

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 14 期 Vol.31 No.14 **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 14 期

2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

厦门市三个产业土地利用变化的敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (3863)
黄河源区沙漠化及其景观格局的变化·····	胡光印,董治宝,逯军峰,等 (3872)
岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例·····	罗光杰,李阳兵,王世杰,等 (3882)
基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析·····	徐涵秋 (3890)
北京市土地利用生态分类方法·····	唐秀美,陈百明,路庆斌,等 (3902)
长白山红松臭冷杉光谱反射随海拔的变化·····	范秀华,刘伟国,卢文敏,等 (3910)
臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型·····	汪金松,张春雨,范秀华,等 (3918)
渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位·····	焦海峰,施慧雄,尤仲杰,等 (3928)
食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响·····	杨志宏,邵淑丽 (3937)
桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征·····	张明阳,王克林,刘会玉,等 (3947)
隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布·····	李彩霞,孙景生,周新国,等 (3956)
不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用·····	周宝利,陈志霞,杜 亮,等 (3964)
镧在草-菇-土系统中的循环与生物富集效应·····	翁伯琦,姜照伟,王义祥,等 (3973)
鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估·····	余进祥,郑博福,刘娅菲,等 (3980)
柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系·····	史建伟,王孟本,陈建文,等 (3990)
土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响·····	梁 飞,田长彦 (3999)
象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素·····	杨季芳,王海丽,陈福生,等 (4007)
近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响·····	吴芳芳,郑有飞,吴荣军,等 (4019)
抑制剂和安全剂对高羊茅根中酶活性和菲代谢的影响·····	龚帅帅,韩 进,高彦征,等 (4027)
南苜蓿高效共生根瘤菌土壤的筛选·····	刘晓云,郭振国,李乔仙,等 (4034)
汉江上游金水河流域土壤常量元素迁移模式·····	何文鸣,周 杰,张昌盛,等 (4042)
基于地理和气象要素的春玉米生育期栅格化方法·····	刘 勤,严昌荣,梅旭荣,等 (4056)
日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型·····	李 刚,陈亚茹,戴剑锋,等 (4062)
冀西北坝上旱干区南瓜油葵间作的水分效应·····	黄 伟,张俊花,李文红,等 (4072)
专论与综述	
鸟类分子系统地理学研究进展·····	董 路,张雁云 (4082)
自然保护区空间特征和地块最优选择方法·····	王宜成 (4094)
人类活动是导致生物均质化的主要因素·····	陈国奇,强 胜 (4107)
冬虫夏草发生的影响因子·····	张古忍,余俊锋,吴光国,等 (4117)
自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测·····	余晨兴,全 川 (4126)
研究简报	
塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价·····	贡 璐,张海峰,吕光辉,等 (4136)
高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态·····	周晓庆,吴福忠,杨万勤,等 (4144)
生物结皮粗糙特征——以古尔班通古特沙漠为例·····	王雪芹,张元明,张伟民,等 (4153)
不同海拔茶园害虫、天敌种群及其群落结构差异·····	柯胜兵,党凤花,毕守东,等 (4161)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说:内地多呈灌木状的沙棘,在青藏高原就表现为高大的乔木,在拉萨河以及雅鲁藏布江沿岸常常可以看到高大的沙棘林和沼泽塔头湿地相映成趣的美丽景观。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

史建伟,王孟本,陈建文,张国明. 柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系. 生态学报, 2011, 31(14): 3990-3998.

Shi J W, Wang M B, Chen J W, Zhang G M. Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a *Caragana korshinskii* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3990-3998.

柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系

史建伟^{1,*}, 王孟本¹, 陈建文¹, 张国明²

(1. 山西大学黄土高原研究所 太原 030006; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:受土壤资源有效性时空异质性的影响,植物细根会表现出明显的垂直分布和季节变化特征。揭示这些特征对认识细根的营养和水分吸收规律,预测 C 在地下的分配特点具有重要意义。运用 Minirhizotron 技术对晋西北黄土丘陵区 30a 生柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 人工灌木林 0—100 cm 土层深度范围内细根的根数密度 (FRD, 根/cm²)、根长密度 (FRLD, 根/cm²)、平均直径 (FRDi, mm) 和根面积指数 (FRAI, mm²/cm²) 的垂直分布特征和季节动态进行了一个生长季的观测,分析了这些参数与土壤温度、水分和有效氮的关系。结果表明:(1) FRD、FRLD 和 FRAI 均表现随土层深度增加而先增大后减小,且最大值均出现在 40—80 cm 土层,而表层 0—20 cm 最小;FRDi 表现随土层深度增加而减小(除 80—100 cm 土层外),其中表层 0—20 cm 最大,而 60—80 cm 土层最小;(2) 受土壤资源有效性季节变化的影响,FRD、FRLD 和 FRAI 在不同土层(除 0—20 cm 外)表现相似的季节动态,即随季节变化而先增大后减小,春季小而秋季大;FRDi 则表现随季节变化由粗逐渐变细的过程,春季最粗而秋季最细;(3) 各细根参数与土壤温度、水分和有效氮在各土层存在不同程度的相关性。简单相关分析表明,细根的季节性变化主要受土壤温度和水分的影响,有效氮的影响不明显。表层(0—20 cm)主要受土壤水分影响,而在中下层(20—100 cm)则主要受土壤温度的影响。各土层细根与土壤有效资源间的相关性反映了细根功能的季节性差异。综合分析表明,细根各参数季节变化的 54.0%—98.6% 是由土壤温度和水分相互作用引起的。

关键词:柠条; 细根; 分布; Minirhizotron 技术; 土壤有效资源

Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a *Caragana korshinskii* plantation

SHI Jianwei^{1,*}, WANG Mengben¹, CHEN Jianwen¹, ZHANG Guoming²

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

² State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The distribution of fine roots is closely related to soil resource availability. The characterization of vertical distribution and seasonal changes of the fine roots are essential for ecologists to further understand the rules of water and nutrient absorption for plant fine roots. They may also benefit the estimation of belowground carbon allocation of plants. In this study, we investigated the vertical distribution and seasonal dynamics of fine root density (FRD, N/cm²), fine root length density (FRLD, mm/cm²), mean fine root diameter (FRDi, mm) and fine root area index (FRAI, mm²/cm²) in 0—100cm soil profile (0—20, 20—40, 40—60, 60—80 and 80—100cm soil layers, respectively) in a 30-year old *Caragana korshinskii* plantation located in the loess hilly region, northwest Shanxi Province, China by using minirhizotron techniques. Soil properties such as soil temperature, moisture and soil nitrogen availability were measured during the experiment. The correlations of soil properties with fine root parameters of FRD, FRLD, FRDi and FRAI were analyzed. The results showed that: (1) The highest values of FRD, FRLD and FRAI all appeared in 40—60cm soil layer; and the lowest values occurred in 0—20cm soil layer. Significant differences were found for each of them among the five soil layers

基金项目:山西省科技攻关项目(2006031014)

收稿日期:2010-05-07; 修订日期:2010-08-18

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

($P < 0.05$). However, FRDi became small with soil depth increase, and the difference was insignificant among five soil layers ($P > 0.05$). (2) A similar seasonal trend was found for FRD, FRLD or FRAI among different soil layers except for 0—20 cm soil layer because of the seasonal change of soil resource availability. The highest values of FRD, FRLD and FRAI all occurred in autumn, and the smallest ones of them all appeared in spring. However, FRDi became finer from spring to autumn. For 80—100 cm soil layer, the values of each fine root parameter in March (spring) had significant differences from those in August and September (autumn) ($P < 0.01$). However, the values of each parameter for nine months (Mar.-Nov.) showed various levels of significances in their differences for other soil layers. (3) Pearson correlation analysis indicated that the seasonal change of fine roots was significantly influenced by soil temperature and moisture, respectively, and to a lesser extent, by soil nitrogen availability. Soil moisture had a significant influence on FRD, FRLD and FRAI in 0—20 cm soil layer ($r = -0.729 \sim -0.914$, $P < 0.05$). In 20—100 cm soil layers, soil temperature played a major role, and showed a significance increase with the soil depth increment ($r = -0.028 \sim -0.832$, $P < 0.05$). Functional variation of fine roots was different in among soil layers and seasons. Multiple correlation analysis showed that the effects of soil temperature and soil moisture on fine roots were more significant than those of soil temperature and soil nitrogen availability, or soil moisture and soil nitrogen availability in each soil layer. The seasonal interaction of soil temperature with soil moisture can explain 54.0%—98.6% of the seasonal variation of FRD, FRLD, FRDi and FRAI. These results suggested that soil resource availability was closely related to the vertical distribution and seasonal changes of fine roots, and soil temperature and moisture together had a great influence on fine root distribution in the loess hilly region.

Key Words: *Caragana korshinskii*; fine root; distribution; Minirhizotron technology; soil resource availability

树木根系是陆地森林生态系统物质循环中主要的 C 库之一^[1]。在多数森林生态系统中,根系周转消耗的 C 约占到年 C 循环的 50% 左右^[2]。细根(直径 ≤ 2 mm)作为根系中生理功能最活跃的部分^[3-4],其生理生态过程因消耗大量的光合产物^[5],而影响森林生态系统净初级生产力在地上和地下的分配格局^[6]。以往的研究只是通过分析细根生物量的动态变化来了解 C 在地下的分配格局^[4,7],而忽略了细根作为吸收器官的适应性变化。细根作为受土壤环境影响反应最敏感的部分,其可塑性是细根对土壤有效资源响应的主要机制之一^[8]。许多研究表明,当土壤资源有效性增加时,分配到地下的 C 增加,细根会通过增加根长密度或改变根系形态特征(如直径、根表面积)来提高对土壤养分和水分的吸收能力^[9-10]。因此探究细根对土壤资源变化的响应策略,对于准确估计 C 在地下的分配具有重要意义。然而由于以往的研究方法不能对细根的生长过程进行直接观察,所以对于细根在土壤有效资源变化下的适应性表现缺乏足够的了解。微根管法(Minirhizotron)的出现突破了这一局限,它可在不干扰土壤和伤害根的前提下,对细根的根数、长度、表面积和直径等特征的长期动态变化进行直接观察^[11],这为进一步分析细根对土壤资源变化的响应机理提供了重要的技术保障。

土壤资源有效性不但具有季节上的变化,还有垂直分布的差异^[12],这使得不同季节,甚至同一季节各个土层细根的结构和功能可能发生转变^[13-14]。而以往大多数研究仅注重细根的垂直分布变化^[15-18],忽视了季节变化过程中细根功能的转变。因此选择反映细根生长和功能变化的 4 个参数:根密度(fine root density; FRD)、根长密度(Fine root length density; FRLD)、平均直径(mean root diameter; FRDi)和根面积指数(Fine root area index; FRAI)作为测定指标,以晋西北黄土丘陵区 30a 生柠条(*Caragana korshinskii* Kom.) 人工灌木林为研究对象,采用 Minirhizotron 法进行研究,拟探讨以下问题:(1) FRD、FRLD、FRDi 和 FRAI 在 0—100 cm 土层的垂直分布特征及其季节动态;(2) 这些参数变化与土壤温度、水分和有效氮的相关关系。目的是了解这些细根参数的变化规律及与土壤有效资源变化的关系,这对认识森林生态系统 C 的地下分配、养分和水分吸收以及预测林分生产力等具有重要的理论意义^[6,19],同时也为干旱和半干旱地区人工林的经营管理提供理论指导。

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(38°58'N, 111°46'E, 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。年平均气温 4.1—5.5 °C, 最冷月(1 月)平均温度 -13.2 °C, 最热月(7 月)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 30a 生柠条人工灌木林, 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。选择立地条件一致的林地, 设置 30 m×30 m 的样地一块, 样地四周以 2 m 高铁丝网维护, 建成固定样地。在固定样地内再分别设置 3 个 30 m×10 m 的小样地, 每年不定期对样地进行人工除草, 以保证细根观测的单一性, 2008 年样地柠条平均株高 182.3 cm, 平均冠幅为 1.2 m, 盖度约为 60%。

1.2 微根管的安装

2006 年 10 月, 在每一小样地区域内, 分别随机各安装 4 个微根管, 共安装微根管 12 个。参照 Johnson 等^[12]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

考虑到管安装后需要一定的平衡期以减少实验本身带来的误差^[11,20], 选择管-土平衡 1a 后开始对细根进行取样。2008 年 3 月开始对柠条细根各参数进行野外观测。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 2008 年 3 月开始至 2008 年 11 月止, 每月中旬取样 1 次, 共观测 9 次。用 RooTrack2.0 软件对所获图像进行处理, 以获取细根数、根长度、直径和根表面积等数据。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。同时根据土层垂直深度位置(0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm)所对应的微根管图框分别分析各土层的细根参数。

本研究测定的细根参数分别为根数密度(单位观测窗面积内所观测到的细根数, 根/cm²)、根长密度(单位观测窗面积内观测到的所有细根长度, mm/cm²)、平均直径(指定土层深度内观测到所有细根直径的平均值, mm)和根面积指数(单位观测窗面积内观测到的所有细根的表面积, mm²/cm²)。

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、20—40、40—60、60—80、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, 土壤有效氮为两者之和; 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 1h 自动记录一次数据, 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, 其中细根形态指标的垂直分布特征为各土层 9 个月测定值的平均值。采用 One-Way ANOVA 法分别对细根各参数在不同土层的垂直分布和季节变化进行方差分析, 运用 LSD 法进行多重比较, 分别对土壤温度、水分和有效氮与细根各参数进行 Pearson 相关分析, 并运用 Enter 法对土壤温度和水分、土壤温度和有效氮及土壤水分和有效氮与细根各参数进行多元相关分析。数据处理均运用 SPSS13.0 软件来进行。

2 结果

2.1 根数密度(FRD)

FRD 表现随土层深度加深而先增大后减小, 其中 62.9% 的细根集中在 40—80 cm 土层深度内, 表层(0—20 cm)最少(8.5%), 40—60 cm 土层最多(34.3%)。分析表明, FRD 受土层深度影响差异极显著

($P < 0.01$), 除 20—40 cm 与 0—20 cm、80—100 cm、40—60 cm 与 60—80 cm 土层间差异不明显外($P > 0.05$), 其它各土层间均存在显著差异($P < 0.05$) (图 1)。

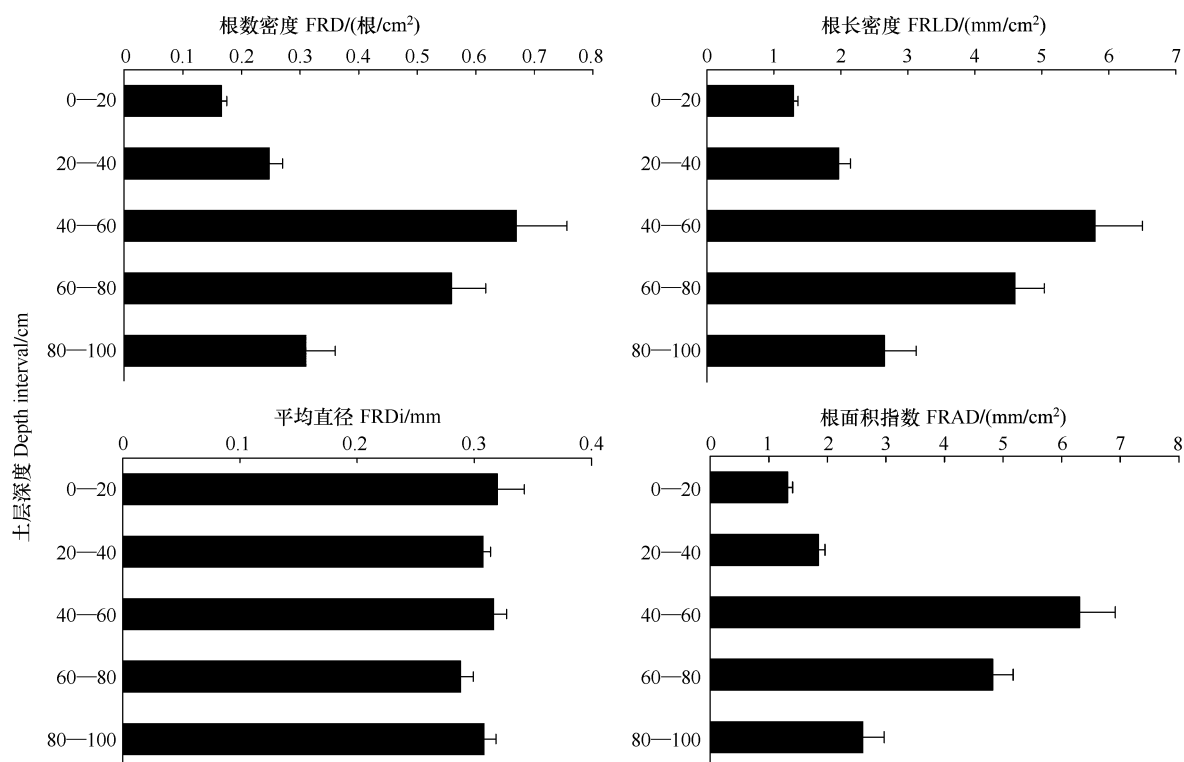


图 1 柠条人工林细根根数密度, 根长密度, 平均直径, 根面积指数不同土层深度垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of fine root FRD, FRLD, FRDi, FRAI among different soil depth in *Caragana korshinskii* plantation

受季节性气候影响, 各土层深度 FRD 表现明显的季节变化。除 0—20 cm 土层深度表现平缓外, FRD 表现随月份变化先增大后减小的趋势, 且最大值(平均 $(0.5316 \pm 0.1371) \text{ N/cm}^2$) 均出现在秋季月份(9 月份), 最小值(平均 $(0.2204 \pm 0.0510) \text{ N/cm}^2$) 则出现在春季(3 月份)。各土层受季节性因素影响表现差异, 在 40—60 cm 和 80—100 cm 土层, 3、4 和 5 月份分别与 8、9、10、11 月份间存在显著差异($P < 0.05$), 其它各月份间则无显著差异($P > 0.05$)。而在其它各土层各月份间均表现差异不显著($P > 0.05$) (图 2)。

相关分析表明(表 1), FRD 受土壤温度的影响随土层深度加深而增加($r = 0.357-0.791, P < 0.05$), 土壤水分仅在 0—20 cm 表现显著负相关($r = -0.744, P < 0.05$); FRD 与土壤有效氮在各土层间的相关性均不显著($r = 0.207-0.510, P > 0.05$)。多元相关分析表明(表 1), 各土层 FRD 明显受土壤温度和水分相互作用的影响($r = 0.639-0.926, P < 0.05$), 而受土壤水分和有效氮与土壤温度和有效氮的影响较小。

2.2 根长密度(FRLD)

FRLD 也表现随土层深度下降而先增大后减小, 0—20 cm 土层中仅分布总 FRLD 的 7.9%, 而 40—60 cm 土层则占到 35.5%, 其中 80.1% 的 FRLD 分布在 40—100 cm 土层内。分析表明随土层深度变化 FRLD 存在极显著差异($P < 0.01$), 除 20—40 cm 与 0—20 cm、80—100 cm 土层外, 其它各土层间均存在显著差异($P < 0.05$) (图 1)。

各土层 FRLD 也表现明显的季节动态(图 2), 除 0—20 cm 土层深度表现平缓外, FRLD 也表现随生长季变化先增大后减小的趋势, 且最大值(平均 $(4.4046 \pm 1.1743) \text{ mm/cm}^2$) 均出现在秋季月份(9 月份), 最小值(平均 $(1.8482 \pm 0.4691) \text{ mm/cm}^2$) 出现在春季(3 月份)。各土层受季节性因素影响不一致, 其中在 40—60 cm 土层, 3 月和 4 月分别与 8、9、10、11 月份间, 5 月和 9、10 月份间存在存在显著差异($P < 0.05$), 80—100 cm

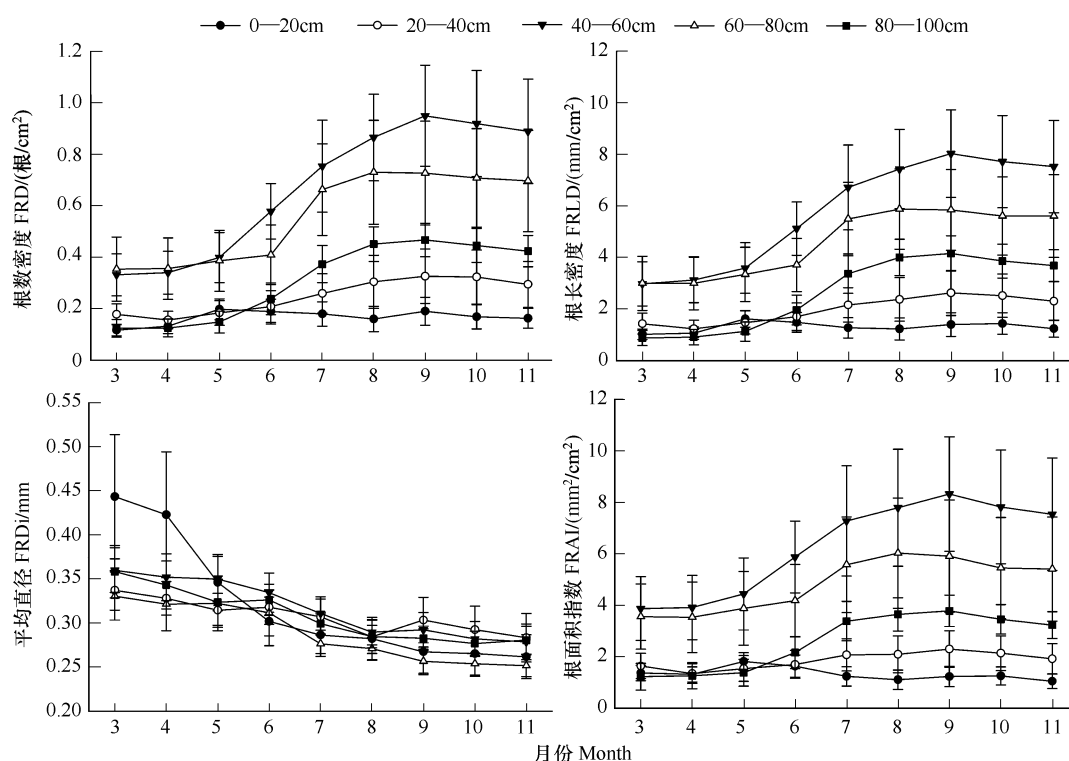


图2 柠条细根根数密度、根长密度、平均直径、根面积指数不同土层季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of fine root FRD, FRLD, FRDi, FRAI among different soil depth in *Caragana korshinskii* plantation

土层中除5月与7月表现显著差异($P < 0.05$)外,3月、4月分别与7、8、9、10、11月份间,5月分别与8、9、10、11月份间的差异都表现极显著($P < 0.01$),而在其它各土层各月份间差异均不显著($P > 0.05$)。

简单相关分析表明(表1),与FRD同样,FRLD与土壤温度的相关性随土层深度增加,其显著性也增加($r = 0.121 - 0.804$, $P < 0.05$);土壤水分也仅在表层(0—20 cm)表现明显($r = 0.729$, $P < 0.05$),而土壤有效氮在各土层的影响均不明显,但随土层深度加深相关性增加($r = 0.06 - 0.523$, $P > 0.05$)。多元相关分析也表明,各土层FRLD与土壤温度和水分的关联性($r = 0.633 - 0.928$, $P < 0.05$)要显著于与土壤水分和有效氮及土壤温度和有效氮的关联性。

2.3 平均直径(FRDi)

除80—100 cm土层外,FRDi表现随土层深度增加而减小(图1),且在 $(0.2884 \pm 0.0109) - (0.3197 \pm 0.0231)$ mm间波动,其中上层(0—40 cm)直径 (0.3136 ± 0.0060) mm要粗于中下层(40—100 cm) (0.3045 ± 0.0084) mm。FRDi受土层深度影响不明显($P > 0.05$),仅0—20 cm与60—80 cm间和40—60 cm与60—80 cm间存在显著差异($P < 0.05$)。

各土层FRDi受季节性影响也随生长季月份增加而减小(图2),生长季各土层细根直径均在0.25—0.44 mm间波动,春季最粗(平均 (0.3659 ± 0.0202) mm),秋季最细(平均 (0.2712 ± 0.0062) mm)。分析表明,除20—40 cm受季节性影响各月份间差异不显著外($P < 0.05$),其余各土层各月份间均存在差异,在0—20 cm土层,3月分别与7、8、9、10、11月,4月分别与9、10、11月份间存在极显著差异($P < 0.01$),3月与6月,4月分别与6、7、8月间存在显著差异($P < 0.05$);在40—60 cm土层,3月分别与8、9、10、11月,4月分别与8、10、11月,5月分别与10、11月间存在显著差异($P < 0.05$);在60—80 cm土层,3月分别与8、9、10、11月,4、5月分别与9、10、11月,6月分别与10、11月间存在显著差异($P < 0.05$);在80—100 cm土层,3月分别与8、9、10、11月间存在极显著差异($P < 0.01$),3月与7月,4月分别与8、9、10、11月间存在显著差异($P < 0.05$)。

简单相关分析表明(表1),FRDi受土壤温度的影响随土层深度增加而逐渐表现显著性($r = -0.421 -$

0.741, $P < 0.05$), 而与土壤水分、有效氮的相关性均不明显。多元相关分析表明, FRDi 在不同土层主要受土壤温度和水分相互作用影响, 其中在 40—60 cm 和 80—100 cm 土层表现显著相关性 ($r = 0.914$ 和 $r = 0.886$, $P < 0.05$), 但在不同土层与土壤温度和有效氮、土壤水分和有效氮的相关性均表现不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 柠条人工林细根根数密度 (FRD)、根长密度 (FRLD)、平均直径 (FRDi) 和根面积指数 (FRAI) 与土壤温度 (T)、水分 (W) 及有效氮 (N) 间的相关关系

Table 1 Correlation of fine root (≤ 2 mm in diameter) root density (FRD), root length density (FRLD), mean diameter (FRDi), root area index (FRAI) with soil temperature (T), moisture (W) and total nitrogen availability (N) in *Caragana korshinskii* plantation

	土层深度 Soil depth /cm	r_T	r_W	r_N	R_{T+W}	R_{T+N}	R_{W+N}
FRD	0—20	0.482	-0.744 *	0.421	0.781	0.568	0.854
	20—40	0.357	0.482	0.207	0.639	0.367	0.571
	40—60	0.569	0.218	0.250	0.926 *	0.570	0.373
	60—80	0.687 *	-0.302	0.457	0.832	0.704	0.511
	80—100	0.791 *	-0.501	0.510	0.866	0.804	0.630
FRLD	0—20	0.121	-0.729 *	0.060	0.743	0.124	0.731
	20—40	0.413	0.426	0.286	0.633	0.439	0.568
	40—60	0.602	0.179	0.274	0.928 *	0.603	0.366
	60—80	0.744 *	-0.365	0.484	0.865	0.759	0.563
	80—100	0.804 *	-0.528	0.523	0.867	0.818	0.654
FRDi	0—20	-0.461	-0.104	-0.406	0.540	0.545	0.420
	20—40	-0.421	-0.550	0.167	0.738	0.542	0.554
	40—60	-0.482	-0.309	-0.088	0.914 *	0.497	0.346
	60—80	-0.577	0.115	-0.472	0.863	0.621	0.474
	80—100	-0.741 *	0.390	-0.493	0.886 *	0.756	0.556
FRAI	0—20	-0.028	-0.914 **	-0.259	0.986 **	0.263	0.951 **
	20—40	0.516	0.351	0.387	0.664	0.560	0.582
	40—60	0.651	0.121	0.313	0.934 *	0.652	0.367
	60—80	0.787 *	-0.443	0.500	0.869	0.802	0.619
	80—100	0.832 *	-0.578	0.547	0.874	0.847	0.701

r_T 、 r_W 、 r_N 分别表示细根根数密度、根长密度、平均直径和根面积指数与土壤温度、水分及有效氮间的相关性; R_{T+W} 表示与土壤温度和水分的相关性; R_{T+N} 表示与土壤温度和有效氮的相关性; R_{W+N} 表示与土壤水分和有效氮的相关性; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

2.4 根面积指数 (FRAI)

FRAI 与 FRD 和 FRLD 表现同样的垂直变化 (图 1), FRAI 最大也出现在 40—60 cm 土层 ($(6.3090 \pm 0.6051) \text{ mm}^2/\text{cm}^2$), 最小在 0—20 cm 土层 ($(1.3259 \pm 0.0818) \text{ mm}^2/\text{cm}^2$)。受土层深度影响, FRAI 表现极显著差异 ($P < 0.01$), 除 20—40 cm 与 0—20 cm、80—100 cm 土层外, 其它各土层间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

FRAI 受季节性气候影响也表现同 FRD 和 FRLD 一样的动态 (图 2), 除 0—20 cm 土层深度表现平缓外, FRAI 也表现随生长季月份变化先增加后减小的趋势, 最大值 (平均 $(4.3007 \pm 1.2748) \text{ mm}^2/\text{cm}^2$) 均在秋季月份 (9 月份), 最小值 (平均 $(2.2647 \pm 0.5949) \text{ mm}^2/\text{cm}^2$) 则在春季 (3 月份)。FRAI 仅在 80—100 cm 土层受季节性因素影响, 3 月和 4 月分别与 8、9 月, 5 月与 9 月间表现极显著差异 ($P < 0.01$), 3 月和 4 月分别与 7、10、11 月, 5 月分别与 7、8、10、11 月间存在显著差异 ($P < 0.05$), 而其它各土层各月份间差异均不显著 ($P > 0.05$)。

简单相关分析表明 (表 1), FRAI 受土壤温度的影响也随土层深度的增加而增加 ($r = -0.028—0.832$, $P < 0.05$), 土壤水分仅在 0—20 cm 表现负相关 ($r = -0.914$, $P < 0.01$), 而土壤有效氮在各层的影响均较小; 多元相关分析表明, FRAI 在不同土层受土壤温度和水分相互作用影响明显, 在 0—20 cm 表现极显著 ($r = 0.986$, $P < 0.01$), 40—60 cm 表现显著 ($r = 0.934$, $P < 0.05$)。此外, 除在 0—20 cm 土层受土壤温度和有效氮相互作用影响极显著外 ($r = 0.951$, $P < 0.01$), 受土壤温度和有效氮、土壤水分和有效氮的相互作用影响均不明显。

3 讨论

3.1 细根垂直分布

在多数森林生态系统中,细根主要在土壤表层分布,且随土层深度增加而减小^[17-18,21]。而本研究发现,柠条细根除 FRDi 表现这一趋势外,FRD、FRLD 和 FRAI(分别占总数的 34.3%、35.5% 和 37.3%)主要分布在 40—60 cm 土层(图 1)。根系在土壤中的分布特征一般受土壤结构和土壤温度、水分和有效氮等因素的影响^[19]。细根集中分布于 40—60cm 土层的原因可能因为本研究地所处区域为干旱和半干旱地区,表层(0—20 cm)土壤为砂土:(1)保水性差,表层土壤往往是水分胁迫层,水分的缺少限制了细根在表层的富集,而干旱胁迫可刺激细根向较深土层生长,使得深土层细根比例增加^[22];(2)保肥性差,表层的养分通过水分的入渗向相对较深的土层集中;(3)由于地表植被相对稀疏,使得表层土壤温度较高限制了细根在表层的生长。对土壤有效资源的测定分析也发现,土壤温度随土层深度增加而逐渐降低,土壤水分含量则是随土层深度增加而增加,有效氮也表现增加趋势,其中 40—60 cm 这一土层有效资源较集中,因此这一土层细根会通过增加 FRD、FRLD 和 FRAI,来提高水分和养分的吸收能力^[23-24]。一般而言,在土壤养分和水分含量较低的情况下,细根会通过减小直径来调整其功能以适应环境^[25-26]。而本研究中表层(0—20 cm)FRDi 较大并不是细根直径在土壤资源较肥沃条件下的反应,可能是表层土壤含水量低且温度较高情况下的一种反应:细根在土壤中的穿透阻力增加,进而导致细根直径增加^[27]。相关性分析也表明:FRDi 变化显著受土壤温度和水分相互作用的影响($R=0.540-0.914, P<0.05$)。除土壤资源有效性影响细根各参数的垂直分布外,柠条自身的遗传特性也可能是因素之一:表层根短而粗,中下层根细而长以此来适应干旱环境。黄勇等^[28]对旱生植物梭梭(*Haloxylon ammodendron* (Mey.) Bunge)的研究也表明,随着树龄增加,FRD 和 FRLD 的分布向 40—80cm 土层集中。本研究地柠条树龄为 30a,其细根分布特征也可能是其作为旱生植物的遗传特征的一种表现。已有柠条根系的研究也发现,柠条的大部分根系集中在 10—80cm 土层^[29-30],本研究结果明显地也在这一范围之内。

此外一些对细根分布的研究表明,微根管法和土钻法分析所得数据在表层(0—10 cm)存在差异^[31-32],一般而言,微根管观察得到的根密度数据要低于土钻法得到的^[1,33]。这可能是微根管法的一种取样误差,因为在运用微根管测定根系时可能存在深度依赖的差异,即微根管测定表层根系数据经常偏低,而深层偏高^[11]。对于本研究细根垂直分布差异是否是这一问题的延续,还是真实的反映,仍还需作进一步的研究。

3.2 细根季节变化

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,因此树木的地下生长过程也具有明显的季节性^[14]。研究表明(图 2),柠条细根 FRD、FRLD 和 FRAI 均表现春季最小而秋季最大,而 FRDi 则是春季粗而秋季细。许多研究表明,温带落叶树种细根生长先于叶^[14,23]。根据柠条的生长特点,4 月份萌发新叶,春季(4 月)展叶之前,细根生长所需的 C 来自于根系上一年储存的碳水化合物,展叶后来自于新叶固定的碳水化合物^[34],由于根系储存物质因此春季观察到的 FRDi 较大,且由于春季土壤水分和有效氮的相对受限和分配到细根的 C 有限,新生的细根在随后一段时间内陆续死亡^[35],所以 FRD、FRLD 和 FRAI 在春季表现较小。4 月份后气温开始回升,随着有利的土壤有效资源形成和 C 的消耗,细根直径会逐渐变细^[25],细根 FRD、FRLD 和 FRAI 逐渐增加,并开始大量吸收水分和养分供地上枝和叶的生长,地上部分此时也开始固定大量的 C。然而夏季(5—7 月)C 分配格局发生改变,相当一部分 C 还是分配到地上的枝条和茎中^[34]。在夏季树冠发育完全后,细根吸收养分和水分与消耗的 C 之间保持一个相对的动态平衡^[23]。且 7 月中旬之前为旱季,受土壤资源有效性影响,细根生长仍较缓慢。7 月中旬之后至 10 月之间为雨季。随着雨季的到来,土壤有效资源增加,到了秋季(8—10 月),地上部分停止生长,树冠逐渐衰老,对养分和水分的需求逐渐降低,C 的分配格局又发生改变,地上部分累积的 C 主要用于地下部分生长,由于此时土壤资源条件与 C 分配在秋季对细根最佳,因此从细根的构建成本-效益方面来考虑,细根常会减小 FRDi,增加 FRAI、FRD 和 FRLD,来增加细根生产。而 10 月份后可能会随着气温下降、降水和地上 C 分配的减少,大部分寿命较短且直径较细的根死亡,会使得 FRAI、FRD 和 FRLD 减少,与此同时用于下一年根生长所需碳水化合物在根中的积

累^[34],可能会使得 FRDi 在冬季增粗。

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^[14],而转变的最基本反应是就是通过调整其根系特征,以适应其空间环境^[5]。分析表明,除 FRDi 外,其它细根特征均在 0—20 cm 土层变化相对平缓,而其它土层都表现一致的季节变化趋势。这可能因为表层土壤结构较疏松,而使得在夏秋季该土层土壤温度较高,从下层蒸发而来的水分影响 FRD、FRLD 和 FRAI 的季节变化($r = -0.729 \sim -0.914$, $P < 0.05$)。随着土层深度的加深,温度上升或下降时间则相对滞后,成为影响细根在此空间执行吸收功能的主要因子,特别地对于下层(60—80 cm) ($r = 0.687 \sim 0.832$, $P < 0.05$),而中层(40—60 cm)土壤作为土壤水分承上启下的部分,土壤水分也影响细根的生长,因此土壤温度和水分的相互作用共同影响这一土层细根的季节变化($r = 0.926 \sim 0.934$, $P < 0.05$)。此外本研究也发现,各细根参数主要受土壤温度和水分的的影响,有效氮的影响不明显,这可能与表层土壤水分亏缺限制其利用率有关^[17]。总的来说,FRD、FRLD、FRDi 和 FRAI 在各土层季节变化的 54.0%—98.6% 均由土壤温度和水分的相互作用而引起。因此随着土壤资源有效性在不同土层的季节性改变,地上 C 分配格局的变化,细根的功能也会发生变化,这可能是树木对于干旱环境的一种适应策略^[12]。

4 结论

(1) FRD、FRLD 和 FRAI 均表现随土层深度增加而先增大后减小的趋势,且均表现极显著差异($P < 0.01$),各参数最大值均出现在 40—80 cm 土层,而表层 0—20 cm 最小;FRDi 表现随土层深度增加而减小(除 80—100 cm 土层外),但差异不明显($P > 0.05$),其中表层 0—20 cm 最大,而 60—80 cm 土层最小。

(2) 受土壤资源有效性季节变化的影响,FRD、FRLD 和 FRAI 在不同土层(除 0—20 cm 外)表现出相似的季节动态,即随季节变化而先增大后减小,春季小而秋季大;FRDi 则表现随季节变化由粗逐渐变细的过程,春季最粗而秋季最细;80—100 cm 土层各参数均表现 3 月份(春季)分别与 8、9 月份(秋季)间存在极显著差异($P < 0.01$),而在其它土层,各参数月份间的差异随不同土层变化表现不同程度的显著性。

(3) 各细根参数与土壤温度、水分和有效氮在各土层存在不同程度的相关性。从简单相关分析来看,细根季节性变化主要受土壤温度和水分的的影响,有效氮的影响不明显。FRD、FRLD 和 FRAI 在 0—20 cm 土层主要受土壤水分影响($r = -0.729 \sim -0.914$, $P < 0.05$),而在 20—100 cm 土层则受土壤温度的影响,且显著性随土层加深而增加($r = -0.028 \sim 0.832$, $P < 0.05$)。各土层细根与土壤有效资源间的相关性反映了细根功能的季节性差异,综合分析表明,各细根参数季节动态差异的 54.0%—98.6% 均由土壤温度和水分的相互作用而引起。

References:

- [1] Vogt K A, Persson H. Measuring growth and development of roots//Lassoie J P, Hinckley T M, eds. Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology. Boca Raton: CRC Press, 1991: 477-501.
- [2] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Absbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. Plant Soil, 1996, 187(2): 159-219.
- [3] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forest. Nature, 1993, 361(6407): 59-61.
- [4] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. New Phytologist, 2000, 147(1): 131-139.
- [5] 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 biomes. Oecologia, 1996, 108(3): 389-411.
- [6] He J S, Wang Z Q, Fang J Y. Issues and prospects of belowground ecology with special reference to global climate change. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [7] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Factors controlling the timing of root elongation intensity in a mature upland oak stand. Plant Soil, 2001, 228(2): 201-212.
- [8] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. New Phytologist, 2004, 162(1): 9-24.
- [9] Curt T, Prévosto B. Rooting strategy of naturally regenerated beech in Silver birch and Scots pine woodlands. Plant Soil, 2003, 255(1): 265-279.
- [10] Meinen C, Hertel D, Leuschner C. Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: is there evidence of below-ground overyielding? Oecologia, 2009, 161(1): 99-111.

- [11] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, Storm M J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(3): 263-289.
- [12] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 1996, 108(4): 583-595.
- [13] Hutchings M J, John E A. Distribution of roots in soil, and root foraging activity//De Kroon H, Visser E J W, eds. *Root Ecology*. New York: Springer-Verlag, 2003: 61-83.
- [14] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, Brown S E. Response of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 105-115.
- [15] Davis J P, Haines B, Coleman D, Hendrick R. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(1): 19-33.
- [16] Zhou Z C, Shangguan Z P. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant Soil*, 2007, 291(1/2): 119-129.
- [17] 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.
- [18] An H, Wei L Y, Liu Y, Shangguan Z P. Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in Hilly Loess Regions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 611-619.
- [19] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 2002, 72(3): 311-328.
- [20] Shi J W, Yu S Q, Yu L Z, Han Y Z, Wang Z Q, Guo D L. Application of minirhizotron in fine root studies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 715-719.
- [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 Science of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [22] Persson H, von Fircks Y, Majdi H, Nilsson 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(1): 161-165.
- [23] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 167-176.
- [24] Schmid I, Kazda M. Clustered root distribution in mature stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Oecologia*, 2005, 144(1): 25-31.
- [25] Ostonen I, Lohmus K, Lasn R. The role of soil conditions in fine root ecomorphology in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant Soil*, 1999, 208(2): 283-292.
- [26] 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.
- [27] Misra R K, Gibbons A K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. *Plant Soil*, 1996, 182(1): 1-11.
- [28] Huang Y, Guo Y H. Root distribution characteristics of *Haloxylon ammodendron* (Mey.) Bunge Plantation. *Acta Agrestis Sinica*, 2009, 17(1): 84-87.
- [29] Niu X W, Ding Y C, Zhang Q, Xu Q. Studies on the characteristics of *Caragana* root development and some relevant physiology. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(5): 860-865.
- [30] 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.
- [31] Upchurch D R, Ritchie J T. Root observations using a video recording system in mini-rhizotrons. *Agronomy Journal*, 1983, 75: 1009-1015.
- [32] Samson B K, Sinclair T R. Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant Soil*, 1994, 161(2): 225-232.
- [33] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 1992, 73(4): 1139-1147.
- [34] Pregitzer K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots. *New Phytologist*, 2003, 158(3): 421-424.
- [35] Anderson L J, Comas L H, Lakso A N, Eissenstat D M. Multiple risk factors in root survivorship: a 4-year study in Concord grape. *New Phytologist*, 2003, 158(3): 489-501.

参考文献:

- [6] 贺金生, 王政权, 方精云. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望. *科学通报*, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [17] 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] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.
- [20] 史建伟, 于水强, 于立忠, 韩有志, 王政权, 郭大立. 微根管在细根研究中的应用. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 715-719.
- [28] 黄勇, 郭玉海. 人工梭梭林根系的分布特征. *草地学报*, 2009, 17(1): 84-87.
- [29] 牛西午, 丁玉川, 张强, 徐强. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 860-865.
- [30] 张志山, 李新荣, 张景光, 王新平, 赵金龙, 陈应武. 用 Minirhizotrons 观测柠条根系生长动态. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 457-464.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 14 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The sensitivity of Xiamen's three industrial sectors to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (3863)
Desertification and change of landscape pattern in the Source Region of Yellow River	 HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al (3872)
Comparison of ecological significance of landscape diversity changes in karst mountains: a case study of 4 typical karst area in Guizhou Province	 LUO Guangjie, LI Yangbing, WANG Shijie, et al (3882)
Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors	 XU Hanqiu (3890)
Primary exploration on the ecological land use classification in Beijing	TANG Xiumei, CHEN Baiming, LU Qingbin, et al (3902)
Changes of spectral reflectance of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Abies nephrolepis</i> along altitudinal gradients in Changbai Mountain	 FAN Xiuhua, LIU Weiguo, LU Wenmin, et al (3910)
Biomass allocation patterns and allometric models of <i>Abies nephrolepis</i> Maxim	 WANG Jinsong, ZHANG Chunyu, FAN Xiuhua, et al (3918)
Niche analysis of dominant species of macrobenthic community at a tidal flat of Yushan Island	 JIAO Haifeng, SHI Huixiong, YOU Zhongjie, et al (3928)
The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows <i>passer montanus</i>	 YANG Zhihong, SHAO Shuli (3937)
The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China	 ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al (3947)
Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation	LI Caixia, SUN Jingsheng, ZHOU Xinguo, et al (3956)
Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to verticillium wilt (<i>Verticillium dahliae</i> Kleb.)	 ZHOU Baoli, CHEN Zhixia, DU Liang, et al (3964)
Biological cycle and accumulation of lanthanum in the forage-mushroom-soil system	 WENG Boqi, JIANG Zhaowei, WANG Yixiang, et al (3973)
Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed	 YU Jinxiang, ZHENG Bofu, LIU Yafei, et al (3980)
Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a <i>Caragana korshinskii</i> plantation	 SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (3990)
Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate	 LIANG Fei, TIAN Changyan (3999)
Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay	 YANG Jifang, WANG Haili, CHEN Fusheng, et al (4007)
Concentration of O ₃ at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in <i>Triticum aestivum</i>	 WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (4019)
Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue	 GONG Shuaishuai, HAN Jin, GAO Yanzheng, et al (4027)
Screening of highly-effective rhizobial strains on Alfalfa (<i>Medicago polymorpha</i>) in soil	 LIU Xiaoyun, GUO Zhenguo, LI Qiaoxian, et al (4034)
Geochemical evolution processes of soil major elements in the forest-dominated Jinshui River Basin, the upper Hanjiang River	 HE Wenming, ZHOU Jie, ZHANG Changsheng, et al (4042)
Integrating geographic features and weather data for methodology of rasterizing spring maize growth stages	 LIU Qin, YAN Changrong, MEI Xurong, et al (4056)
A model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse	 LI Gang, CHEN Yaru, DAI Jianfeng, et al (4062)
Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province	 HUANG Wei, ZHANG Junhua, LI Wenhong, et al (4072)
Review and Monograph	
Theoretical backgrounds and recent advances in avian molecular phylogeography	DONG Lu, ZHANG Yanyun (4082)
A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods	WANG Yicheng (4094)
Human activities are the principle cause of biotic homogenization	CHEN Guoqi, QIANG Sheng (4107)
Factors influencing the occurrence of <i>Ophiocordyceps sinensis</i>	ZHANG Guren, YU Junfeng, WU Guangguo, et al (4117)
Molecular detection of diversity of methanogens and methanotrophs in natural wetland soil	SHE Chenxing, TONG Chuan (4126)
Scientific Note	
Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River	GONG Lu, ZHANG Haifeng, LÜ Guanghui, et al (4136)
Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest	 ZHOU Xiaoqing, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4144)
The aerodynamic roughness length of biological soil crusts: a case study of Gurbantungut Desert	 WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weimin, et al (4153)
Differences among population quantities and community structures of pests and their natural enemies in tea gardens of different altitudes	KE Shengbing, DANG Fenghua, BI Shoudong, et al (4161)

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 14 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 14 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		



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