

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
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 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于 洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	方 舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	谭向峰, 杜 宁, 葛秀丽, 等 (5998)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	王莉雯, 卫亚星 (6006)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	张 亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	吕晋慧, 王 玄, 冯雁梦, 等 (6033)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	顾 韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	张 荣, 刘 彤 (6056)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	李 茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
北京山区防护林优势树种分布与环境的的关系	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	熊 君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	黄 林, 王 峰, 周立江, 等 (6110)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	王树芹, 赖 娟, 赵秀兰 (6128)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
.....	孙特生, 李 波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁 宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾 玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于 非, 王 吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江 鑫, 赛 珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋 敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

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

DOI: 10.5846/stxb201108281254

黄林,王峰,周立江,黄茹,齐代华,魏刚. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系. 生态学报, 2012, 32(19): 6110-6119.

Huang L, Wang F, Zhou L J, Huang R, Qi D H, Wei G. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6110-6119.

不同森林类型根系分布与土壤性质的关系

黄 林¹, 王 峰², 周立江^{2,*}, 黄 茹^{1,3}, 齐代华¹, 魏 刚¹

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715;

2. 四川省林业调查规划院 四川成都, 610081; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:在红壤丘陵区选取 8 种典型森林类型, 对不同土层深度、不同径级的根长密度分布特征、根长分维数, 以及根系特征与土壤容重、有机碳、全氮的关系进行了研究。结果表明: 马尾松低效林根长密度最小, 杉木低效林和湿地松林较大, 表层土壤根长密度与灌草覆盖度显著相关($r=0.793, P<0.05$)。各种森林类型的根长密度随着土壤深度的增加均表现为递减规律, 但随深度的增加, 不同森林类型的差异逐步缩小, 且植物种类及生长状况对根长密度分布的影响越来越小。在相同的土层中, 根长密度随径级的变化并不一致, 马尾松低效林 $0<L\leq 0.2$ mm 径级根长密度最大, 其他类型各土层均表现为 $0.2<L\leq 0.5$ mm 径级根长密度最大的偏峰曲线特征。各径级根长密度随土层加深也表现为递减趋势, 根系径级越大, 表层与底层的根长密度差异越明显。根长密度与容重呈显著负相关, 与有机碳、全氮呈极显著正相关, 说明根长密度越大, 既有利于改良土壤结构性状, 也有利于丰富土壤有机碳和全氮含量; 从不同径级来看, 径级 1—2 mm 根系对改良土壤结构和增加土壤有机碳、全氮含量作用最为显著, 径级 ≤ 1.0 mm 的根系对土壤性状改良作用不明显。各森林类型的根长分维数在 2.0973—2.6063 之间, 分维数越大, 根系长度更集中分布于 0—0.2 mm 径级内, 根长分维数反映了不同径级范围根系长度的组成状况。

关键词:根系分布; 根长密度; 分维数; 容重; 有机碳; 全氮

Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties

HUANG Lin¹, WANG Feng², ZHOU Lijiang^{2,*}, HUANG Ru^{1,3}, QI Daihua¹, WEI Gang¹

1 Key-Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Sichuan Forest Inventory and Planning Institute, Chengdu Sichuan, 610081, China

3 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Fine roots are the core of the belowground ecological processes and play an important role in tree root systems. Fine roots are the major organ trees use to absorb water and nutrients. They play an important and significant role in the processes of carbon allocation and nutrient cycling of forested ecosystems. Therefore, an understanding of the structure and function of root systems allows us to enhance forest ecosystem productivity and to understand the way available resources are used belowground.

No single, widely accepted definition of what makes up a fine root exists, although most researchers refer to roots ≤ 2 mm in diameter as fine roots. We studied eight forest types in a hilly red soil area in South China during the 2010 growing season. We measured important root characteristics at a variety of soil depths such as the distribution of RLD (root length density) in several size (diameter) classes, fractal dimensions and the relationships between RLD and soil bulk density,

基金项目:国家林业局生物措施治理水土流失试点项目(04908)

收稿日期:2011-08-28; **修订日期:**2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljz699@163.com

and between soil organic carbon and total nitrogen. The results indicate *Pinus massoniana* low-benefit forest (PMLF) has the lowest RLD, but larger densities were found in Chinese fir low efficiency forest (CLF) and *Pinus elliottii* forest. The RLD in topsoil was significantly correlated to the shrub-herb layer coverage ($r=0.793$, $P<0.05$). RLD of all forest types decreased with the increasing of soil depth. The effects of plant species and growth conditions on RLD declined with increasing soil depth. Also, the differences of RLD among forest types gradually decreased as soil depth increased. In the different habitats, no obvious changes were found between RLD and diameter class in the same soil layer. The RLD in the 0 to ≤ 0.2 mm diameter class was the highest in *Pinus massoniana* Low-benefit Forest (PLF), and the RLD usually peaked in the 0.2 to ≤ 0.5 mm diameter class in all forest types except *Pinus massoniana* Low-benefit Forest (PLF). RLD in all diameter classes all declined as soil depth increased. As root diameter increased, the differences of RLD increased significantly in the shallowest soil layer and in the deepest soil sample. Correlation analysis indicated RLD was significantly correlated with soil organic carbon and total-N, while there was a negative correlation between RLD and soil bulk density. RLD in the 1—2 mm diameter class had a significant impact on soil structure, soil organic carbon and total-N accumulation. The fractal dimensions of root length ranged from 2.0973 to 2.6063 in all forest types. Samples with fractal dimensions had higher concentrations of roots in the 0—0.2 mm diameter length class. This suggests the succession process of the root system not only affected by plant genetic characteristics and climate factors, but it also influences soil quality; and its various characteristics were also closely related. The function of roots in improving soil structure or increasing nutrient availability would be weakened if the diameter class was too large or too small with the same root length. Therefore, ecological management and forest development should include the consideration of root characteristics. Forest stand structure, which consists of trees, shrubs and herbs, should be managed in a way which enhances ecological system functions and increases and maintains soil productivity.

Key Words: bulk density; fractal dimension; organic carbon; root distribution; root length density (RLD); total nitrogen

森林根系系统具有巨大的吸收表面积,是植物吸收水分和养分维持生长的主要器官^[1]。在森林生态系统的养分循环与碳分配中起十分重要的作用,通过根系周转进入土壤的有机物是地上凋落量的数倍,如果忽略根系的生产、死亡和分解,土壤有机物质和养分元素的周转将被低估 20%—80%^[2-4]。根系功能的发挥与其数量、分布、寿命、形态和构型密切相关,而这些特征受植物自身特性、植被构成及立地条件等的影响,同时根系对土壤质量及环境变化的反应也较为敏感^[5-6]。因此,根系既是森林植被净初级生产力重要的“汇”^[7-8],同时也是土壤碳和养分主要的“源”^[9-11],了解根系在土壤系统中的结构组成、分布规律是认识森林碳平衡与养分循环的基础^[12]。

国内外学者提出以根密度、根生物量来研究植物根系在土壤中的分布状况及其与土壤性质的关系,结果表明根系能够改良土壤性状^[13-15]。而随着实验技术的进步,根表面积、根长密度、根体积密度、比根长等指标都被用于研究植物根系分布特征及其与土壤性状的关系^[16-20],并取得了一定的研究成果,众多研究证明:根系长度能更好的反映根系在土体中的密稠度和交织穿插、缠绕能力,且更为直观又易于测量^[21-22],但目前国内研究者对此关注较少^[23]。因此,本文选择了红壤丘陵区常见的 8 种森林类型,研究根系的分布格局、组成状况及与土壤性质的关系,试图探究以下问题:(1)红壤丘陵区不同森林类型的根长密度分布特征;(2)不同径级根长密度的组成与分布特征;(3)初步提出不同径级根长组成状况的定量评价指标;(4)分析根系长度变量与土壤性质的关系。希望通过此研究,能更深入地了解根系组成、分布规律及其与土壤因子的相互关系,为该区植被恢复、森林培育和生态建设提供基础依据。

1 研究区概况

研究区位于江西省信丰县崇墩沟,属低山丘陵地貌,地势较为平缓,海拔 180—495 m 之间,坡度多在 10—30°之间。土壤主要为红壤、黄红壤。土层厚度一般在 50—80 cm,有机质含量较低。气候属亚热带湿润

季风气候,年平均气温 19.5℃,极端最高温 39.4℃,极端最低温-4.1℃,年降水量 1517.3 mm,70% 的降雨集中在 4—9 月,年均蒸发量 1246 mm,相对湿度 77%,无霜期 298d,大于 10℃ 积温在 5088—6019°之间。主要的乔木树种为马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、湿地松 (*Pinus elliotii*)、木荷 (*Schima superba*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)、喜树 (*Camptotheca acuminata*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*)、桉树 (*Eucalyptus robusta*) 等;竹类有毛竹 (*Phyllostachys pubescens*)、黄竹 (*Dendrocalamus membranaceus*)、方竹 (*Chimonobambusa quadrangularis*) 等;灌木有胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、欏木 (*Loropetalum chinensis*)、三叶赤楠 (*Syzygium grijsii*)、山茶 (*Camellia japonica*)、油茶 (*Camellia oleifera*)、盐肤木 (*Rhus chinensis*) 等;草本植物主要为芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)、鹧鸪草 (*Eriachne pallescens*)、芒 (*Miscanthus sinensis*)、蕨类 (*Pteridophyta*) 等。

2 研究方法

2.1 样地选择与根系调查

针对研究区的主要森林类型,2010 年 8 月,选择相似海拔梯度、同一坡向的马尾松低效林 (*Pinus massoniana*)、马尾松+木荷混交林 (*Pinus massoniana* + *Schima superba*)、马尾松+杉木混交林 (*Pinus massoniana* + *Cunninghamia lanceolata*)、湿地松纯林 (*Pinus elliotii*)、杉木低效林 (*Cunninghamia lanceolata*)、杉木+枫香混交林 (*Cunninghamia lanceolata* + *Liquidambar formosana*)、火烧迹地(原为杉木人工林,火烧 28 个月)、木油桐纯林 (*Aleurites montana*) 8 种森林类型,在林地内选择典型地带,并分别设置 20 m×20 m 的样地,用 GPS 定位,每木检尺后,对植被和土壤类型进行调查。样地基本情况见表 1。

根系取样采用剖面法,在每个样地内根据离树的距离随机选取 5 个取样点,从土壤表层向下按 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 分层,用钢制圆形环刀水平向下取土样,将取出的土壤样品放入灭菌处理过的密封袋内带回,在实验室对取回的每个根系样品先浸泡 24 h 后,用筛孔为 0.2 mm 的筛子在流水中冲洗。将根系放入装有蒸馏水的蒸发皿中,用镊子将根系从杂质中分离出来,然后采用 EPSON LA 2400 在 400dpi 下对根系进行灰度扫描,应用“WinRHIZO 根系分析系统”软件对根系长度及不同径级的根长密度进行分析。

2.2 土壤因子的测定

在采集根系样品同时,在不同层次取土壤 500—1000 g 用于土壤化学性质分析。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化法;全氮采用半微量开氏法测定;土壤容重采用环刀法测定。

2.3 根长分维数计算

通过对根系长度径级分形特征的研究,描述各径级根系的构成关系,反映不同森林类型土壤中根系的级配组成,使相同土体单元内不同径级的根系长度这一特征描述更为简化和直观。通过采用 Turcotte 提出的分维数^[24],以根长密度与平均径级的关系计算根长径级分维数,公式:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}$$

式中, D 表示不同径级的根长分维数, $\bar{d}_i$ 表示相邻两个径级 d_i 与 d_{i+1} 的平均值, $\bar{d}_{\max}$ 表示最大径级根系的平均直径, $W(\delta < \bar{d}_i)$ 表示小于径级 d_i 的累积根系长度, W_0 表示各径级根系长度的总和。最后,分别以

$\lg\left(\frac{W_i}{W_0}\right)$ 、 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)$ 为纵、横坐标,用回归分析计算分维数,采用相关系数反映回归分析的相关性。

实验数据用 Excel 2007 进行初步统计分析、分形维数的计算、作图,并以 SPSS 13.0 统计软件进行相关分析、回归分析及回归方程的拟合。

表 1 不同森林类型样地调查基本情况

Table 1 The basic situation of standard plots in different forest types									
林分类型 Stand type	主要树种 Main species	林龄 Age /a	平均树高 Mean height / m	平均冠幅 Mean canopy width / m	平均密度 Mean density /(个/hm ²)	郁闭度 Canopy width	土厚 Soil depth / cm	主要灌木、草本植物 Main shrub and herb species	林下植被盖度/% Cover degree under stand
马尾松低效林 ^① PLF	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> sn	27	5.3	1.7×1.8	1775	0.35	60	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> , 芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	30
马尾松+木荷混交林 ^② PSMF	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> sn, 木荷 <i>Schima superba</i>	20	4.3	1.6×1.8	2600	0.48	85	三叶赤楠 <i>Syzygium grijsii</i> , 榿木 <i>Loropetalum chinense</i> , 芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	88
马尾松+杉木混交林 ^③ PCMF	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> sn, 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	27	9.2	4.2×4.3	1750	0.71	80	三叶赤楠 <i>Syzygium grijsii</i> , 芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	80
湿地松纯林 ^④ PPF	湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	25	13.3	2.8×3.0	2050	0.68	80	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> , 米碎木 <i>ilex godajam</i>	93
杉木低效林 ^⑤ CLF	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	21	2.9	1.4×1.2	2000	0.42	88	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> , 杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	96
杉木+枫香混交林 ^⑥ CLMF	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , 枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	21	7.9	4.6×4.3	1750	0.66	84	榿木 <i>Loropetalum chinense</i> , 淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	82
火烧迹地 ^⑦ CFBA							80	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> , 芒 <i>Miscanthus sinensis</i> , 蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	70
木油桐纯林 ^⑧ APF	木油桐 <i>Aleurites montana</i>	26	16.6	7.5×6.6	625	0.70	86	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> , 竹叶草 <i>Oplismenus compositus</i> , 蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	90

① *Pinus massoniana* Low-benefit Forest; ② Mixed Forest of *Pinus massoniana*sn and *Schima superba*; ③ Mixed Forest of *Pinus massoniana*sn and *Cunninghamia lanceolata*; ④ *Pinus elliotii* Pure Forest; ⑤ *Cunninghamia lanceolata* Low-benefit Forest; ⑥ Mixed Forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana*; ⑦ *Cunninghamia lanceolata* Forest Burned Areas; ⑧ *Aleurites montana* Pure Forest

3 结果与分析

3.1 各森林类型根长密度分布特征

3.1.1 不同森林类型根长密度横向对比

根系在不同土壤深度的分布与植物种类(深根、浅根)、土壤的结构及其养分、水分的分配密切相关^[25-26]。根长密度(RLD)是单位土壤体积所含根系的长度,反映在某一土壤层的根系伸展量^[27]。红壤丘陵区不同森林类型的根长密度的对比显示:马尾松低效林在各土层的根长密度均最小。0—10 cm 土层,根长密度主要受到浅根性植物的影响,杉木低效林根长密度最大(3005.82 cm/100cm³),其次为湿地松林(2612.85 cm/100cm³),其值分别是马尾松低效林的3.8倍和3.3倍,原因是其林下以芒萁为主的草本覆盖度均达到了90%以上,使其表层土壤中的根系长度较大,根长密度与灌草覆盖度的相关系数达到0.793,在 $P<0.05$ 的水平上显著。10—20 cm 土层,湿地松林根长密度最大(1297.46 cm/100cm³),在20—40 cm、40—60 cm 及60—80 cm 土层,均是马尾松+木荷混交林根长密度最大,分别为759.24 cm/100cm³、734.03 cm/100cm³、489.30 cm/100cm³,该林分群落结构较完整,灌草层覆盖度88%,林下物种主要有三叶赤楠、檫木、油茶、菝葜、莢蒾等灌木和芒、珍珠茅、青茅等草本植物,物种多样性水平较高,这些都对根系在地下各层的均匀分布极为有利。

3.1.2 不同森林类型根长密度垂直分布

从图1可以看出,各森林类型的根系集中分布在0—10 cm 土层,其根长密度是10—20 cm 土层的1.7—4.1倍,是60—80 cm 土层的3.4—42.9倍。随着土层深度的增加,各种森林类型的根长密度均表现为递减趋势,选用多种曲线对根长密度随土层的变化进行拟合,发现根长密度随土层深度表现为指数函数或幂函数的递减规律,这与李勇、张小全、杨丽韞等研究结果相似^[15,28-29]。不同类型根长密度与土壤深度变化关系式见表2,分析表明,所有关系式均在 $P<0.01$ 的水平上极显著,相关系数在-0.997—-0.971之间。不仅根长密度随着土壤深度的增加而减小,而且从不同类型各土层标准误差分布(图1)也可以看出,从0—10 cm 到60—80 cm 土层,根长密度的标准误差逐级减小,分别为270.33、105.29、75.55、70.09、53.65,表明了随着土层深度的增加,不同森林类型根长密度的差异程度逐步缩小,植物种类及生长状况对根长密度分布的影响也随土层深度减小。

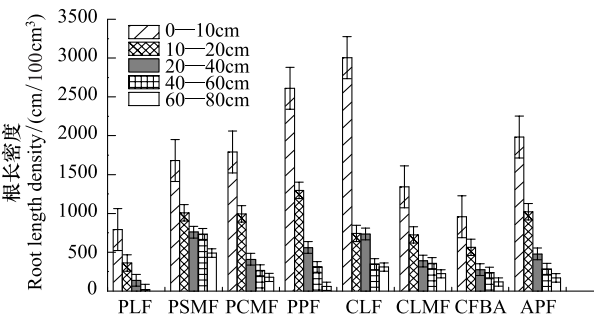


图1. 各森林类型不同土层深度根长密度

Fig. 1 RLD in different soil depth of different forest types

PLF: 马尾松低效林 *Pinus massoniana* Low-benefit Forest; PSMF: 马尾松+木荷混交林 Mixed Forest of *Pinus massoniana* + *Schima superba*; PCMF: 马尾松+杉木混交林 Mixed Forest of *Pinus massoniana* + *Cunninghamia lanceolata*; PPF: 湿地松纯林 *Pinus elliotii* Pure Forest; CLF: 杉木低效林 *Cunninghamia lanceolata* Low-benefit Forest; CLMF: 杉木+枫香混交林 Mixed Forest of *Cunninghamia lanceolata* + *Liquidambar formosana*; CFBA: 火烧迹地 *Cunninghamia lanceolata* Forest Burned Areas; APF: 木油桐纯林 *Aleurites montana* Pure Forest

表2 各森林类型根长密度与土层深度变化的关系式

Table 2 The models of RLD and soil depth in different forest types

森林类型 Stand type	关系式 Equation	相关系数 Correlation coefficient	森林类型 Stand type	关系式 Equation	相关系数 Correlation coefficient
PLF	$f = 3493.6e^{-1.2217h}$	-0.974 **	PSMF	$f = 1679.6h^{-0.7031}$	-0.980 **
PCMF	$f = 3031.3e^{-0.5945h}$	-0.989 **	PPF	$f = 7528.3e^{-0.8946h}$	-0.981 **
CLF	$f = 2659.0h^{-1.3846}$	-0.971 **	CLMF	$f = 1398.6h^{-1.0821}$	-0.988 **
CFBA	$f = 1527.9e^{-0.5062h}$	-0.987 **	APF	$f = 3472.5e^{-0.6189h}$	-0.997 **

** 表示相关性达极显著水平($P<0.01$); * 表示相关性达显著水平($P<0.05$)

3.2 不同径级根长密度分布特征

各森林类型中不同径级的根长密度差异较大,从相同土层来看,不同森林类型的根长密度随径级增大表

现不一致,马尾松低效林中根长密度最大的径级为 $0 < L \leq 0.2$ mm,根长密度随着径级增大而依次减小,其原因可能是该森林类型物种组成单一,进而影响了根系在不同土层的分布。其他森林类型各土层均以 $0.2 < L \leq 0.5$ mm 径级的根长密度最大,且表现为偏峰曲线的特征;从土壤表层来看,马尾松低效林差异最大,最大根长密度是最小值的 306.1 倍,其他依次为杉木火烧迹地(66.8 倍)、杉木低效林(34.4 倍)、木油桐林(26.4 倍)、杉木+枫香混交林(25.0 倍)、马尾松+木荷混交林(23.8 倍)、马尾松+杉木混交林(21.7 倍)、湿地松纯林(3.4 倍)。

各森林类型不同径级根长密度的垂直分布见图 2,可以看出,从土壤表层向下,不同径级的根长密度随土层深度增加总体表现为递减趋势。 $0 < L \leq 0.2$ mm 径级根系:0—10 cm 土层的根长密度分别是底层 3.3—46.8 倍,马尾松+木荷混交林差异最小,马尾松低效林差异最大; $0.2 < L \leq 0.5$ mm 径级根系:表层土壤根长密度是底层 2.6—34.1 倍,表层与底层根长密度的差异较其他径级较小; $0.5 < L \leq 1.0$ mm 径级根系:表层土壤根长密度是底层 4.5—68.6 倍; $1.0 < L \leq 2.0$ mm 径级根系:表层土壤根长密度是底层 17.3—15284.8 倍; $2.0 < L$

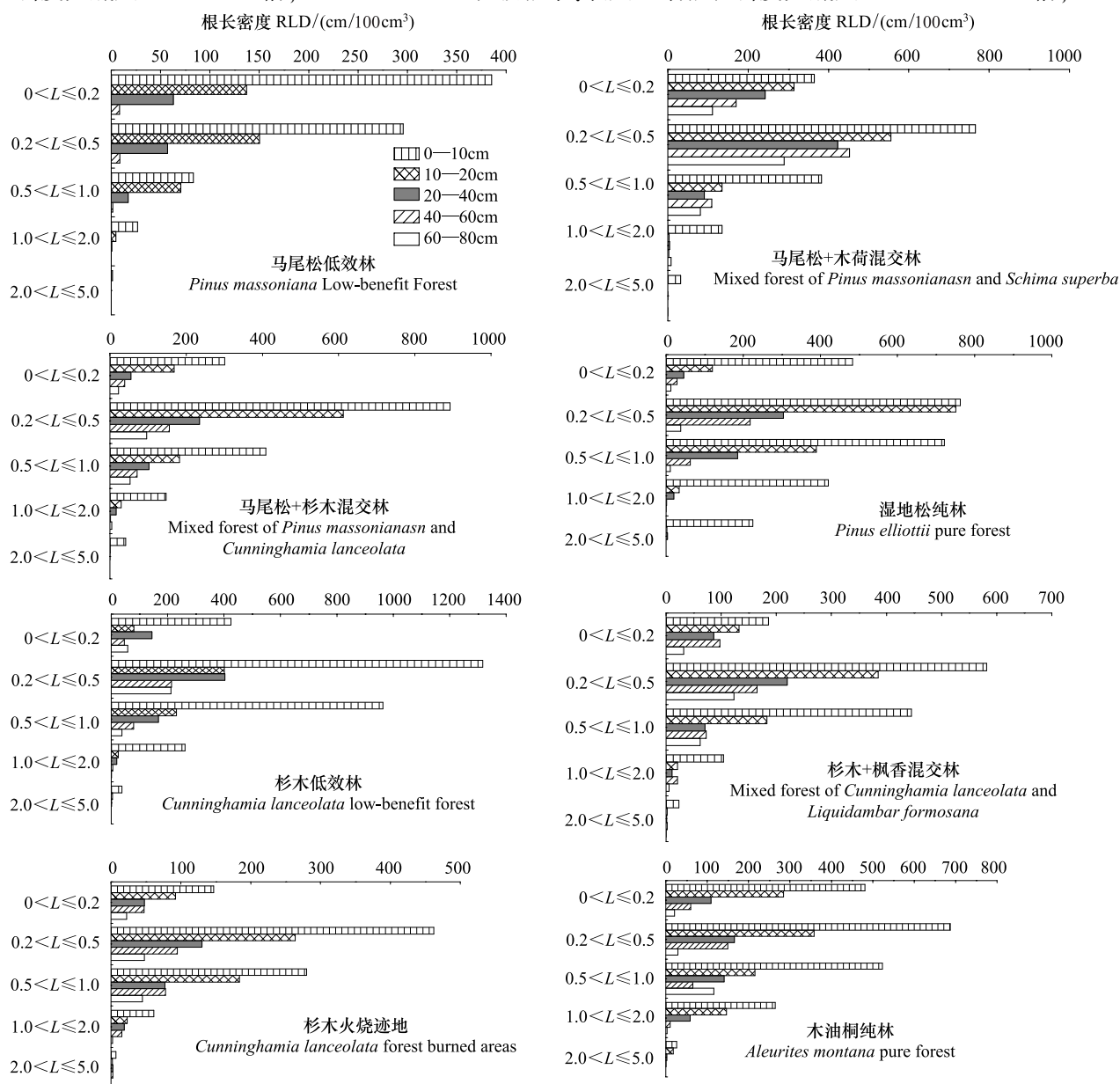


图 2 8 种森林类型不同径级根长密度的垂直分布

Fig2. Vertical distribution of RLD in different diameter classes of 8 forest types

≤ 5.0 mm 径级根系:表层土壤根长密度是底层 396.6 倍到无穷大。表明在研究的森林类型中,根系径级越大,土壤表层与底层的根长密度差异也越明显。

3.3 不同森林类型各土层根长分维数

不同森林类型下根长分维数反映了各径级根系的组成状况,分维数越小,说明不同径级根系的组成分布越均匀,反之,则表明根系在不同径级的分布不均匀。各类型不同土层根长密度的分维数及相关系数见表 3,可以看出,不同类型根长分维数在 2.0973—2.6063 之间,马尾松低效林在 0—60 cm 土层的分维数均最大,表明该类型不同径级根系的分布极不均匀,主要分布于径级 ≤ 0.2 mm 的范围内,这与其地表物种组成单一、灌草覆盖度低有直接关系。不同森林类型根长分维数最小值在不同土层深度表现不一致,在 0—10 cm 土层,杉木+枫香混交林的根长分维数最小(2.2375),说明不同径级根系长度分布均匀,这主要是由于灌草层物种丰富、覆盖度较高的影响;在 10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层,以湿地松林的分维数最小,根系长度在不同径级内的分布比较均匀,其值分别为 2.1331、2.0973 和 2.1415;60—80 cm 土层,以马尾松+木荷混交林分维数最大,其值为 2.3868;分维数最小的是木油桐林(2.1620)。不同森林类型分维数的对比表明,植物种类丰富、植被空间结构配置合理的类型,其不同径级的根长分布更加均匀,分维数也越小。从实验分析结果也可以看出,根长分维数的大小反映了不同径级范围根系长度的组成状况,可以作为不同径级的根系长度组成状况的定量评价指标。

表 3 不同森林类型各土层的根长分维数及相关系数

Table 3 Fractal dimension of root length and correlation coefficient of different soil depth in different forest types

林分类型 Stand type	土层深度 Soil depth / cm				
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80
马尾松低效林	2.6063	2.5287	2.5873	2.5796	
	0.8989 *	0.9107 *	0.8944 *	0.8868 *	
马尾松+木荷混交林	2.3716	2.4780	2.4849	2.3941	2.3868
	0.9269 **	0.8953 *	0.8934 *	0.8949 *	0.9002 *
马尾松+杉木混交林	2.3022	2.3066	2.2361	2.2594	2.2141
	0.9227 **	0.9016 *	0.9096 *	0.9066 *	0.9133 *
湿地松纯林	2.3328	2.1331	2.0973	2.1415	2.3631
	0.9596 **	0.9075 *	0.9121 *	0.8889 *	0.8968 *
杉木低效林	2.2432	2.1746	2.3425	2.2421	2.3430
	0.9325 **	0.9140 *	0.9105 *	0.9022 *	0.8882 *
杉木+枫香混交林	2.2375	2.3212	2.3807	2.4356	2.2539
	0.9326 **	0.9139 *	0.9055 *	0.9201 **	0.9119 *
火烧迹地	2.2690	2.2824	2.3020	2.3355	2.3202
	0.9246 **	0.9254 **	0.9262 **	0.9359 **	0.9320 **
木油桐纯林	2.3974	2.4411	2.3775	2.3612	2.1620
	0.9462 **	0.9440 **	0.9459 **	0.9141 *	0.9570 **

** 表示相关性达极显著水平($P < 0.01$); * 表示相关性达显著水平($P < 0.05$)

3.4 根系特征与土壤性质相关关系

植物根系通过物理作用和分泌的有机物质,在土体中穿插、缠绕来分散、串联、固结土壤颗粒,在土壤中形成的孔隙可增加渗透性和土壤动物的生存空间,有利于土壤有机物积累和丰富土壤生物多样性。同时,根系通过吸收作用可以反映出土壤中养分和水分的分配格局^[30],并且自身的生长和延伸也会对土壤养分、水分梯度及其它特征做出响应^[31]。采用 Pearson 典型相关分析研究土壤容重、有机碳、全氮与根长密度、分维数及不同径级根长所占比例的关系(表 4)。

(1) 土壤容重与 $1.0 < L \leq 2.0$ mm、 $2.0 < L \leq 5.0$ mm 径级的根系所占比例均呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.589、-0.486,土壤容重受径级 1—2 mm 根系长度的影响最为明显,根系直径越小对土壤容重的影响

越不明显。容重与根长密度总体表现为显著负相关($r=-0.501$),与有机碳、全氮含量呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.740 、 -0.689 。

(2)土壤有机碳、全氮与根长密度均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.777 、 0.595 。径级 $1.0<L\leq 2.0$ mm 和 $2.0<L\leq 5.0$ mm 的根长所占比例对丰富土壤有机碳有重要贡献,相关系数分别为 0.543 和 0.539 ,同时也促进了全氮含量的积累,相关系数分别为 0.753 和 0.646 ,而径级 ≤ 1.0 mm 的根系对土壤有机碳和全氮富集没有显著作用。土壤全氮含量受到有机碳积累的直接影响,相关系数达到 0.829 。

(3)根长密度与分维数、小径级($L\leq 1.0$ mm)根长所占比例的关系不明显,根长密度与径级 $1.0<L\leq 2.0$ mm 和 $2.0<L\leq 5.0$ mm 的根长所占比例呈极显著正相关,相关系数分别为 0.652 、 0.661 。

(4)根长分维数与径级 $0<L\leq 0.2$ mm 根长所占比例极显著相关($r=0.965$),表明分维数越大,根系长度集中分布于 $0-0.2$ mm 径级内;分维数与径级 $0.5<L\leq 1.0$ mm 根长所占比例呈负相关关系,表明中间径级的根长度越大,根长在不同径级内的分配趋向于均匀化。

表4 土壤性质与根系特征及不同径级根长所占比例的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of soil characteristics and the root parameters, percentage of root length in different DC

项目 Item	根长密度 /(cm/100cm ³) RLD	容重/(g/cm ³) Soil bulk density	有机碳/% Soil organic C	全氮/(g/kg) Soil total nitrogen	根长分维数 Fractal dimension of root length
容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	-0.501 *	1			
有机碳 Soil organic C/%	0.777 **	-0.740 **	1		
全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	0.595 **	-0.689 **	0.829 **	1	
分形维数 Fractal dimension	-0.088	-0.010	-0.117	-0.009	1
$P_{0<L\leq 0.2}$	-0.135	-0.014	-0.126	-0.015	0.965 **
$P_{0.2<L\leq 0.5}$	-0.266	0.499 **	-0.074	-0.409	-0.228
$P_{0.5<L\leq 1.0}$	0.056	-0.291	0.000	0.170	-0.654 **
$P_{1.0<L\leq 2.0}$	0.652 **	-0.589 **	0.543 **	0.753 **	-0.032
$P_{2.0<L\leq 5.0}$	0.661 **	-0.486 **	0.539 **	0.646 **	-0.039

* * 表示相关性达极显著水平($P<0.01$); * 表示相关性达显著水平($P<0.05$)

4 结论与讨论

根系具有向地、向水和向肥生长的特性,完善的根系系统是植物地上部分能够良好生长的基础条件,同时植物的根系在土壤不同深度的分布因植物种类及生存环境的变化而有所差异。研究不同森林类型根系的分布特征和径级组成状况及其与土壤性质的关系,可以深入了解植物与相关生态因子之间的相互关系。

本文所研究的8种森林类型,表层土壤根长密度与灌草覆盖度表现为显著相关($r=0.793$, $P<0.05$),马尾松低效林由于植被覆盖度低,各土层的根长密度均最小; $0-10$ cm 土层,杉木低效林根长密度最大(3005.82 cm/100cm³),是前者的3.8倍,这主要是根茎匍匐于表层土壤的芒萁覆盖度达到90%以上,直接增加了表层土壤中的根系长度。各种森林类型的根长密度随着土层深度的增加均表现为递减规律,这与前人的研究结论一致^[28-29],但不同森林类型根长密度的差异在逐步缩小,表明了土层越深,植物种类及生长状况对根长的影响也越小。

在相同的土层中,不同森林类型根长密度随径级的变化并不一致,马尾松低效林 $0<L\leq 0.2$ mm 径级根长密度最大,随着径级增大而减小;其他类型各土层均表现为 $0.2<L\leq 0.5$ mm 径级根长密度最大的偏峰曲线特征。从土壤表层向下,各径级根长密度也表现为递减趋势,但根系径级越大,土壤表层与底层的根长密度差异越明显。

分形维数可以描述不同等级变量的组成与分配情况,且更为简化和直观。尝试采用分维数研究不同径级的根系组成,分维数越小,说明不同径级根长的分布越均匀,反之,根系在不同径级的分布越不均匀。本研究中,红壤丘陵区8种典型森林类型根长分维数在 $2.0973-2.6063$ 之间,马尾松低效林在各土层中的根长分维

数均最大,但分维数最小值在各林型表现不一致,可以看出,灌草覆盖度高、物种丰富、乔灌草空间配置合理的杉木+枫香混交林、湿地松林、木油桐林的根长分维数相对较小,不同径级范围内根长分配更为均匀。根长分维数与 $0 < L \leq 0.2$ mm 径级的根长密度关系最为密切,根系长度主要集中分布于 $0 < L \leq 0.2$ mm 径级之内,根长分维数反映了不同径级范围根系长度的组成状况,以其作为衡量根系长度按径级组成的定量评价指标具有一定的理论意义。

从根系特征与土壤性质的关系来看,根长密度越大,不仅有利于减小土壤容重,增加土壤孔隙含量,改良土壤结构性状,还有利于丰富土壤有机碳和全氮含量。对不同径级根长比例的分析表明,径级 1—2 mm 根系对改良土壤结构和增加土壤有机碳、全氮含量作用最为显著,而径级 ≤ 1.0 mm 的根系对土壤性状改良作用不明显。

通过对红壤丘陵区 8 种森林类型根系长度的横向对比与垂直分布的研究表明:杉木低效林和湿地松林表层土壤根长变量值较大,这是因为此两种林型的主要乔木树种为浅根性树种,其主根不明显,侧根发达,而林下的灌、草层覆盖度较高且也以浅根性植物为主;马尾松、木荷混交林下随土壤深度增加仍具有较高的根长变量值,这是由于其群落结构层次完整,浅根性植物与深根性植物种类丰富,通过对根长分维数进行的研究,发现分维数与 $0-0.2$ mm 径级的根长所占比例关系最为密切。

在植被-土壤系统中,根系是完成两者耦合作用的重要因子,同时根系系统的演替过程不仅受到植物遗传特性和气候等因子的影响^[22],也与土壤质量及其变异特性密切相关。在根系长度相同的情况下,径级过大或过小对土壤结构的改良或养分的增加作用都将减弱,因此,在该区域实施生态治理和森林培育的过程中,应考虑植物根系生物学特性,合理配置乔、灌、草等物种,既有利于增强森林生态系统功能,又可起到维护土壤生产力持续性的功效。

References:

- [1] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, 81(1): 275-280.
- [2] Vogt K A, Crier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forests. *Advance in Ecology Research*, 1986, 15: 303-377.
- [3] Mc Clagherty C A, Aber J D. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 1982, 63(5): 1481-1990.
- [4] Ruess R M, van Cleve K, Yarie J A, Viereck L A. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1326-1336.
- [5] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(12): 2507-2520.
- [6] Yu S Q, Wang Z Q, Shi J W, Quan X K, Mei L, Sun Y, Jia S X, Yu L Z. Estimating fine-root longevity of *Fraxinus Mandshurica* and *Larix Gmelinii* using mini-rhizotrons. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 102-109.
- [7] Guo Z L, Zheng J P, Ma Y D, Han S J, Li Q K, Yu G R, Fan C N, Liu W D, Shao D K. A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [8] 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 USA*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [9] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [10] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, Norman J M. Root mass, net primary production and turnover in Aspen, Jack pine and Black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology*, 1997, 17(8/9): 577-587.
- [11] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [12] King J S, Albaugh T J, Allen H L, Buford M, Strain B R, Dougherty P. Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 2002, 154(2): 389-398.
- [13] Bohm W. *Methods of Studying Root Systems*. Berlin, Herdelberg, New York: Springer-Verlag, 1979: 28-181.
- [14] Li Y, Xu X Q, Zhu X M, Tian J Y. Intensifying effect of herb roots on soil anti scouribility. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(3): 302-309.
- [15] Li Y, Wu S X, Xia Hou G F. Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in Purple Soil Region. *Journal of Soil Water Conservation*, 1998, 4(2): 1-7.
- [16] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 90-95.

- [17] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. Part I: laboratory study. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1167-1174.
- [18] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. Part II: field study. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1174-1181.
- [19] Wells C E, Glenn D M, Eissenstat D M. Changes in the risk of fine-root mortality with age: a case study in peach, *Prunus persica* (Rosaceae). American Journal of Botany, 2002, 89(1): 79-87.
- [20] Huang L, Zhou L J, Wang F, Huang R, Tian F, Qi D H, Tang Y H. Study on root biomass and carbon storage of different vegetation communities in Hilly Red Soil Region. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 61-66.
- [21] Xu S J, Zeng B, Lei S T, Su X L. Root features of several flooding-tolerant plants and their roles in enhancing anti-erodibility of the soil in Three Gorges Reservoir Region. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 160-167.
- [22] Wei L Y, Shang Guan Z P. Specific root length characteristics of three plant species, *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides* and *Quercus liaotungensis* in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4164-4170.
- [23] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, Cai X A. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: A research review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895-904.
- [24] Turcotte D L. Fractals and fragmentation. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [25] Wang D H, Zhao Z, Xue W P, Cheng X R. Effect of soil water environment on vertical fine root distribution of *Robinia pseudoacacia*. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 200-202.
- [26] Zhang Y Q, Zhu Q K, Qi S, Zhang Y. Vertical distribution characteristics of root system of several shrub species on terrace banks. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 34-39.
- [27] Hao Z Y, Yang P L, Liu H L, Yao C M. Experimental investigation on root system distribution of apple tree. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(6): 63-66.
- [28] Zhang X Q. Fine-root biomass, production and turnover of trees in relations to Environmental conditions. Forest Research, 2001, 14(5): 566-573.
- [29] Yang L Y, Li W H. Fine root distribution and turnover in a broad-leaved and Korean pine climax forest of the Changbai Mountain in China. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(2): 10-14.
- [30] Zhang Y Q, Zhu Q K, Qi S, Zhang Y, Wang D M. Root system distribution characteristics of plants on the terrace banks and their impact on soil moisture. Acta Ecologica Sinica, 2005, 15(3): 500-506.
- [31] Schenk H J. Vertical vegetation structure below ground: scaling from root to globe. Progress in Botany, 2005, 66(Pt4): 341-373.

参考文献:

- [6] 于水强, 王政权, 史建伟, 全先奎, 梅莉, 孙玥, 贾淑霞, 于立忠. 水曲柳和落叶松细根寿命的估计. 植物生态学报, 2007, 31(1): 102-109.
- [7] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 韩士杰, 李庆康, 于贵瑞, 范春楠, 刘万德, 邵殿坤. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态. 生态学报, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [14] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 草类根系对土壤抗冲性的强化效应. 土壤学报, 1992, 29(3): 302-309.
- [15] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 水土保持学报, 1998, 4(2): 1-7.
- [20] 黄林, 周立江, 王峰, 黄茹, 田锋, 齐代华, 唐元会. 红壤丘陵区典型植被群落根系生物量及碳储量研究. 水土保持学报, 2009, 23(6): 61-66.
- [21] 徐少君, 曾波, 类淑桐, 苏晓磊. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应. 土壤学报, 2011, 48(1): 160-167.
- [22] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性. 生态学报, 2006, 26(12): 4164-4170.
- [23] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.
- [25] 王迪海, 赵忠, 薛文鹏, 成向荣. 水分生态环境对刺槐细根垂直分布的影响. 水土保持研究, 2005, 12(5): 200-202.
- [26] 张宇清, 朱清科, 齐实, 张岩. 梯田生物埂几种灌木根系的垂直分布特征. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 34-39.
- [27] 郝忠勇, 杨培岭, 刘洪禄, 姚春梅. 苹果树根系分布特性的试验研究. 中国农业大学学报, 1998, 3(6): 63-66.
- [28] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响. 林业科学研究, 2001, 14(5): 566-573.
- [29] 杨丽韞, 李文华. 长白山原始阔叶红松林细根分布及其周转的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 10-14.
- [30] 张宇清, 朱清科, 齐实, 张岩, 王冬梅. 梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响. 生态学报, 2005, 15(3): 500-506.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liyue, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 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:1000717	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