

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 3 期
Vol.31 No.3
2011



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 31 卷 第 3 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

景观生态学原理在城市土地利用分类中的应用	李伟峰, 欧阳志云, 肖 焱 (593)
中国特有濒危植物夏蜡梅的交配系统	赵宏波, 周莉花, 郝日明, 等 (602)
昆仑山北坡不同海拔塔里木沙拐枣的光合生理生态特性	朱军涛, 李向义, 张希明, 等 (611)
天山云杉天然林不同林层的空间格局和空间关联性	李明辉, 何风华, 潘存德 (620)
大气 CO ₂ 浓度升高对 B 型烟粉虱大小、酶活及其寄主的选择性影响	王学霞, 王国红, 戈 峰 (629)
桃小食心虫越冬幼虫过冷却能力及体内生化物质动态	王 鹏, 凌 飞, 于 毅, 等 (638)
象山港不同养殖类型海域大型底栖动物群落比较研究	廖一波, 寿 鹿, 曾江宁, 等 (646)
北部湾宝刀鱼的摄食生态	颜云榕, 杨厚超, 卢伙胜, 等 (654)
黄河三角洲自然保护区东方白鹤的巢址利用	段玉宝, 田秀华, 朱书玉, 等 (666)
贺兰山野化牦牛冬春季食性	姚志诚, 刘振生, 王兆铨, 等 (673)
杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响	王 丹, 王 兵, 戴 伟, 等 (680)
中国干旱半干旱区潜在植被演替	李 飞, 赵 军, 赵传燕, 等 (689)
夜间增温和施肥对川西亚高山针叶林两种树苗根际效应的影响	卫云燕, 尹华军, 刘 庆, 等 (698)
洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征	鲁 静, 周虹霞, 田广宇, 等 (709)
杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应	安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳 (716)
柠条细根的空间分布特征及其季节动态	史建伟, 王孟本, 陈建文, 等 (726)
NaCl 和 Na ₂ SO ₄ 胁迫下两种刺槐叶肉细胞叶绿体超微结构	孟凡娟, 庞洪影, 王建中, 等 (734)
设施番茄果实生长与环境因子的关系	程智慧, 陈学进, 赖琳玲, 等 (742)
嫁接茄子根系分泌物变化及其对黄萎菌的影响	周宝利, 刘 娜, 叶雪凌, 等 (749)
华北地区冬小麦干旱风险区划	吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等 (760)
干旱胁迫条件下冷型小麦灌浆结实期的农田热量平衡	严菊芳, 张嵩午, 刘党校 (770)
秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响	高 飞, 贾志宽, 路文涛, 等 (777)
盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应	徐 猛, 马巧荣, 张继涛, 等 (784)
阿魏酸、对羟基苯甲酸及其混合液对土壤氮及相关微生物的影响	母 容, 潘开文, 王进闯, 等 (793)
岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物生物量及其影响因素	江元明, 庞学勇, 包维楷 (801)
荒漠沙蒿根围 AM 真菌和 DSE 的空间分布	贺学礼, 王银银, 赵丽莉, 等 (812)
百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响	邵元元, 王志英, 邹 莉, 等 (819)
居住区植物绿量与其气温调控效应的关系	李英汉, 王俊坚, 李贵才, 等 (830)
近 33 年白洋淀景观动态变化	庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 等 (839)
舟山群岛旅游交通生态足迹评估	肖建红, 于庆东, 刘 康, 等 (849)
¹⁵ N 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留	彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等 (858)
沉积物老化过程中 DOC 含量变化对菲吸附-解吸的影响	焦立新, 孟 伟, 郑丙辉, 等 (866)
湖南石门、冷水江、浏阳 3 个矿区的苧麻重金属含量及累积特征	余 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等 (874)
问题讨论	
近 55a 来河西走廊荒漠绿洲区季节变化特征及其对胡杨年生长期的影响	刘普幸, 张克新 (882)
利用 HYSPLIT 模型分析麦蚜远距离迁飞前向轨迹	郁振兴, 武予清, 蒋月丽, 等 (889)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 302 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-02

柠条细根的空间分布特征及其季节动态

史建伟¹, 王孟本¹, 陈建文¹, 曹建庭²

(1. 山西大学黄土高原研究所 太原 030006; 2. 山西省太原市园林植保站, 太原 030001)

摘要:以晋西北黄土区 30 年生柠条(*Caragana korshinskii* Kom.) 人工林为研究对象, 2007 年应用 Minirhizotron 技术, 分别在距茎干水平距离 0、50、100 cm 处设点, 对林地 0—100 cm 土层深度范围内的柠条细根空间分布及其生长季的动态进行了研究。结果表明: (1) 生长季柠条细根根长密度(*RLD*) 总平均值为 1.3423 mm/cm²。在水平方向上, 距茎干水平距离 50 cm 处分布最多(1.5369 mm/cm²), 其次为 0 cm 处(1.3855 mm/cm²), 100 cm 处分布最少(1.1044 mm/cm²)。在垂直深度上, 各土层 *RLD* 平均值大小顺序为 40—60 cm > 60—80 cm > 20—40 cm > 0—20 cm > 80—100 cm; (2) 在 0—100 cm 土层范围内, 月平均 *RLD* 在生长季的波动范围为 0.4405—2.1040 mm/cm², 其中 9 月份最多, 4 月份最少; *RLD* 在 5 个土层深度 3 个水平距离处随季节变化均表现先增加后减少的趋势, 且不同空间位置 *RLD* 峰值变化均在秋季(8—10 月份)波动。细根的这种时空分布差异, 可能主要受林下土壤资源空间异质性及其季节性变化的影响, 但也不排除其它因素的影响(如真菌, 植食性昆虫)。

关键词: 细根; 空间分布; 季节动态; Minirhizotron 技术

The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation

SHI Jianwei¹, WANG Mengben¹, CHEN Jianwen¹, CAO Jianting²

¹ Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

² Garden Plant Protection Station of Taiyuan, Taiyuan 030001, China

Abstract: Fine root was a major organ of trees in absorbing water and nutrients. The growth and development of trees were influenced by the spatial distribution of fine roots in soil. It is important and significant to know the spatial distribution pattern of fine roots for evaluating the competition among tree species and understanding the utilization status of the available resources belowground. In this study, we investigated the spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a 30-year old *Caragana korshinskii* with the minirhizotron technique in the Northwest Shanxi, which belongs to the Loess Plateau region of China, during the growing season (from April to November) in 2007. The minirhizotron tubes were installed at three horizontal distances (0 cm, 50 cm and 100 cm) from the plant stems within the 100 cm soil depth. The results showed that (1) the average root length density (*RLD*) of *Caragana korshinskii* was 1.3423 mm/cm² in the growth season. *RLD* exhibited the trends of first increase then decrease in both horizontal and vertical directions. In horizontal direction, the biggest value of *RLD* (1.5369 mm/cm²) appeared at 50 cm from the plant stems, but the smallest one (1.1044 mm/cm²) emerged at 100 cm from the plant stems, and there was no significant differences in *RLD* among the three horizontal sites ($P > 0.05$). In vertical direction, the value of *RLD* ranked as: 40—60 cm > 60—80 cm > 20—40 cm > 0—20 cm > 80—100 cm, and there was a significant difference in *RLD* among the five soil layers ($P < 0.05$); (2) the monthly average *RLD* within the 100 cm soil depth changed from 0.4405 to 2.1040 mm/cm² in the growth season. The biggest *RLD* was found in September, and the smallest one occurred in April. There also existed the trend of first increase then decrease for the seasonal change of *RLD* in either each soil layer or each horizontal site, and their maximum values of *RLD* appeared in the period from August to October, and the minimum values mostly presented in April or May. The season changes of

基金项目: 山西省自然科学基金(2007021032); 山西省科技攻关项目(2006031014)

收稿日期: 2009-12-01; **修订日期:** 2010-06-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sjwsx@sxu.edu.cn

RLD among different soil layers had significant differences ($P < 0.01$), however, the season changes of *RLD* among different horizontal distances manifested insignificance ($P > 0.05$). Results from the analysis of simple and multiple correlations indicated that there existed different correlations between *RLD* and each factor or multiple factors (soil temperature, moisture and nitrogen availability) at different soil layers and different horizontal distances. *RLD* might be mainly influenced by soil moisture in 0–20 cm soil layer, and impacted by soil temperature in 80–100 cm soil layer. However, in other soil layers, *RLD* could be synthetically affected by soil temperature, moisture and soil nitrogen availability. It suggested that the change characteristics of spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in this *C. korshinskii* plantation may be resulted from spatial and seasonal heterogeneities of the soil properties. However, more observations should be conducted to test the effects of fungi and herbivorous insects on the fine roots because many researches showed that fungi and herbivorous insects might also influence the growth of fine roots.

Key Words: fine root; spatial distribution; seasonal dynamics; Minirhizotron

林木细根(直径 ≤ 2 mm)是林木吸收水分和养分的主要器官,其在土壤中的空间分布直接影响林木的生长发育和生产力^[1-2],此外林木细根在森林生态系统的能量流动和物质循环中也起十分重要的作用^[3]。因此林木细根空间结构研究已成为评价林木对地下资源利用程度和反映植物间地下竞争的重要内容,并早已成为森林生态学研究的热点之一^[4-6]。目前相关研究多集中在细根的垂直分布,而细根水平分布的研究则多见于具有异质组分的森林(如天然林、混交林、农林复合系统等)和林隙研究中^[4],而人工纯林细根水平分布研究极少^[6-7]。

细根的生长在生长季显著受各生态因子的影响,因此反映细根生理生态功能的各指标也会发生变化。特别对于根系的水分和养分吸收能力而言,细根根长密度无疑比其它指标更有意义^[8]。已有的研究表明,细根长密度动态与土壤资源有效性季节变化存在密切的关系^[9-10];细根长密度在垂直分布上的差异与不同土壤层次资源有效性的分布差异有很大关系^[11],而根系的空间分布除具有垂直分布这一属性外,水平分布也是其重要的特征之一。目前大部分研究多集中在静态空间分布特征上^[7],而动态研究较少。研究也多采用传统的破坏性采样法,它不可避免地会影响相邻细根的生长。微根管法是一种非破坏性、可以直接在原位多次观测细根的新方法^[1],最大的优点就是在不影响根系生长过程的情况下,可长期监测细根的生长动态,并对于研究根系分布和动态及建立根系模型非常有效^[12]。

柠条(*Caragana korshinskii*)属于豆科锦鸡儿属植物,主要分布于我国北方干旱半干旱地区,是黄土高原地区的最主要造林灌木树种之一。柠条具有良好的防风固沙和保持水土功能,同时又是优质灌木饲料植物资源,具有较高的生态和经济价值。目前对其地上部分研究较多,而对地下研究较少。因此本研究选择柠条(*Caragana korshinskii*)人工林作为研究对象,以 Minirhizotron(微根区管或小观察窗)为研究手段,主要探讨:(1)柠条细根在水平距离和垂直深度的分布特征;(2)柠条细根在不同水平距离和土层深度处的季节动态。目的是通过分析柠条细根的空间分布及其季节动态特征,为植物细根对不同土壤空间有效资源变化的响应机制研究提供基础资料,同时也为黄土高原地区的人工林管理及植被恢复提供重要理论依据。

1 试验地概况及研究方法

1.1 试验地概况及设置

试验地设在山西省五寨县张家坪林场(111°46.296'E, 38°58.825'N, 海拔 1448 m),属温带大陆性气候,四季分明,春季干旱多风,夏秋雨量集中。年平均降雨量 478.5 mm,年降雨量的 50% 以上集中在 7、8、9 月份。年平均气温 4.1—5.5 °C,最冷月(1 月份)平均温度 -13.2 °C,最热月(7 月份)平均温度 20.0 °C,平均无霜期 125 d。该区土壤为黄土状淡栗褐土,土壤肥力较低。

试验用林分为 30 年生柠条人工林,位于梁峁缓坡部位,坡度 0—5°。林分源于 1977 年秋季播种造林,条带状播种,行距 2 m。选择立地条件均一的林地,设置 30 m × 30 m 的样地一块,样地四周以 2 m 高铁丝网围

护,建成固定样地。2007 年平均株高 178.6 cm,平均冠幅为 1.2 m。

1.2 微根管的安装

2006 年 10 月,在固定样地区域内,在距条带状植株茎干水平距离为 0、50、100 cm 位置上分别各安装 1 个微根管,设 4 个重复,共安装微根管 12 个。参照 Johnson 等^[1]介绍的方法安装微根管(美国 Bartz 技术公司生产)。微根管(长 150 cm,外径 5.5 cm,内径 5.0 cm)的安装与地面成 45°角,垂直深度 100 cm,露出地面部分约 20 cm。安装前管底部密封,微根管露出地面部分先封一层黑色胶带,而后加封一层黄色胶带。微根管固定之后,用外涂白色涂料的盖(高 20 cm)将管口封住。

1.3 数据的采集、整理

2007 年 4 月 10 日开始对柠条细根生长状况进行野外观测。采用 BTC 图像采集系统(美国 Bartz 技术公司生产)进行采样,观测窗面积为 1.8 cm × 1.4 cm,每管收集约 91—92 幅图片。从 2007 年 4 月 10 日开始至 2007 年 11 月 15 日止,每 3—4 周取样 1 次,共观测 9 次。用 RooTrack2.0 软件^[13]对所获图像进行处理,以获取细根长度、直径等数据。依据微根管号、图框位置、取样时间和细根编号建立细根数据库以方便数据分析。微根管最大特点是能够连续观测细根长度的变化,因此本研究以单位面积观测窗内观测到的细根长,即根长密度 *RLD*(Root length density)作为测定指标。

1.4 土壤资源有效性指标的测定

土壤水分和土壤有效氮的测定与细根观测同期进行,每次在样地随机取 9 个点,取样深度分 5 个土层:0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm。土壤含水量用烘干法测定;土壤铵态氮的测定采用纳氏比色法,土壤硝态氮的测定运用酚二磺酸比色法;土壤温度用 TidbiT v2 袖珍温度记录仪(美国 Onset 公司生产)测定,在 20、40、60、80、100 cm 土层深度各安装温度自动记录仪 1 个,设置为每小时自动记录 1 次数据,起止时间与细根观测期同步。

1.5 数据分析

运用 Excel 对所获取的数据分别进行整理。细根空间分布特征采用生长季内不同空间位置的所有次取样数据的平均值。采用多因素方差分析法分别对不同土层深度和不同水平距离处的 *RLD* 差异显著性及其季节变化的差异显著性做方差分析,LSD 法进行多重比较,并采用线性回归法对土壤资源有效性与 *RLD* 作回归分析。数据处理均运用 SPSS13.0 软件来进行。

2 结果

2.1 不同水平距离和土层深度处细根分布特征

研究表明,生长季柠条细根总平均根长密度为 1.3423 mm/cm²,且分别在水平和垂直方向上具有明显的分布特点。在水平方向上,平均 *RLD* 变化随离茎干水平距离的增加表现先增加后减少,距茎干水平距离 50 cm 处分布最多为 1.5369 mm/cm²,其次为距茎干水平距离 0 cm 处 1.3855 mm/cm²,距茎干水平距离 100 cm 处分布最少 1.1044 mm/cm²,方差分析表明,各水平距离间差异不显著($P > 0.05$)。在垂直深度上,平均 *RLD* 也随土层深度加深表现先增加后减少的趋势,各土层平均 *RLD* 大小序为:40—60 cm > 60—80 cm > 20—40 cm > 0—20 cm > 80—100 cm。方差分析表明,各土层间 *RLD* 差异显著($P < 0.05$)。

细根 *RLD* 在水平方向和垂直深度上均表现一定的分布特征(图 1)。在水平方向上,5 个土层深度处的 *RLD* 在不同水平距离表现不同特征。在 0—20 cm 深度处,距茎干水平距离 50 cm 处分布最多,100 cm 处最小,0 cm 处居中。在 20—40 cm 深度处 *RLD* 随水平距离增加而减小;40—60 cm 土层处 *RLD* 在距茎干水平距离 50 cm 处分布最多,而在 0 cm 处分布最少,60—80 cm 土层处 *RLD* 的分布状况正好与 40—60 cm 土层处相反,距茎干水平距离 0 cm 处分布最多,50 cm 处分布最少;而 80—100 cm 土层处 *RLD* 的分布表现与 0—20 cm 处一致的特征。从垂直深度来看,3 个水平距离处 *RLD* 随土层深度变化表现不同程度的差异,在距茎干水平距离 0 cm 处 *RLD* 的分布表现双峰型,峰值分别出现在 20—40 cm 和 60—80 cm 土层;而在距茎干水平距离 50 cm 和 100 cm 处的 *RLD* 分布均为单峰型,40—60 cm 土层分布最多。

2.2 不同水平距离和土层深度处细根季节动态

在 0—100 cm 土层范围内, 月平均细根长密度在生长季的波动范围为 0.4405—2.1040 mm/cm², 其中 9 月份根长密度分布最多, 而 4 月份分布最少, 方差分析表明, *RLD* 季节动态变化随距茎干水平距离变化的差异不显著 ($P > 0.05$), 而随土层深度变化表现极显著差异 ($P < 0.01$)。

在不同土层深度, 细根长密度在 3 个水平距离处随季节变化均表现先增加后减少的趋势, 且分别表现不同的季节动态特征 (图 2)。

在 0—20 cm 土层, 0、100 cm 水平距离处 *RLD* 最大都出现在 8 月份, 分别为 (1.5670 ± 0.8932) mm/cm² 和 (0.8729 ± 0.2792) mm/cm², 最小都出现在 4 月份, 分别是 (0.2189 ± 0.1771) mm/cm² 和 (0.1968 ± 0.0122) mm/cm², 而 50 cm 处最大和最小则分别出现在 9 月份 (1.8027 ± 0.5757) mm/cm² 和 5 月份 (0.8255 ± 0.0244) mm/cm², 这 3 个水平距离处各月份间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

在 20—40 cm 土层, 0、50、100 cm 水平距离处的最大分布都出现在 9 月份, 分别是 (2.8982 ± 1.5697) mm/cm²、 (1.8041 ± 0.7719) mm/cm²、 (1.5836 ± 1.2531) mm/cm², 最小分布均在 4 月份, 分别为 (0.0746 ± 0.0068) mm/cm²、 (0.6261 ± 0.0018) mm/cm²、 (0.2260 ± 0.0785) mm/cm², 各月份间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

而在 40—60 cm 土层, 0 cm 水平距离处 10 月份最多 (2.4605 ± 0.9636) mm/cm², 4 月份最小 (0.2917 ± 0.1997) mm/cm², 且 4、5 月份和 10、11 月, 7 月和 10 月份间均存在显著差异 ($P < 0.05$); 50 cm 和 100 cm 水平距离处最大值都出现在 9 月份分别为 (4.4895 ± 1.9016) mm/cm² 和 (3.3056 ± 1.8637) mm/cm², 而 50 cm 和 100 cm 距离处最小值则分别出现在 5 月份 (0.3458 ± 0.0015) mm/cm² 和 4 月份 (0.1250 ± 0.0889) mm/cm², 且这两个水平距离处各月份间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

在 60—80 cm 土层, 0、50、100 cm 水平距离处也都是在 9 月份最多, 分别是 (3.0569 ± 2.0903) mm/cm², (3.1087 ± 1.7753) mm/cm², (4.1617 ± 3.7234) mm/cm², 而 50 cm 处最小值在 7 月份 (0.1459 ± 0.0681) mm/cm², 0 cm 和 100 cm 处都在 4 月份 (0.4627 ± 0.1538) mm/cm² 和 (0.3644 ± 0.3104) mm/cm², 在这些距离处各月份间也均无显著差异 ($P > 0.05$)。

在 80—100 cm 土层, 50 cm 水平距离处差异明显, 最多在 10 月份 (2.0318 ± 0.7365) mm/cm², 最少在 7 月份 (0.3368 ± 0.2299) mm/cm², 且 7 月和 10 月、11 月份间存在显著差异 ($P < 0.05$), 而 0 cm 和 100 cm 处最大值分别在 7 月份 (1.0035 ± 0.8759) mm/cm² 和 8 月份 (0.7831 ± 0.4183) mm/cm², 最小值分别在 4 月份 (0.6905 ± 0.4293) mm/cm² 和 5 月份 (0.2899 ± 0.1158) mm/cm², 且各月份间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

从上述研究结果可发现, 在不同水平距离和不同土层深度处细根长密度的峰值总是在 8—10 月份间波动, 而最小值也总在 4—5 月份间出现。

3 讨论

3.1 细根空间分布特征

根系在土壤中的分布受土壤物理、化学和生物特性的综合影响, 植物根系的分布特征往往是土壤环境因子共同作用的结果^[11]。有关细根空间分布特征的研究, 目前有两种结论: (1) 水平方向和垂直方向上 *RLD* 分别随离茎干水平距离和土层深度的增加而减小^[14]; (2) 水平方向和垂直方向上分别随离茎干水平距离和土层深度的增加表现先增加后减小^[15-16]。本研究结论显然与后者相一致, 且柠条细根长的 70% 以上主要集中在土层深度为 20—80 cm, 距茎干水平距离 50 cm 的范围内。树木根系的垂直分布主要受树种、年龄、地下水位

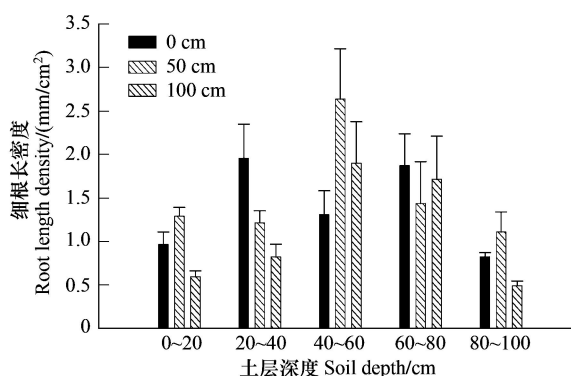


图 1 细根长密度空间分布特征

Fig. 1 Root length density in space distribution

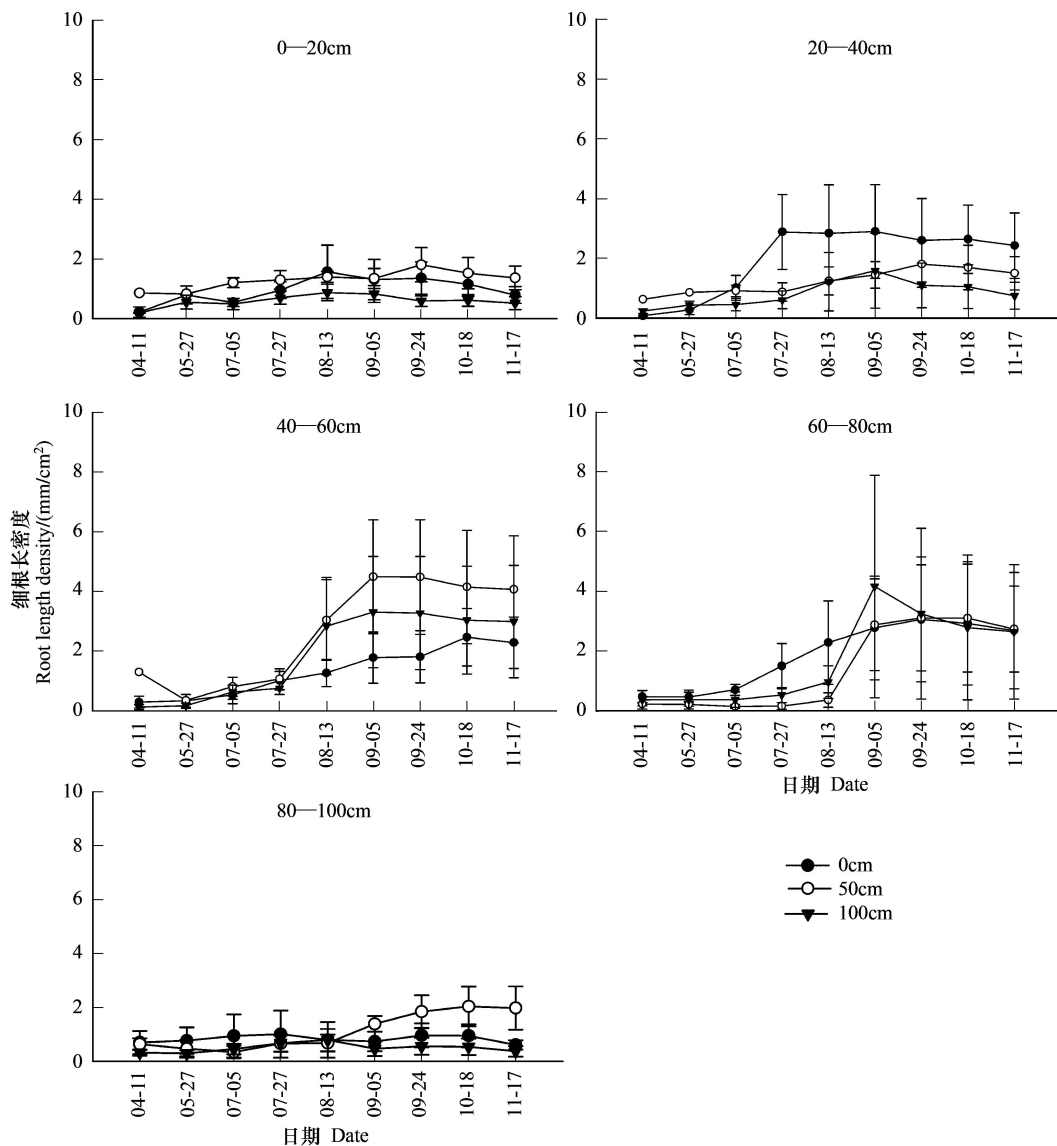


图2 不同土层深度和水平距离处 RLD 的季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of root length density at different soil depths and horizontal distance

和土壤水分、养分及物理性质(通气、机械阻力等)等的影响。本研究发现,20—80 cm 土层是柠条细根的在垂直方向上的主要分布范围,这可能与树种特性和研究地表层土壤干旱有关。本研究区降水少,风大,表层土壤往往是水分胁迫层,而干旱胁迫可能刺激细根向较深土层生长,使得深土层细根比例增加^[17]。已有柠条根系的研究也表明,黄土高原地区柠条的根系主要密集于 10—100 cm 土层中^[18];沙漠区柠条的大部分根系集中在 10—80cm 土层^[19]。本研究结果明显地也在这一范围之内。

树木细根在水平位置的分布主要受水平位置上土壤的空间异质性影响^[6],而土壤在水平位置上的空间异质性主要由林木树冠及树木之间的林隙造成的水分、温度等因素的异质性所致,林隙和林冠下光照和温度的异质性很大,林隙可以接受到更充足的阳光,温度均高于林冠下同一层次土壤的温度,且在一定的范围内根系的生长随温度的升高而增加。受温、湿度异质性影响,林隙土壤中的养分也较林下土壤丰富^[20-21],而细根也总是趋于富养斑块下生存,这使得大量的细根积聚在林隙土壤中。此外,树冠对降水的再分配及对降水化学性质的影响,也能显著改变林冠下及树冠周围土壤湿度、化学性质等,进而显著地改变靠近树干一定范围内的细根分布^[22]。本研究中距茎干 50 cm 处的取样位置基本位于柠条树冠边缘,树冠对降水截留少,同时光照

相对较好,因此细根倾向于占据这些有利的营养空间。这可能就是细根在 50 cm 这一水平位置分布较多的主要原因。

3.2 不同空间位置细根季节动态

温带森林受气候因子影响较大,土壤资源有效性随之也具有明显的季节动态变化,因此树木的地下生长过程也具有明显的季节性^[11]。本研究区降雨分配不均,7月中旬之前为旱季,之后至10月份之间为雨季。已有的研究表明,在干旱区,细根的生长与土壤水分含量呈正相关关系^[12]。因此柠条细根长密度的最小值出现在旱季,而最大值则会出现雨季。此外,根据柠条的生长特点,4月份萌发新叶,枝条和叶的生长要从5月份持续到8月份以后,4月份气温开始回升,但受土壤资源有效性影响,细根生长缓慢,而在5—8月份生长季中光合作用的产物主要用于地上部分的生长,随着雨季的到来,土壤有效资源增加,到了9月份,地上部分停止生长,C的分配格局会发生改变,主要用于地下部分生长,此后可能会随着气温下降和降水的减少,细根生长又会变慢。因此生长季柠条 *RLD* 最大值一般会出现秋季,最小值在春季出现。

土壤资源有效性在垂直分布上出现的差异,会使得不同季节,甚至同一季节各个层次细根的结构和功能发生转变^[11],而转变的最基本反应是就是通过调整其根长密度,以适应其空间环境^[23]。在一定的土层深度内,土层越深,其温度上升或下降的时间愈滞后,降雨入渗到达的时间亦愈滞后,对植物根系生长较为有利的土壤温度和水分条件在土壤下层便相对滞后。在生长季末的不利土壤温度条件的到来同样相对滞后,此外土层越深,温度和水分季节性变幅越小。而细根的生长常会向土壤资源有效性较高的环境富集。在本研究地对于柠条细根生长而言(表1),土壤表层(0—20 cm)可能主要是水分限制,而深层(80—100 cm)则可能主要受温度制约,中下层(20—80 cm)可能受土壤温度、水分和有效养分等因素的共同影响。春季土壤温度较低,也为旱季,因此各土层最小值也均出现在这个季节,而随着夏季末土壤温度升高,雨季的到来,峰值最先出现在表层和深层,随后是中下层,而随着雨季的结束,土壤温度下降,各土层细根的生长也会变慢。此外,本研究也发现,柠条细根生长受土壤有效氮的影响不明显,这可能与柠条是固氮树种有关。

此外在林分中,受林冠效应影响,林隙内最高土壤温度常较林下高,而最低温度较林下低,变动幅度大,这对土壤湿度以及有机质的分解有一定的影响。林隙也会改变土壤局部的湿度,导致林隙内土壤湿度的异质性,而这种异质性强度与干、湿季节有关^[24]。因此,受土壤资源空间异质性季节变化的影响,不同水平距离处的 *RLD* 季节性分布表现差异。也正是受不同季节土壤资源水平和垂直方向空间异质性影响,*RLD* 在不同空间的季节性分布发生变化。柠条 *RLD* 最大值和最小值均出现在秋季(8月—10月份)和春季(4月—5月份),且随距茎干水平距离和土层深度位置的变化而在季节月份间波动。

表1 柠条不同土层和不同水平距离处细根 *RLD* 与土壤温度、水分、有效 N 间的简单相关和复相关(*R*)

Table 1 Simple and Multiple Correlation coefficients of fine root *RLD* with soil temperature, soil water, soil nitrogen availability at different soil depth and different horizontal distance in *Caragana korshinskii* plantation

土层深 Depth soil /cm	0cm 水平距离 0cm at horizontal distance				50cm 水平距离 50cm at horizontal distance				100cm 水平距离 100cm at horizontal distance			
	<i>R_T</i>	<i>R_W</i>	<i>R_N</i>	<i>R_{T+W+N}</i>	<i>R_T</i>	<i>R_W</i>	<i>R_N</i>	<i>R_{T+W+N}</i>	<i>R_T</i>	<i>R_W</i>	<i>R_N</i>	<i>R_{T+W+N}</i>
0—20	0.131	0.184	-0.038	0.295	-0.051	-0.008	-0.248	0.310	0.448	0.555	0.286	0.628
20—40	0.330	0.370	0.182	0.447	-0.196	-0.142	-0.572	0.603	0.126	0.206	-0.271	0.542
40—60	-0.057	0.564	-0.403	0.678	-0.09	0.472	-0.535	0.708	0.137	0.583	-0.441	0.796
60—80	0.298	0.656	-0.294	0.688	-0.147	0.433	-0.617	0.649	-0.014	0.461	-0.555	0.637
80—100	0.610	0.180	0.289	0.648	0.023	0.493	-0.361	0.533	0.849**	0.614	0.410	0.983*

R_T、*R_W*、*R_N* 分别表示细根 *RLD* 与土壤温度、水分、总有效氮的相关性,*R_{T+W+N}* 表示细根 *RLD* 与土壤水分、土壤温度和总有效氮的复相关性 (* *P* < 0.05; ** *P* < 0.01)

当然,本研究结果也可能是以下两方面的原因引起:(1)真菌、病原菌和土壤植食性动物也是影响细根生长的主要因素^[25]。大量实验证明,菌根能够延长根系的寿命,降低根系的死亡率^[26]。此外,植食性动物消耗少量的细根,也能刺激细根生长,但这取决于细根分布密度和地下昆虫的种类^[27]。而病原微生物则会促进细

根衰亡^[28]。柠条作为一种固氮植物,其共生菌-固氮菌,以及研究地土壤植食性昆虫的存在对细根不同空间的季节性分布是否与这些因素的季节变化相关,还需作进一步的探讨。(2)安装微根管而钻洞可能会切断根系,并刺激细根增生^[1],导致比原样地产生较多的细根和较高生产量。同时,管壁与土壤接触不良,形成缝隙也会影响根的生长。因此在运用管观测和采集数据时需要一个平衡期,时间一般为6个月到1a以上。而本研究的平衡期只进行了半年,柠条细根的生长是否是管-土平衡后的一种假象,还需作进一步的观测来验证。

4 结论

(1)柠条细根表现明显的空间分布特征。*RLD*在水平和垂直方向上均表现先增加后减少的趋势,在水平方向上,距树干水平距离50 cm处分布最多,其次为0 cm处,100 cm处分布最少。在垂直深度上,各土层*RLD*大小依次为:40—60 cm > 60—80 cm > 20—40 cm > 0—20 cm > 80—100 cm,树冠下和树冠外光照、降水的截流及土壤资源的有效性差异,最终导致细根的空间分布差异。

(2)柠条细根长密度表现明显的季节波动性。在0—100 cm土层范围内,细根长密度最大值出现在9月份,最小值在4月份。受土壤资源空间异质性季节变化的影响,5个土层深度3个水平距离处的*RLD*峰值都在秋季月份间(8—10月份)波动。

References:

- [1] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, Storm M J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45: 263-289.
- [2] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forest. *Nature*, 1993, 361: 59-61.
- [3] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, 81: 275-280.
- [4] Guo Z L, Zheng J P, Ma Y D, Han S J. 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.
- [5] 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: 303-378.
- [6] Yang X Y, Han Y Z, Zhang Y X. Effects of Horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamics in *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1277-1284.
- [7] Chen G S, Yang Y S, He Z M, Xie J S, Gao R, Zeng H D. Effects of proximity of stems and tree diameters on fine root density in plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1007-1011.
- [8] Robinson D, Hodge A, Fitter A. Constraints on the form and function of root systems//Kroon H D eds. *Root Ecology*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 1-26.
- [9] 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 gmelinii* plantation. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3): 403-410.
- [10] Mei L, Wang Z Q, Han Y Z, Gu J C, Wang X R, Cheng Y H, Zhang X J. Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 1-4.
- [11] Pregitzer K S, King J S, Burton A J. Response of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 2000, 147: 105-115.
- [12] Kage H, Kochler M, Stutzel H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and simulation. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20: 379-394.
- [13] Craine J, Tremmel D. Improvements to the minirhizotron system. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 1995, 76: 234-235.
- [14] O'grady A P, Worledge D, Battaglia M. Temporal and spatial changes in fine root distributions in a young *Eucalyptus globules* stand in southern Tasmania. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214: 373-383.
- [15] Nambiar E K S. Root development and configuration in intensively managed radiate pine plantations. *Plant Soil*, 1983, 71: 37-47.
- [16] Bouillet J P, Laclau J P, Arnaud M, Thongo M'Bou A, Saint-André L, Jourdan C. Changes with stand age in the spatial distribution of root of *Eucalyptus* clone in Congo: impact on water and nutrient uptake. *Forest ecology and management*, 2002, 171(1/2): 43-57.
- [17] Persson H, Fircks Y V, Majdi H, Nilson L O. Root distribution in a Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) stand subjected to drought and ammonium sulphate application. *Plant Soil*, 1995, 168/169: 161-165.
- [18] Niu X W. Study on the biological characteristics of *Caragana korshinskii*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1998, 13(4): 122-129.
- [19] Zhang Z S, Li X R, Zhang J G, Wang X P, Zhao J L, Chen Y W. Root growth dynamics of *Caragana Korshinskii* using minirhizotrons. *Journal of*

- Plant Ecology, 2006, 30(3): 457-464.
- [20] Zhang C Y, Zhao X H, Zheng J M. A Study on Soil Properties in Forest Gaps and under Canopy in Broad leaved *Pinus koriensis* Forest in Changbai Mountain. Forest Research, 2006, 19(3): 347-352.
- [21] Geng Y Q, Shan H C, Tan X, Sun X Y, Wang D Z. Soils in forest gaps in artificial coniferous forests. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(4): 16-19.
- [22] Olsthoorn A F M, Klap J M, Oude Voshaar J H. The relation between fine root density and proximity of stems in closed Douglas-fir plantations on homogenous sandy soils: implication for sampling design. Plant Soil, 1999, 211: 215-221.
- [23] Jackson R B, Canadell J R, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. A global analysis of root distribution for terrestrial biomass. Oecologia, 1996, 108(3): 389-411.
- [24] Canham C D. Different response to gaps among shade tolerant trees species. Ecology, 1989, 70: 548-550.
- [25] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root lifespan. Advances in Ecological Research, 1997, 27: 1-60.
- [26] Tierney G L, Fahey T J. Evaluating minirhizotron estimates of fine root longevity and production in the forest floor of a temperate broadleaf forest. Plant Soil, 2001, 229: 167-176.
- [27] Wardle D A. Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components. Princeton: Princeton University Press, 2002: 58-136.
- [28] Shigo A L. Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. Annual Review of Phytopathology, 1984, 22: 189-214.

参考文献:

- [4] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 韩士杰. 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.
- [6] 杨秀云, 韩有志, 张芸香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1277-1284.
- [7] 陈光水, 杨玉盛, 何宗明, 谢锦升, 高人, 曾宏达. 树木位置和胸径对人工林细根水平分布的影响. 生态学报, 2005, 25(5): 1007-1011.
- [9] 程云环, 韩有志, 王庆成, 王政权. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 403-410.
- [10] 梅莉, 王政权, 韩有志, 谷加存, 王向荣, 程云环, 张秀娟. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局. 应用生态学报, 2006, 17(1): 1-4.
- [18] 牛西午. 柠条生物学特性研究. 华北农学报, 1998, 13(4): 122-129.
- [19] 张志山, 李新荣, 张景光, 王新平, 赵金龙, 陈应武. 用 Minirhizotron 观测柠条根系生长动态. 植物生态学报, 2006, 30(3): 457-464.
- [20] 张春雨, 赵秀海, 郑景明. 长白山阔叶红松林林隙与林下土壤性质对比研究. 林业科学研究, 2006, 19(3): 347-352.
- [21] 耿玉清, 单宏臣, 谭笑, 孙向阳, 王登芝. 人工针叶林林冠空隙土壤的研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 16-19.

CONTENTS

Applying landscape ecological concepts in urban land use classification	LI Weifeng, OUYANG Zhiyun, XIAO Yi (593)
Mating system of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> (Cheng et S. Y. Chang) Cheng et S. Y. Chang, an endangered, indigenous species in China	ZHAO Hongbo, ZHOU Lihua, HAO Riming, et al (602)
Photosynthetically and ecophysiological characteristics of <i>Calligonum roborowasikii</i> in different altitudes on the northern slope of Kunlun Mountain	ZHU Juntao, LI Xiangyi, ZHANG Ximing, et al (611)
Spatial distribution pattern of different strata and spatial associations of different strata in the Schrenk Spruce Forest, northwest China	LI Minghui, HE Fenghua, PAN Cunde (620)
Effect of elevated CO ₂ on the body size, enzyme activity and host selection behavior of <i>Bemisia tabaci</i> biotype B	WANG Xuexia, WANG Guohong, GE Feng (629)
The dynamics of super-cooling ability and biochemical substances in the overwintering <i>Carposina niponensis</i> Walsingham (Lepidoptera: Carposinidae) larvae	WANG Peng, LING Fei, YU Yi, et al (638)
A comparative study of macrobenthic community under different mariculture types in Xiangshan Bay, China	LIAO Yibo, SHOU Lu, ZENG Jiangning, et al (646)
Feeding ecology of dorab wolf-herring, <i>Chirocentrus dorab</i> from the Beibu Gulf	YAN Yunrong, YANG Houchao, LU Huosheng, et al (654)
Make use of nest-site of oriental white stork in the Yellow River Estuary Nature Reserve	DUAN Yubao, TIAN Xiuhua, ZHU Shuyu, et al (666)
Winter and spring diet composition of feral yak in Helan Mountains, China	YAO Zhicheng, LIU Zhensheng, WANG Zhaoding, et al (673)
Effects of tree growth and soil properties on soil respiration rate in Chinese fir plantations	WANG Dan, WANG Bing, DAI Wei, et al (680)
Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China	LI Fei, ZHAO Jun, ZHAO Chuanyan, ZHANG Xiaoqiang (689)
Responses on rhizosphere effect of two subalpine coniferous species to night-time warming and nitrogen fertilization in western Sichuan, China	WEI Yunyan, YIN Huajun, LIU Qing, et al (698)
Nitrogen and phosphorus contents in 44 wetland species from the Lake Erhai Basin	LU Jing, ZHOU Hongxia, TIAN Guangyu, et al (709)
Growth and physiological responses of the <i>Periploca sepium</i> Bunge seedlings to drought stress	AN Yuyan, LIANG Zongsuo, HAO Wenfang (716)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature <i>Caragana korshinskii</i> plantation	SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (726)
The ultrastructure of chloroplast in mesophyll cell on two robinias under NaCl and Na ₂ SO ₄ stress	MENG Fanjuan, PANG Hongying, WANG Jianzhong, et al (734)
Relationship between tomato fruit growth and environmental factors under protected facility cultivation	CHENG Zhihui, CHEN Xuejin, LAI Linling, et al (742)
Effect of grafting eggplant on root exudates and disease resistance under <i>Verticillium dahliae</i> stress	ZHOU Baoli, LIU Na, YE Xueling, et al (749)
The drought risk zoning of winter wheat in North China	WU Dongli, WANG Chunyi, XUE Hongxi, et al (760)
Heat balance of cold type wheat field at grain-filling stage under drought stress condition	YAN Jufang, ZHANG Songwu, LIU Dangxiao (770)
Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia	GAO Fei, JIA Zhikuan, LU Wentao, et al (777)
Osmotic and ionic stress effects of high NaCl concentration on seedlings of four wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) genotypes	XU Meng, MA Qiaorong, ZHANG Jitao, et al (784)
Effects of ferulic acid, p-hydroxybenzoic acid and their mixture on mineral nitrogen and relative microbial function groups in forest soils	MU Rong, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (793)
Soil microbial biomass and the influencing factors under <i>Pinus tabulaeformis</i> and <i>Picea asperata</i> plantations in the upper Min-jiang River	JIANG Yuanming, PANG Xueyong, BAO Weikai (801)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in the rhizosphere of <i>Artemisia sphaerocephala</i> from Inner Mongolia desert	HE Xueli, WANG Yinyin, ZHAO Lili, et al (812)
Effect of chlorothalonil on soil microbial communities of <i>Larix</i> artificial shelter-forest	SHAO Yuanyuan, WANG Zhiying, ZOU Li, et al (819)
Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter	LI Yinghan, WANG Junjian, LI Guicai, et al (830)
Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007	ZHUANG Changwei, OUYANG Zhiyun, XU Weihua, et al (839)
Evaluation of tourism transport ecological footprint in Zhoushan islands	XIAO Jianhong, YU Qingdong, LIU Kang, et al (849)
Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ¹⁵ N cross labeled fertilizers	PENG Peiqin, QIU Shaojun, HOU Hongbo, et al (858)
Effects of dissolve organic carbon (DOC) contents on sorption and desorption of phenanthrene on sediments during ageing	JIAO Lixin, MENG Wei, ZHENG Binghui, et al (866)
Heavy metal concentrations and bioaccumulation of ramie (<i>Boehmeria nivea</i>) growing on 3 mining areas in Shimen, Lengshuijiang and Liuyang of Hunan Province	SHE Wei, JIE Yucheng, XING Hucheng, et al (874)
Discussion	
Climate characteristic of seasonal variation and its influence on annual growth period of <i>populus euphratica</i> Oliv in Hexi Corridor in recent 55 years	LIU Puxing, ZHANG Kexin (882)
Forward trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model	YU Zhenxing, WU Yuqing, JIANG Yueli, et al (889)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 3 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 3 2011

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:100717	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		

