

柠条人工幼林细根生长和死亡的季节变化

王孟本, 陈建文, 史建伟, 荀俊杰, 李俊英

(山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006)

摘要:以晋西北黄土区 5 年生柠条(*Caragana korshinskii* Kom.) 人工林为研究对象,应用微根管技术对林地 100cm 土层范围的柠条细根动态进行了观测。以细根根长密度(RLD , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$)、生长速率(RLD_{gr} , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)、死亡速率(RLD_{dr} , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)和生死之比(R_{gd})为基本参数,对生长季(2007 年 4–9 月)柠条细根的生长和死亡特点及其与环境因子(如气温、降雨量、土壤温度、土壤水分等)的关系做了探讨。结果表明:(1)在生长季,柠条细根的平均 RLD_{gr} 和 RLD_{dr} 分别为 $0.1264 \text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.0354 \text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$; (2)下层(50–100cm)细根的 RLD_{gr} 大于上层(0–50cm);但是下层细根的 RLD_{dr} 小于上层; (3)柠条细根 RLD_{gr} 的季节变化趋势为 4–7 月份迅速增大,8 月份达峰值,之后迅速减小;细根 RLD_{dr} 的季节变化趋势则为 4–7 月初缓慢增大,之后迅速增大,在生长季末(9 月下旬)达到最大; (4)柠条细根 R_{gd} 在生长季呈逐渐减小趋势,但是仅季末 $R_{gd} < 1$,说明在生长季柠条的细根动态是一个以生长占优势的生死交织过程; (5) RLD_{gr} 与气温存在极显著正相关($P < 0.01$),与土壤温度存在显著正相关($P < 0.05$);但是 RLD_{dr} 与各个环境因子的相关性均不显著($P > 0.05$)。

关键词:细根;柠条;生长速率;死亡速率;微根管;环境因子

The seasonal change patterns of production and mortality of fine roots in young *Caragana korshinskii* plantation

WANG Mengben*, CHEN Jianwen, SHI Jianwei, XUN Junjie, LI Junying

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

Abstract: The objective of this study was to investigate the fine root dynamics of *Caragana korshinskii* Kom., a shrub species widely planted to control soil erosion and land desertification in the semiarid area of China, in a 5-year-old plantation in the Loess Plateau area of Northwest Shanxi, China, using the minirhizotron technique. By defining the fine root growth rate (RLD_{gr} , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), fine root death rate (RLD_{dr} , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), and ratio of growth to death (R_{gd} , i. e. RLD_{gr}/RLD_{dr}) as basic parameters, their change patterns and the relationships of RLD_{gr} and RLD_{dr} with environmental factors (i. e. air temperature, precipitation, soil temperature and soil water content) in the growth season (from April to September) in 2007 were analyzed. The results showed that the average RLD_{gr} and RLD_{dr} in the growing season were $0.1264 \text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ and $0.0354 \text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The average RLD_{gr} in the deep soil layer (50–100cm) was higher than in the top soil layer (0–50cm), while the average RLD_{dr} in the deep layer was lower than in the top layer. The RLD_{gr} increased rapidly from April to July and peaked in August, and then decreased rapidly. The RLD_{dr} increased gradually from early April to early July, accelerated rapidly, and peaked until the end of the growing season (late September). The R_{gd} decreased gradually from April to September and fell to < 1 at the end of the growing season. The seasonal changes of RLD_{gr} were significantly correlated with air temperature ($P < 0.01$), and correlated with soil temperature ($P < 0.05$). There were, however, no significant correlations between seasonal trends of RLD_{dr} and the environmental factors ($P > 0.05$).

基金项目:山西省科技攻关项目(2006031014)

收稿日期:2009-09-12; 修订日期:2009-11-09

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

Key Words: fine root; *Caragana korshinskii*; growth rate; death rate; minirhizotron; environmental factor

林木细根(直径 < 2 mm)具有较大的吸收表面积,是林木吸收水分和养分的主要器官。虽然细根生物量仅占林木总生物量的 1%—12%^[1],但是由于其生产、死亡和分解的循环周转很快,可消耗林木净初级生产量的 8%—69%^[1]。细根的生死时间和数量在整个根系调节吸收机能中具有重要作用,因而影响植物的竞争力和适应性。细根的形成和死亡除了受养分影响之外,土壤水分和温度对其动态特征同样具有重要影响^[2]。然而截至目前,对灌木树种细根动态的相关研究仍甚少见到。

微根管技术是一种非破坏性、可以原位直接观察和研究植物细根的新方法。自 20 世纪 90 年代以来,该方法已经比较广泛地运用于农作物和野生植物细根生长动态和功能的研究^[3-4]。其最大优点是可以在不影响根系生长过程的情况下,对细根生长(从发生到死亡)进行长期监测。因此,微根管法已被用在研究植物细根的发生、生长、死亡、寿命和物候,以及生态系统地下部分的碳估算和根系吸水模型的建立等方面^[5-7]。

柠条(*Caragana korshinskii* Kom)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,同时又是优质的灌木饲料植物资源,具有较高的生态和经济价值^[8-9]。有关柠条生物学特性、资源分布、水分利用状况及其在群落中的作用等方面的研究较多^[8,10],但有关其根系动态的研究则较少。Cheng 等采用壕沟剖面法对黄土高原北部接近沙漠地带的柠条细根分布特点进行了观测。他们发现在 6m 深观测剖面中,柠条细根主要集中在 1m 深土层内(砂壤土和砂土地分别为 70.7% 和 96.6%)^[11]。Zhang 等采用壕沟剖面法、土芯法和微根管法对腾格尔沙漠柠条细根的分布和动态进行了观测^[12]。结果表明,生长季土壤水分与细根周转的季节变化趋势同步,土壤水分对细根周转的影响很明显。

黄土高原地区的柠条人工林多生长在水分条件比较严酷的生境下。研究其细根生长和死亡动态不仅对深入认识柠条细根的生长规律及其与环境因子的关系具有重要意义,同时可为人工林营造和管理提供科学参考。我们以晋西北黄土高原地区 5 年生人工柠条林为研究对象,运用微根管法对柠条的细根动态进行了野外定位观测。本文旨在对该人工幼林柠条细根生长和死亡的季节变化特征及其与环境因子的关系进行探讨。

1 研究方法

1.1 试验区概况和样地设置

试验区设在山西省五寨县张家坪林场(东经 111°46.296',北纬 38°58.825',海拔 1448m)。该区属温带大陆性气候,四季分明,春季干旱多风,夏秋雨量集中。年平均降雨量 478.5mm,年蒸发量 1784.4mm,年平均气温 4.9℃,最冷月(1 月份)平均温度 -13.2℃,最热月(7 月份)平均温度 20.0℃,一般霜终日为 5 月中旬,初日为 9 月中旬,平均无霜期为 125d。该区土壤为黄土状淡栗褐土,土壤肥力较低。

试验用林分为 5 年生人工柠条纯林,位于梁峁缓坡部位,坡度 0—5°。林分源于 2002 年秋季播种造林,播种时行距 2m。在林地设置 30m × 30m 样地,样地四周以 2m 高铁丝网维护,建成固定样地。样地内有柠条 11 行共 291 株(丛),2007 年平均株高 123.6cm,基茎 0.45cm,总盖度 32.7%。

1.2 微根管安装

2006 年 10 月,在样地中心 25m × 25m 区域内,在距株行 0、50、100cm 处分别随机确定 3 个位点安装微根管,共安装微根管 9 个。参照 Johnson 等介绍的方法^[13]安装微根管(美国 Bartz 技术公司)。微根管(长为 150cm,外径 5.5 cm,内径 5.0cm)的安装与地面成 45°角,垂直深度 100 cm,露出地面部分约 20cm。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,用外涂白色涂料的塑料瓶(长 20cm)将管口封盖。为了排除极少数半灌木和若干草本植物对柠条细根观测的干扰,同时将半灌木植物连根挖掉,并将微根管周围的草本植物锄掉。

1.3 数据的采集、整理

2007 年 4 月 10 日开始对林地柠条细根生长状况进行野外观测,至 11 月 15 日,共进行了 9 次观测。一般

每月观测 1 次,个别月份观测了 2 次。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 $1.8\text{cm} \times 1.4\text{cm}$,每个微根管收集 91—92 幅图片。用 RooTrack2.0 软件^[14]对所获图像进行处理,以获取细根长度、直径等数据。分活细根(白色与褐色细根)和死根(黑色与 2 次观测期间消失的细根)两类^[15]。依据微根管号、观测框位置、取样时间、细根编号建立细根数据库。

为了与常用的单位土壤体积为基础的细根动态数据进行比较^[13,16-18],本文以单位土体的根长密度(RLD , $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$)作为基本参数。

$$RLD = RL/A \times DOF$$

其中, $RL(\text{mm})$ 为观测窗中观测到的细根根长; $A(\text{cm}^2)$ 为观测窗面积; $DOF(\text{cm})$ 为田间观测深度或田间深度 DOF ^[19]。 DOF 一般在 $0.2\text{—}0.3\text{cm}$ ^[4, 20-22]。由于柠条的细根直径较小^[23],本研究中 DOF 取 0.2cm 。

以单位时间、单位土壤体积的细根生长量和死亡量表示细根的生长速率(RLD_{gr})和死亡速率(RLD_{dr}):

$$RLD_{\text{gr(dr)}} = \Delta RLD_{\text{增(减)}}/T$$

其中, $\Delta RLD_{\text{增(减)}}$ 为相邻两次观测期之间单位土壤体积的柠条细根生长量(死亡量), T 为两次观测的间隔天数(d)。 RLD_{gr} 和 RLD_{dr} 的单位均为 $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

为了表示细根生长量与死亡量的相对大小,本研究同时引入细根生死之比(即细根生长速率与死亡速率之比, R_{gd})这一参数:

$$R_{\text{gd}} = RLD_{\text{gr}}/RLD_{\text{dr}}$$

由定义可见, $R_{\text{gd}} = 1$,生长量与死亡量相等; $R_{\text{gd}} > 1$,生长量大于死亡量; $R_{\text{gd}} < 1$,生长量小于死亡量。

参照 Burton 等^[24]的方法对生长季细根生长量和死亡量进行估算。在本文中,生长季细根生长量是指 4 月 11 日至 9 月 23 日各次观测得到的细根(已有细根和新细根)长度增加值之和($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$),生长季细根死亡量是指各次观测得到的细根(因细根死亡、脱落和昆虫取食等)长度减少值之和($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

1.4 环境因子的观测

气象因子、土壤温度和土壤含水量等的观测与细根观测同期进行。气温和降雨量通过在野外设立 Watch Dog 气象站(美国 Spectrum 公司生产)获取。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、100cm 土层深度各安装温度自动记录仪 1 个,数据记录间隔时间为 1h,由此计算土壤温度日平均值,根据日平均值求得观测时段的土壤温度(平均值)。土壤水分用烘干法测定,在 0—20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm 和 80—100cm 土层深度分别取样,每层 2 个样品,每次 3 个样点(分别取自 3 个行距的中间位置),由此获得每个土层或整个土壤剖面的平均土壤水分含量。因为 Watch Dog 气象站的降雨量测定功能 2007 年中期出现故障,本文降雨量数据取自距试验点约 6km 的五寨县气象站。

1.5 数据分析

鉴于本地无霜期介于 5 月中旬至 9 月中旬。根据气温观测数据,2007 年日平均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的时期为 4 月下旬至 9 月下旬。因此,本文主要对当年 4—9 月份的林地柠条细根生长和死亡动态进行分析。

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)法及其多重比较法对不同土层、不同时间段的细根 RLD_{gr} 和 RLD_{dr} 平均值进行差异显著性检验;根据 Pearson 相关系数对气温、降雨量、土壤温度和土壤水分等环境因子与 RLD_{gr} 和 RLD_{dr} 的相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 柠条细根的生长速率(RLD_{gr})

2.1.1 细根 RLD_{gr} 的垂直变化

在 0—100cm 土壤剖面各个土层(图 1),柠条细根生长速率并不一致。在生长季中期(图 1b—e),细根 RLD_{gr} 最大值出现的土层由浅入深,依次出现在 40—50cm、50—60cm、70—80cm 和 90—100cm 土层。从上层(0—50cm)与下层(50—100cm) RLD_{gr} 平均值来看,生长季前期(4 月初至 7 月下旬)上层 RLD_{gr} 平均值大于下层,生长季后期(7 月下旬至 9 月下旬)下层 RLD_{gr} 平均值大于上层。

就生长季 RLD_{gr} 总体垂直变化(图 2a)而言,下层 RLD_{gr} 平均值大于上层,前者为后者的 1.31 倍。其中,70—80cm 土层的细根 RLD_{gr} 最大($0.2027 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$),30—40cm 土层的细根 RLD_{gr} 最小($0.0737 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$),前者的 RLD_{gr} 为后者的 2.75 倍,差异显著($P < 0.05$)。

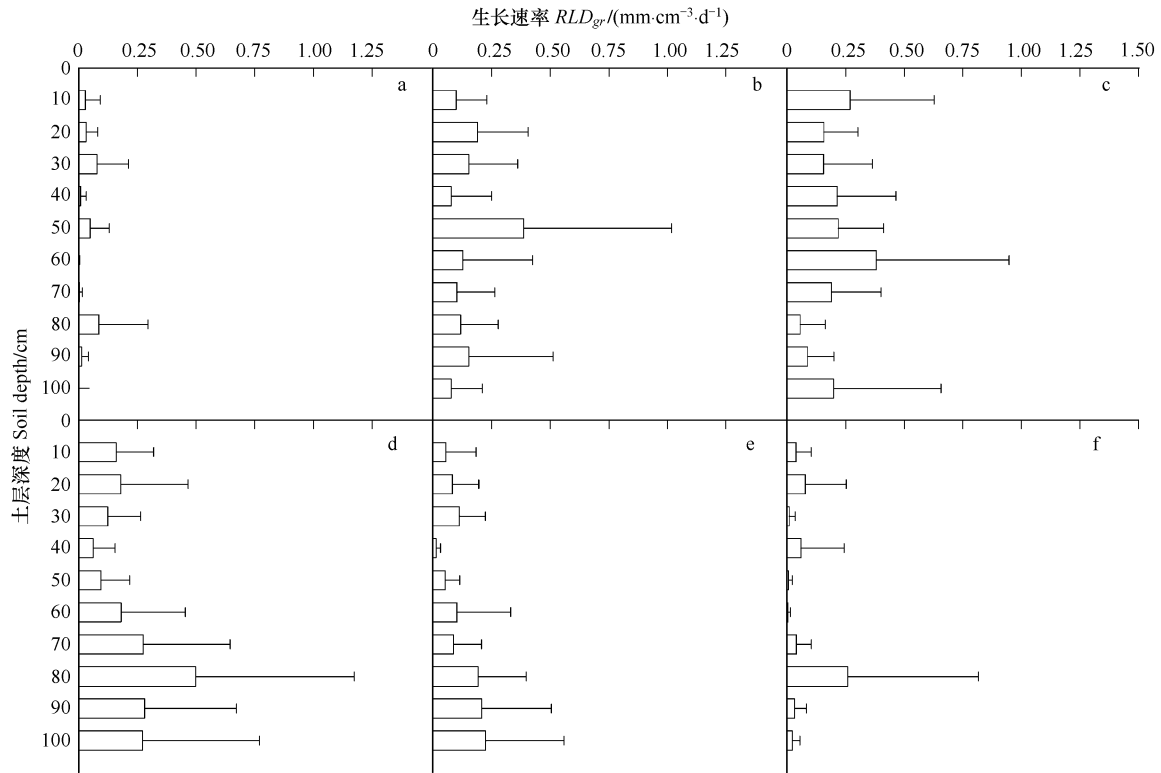


图1 生长季不同时段柠条细根生长速率的垂直变化(2007年)

Fig. 1 The vertical changes of fine root growth rate of *RLD* of *Caragana korshinskii* at different stages of the growing season (2007)

a. 4月11日至5月26日;b. 5月27日至7月4日;c. 7月5日至7月26日;d. 7月27日至8月12日;e. 8月13日至9月5日;f. 9月6日至9月23日

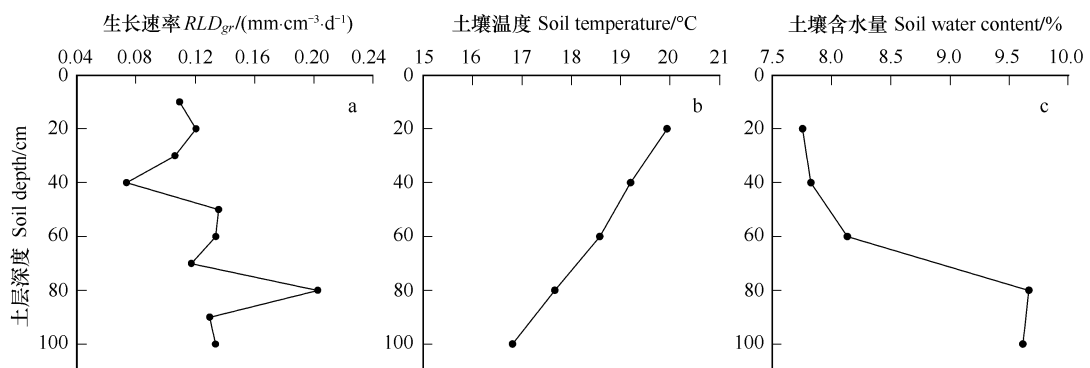


图2 生长季 100cm 土壤剖面的柠条细根平均生长速率、平均土壤温度和土壤水分(2007年)

Fig. 2 The average fine root growth rate of *RLD* (root length density) of *Caragana korshinskii*, average soil water content and soil temperature in 100cm soil profile in the growing season (2007)

2.1.2 细根 RLD_{gr} 的季节变化

在 0—100cm 土壤剖面各个土层,细根 RLD_{gr} 的季节变化大体均为单峰型(图 3),主要不同之处在于峰值大小和出现时间不同。从峰值出现时间来看,深土层比浅土层出现的时间较晚。0—60cm 各土层的峰值出现

在 5 月 27 日至 7 月 26 日,而 60—100cm 各土层的峰值则出现在 7 月 27 日至 8 月 12 日。

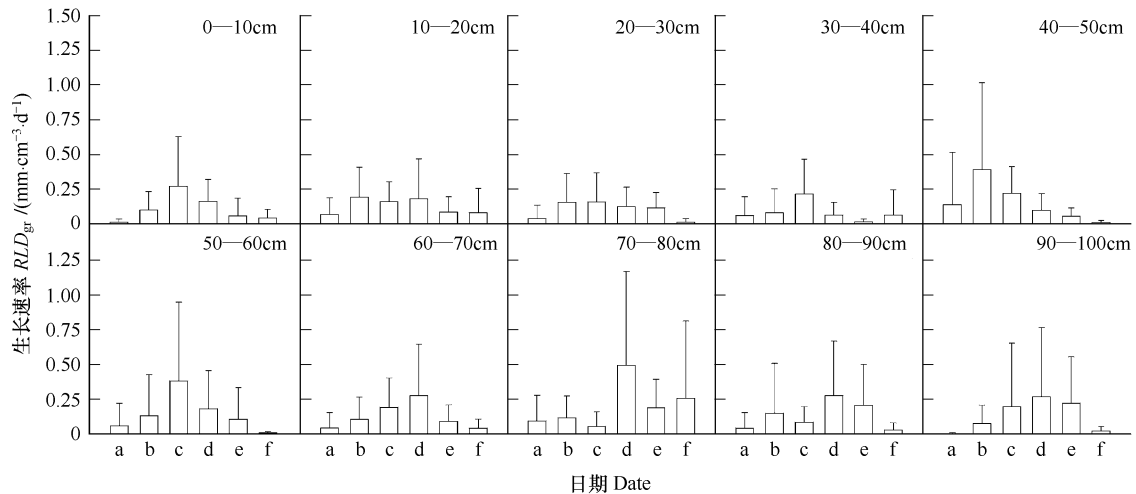


图 3 10 个土层柠条细根的生长速率的季节变化(2007 年)

Fig. 3 The seasonal changes of fine root growth rate of *RLD* (root length density) of *Caragana korshinskii* at 10 soil layers (2007)

a. 4 月 11 日至 5 月 26 日; b. 5 月 27 日至 7 月 4 日; c. 7 月 5 日至 7 月 26 日; d. 7 月 27 日至 8 月 12 日; e. 8 月 13 日至 9 月 5 日; f. 9 月 6 日至 9 月 23 日

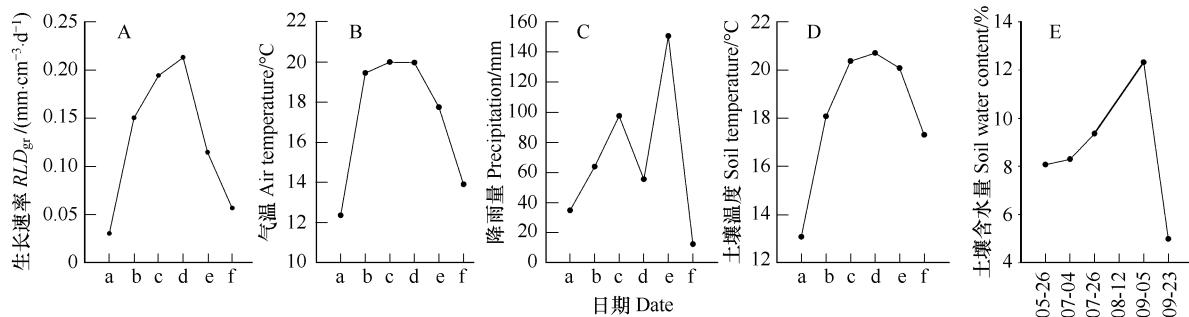


图 4 柠条细根生长速率与气温、降雨量、土壤温度和土壤水分的季节变化(2007 年)

Fig. 4 Seasonal changes of the fine root growth rate of *RLD* of *Caragana korshinskii*, air temperature, precipitation, soil temperature and soil water content (2007)

a. 4 月 11 日至 5 月 26 日; b. 5 月 27 日至 7 月 4 日; c. 7 月 5 日至 7 月 26 日; d. 7 月 27 日至 8 月 12 日; e. 8 月 13 日至 9 月 5 日; f. 9 月 6 日至 9 月 23 日

从整体上看,柠条细根 RLD_{gr} 的季节变化亦为单峰型(图 4A)。 RLD_{gr} 在 4 月 11 日至 8 月 12 日持续增大,在 7 月 27 日—8 月 12 日出现峰值($0.2129\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$),之后逐渐减小。生长季中期(5 月 27 日—8 月 12 日) RLD_{gr} 较大,与生长季初期(4 月 11 日—5 月 26 月)和生长季末期(9 月 6 日—9 月 23 日)的 RLD_{gr} 存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2 柠条细根的死亡速率(RLD_{dr})

2.2.1 细根死亡速率(RLD_{dr})的垂直变化

在生长季初期,土壤剖面的细根 RLD_{dr} 很小(图 5a)。除此之外,在其它观测期,柠条细根的 RLD_{dr} 大体具有随土层加深而减小的趋势。 RLD_{dr} 最大值出现在 0—30cm 浅土层, RLD_{dr} 最小值出现在 60—100cm 深土层。除生长季初期 0—50cm 土层的 RLD_{dr} 平均值小于 50—100cm 土层之外,此后 0—50cm 土层的 RLD_{dr} 平均值均大于 50—100cm 土层。

细根 RLD_{dr} 的总体垂直变化(如图 6a)显示, RLD_{dr} 具有随土层加深而逐渐减小的趋势。上层(0—50cm)

RLD_{dr} 明显大于下层(50—100cm),前者为后者的2.49倍。其中,0—10cm 土层 RLD_{dr} 最大($0.0711\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$),90—100cm 土层 RLD_{dr} 最小($0.0126\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$),前者为后者的5.64倍,差异显著($P<0.05$)。

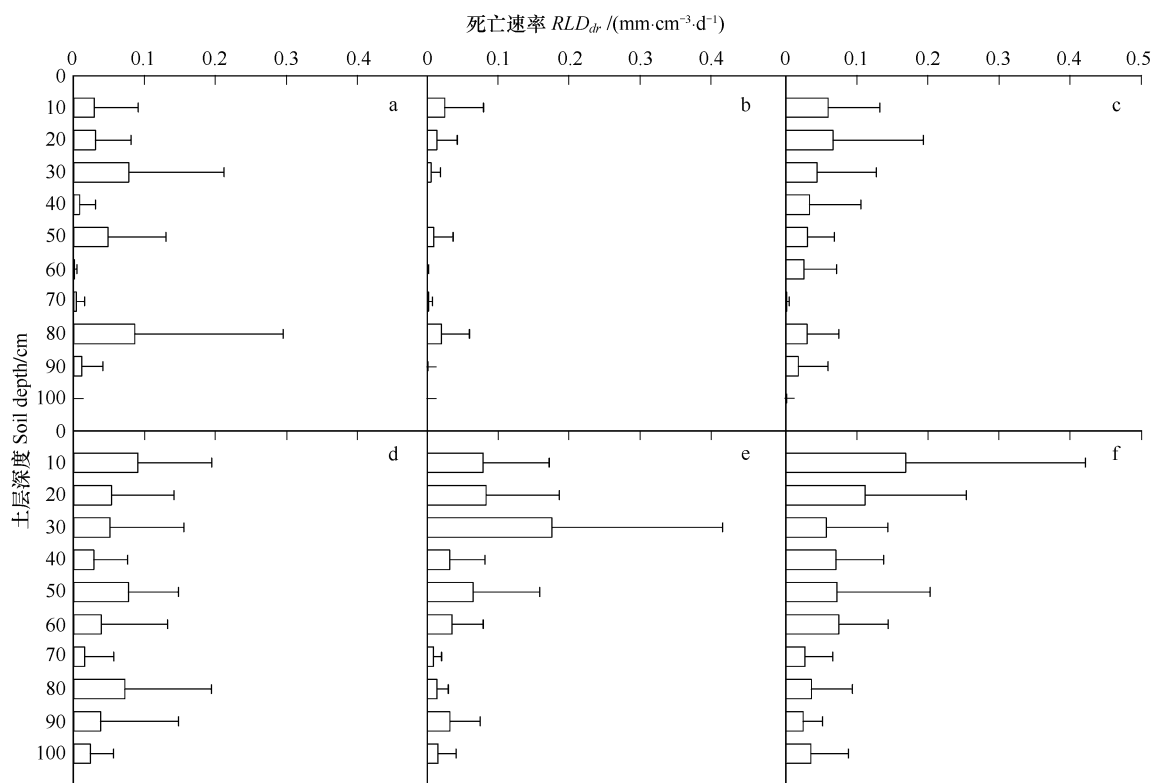


图5 生长季不同时段柠条细根死亡速率的垂直变化(2007年)

Fig. 5 The vertical changes of fine root death rate of *RLD* *Caragana korshinskii* at different stages of the growing season (2007)

a. 4月11日至5月26日;b. 5月27日至7月4日;c. 7月5日至7月26日;d. 7月27日至8月12日;e. 8月13日至9月5日;f. 9月6日至9月23日

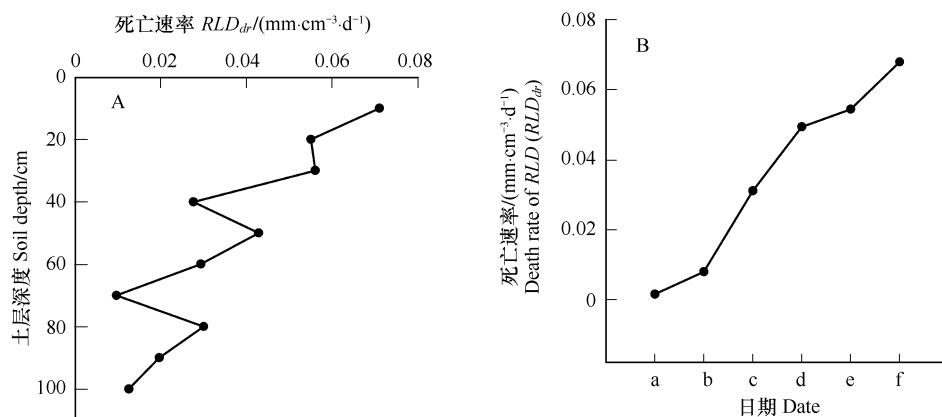


图6 生长季100cm 土壤剖面柠条细根死亡速率的垂直变化(A)和季节变化(B)(2007年)

Fig. 6 The vertical (A) and seasonal (B) changes of fine root death rate of *RLD* (root length density) of *Caragana korshinskii* in 100cm soil profile in the growing season (2007)

a. 4月11日至5月26日;b. 5月27日至7月4日;c. 7月5日至7月26日;d. 7月27日至8月12日;e. 8月13日至9月5日;f. 9月6日至9月23日

2.2.2 细根死亡速率(RLD_{dr})的季节变化

在0—100cm 土壤剖面各个土层,细根 RLD_{dr} 的峰值均比较明显(图3), RLD_{dr} 的峰值均出现在年生长季后

半期。

从整体上看(图 6B),在生长季,柠条细根的 RLD_{dr} 随时间进程而增大。季初(4 月 11 日至 7 月 4 日) RLD_{dr} 缓慢增大,之后迅速增大,季末(9 月 5 日至 9 月 23 日)达到最大。

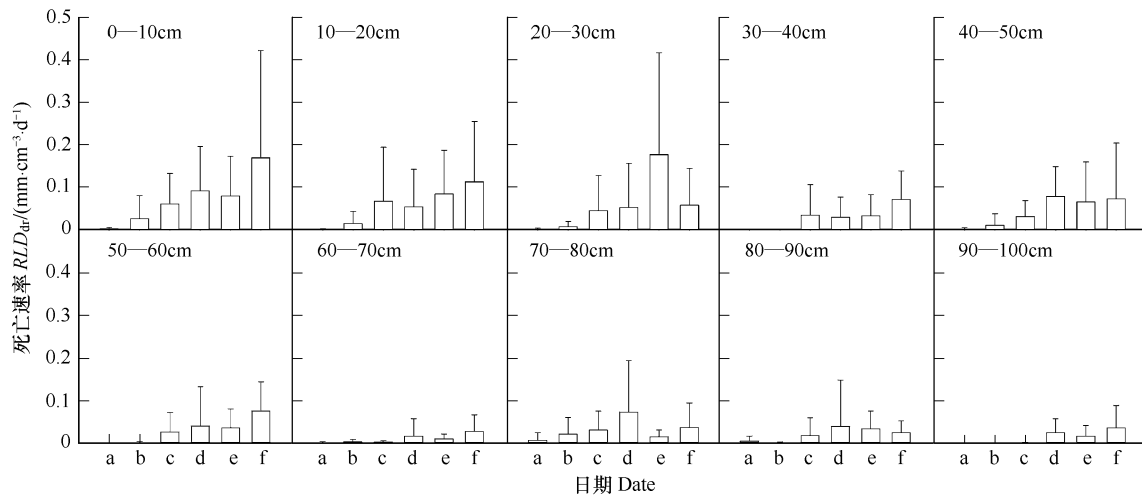


图 7 10 个土层的柠条细根死亡速率的季节变化(2007 年)

Fig. 7 The seasonal changes of fine root death rate of RLD_{dr} of *Caragana korshinskii* at 10 soil layers (2007)

a. 4 月 11 日至 5 月 26 日;b. 5 月 27 日至 7 月 4 日;c. 7 月 5 日至 7 月 26 日;d. 7 月 27 日至 8 月 12 日;e. 8 月 13 日至 9 月 5 日;f. 9 月 6 日至 9 月 23 日

2.3 柠条细根的生死之比(R_{gd})

如图 8 A 所示,在 100cm 土壤剖面各个土层, R_{gd} 值均大于 1(1.54—12.13),且下层(50—100cm) R_{gd} (8.13 ± 3.13) 明显大于上层(0—50cm) (2.29 ± 0.64)。说明在生长季,各土层的细根生长量均大于死亡量,尤以下层为突出。

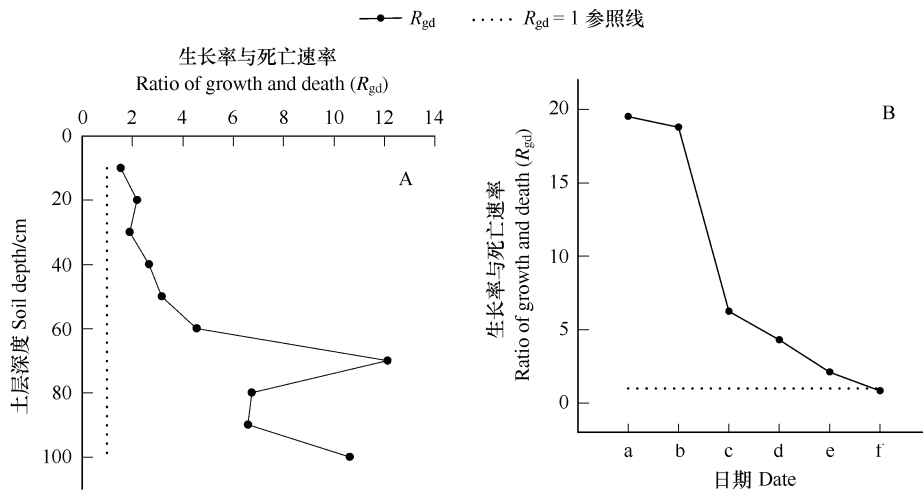


图 8 生长季 100cm 土壤剖面的柠条细根生长率与死亡率之比(R_{gd})的垂直变化(A)和季节变化(B)(2007 年)

Fig. 8 The vertical (A) and seasonal (B) changes of the ratio of RLD_{gr} and RLD_{dr} (R_{gd}) of *Caragana korshinskii* in 100cm soil profile in the growing season (2007)

a. 4 月 11 日至 5 月 26 日;b. 5 月 27 日至 7 月 4 日;c. 7 月 5 日至 7 月 26 日;d. 7 月 27 日至 8 月 12 日;e. 8 月 13 日至 9 月 5 日;f. 9 月 6 日至 9 月 23 日

就季节变化而言(图 8B), R_{gd} 呈逐渐减小趋势。自生长季初至 9 月上旬, R_{gd} 均大于 1,至 9 月下旬 R_{gd} 才

开始小于 1。从而表明,除生长季末之外,柠条细根的 RLD_{gr} 均大于 RLD_{dr} 。由此可见,在年生长期中,柠条的细根动态是一个以生长占优势的生死交织过程。

2.4 柠条细根生长和死亡与环境因子的关系

在 2007 年生长季,气温变化呈抛物线型,4 月初至 8 月中旬气温逐渐升高,8 月中旬达最高(19.98℃),此后气温开始下降(图 4B)。同期降水量为 437.9mm,高于历年同期平均降水量(419.4mm)。其中 4 月初至 7 月下旬降水量逐渐增加,随后出现剧烈波动变化(图 4C)。

土壤温度的季节变化趋势与气温基本相同(图 4D)。土壤温度的垂直变化(图 2b)特点为随土层加深温度逐渐降低(图 2b)。土壤含水量的变化趋势与同期降雨量的趋势基本相似(图 4E)。

以生长季各期测得的 100cm 土壤剖面的 RLD_{gr} (或 RLD_{dr})平均值及其对应环境因子数据为基础进行相关分析。结果表明,柠条细根 RLD_{gr} 的季节变化与气温存在极显著正相关,与土壤温度存在显著正相关,与其它环境因子的相关性均不显著。而柠条细根 RLD_{dr} 的季节变化与各个环境因子的相关性均不显著(表 1)。

表 1 幼龄柠条细根生长速率(RLD_{gr})、死亡速率(RLD_{dr})与各环境因子的相关性
Table 1 Correlations of fine root RLD_{gr} and RLD_{dr} of *Caragana korshinskii* with environmental factors

r	温度/℃ Temperature	降雨量/mm Precipitation	土壤温度/℃ Soil temperature	土壤含水量/% Soil water content
RLD_{gr}	0.962 **	0.383	0.845 *	0.429
RLD_{dr}	0.072	0.107	0.547	-0.79

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

3 讨论

许多研究表明,树种的细根主要集中分布于表土层。例如,武夷山甜槠林细根主要分布于 0—20cm 土层中^[25];长白山原始阔叶红松林细根集中在 0—10 cm 土层^[26]。但也有研究表明一些树种细根垂直变化不明显或中下部土层分布较多^[27-29]。关于柠条根系的已有研究显示,在黄土高原区,柠条的根系主要密集于 10—100cm 土层中^[30]。亦有研究显示,在 6m 土层中,柠条细根主要集中分布在 1m 深土层^[11]。本研究表明,50—100cm 土层的细根 RLD_{gr} 明显高于 0—50cm 土层,50—100cm 的深土层为幼龄柠条细根的生长活跃区。细根在深土层生长速率较高,很可能与林地表土层水分胁迫较为严重有关。因为从总体上看,林地表土层水分胁迫显然比较严重(图 2c),而深土层水分条件相对较好。所以干旱胁迫使深土层细根比例增加^[31]。

在整个生长季,柠条细根 RLD_{gr} 呈单峰型(图 4A),与气温和土壤温度的变化趋势(图 4B 和图 4D)较为相似,因此细根 RLD_{gr} 与后两者存在密切相关性。而 2007 年生长季降水量以及由其引起的土壤水分的波动均较大(图 4C 和图 4E),与细根 RLD_{gr} 的季节变化趋势同步性较差,所以细根 RLD_{gr} 与降水和土壤水分的相关性不显著。

细根的死亡是一个复杂的生理生态过程^[32]。从生理学角度看,细根死亡与光合产物分配到根系多少有关^[33-34];从生态学角度看,与土壤资源有效性相联系^[32, 35]。本研究显示,柠条细根 RLD_{dr} 既有土壤层次之间的差异,又有与 RLD_{gr} 显然不同的季节变化趋势(图 7)。浅土层 RLD_{dr} 高于深土层,很可能与表层各因子波动更为明显,表土层水分胁迫严重(图 2c)有关,亦可能与表层有机质含量较高,土壤动物和微生物相对分布较多,食根性动物(昆虫、线虫等)更为活跃有关。整个生长季 RLD_{dr} 持续增大,其原因则较为复杂。春季细根的死亡可能与储存的光合产物消耗有关^[36-37]。夏季土壤资源(如温度、水分)最适宜细根生理活动,但是光合产物分配的格局发生改变(主要分配到枝条和树干中)^[37],此时细根死亡量较大,主要是地上部分和地下部分竞争碳源的结果^[34, 38]。秋季细根大量死亡则与落叶和温度降低密切相关^[37]。

在生长季,柠条细根的平均 RLD_{gr} 和 RLD_{dr} 分别为 $0.1264\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.0354\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,生死之比很悬殊(3.57/1)。 RLD_{dr} 在季末(9 月下旬)仍居高不下(图 6),说明细根死亡节律较为滞后。这可能与地下气候滞后于地上气候和地下环境因子比地上较为稳定有关。随着生长季的迅速结束和冬季的到来,地下热量

条件会更为不适。在秋末冬初这段时间内, 细根 R_{LD} 可能会继续增大, 细根 R_{gd} 会急剧减小。并可能伴随只有细根死亡而无细根生长的现象。直至当年细根生长量和死亡量达到平衡或基本平衡为止。

References:

- [1] Satomura T, Hashimoto Y, Koizumi H, Nakane K, Horikoshi T. Seasonal patterns of fine root demography in a cool-temperate deciduous forest in central Japan. *Ecological Research*, 2006, 21(5): 741-753.
- [2] Mainiero R, Kazda M. Depth-related fine root dynamics of *Fagus sylvatica* during exceptional drought. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237(1/3): 135-142.
- [3] Liedgens M, Richner W. Relation between maize (*Zea mays* L.) leaf area and root density observed with minirhizotrons. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15: 131-141.
- [4] Taylor H M, Upchurch D R, McMichael B L. Application and limitation of rhizotron and minirhizotrons for root studies. *Plant and Soil*, 1990, 129: 29-35.
- [5] Majdi H. Root sampling methods-applications and limitations of minirhizotron technique. *Plant and Soil*, 1996, 185: 255-258.
- [6] Kage H, Kochler M, Stutzel H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and stimulation. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20: 379-394.
- [7] Zhang X Q, Wu K H, Murach D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 815-883.
- [8] Niu X W. The distribution and description of *Caragana* Fabr. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(5): 107-133.
- [9] Jia L. Research progress of *Caragana*. *Plant Research*, 2001, 21(4): 515-518.
- [10] Li X R, Zhang J G, Liu L C, Chen H S, Shi Q H. Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 24: 257-261.
- [11] Cheng X, Huang M, Shao M, Warrington D N. A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Caragana korshinskii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China. *Plant and Soil*, 2009, 315: 149-161.
- [12] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, Jia R L, Zhang J G, Wang T. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, northwestern China. *Journal of Plant Research*, 2009, 122: 109-119.
- [13] Johnson M G, Tingey D T, Philips D L, Storm M J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental Botany*, 2001, 45: 263-289.
- [14] Craine J, Tremmel D. Improvements to the minirhizotron system. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 1995, 76: 234-235.
- [15] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology*, 1992, 73: 1094-1104.
- [16] Bai W M, Cheng W X, Li L H. Applications of minirhizotron techniques to root ecology research. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3076-3081.
- [17] Shi J W, Wang Z Q, Yu S Q, Quan X K, Sun Y, Jia S X, Mei L. Estimating fine root production, mortality and turnover with Minirhizotrons in *Larix Gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 333-342.
- [18] 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.
- [19] Li J Y, Wang M B, Shi J W. Minirhizotron technique in measuring fine root indices: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(11): 1842-1848.
- [20] Sanders J L, Brown D A. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions. *Agronomy Journal*, 1978, 70: 1073-1076.
- [21] Itoh S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotrons. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 361: 59-61.
- [22] 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: 577-587.
- [23] Xun J J, Li J Y, Chen J W, Shi J W, Wang M B. The relationships of fine root standing length of *Caragana Korshinskii* seedlings with environmental factors. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 764-771.
- [24] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forest. *Oecologia*, 2000, 125: 389-399.
- [25] Li L H, Lin P, Xing X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 337-340.
- [26] 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):1-5.

- [27] Jonsson I, Fidjeland L, Maghembe J A. The vertical distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro, Tanzania, Agroforestry Systems, 1988, 6: 63-69.
- [28] Dhyani S K, Narain P, Singh R K. Studies on root distribution of five multipurpose tree species in Doon Valley, India. Agroforestry Systems, 1990, 12: 149-161.
- [29] Toky O P, Bisht R P. Observations on the rooting pattern of some agroforestry trees in an arid region of north-western India. Agroforestry Systems, 1992, 18: 245-263.
- [30] Niu X W. Study on the Biological Characteristics of *Caragana korshinskii*. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1998, 13 (4): 122-129.
- [31] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. Plant and Soil, 1983, 71: 87-101.
- [32] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root life-span. Advances in Ecological Research, 1997, 27: 1-60.
- [33] Bloomfield J, Vogt K A, Wargo P M. Tree root turnover and senescence//Wiesel Y, Bshel A, Kafkafi U eds. Plant Roots: the Hidden Half (2nd edn). New York:Marcel Dekker, 1996: 363-381.
- [34] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots. New Phytologist, 2000, 147: 43-53.
- [35] Mei L, Wang Z Q, Cheng Y H, Guo D L. A review: factors influencing fine root longevity in forest ecosystems. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28: 704-710.
- [36] 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: 489-501.
- [37] Pregitzer K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots. New Phytologist, 2003, 158: 421-423.
- [38] 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. Frontiers of Biology in China, 2006, 1(3): 310-317.

参考文献:

- [7] 张小全,吴可红,Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述. 生态学报,2000, 20(5):875-883.
- [8] 牛西午. 中国锦鸡儿属植物资源研究——分布及分种描述. 西北植物学报,1999,19(5):107-133.
- [9] 贾丽. 柠条研究进展. 植物研究,2001,21(4):515-518.
- [10] 李欣荣,张景光,刘立超,陈怀顺,石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报,2000,24: 257-261.
- [16] 白文明,程维信,李凌浩. 微根窗技术及其在植物根系研究中的应用. 生态学报,2005,25(11):3076-3081.
- [17] 史建伟,王政权,于水强,全先奎,孙玥,贾淑霞,梅莉. 落叶松和水曲柳人工林细根生长、死亡和周转. 植物生态学报, 2007,31(2): 333-342.
- [18] 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.
- [19] 李俊英,王孟本,史建伟. 应用微根管法测定细根指标方法评述. 生态学杂志,2007,26(11):1842-1848.
- [23] 荀俊杰,李俊英,陈建文,史建伟,王孟本. 幼龄柠条细根现存量与环境因子的关系. 植物生态学报,2009, 33(4):764-771.
- [25] 李凌浩,林鹏,邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. 应用生态学报,1998,9(4):337-340.
- [26] 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):1-5.
- [30] 牛西午. 柠条生物学特性研究. 华北农学报,1998,13(4):122-129.
- [35] 梅莉,王政权,程云环,郭大立. 林木细根寿命及其影响因子研究进展. 植物生态学报,2004,28(5):704-710.