树种间 1—3 级细根 C、N 含量之间相关性均不显著 ($P>0.05$),4、5 级细根 C、N 含量分别具有显著和极显著正相关关系;总的序级 N 含量和 C/N 之间呈极显著负相关性 ($P<0.01$),C 含量和 C/N、C、N 含量之间相关性均不显著 ($P>0.05$) (表 2)。以上结果表明:树种间较低级根 C/N 的变异主要由 N 含量决定,最高级根 C/N 的变异由 C、N 含量共同决定,在较高级根中 C、N 含量之间呈现出一种耦合(协同)关系。N、P 含量及 N/P 相关分析发现:6 种树种细根 1—2 级细根 N、P 含量间呈极显著正相关性 ($P<0.01$),N 含量和 N/P 在 1—3 级细根呈极显著正相关性 ($P<0.01$),4—5 级细根呈显著的正相关性 ($P<0.05$),P 含量和 N/P 在 1—4 级细根相关性均不显著 ($P>0.05$),在第 5 级细根呈极显著负相关性 ($P<0.01$);总的序级 N 和 P 含量及 N/P 之间均呈极显著正相关性 ($P<0.01$),P 含量与 N/P 之间相关性不显著 ($P>0.05$) (表 2)。这些结果也表明在较低级根中 N、P 含量也呈现出一种耦合(协同)关系,较低级根中 N/P 主要由 N 含量决定,最高级根由 N、P 共同决定。

表 2 6 种树种细根 C、N 与 C/N、N、P 与 N/P 之间的相关性
Table 2 The correlation among C、N、C/N and among N、P、N/P of the six tree species

	C×N	C×C/N	N×C/N	N×P	N×N/P	P×N/P
1	0.049	-0.024	-0.979 **	0.742 **	0.775 **	0.165
2	-0.031	0.186	-0.954 **	0.884 **	0.730 **	0.333
3	0.375	-0.322	-0.968 **	0.386	0.814 **	-0.203
4	0.512 *	-0.364	-0.969 **	0.435	0.580 *	-0.469
5	0.678 **	-0.534 *	-0.970 **	0.319	0.543 *	-0.609 **
总的序级 Root order of the total	-0.151	0.127	-0.887 **	0.876 **	0.482 **	0.040

* 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 ($P<0.01$)

3.2 细根养分含量与细根比根长的相关性

通过对 6 种树种细根养分含量与比根长的相关性分析发现:沉水樟,观光木细根 C 含量与比根长之间呈极显著负相关性($P < 0.01$),其余 4 种树种细根 C 含量与比根长相关性均不显著($P > 0.05$);罗浮桫细根 N 含量与比根长相关性不显著($P > 0.05$),其余 5 种树种细根 N 含量与比根长均呈极显著正相关性($P < 0.01$);罗浮桫,细柄阿丁枫细根 P 含量与比根长相关性均不显著($P > 0.05$),其余 4 种树种细根 P 含量与比根长呈极显著正相关性($P < 0.01$);罗浮桫细根 C/N 与比根长相关性不显著($P > 0.05$),其余 5 种树种细根 C/N 与比根长呈极显著负相关性($P < 0.01$);6 种树种细根 N/P 与比根长相关性均不显著($P > 0.05$)(表 3)。所有树种细根 C 含量、N/P 与比根长相关性均不显著($P > 0.05$),N、P 含量与比根长呈极显著正相关性($P < 0.01$),C/N 与比根长呈显著正相关性($P < 0.05$)(表 3)。

表 3 6 种树种细根比根长与 C、N、P、C/N、N/P 之间的相关性

Table 3 The correlation between specific root length and C、N、P、C/N、N/P

指标 Index	沉水樟	观光木	浙江桂	罗浮桫	细柄阿丁枫	米槠	所有树种 All the tree species
C	-0.875 **	-0.775 **	-0.013	-0.162	0.192	0.046	-0.20
N	0.849 **	0.922 **	0.962 **	0.347	0.772 **	0.877 **	0.627 **
P	0.867 **	0.920 **	0.909 **	0.514	0.734	0.664 **	0.632 **
C/N	-0.821 **	-0.853 **	-0.805 **	-0.382	-0.666 **	-0.743 **	-0.635 **
N/P	0.085	0.420	0.109	-0.327	0.167	0.021	0.193

* 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 细根与叶片养分含量的相关性

通过对 6 种树种根尖、细根 5 个序级加权平均值及叶片 N、P 含量、N/P 进行比较发现:沉水樟,观光木,浙江桂 N 含量表现出根尖>叶片>细根,罗浮桫,细柄阿丁枫,米槠 N 含量表现出叶片>根尖>细根;沉水樟,罗浮桫,细柄阿丁枫 P 含量表现出根尖>叶片>细根,观光木和米槠 P 含量表现为叶片>根尖>细根,浙江桂表现为根尖>细根>叶片(图 2),从以上结果可以看出 N、P 含量基本上都表现为根尖相比于细根更接近于叶片。沉水樟,浙江桂,细柄阿丁枫和米槠 N/P 表现出根尖相比于细根也更接近于叶片,观光木和罗浮桫则是细根更接近于叶片(图 2)。另外通过相关性分析发现细根各个序级及总的序级与叶片 N、P 含量和 N/P 之间的相关性并不明显。

4 讨论

本研究中,6 种树种 N、P 含量基本表现为随序级升高而下降,C/N 比则均随序级增加而升高,这都直接证明了细根养分在不同序级间存在一定的异质性。这与 Pregitzer 等^[4]研究发现随根序增加 C/N 均升高,N 含量降低,Guo 等^[5],刘佳等^[14]发现随序级增加 N 含量降低,Li 等^[15]发现细根组织 N 和 P 含量随序级升高呈线性降低的研究结果相似。这种养分分配格局与根的代谢活动强弱有关,低级根是吸收水分和养分的主要器官,代谢最活跃,根尖细胞分裂旺盛^[14],组织内酶和 RNA 投入高,因而对 N 和 P 需求大;从解剖特征上看,低级根主要由初生组织构成,皮层细胞是其结构中主要的细胞类型,随根序增加皮层细胞减少,木质部增加,根序更高时皮层细胞甚至消失,由次生组织构成,次生组织本身包含大量死亡细胞,导致组织整体代谢低^[16],因此营养浓度一般随序级升高而降低。与 N、P 元素相比,不同树种的 C 含量随序级的增加并不呈现一致性的变化,这与一些研究发现 C 含量随序级增加而升高的结果不尽相同^[5,14],其原因可能是 C 作为植物组织的基本构建元素,含量相对稳定,其变化可能主要取决于根系中非结构性碳组分的变化,而其中可溶性(可代谢)组分和贮存组分随序级的变化趋势可能不一,从而导致 C 含量随序级变化的不同趋势。由于根系的很多生态过程如周转、分解等与细根组织碳、氮、磷等养分含量密切相关,因而如果忽视细根内部的养分异质性,而把细根视为化学组成均一的整体,将引起根系对生态系统的养分循环和碳吸存贡献估计的很大误差。另外,本研究表明树种以及树种与序级的交互作用对细根 C、N、P 含量及 C/N 均有显著或极显著影响,表明细根的养

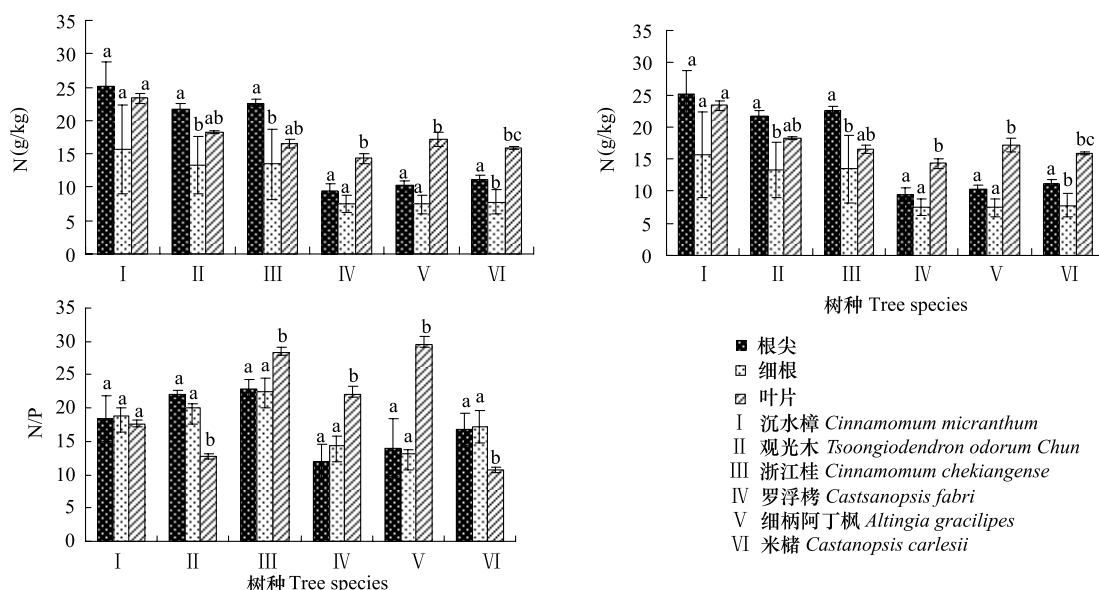


图2 6种树种根尖、细根、叶片N、P、N/P比较

Fig. 2 The comparison of N, P, N/P among first order tips, the average of all fine root orders, leaf for the six tree species

柱状图上具有不同小写字母表示不同树种间有显著差异 ($P < 0.05$), 否则无显著差异 ($P > 0.05$)

分异质性的不同树种中具有不同的表现,这进一步说明了把细根视作整体将引起树种间的可比性问题。

本研究发现元素间的耦合关系在不同序级中表现不同。较高级根 C、N 之间具有耦合关系,这主要因为高级根大部分为结构组织,其中 C、N 均大部分被作为构建元素,从而具有较稳定的 C、N 化学计量学关系。所有序级细根 N、P 含量间表现出较高的相关性,这与 Kerkhoff 等^[10]对多种木质植物的研究表明根系内部 N、P 之间具有较高相关性的结果相似。然而,通过不同序级的分析发现,只有低级根中 N、P 含量表现出较好的耦合关系,这主要因为低级根中 N、P 大部分投入到根系的生理代谢过程。生理代谢过程需要大量酶和蛋白质的投入,以及 rRNA 的投入以生产所需的酶和蛋白质。而 N 和 P 分别是酶和 rRNA 的主要合成元素,因此低级根中 N、P 之间呈现出较稳定的 N、P 化学计量学关系。同时本研究中 C/N、N/P 比的变化主要由 N 含量的变化决定,这与 N 含量相对于 C、P 含量具有更大的变化范围有关。

N/P 不仅是决定群落结构和功能的关键性指标,也可以作为对生产力起限制性作用营养元素的指示指标^[17-18]。研究显示,当植被的 N/P 含量小于 14 时,表明植物生长更大程度受到氮素的限制作用;大于 16 时,则反映植被生产力受磷素的限制更为强烈;介于两者中间表明受到氮磷元素的共同限制作用^[19-20]。目前大多数利用 N/P 判断植物受土壤氮磷限制的研究主要是通过植物叶片来反应,通过细根进行研究还比较少。本研究中沉水樟,观光木和浙江桂平均 N 含量均高于全球植被细根平均 N 含量 (11.7 g/kg)^[21],而罗浮栲,细柄阿丁枫和米槠则明显低于这一数值;6 种树种细根平均 P 含量均低于全球植被细根平均 P 含量 (1.1 g/kg)^[21];平均 N/P 则均高于全球陆地细根平均 N/P (11)^[21]。从以上比较可明显看出本地区常绿阔叶林生长更易受 P 素的限制。这与一般认为温带森林和北方森林的生产力受 N 的限制,而热带雨林和亚热带常绿林生产力普遍受 P 限制的观点相似^[22-23]。本研究区地处中亚热带,气温高、降水量大,加之高温多雨同期,土壤进行着强烈的富铝化作用,活性铁、铝含量高,土壤磷素大多被铁、铝等固定,形成林木难以利用的磷酸铁、铝和闭蓄态磷,从而导致土壤可利用磷含量极低^[24]。从现有对 N/P 的认知水平来看,较低的 N/P 指示植物生长主要受氮素限制已基本得到了普遍认可,而对于较高和中等水平的 N/P 究竟能否反映植被生产力受到磷素的限制,目前还没有一致性的结论,有些研究认为高的 N/P 意味着植被生产力主要受磷素限制,而有些研究认为受到磷和氮的共同限制^[23]。

一些研究表明,细根比根长与细根的许多生理生态过程紧密相关,因而可在一定程度上表征细根的生理

代谢活性水平。本研究中,比根长与细根 N、P 含量和 C/N 均有显著相关,这与 Pregitzer 等^[4]和 Reich 等^[25]发现木本植物根 N 含量与比根长呈正相关等的报道相似,表明这些指标均与细根的生理代谢活性有较密切的相关,从而存在较强的关联性。但不同树种的这种相关性则有较大差异,在个别树种中甚至不存在显著相关。周鹏等^[26]对内蒙古 42 种草本植物的研究发现细根比根长和细根 N、P、N/P 都没有显著的相关关系。因而,在用比根长表征细根的化学组成时需要考虑不同树种及植物类型间的差异。同时,除了个别树种比根长与 C 含量存在显著相关外,细根的 C 含量和 N/P 比无法通过细根的形态指标来进行表征,表明细根 C 含量和 N/P 比与细根的生理代谢活性的关联性较弱。

本研究中根尖的 N、P、N/P 相比于整个细根更接近于叶片,这与一些研究发现在细根系统中只有末端的分支与叶片在营养获取和寿命上具有相似性的结果相似^[4,11],这可能是由于根尖和叶片均属于生理代谢最旺盛的组织有关。根尖(1 级根)是细根中生长和生理最活跃的部分,对土壤养分有效性变化十分敏感^[27],因而通过采用根尖 N/P 可以较好地反映树种受土壤元素的限制状况。与之相比,由于各分支细根养分异质性的存在,采用整个细根系统的养分含量指标树种受养分限制情况可能存在较大偏差。本研究中采用根尖判断树种受养分限制的结果与通过叶片判定的结果有一定差别。同时,本研究中根尖与叶片 N、P、N/P 之间并没有显著的相关性。其原因除了与本研究中样本数(仅 6 个树种)偏少有关外,还可能与本研究中 6 种森林群落处于相似的立地条件导致缺乏土壤养分有效性梯度有关。已有的细根与叶片养分具有相关性的研究中,所选择的研究对象均具有较大的养分有效性梯度,由于根系和叶片均对这种养分有效性梯度作出同向响应,因而两者之间表现出显著的相关性。如 Craine 等^[8]对新西兰 30 种草本植物的研究,Tjoelker 等^[9]对美国 39 种草本和木本植物的研究,周鹏等^[26]对内蒙古 42 种草本植物的研究,均是多地点或多物种的研究,因此具有较大的养分梯度,叶片和细根的 N、P 含量都表现出正相关性。本研究中 6 个树种生长在相似的立地条件下,叶片和根系的生理过程及其对养分需求的种间差异可能得到突显,从而削弱和掩盖了根与叶之间养分的这种关联性。而徐冰等^[28]对内蒙古锡林河流域草原的研究发现在相对一致的生态境中,植物叶片和细根性状在不同物种之间也具有关联性,因此,根系与叶片之间性状的相关性,今后还需要在种内、种间、立地间及生物群区间等不同研究尺度上深入开展。

5 结论

6 种种根细根 N、P 含量随序级升高而下降,C/N 随序级升高而升高,C 含量和 N/P 随序级变化并未表现出明显的变化规律,但总体来说都直接证明细根养分在不同序级间存在一定的异质性,这种分配格局与根的代谢活动强弱有关。另外,本研究中树种及与序级的交互作用对养分具有显著的影响,表明细根的养分异质性在不同树种中具有不同表现,进一步说明把细根视作整体将引起树种间的可比性问题。而通过对 N/P 的分析可以看出本区常绿阔叶林生长更易受到 P 素的限制。

本研究中较高级根 C、N 含量之间具有耦合关系,较低级根中 N、P 含量间具有耦合关系,同时 C/N、N/P 的变化主要由 N 含量变化决定。细根比根长和细根 N、P 含量以及 C/N 均显著相关,而与 C 含量和 N/P 相关性较差,也表明细根 C 含量和 N/P 与细根生理代谢活性的关联性较弱。

6 种种根根尖 N、P 含量及 N/P 相比于整个细根更接近于叶片,这可能与根尖和叶片均属于生理代谢最旺盛的组织有关。同时本研究中细根根尖与叶片 N、P 含量以及 N/P 之间并没有显著的相关性,这可能与本研究中选择树种偏少以及 6 种森林群落处于相似的立地导致缺乏土壤养分有效性梯度有关。而有关根系和叶片之间性状的相关性在今后还需要在不同尺度上进行更深入的研究。

References:

- [1] Caldwell M M. Competition between root systems in natural communities // Gregory P J, Lake J V, Rose D A, eds. Root Development and Function. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [2] Vogt K A, Grier C C, Gower S T, Sprugel D G, Vogt D J. Overestimation of net root production: a real or imaginary problem? Ecology, 1986, 67 (2): 577-579.
- [3] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. Ecology, 2000, 81(1): 275-280.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature*, 1993, 361(6407): 59-61.
- [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] Craine J M, Lee W G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal gradient in New Zealand. *Oecologia*, 2003, 134(4): 471-478.
- [9] Tjoelker M G, Craine J M, Wedin D, Reich P B, Tilman D. Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. *New Phytologist*, 2005, 167(2): 493-508.
- [10] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, Enquist B J. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants. *The American Naturalist*, 2006, 168(4): E103-E122.
- [11] Withington J M, Reich P B, Oleksyn J, Eissenstat D M. Comparisons of structure and life span in roots and leaves among temperate trees. *Ecological Monographs*, 2006, 76(3): 381-397.
- [12] Newman G S, Hart S C. Nutrient covariance between forest foliage and fine roots. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(2/3): 136-141.
- [13] Yan E Y, Wang X H, Zhou W. N: P Stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, east China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 13-22.
- [14] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 938-945.
- [15] Li A, Guo D L, Wang Z Q, Liu H Y. Nitrogen and phosphorus allocation in leaves, twigs, and fine roots across 49 temperate, subtropical and tropical tree species: a hierarchical pattern. *Functional Ecology*, 2010, 24(1): 224-232.
- [16] Chang W J, Guo D L. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [17] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(1): 1-68.
- [18] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, 5(1): 37-61.
- [19] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 372-384.
- [20] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N: P values: predicting nutrient deficiencies in desert shrublands. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 59-69.
- [21] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [22] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [23] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.
- [24] Zhang D H, Ye Z F, Luo S F. The preliminary study on P-Adsorption and P-Desorption in Fujian Mountain red soils. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(1): 19-24.
- [25] Reich P B, Walters M B, Tjoelker M G, Vanderklein D, Buschena C. Photosynthesis and respiration rates depend on leaf and root morphology and nitrogen concentration in nine boreal tree species differing in relative growth rate. *Functional Ecology*, 1998, 12(3): 395-405.
- [26] Zhou P, Geng Y, Ma W H, He J S. Linkages of functional traits among plant organs in the dominant species of the Inner Mongolia grassland, China. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 7-16.
- [27] Yu L Z, Ding G Q, Zhu J J, Zhang N, Zhang X P, Ying H. Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders' fine roots in *Larix kaempferi* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 747-753.
- [28] Xu B, Cheng Y X, Gan H J, Zhou W J, He J S. Correlations between leaf and fine root traits among and within species of typical temperate grassland in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 29-38.

参考文献:

- [13] 阎恩荣,王希华,周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 13-22.
- [14] 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.
- [16] 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. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [24] 张鼎华,叶章发,罗水发. 福建山地红壤磷酸离子 ($H_2PO_4^-$) 吸附与解吸附的初步研究. *山地学报*, 2001, 19(1): 19-24.
- [26] 周鹏,耿燕,马文红,贺金生. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 7-16.
- [27] 于立忠,丁国泉,朱教君,张娜,张小朋,英慧. 施肥对日本落叶松不同根序细根养分浓度的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 747-753.
- [28] 徐冰,程雨曦,甘慧洁,周文嘉,贺金生. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 29-38.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grailipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《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 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 14 (July, 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@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.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