

## 晋西北黄土区幼龄柠条细根的净生长速率

王孟本\*, 荀俊杰, 陈建文, 史建伟

(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*) 人工林为研究对象,使用微根管技术对林地 100cm 土层深度的柠条细根生长动态进行观测。以根长密度( $RLD$ ,  $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ )为基本参数,以净生长量( $RLD_{\text{net}}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{mm}^{-3}$ )和净生长速率( $RLD_{\text{NGR}}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ )为相应导出参数,对 2007 年生长季(4—9 月份)柠条细根的  $RLD_{\text{NGR}}$  及其与环境因子气温、降雨量、土壤温度、土壤水分的关系进行了探讨。结果表明:柠条细根的  $RLD_{\text{net}}$  为  $(2.923 \pm 1.767) \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $RLD_{\text{NGR}}$  为  $(0.113 \pm 0.069) \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。50—100cm 土层是柠条细根生长的活跃区,其细根  $RLD_{\text{NGR}}$  是 0—50cm 土层细根的 1.5 倍。柠条细根生长的季节变化趋势呈单峰型,4 月初至 8 月初  $RLD_{\text{NGR}}$  逐渐增大,8 月中旬  $RLD_{\text{NGR}}$  达到最大,之后逐渐减小,9 月下旬  $RLD_{\text{NGR}}$  出现负值。统计分析表明,柠条细根的  $RLD_{\text{NGR}}$  与气温呈显著正相关。年生长季柠条细根的累计净生长量为  $14.613 \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; 累计净生产力为  $1.461 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

**关键词:**细根; 柠条; 根长密度; 微根管; 环境因子; 黄土区

## The net growth rate of fine roots of *Caragana korshinskii* seedlings in the Loess Plateau region, Northwest Shanxi

WANG Mengben\*, XUN Junjie, CHEN Jianwen, SHI Jianwei

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

**Abstract:** The fine root growth patterns of *Caragana korshinskii* in a 5-year old plantation in the Loess Plateau region of Northwest Shanxi were investigated by using minirhizotron technique. By defining root length density ( $RLD$ ,  $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) as basic fine root parameter, and net root length density ( $RLD_{\text{net}}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) and net root growth rate ( $RLD_{\text{NGR}}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ) as derived parameters, the  $RLD_{\text{NGR}}$  of *C. korshinskii* seedlings and its relationships with the environmental factors (air temperature, precipitation, soil temperature and soil water content) in the growth season of 2007 were analyzed. The results showed that the averaged  $RLD_{\text{net}}$  was  $(2.923 \pm 1.767) \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; and the averaged  $RLD_{\text{NGR}}$  was  $(0.113 \pm 0.069) \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ . The 50—100cm soil layers were the primary growth zone of the fine roots, where the averaged  $RLD_{\text{NGR}}$  was 1.5 times that of 0—50cm soil layers. There existed a distinctive seasonal change pattern of  $RLD_{\text{NGR}}$  from April to September, and it increased rapidly from early April to early August and reached a peak in the middle of August, and then decreased gradually, and became negative in late September. The seasonal growth pattern of fine roots in *C. korshinskii* seedlings was significantly and positively related to air temperature. The cumulative  $RLD_{\text{net}}$  was  $14.613 \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$  in the annual growing season, and the cumulative net productivity was  $1.4613 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{hm}^{-2}$  in the same period.

**Key Words:** fine root; *Caragana korshinskii*; root length density; minirhizotron; environmental factor; the Loess Plateau region

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。虽然细根占林木

**基金项目:**山西省自然科学基金资助项目(2007021032);山西省科技攻关资助项目(2006031014)

**收稿日期:**2009-01-17; **修订日期:**2009-04-20

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

根系总生物量的不足 30%,但其年净生产力甚至可高达森林总净生产力的 80% 左右<sup>[1-2]</sup>。细根的死亡和分解可将大量有机质和养分元素归还到土壤中,其每年向土壤归还的碳和养分比地上凋落物多 18%—58%。如果忽略细根的生产、死亡和分解,对土壤有机物质和营养元素的周转量将低估 20%—80%<sup>[1-4]</sup>。因此,细根在森林生态系统的物质循环和能量流动中起着十分重要的作用<sup>[1,4-5]</sup>。传统的根系研究方法有土柱法、内生长法和根室法等<sup>[2]</sup>。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。其最大优点是可以在基本不影响根系生长过程的情况下,对细根生长(从根系发生到死亡)进行长期定位监测。自 20 世纪 90 年代以来,该技术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<sup>[6-7]</sup>,涉及的方面包括植物细根的发生、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<sup>[8-9]</sup>。然而,截至目前,该技术在国内的应用仍比较少见。

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,同时又是优质的灌木饲料植物,具有较高的生态和经济价值<sup>[10-11]</sup>。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<sup>[10,12-13]</sup>,但有关其根系动态的研究则较少。张志山等<sup>[14]</sup>主要从研究方法比较的角度出发,用微根管法与根钻法对沙漠区柠条细根生长动态进行了观测。

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。对柠条的细根生长动态进行研究,不仅有助于深入揭示柠条的生长规律,尤其是与水热条件的关系,同时可为人工林营造和管理提供重要参考。为此,以晋西北黄土区 5 年生人工柠条林为研究对象,采用微根管技术对柠条的细根生长动态进行了野外定位观测。本文旨在以 2007 年的观测数据为基础,对幼龄柠条细根净生长率的季节变化特征进行探讨。

## 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°16.296',北纬 38°58.825',海拔 1448m),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℃,终霜日一般在 5 月中旬,始霜日一般在 9 月中旬,平均无霜期 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,在固定样地中心 25m×25m 区域内,距株行 0cm、50cm、100cm 位置上分别随机安装 3 个微根管,共安装微根管 9 个。参照 Johnson 等<sup>[15]</sup>介绍的方法安装微根管(美国 Bartz 技术公司生产)。微根管(长为 150cm,外径 5.5cm,内径 5.0cm)的安装与地面成 45°角,垂直深度 100cm,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桶(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 1.8cm×1.4cm,每个微根管收集 91—92 幅图片。用 RooTrack2.0 软件<sup>[16]</sup>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(黑色与两次观测期间消失的细根)两类<sup>[17]</sup>。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。

细根生长量用根长密度( $RLD, \text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<sup>[18-21]</sup>表示:

$$RLD = RL/A \times DOF \quad (1)$$

其中, $RL$ (mm)为细根观测窗中观测到的细根根长; $A$ ( $\text{cm}^2$ )为观测窗面积; $DOF$ (cm)为田间深度<sup>[14,22]</sup>。 $DOF$ 一般在0.2—0.3cm之间<sup>[23-25]</sup>。在本研究中,由于柠条的细根直径较小, $DOF$ 取0.2cm。

细根净生长量( $RLD_{\text{net}}$ ,  $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),即2次观测期间细根根长密度的净增加量,按下式计算:

$$RLD_{\text{net}} = (RLD_{n+1} - RLD_n) \quad (2)$$

式中, $RLD_{n+1}$ 和 $RLD_n$ 分别表示第 $n+1$ 次与第 $n$ 次观测到的活细根根长密度。 $RLD_{\text{net}}$ 为正值说明细根的生长量大与死亡量, $RLD_{\text{net}}$ 为0说明细根的生长量等于死亡量, $RLD_{\text{net}}$ 为负值说明细根的死亡量大于生长量。

细根净生长速率( $RLD_{\text{NGR}}$ ,  $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ),即单位时间(在此为每天)的细根根长密度净增加量,按下式计算:

$$RLD_{\text{NGR}} = RLD_{\text{net}}/T \quad (3)$$

式中, $T$ 为相邻两次观测的间隔天数。同理, $RLD_{\text{NGR}}$ 为正值说明细根的生长速率大与死亡速率, $RLD_{\text{NGR}}$ 为0表示细根的生长速率与死亡速率相等, $RLD_{\text{net}}$ 为负值表示细根的死亡速率大于生长速率。

根据公式(3),即可对一定时期、一定土层深度的柠条细根净生长速率进行计算。

#### 1.4 环境因子观测

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、80cm和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、40cm、60cm、80cm和100cm土层深度分别取样,每层2个样品,每次3个样点(样点位于行距中间,在3个不同行距设点),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

由于本地无霜期介于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月至9月的柠条细根净生长速率的变化特征进行研究。

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 $RLD_{\text{NGR}}$ 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 $RLD_{\text{NGR}}$ 的相关性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 细根直径的径级结构

在观测到的活细根中,直径 $<0.5\text{mm}$ 的占92%;直径在 $0.5—<1\text{mm}$ 的占6.8%;直径在 $1—<1.5\text{mm}$ 的占1%;直径在 $1.5—2\text{mm}$ 的仅占0.2%。其总平均值为 $(0.205 \pm 0.075)\text{mm}$ (平均值 $\pm$ 标准误差)。

### 2.2 细根净生长速率( $RLD_{\text{NGR}}$ )的垂直变化

由图1a至图1d可以看出,自4月至8月, $RLD_{\text{NGR}}$ 最大值所在的土层由浅变深。 $RLD_{\text{NGR}}$ 最大值4月10日至5月26日出现在20—30cm,5月27日至7月4日出现在40—50cm,7月5日至7月26日出现在50—60cm,7月27日至8月12日出现在70—80cm。与此同时,如图1e和图1f所示,自8月13日至9月23日, $RLD_{\text{NGR}}$ 出现负值的土层也由浅变深。8月13日至9月5日0—50cm各土层 $RLD_{\text{NGR}}$ 首先出现负值,9月6日至9月23日50—60cm土层 $RLD_{\text{NGR}}$ 出现负值。

总体而言(图2a),30—40cm土层 $RLD_{\text{NGR}}$ 最小,70—80cm土层 $RLD_{\text{NGR}}$ 最大。0—50cm各土层的 $RLD_{\text{NGR}}$ 明显小于50—100cm各土层,后者的平均 $RLD_{\text{NGR}}$ 是前者的1.5倍。说明50—100cm土层是柠条细根生长最旺盛的区域。

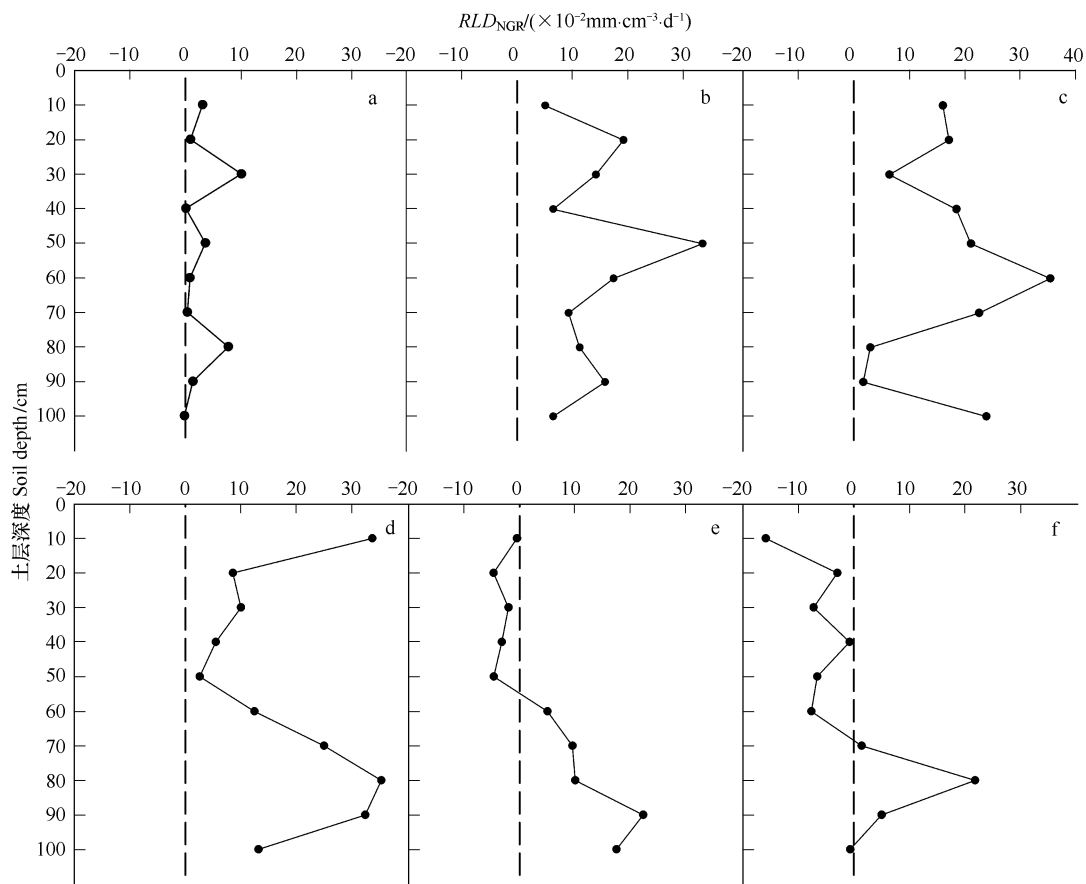


图1 2007年4月至9月幼龄柠条细根净生长速率( $RLD_{NGR}$ )的垂直变化

Fig.1 The vertical change patterns of net root growth rate( $RLD_{NGR}$ ) of *Caragana korshinskii* seedlings from April to September in 2007

a. 4月10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, 下同

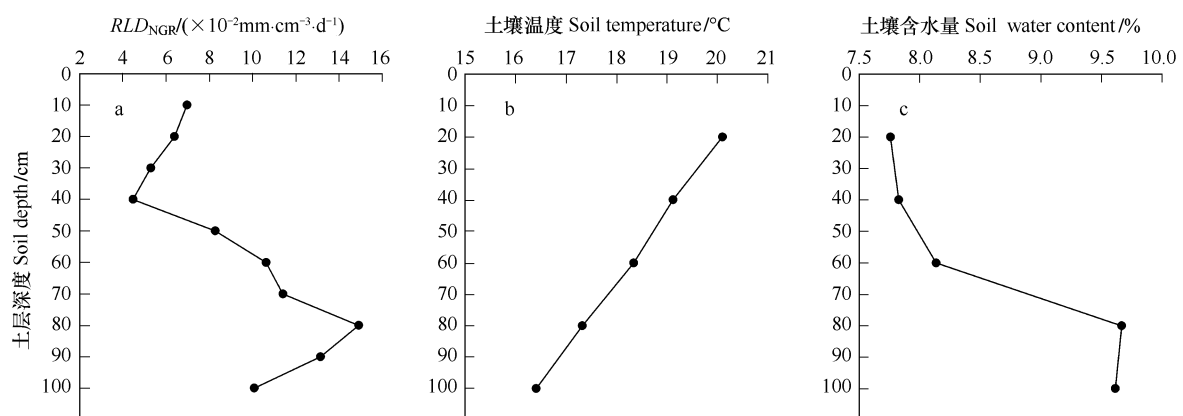


图2 2007年生长季100cm土壤剖面幼龄柠条细根平均净生长速率( $RLD_{NGR}$ )与对应土壤温度和水分垂直变化

Fig.2 The vertical change patterns of averaged net fine root growth rate ( $RLD_{NGR}$ ) of *C. korshinskii* seedlings and the related soil temperature and soil water content in the 100cm soil profile in the growing season of 2007

### 2.3 细根净生长速率( $RLD_{NGR}$ )的季节动态

在0—100cm土壤剖面各个土层, $RLD_{NGR}$ 的季节变化情形不尽相同。明显不同之处是剖面上层(0—60cm

各土层)的  $RLD_{NGR}$  自 9 月上旬始即开始出现较大负值( $-0.051 \pm 0.043$ )  $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ) (图 3), 而剖面下层 (60—100 cm 各土层) 仅 90—100 cm 土层的  $RLD_{NGR}$  在生长季始、末出现很小负值( $-0.004 \pm 0.003$ )  $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

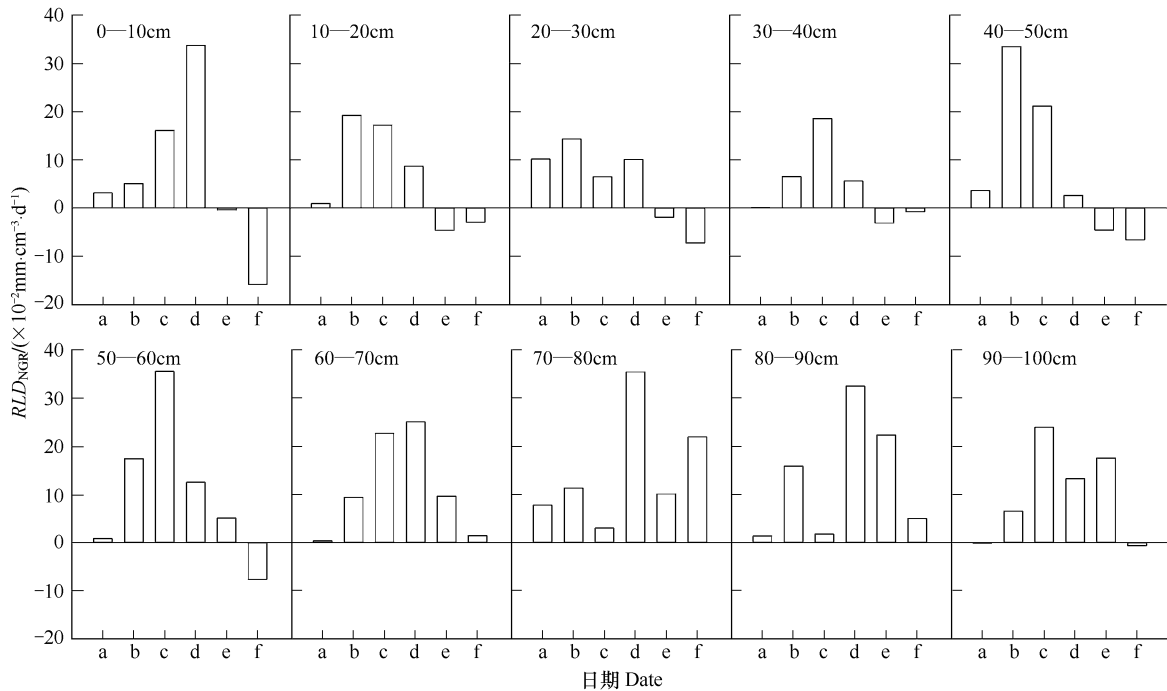


图 3 林地 100cm 土壤剖面 10 个土层的幼龄柠条细根净生长速率 ( $RLD_{NGR}$ ) 的季节动态

Fig. 3 The seasonal dynamics of net fine root growth rate ( $RLD_{NGR}$ ) of *C. korshinskii* seedlings at each soil layer in 100cm soil profile in the plantation of *C. korshinskii*

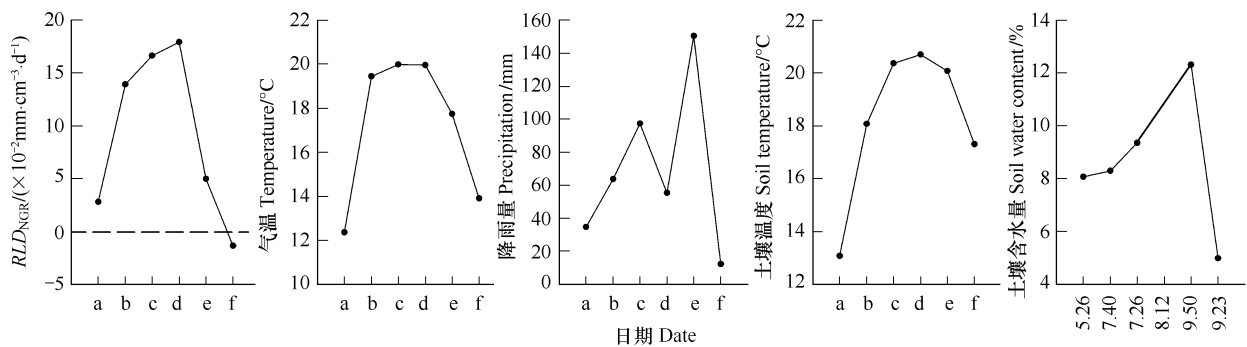


图 4 柠条细根净生长速率 ( $RLD_{NGR}$ ) 与气温、降雨量、土壤温度和土壤水分的季节动态 (2007)

Fig. 4 The seasonal dynamics of averaged net fine root growth rate ( $RLD_{NGR}$ ) of *C. korshinskii* seedlings, temperature, precipitation, soil temperature and soil water content in 2007

总体来看 (图 4), 柠条的  $RLD_{NGR}$  季节变化为单峰型, 4 月 10 日至 8 月 12 日  $RLD_{NGR}$  逐渐增大, 7 月 27 日至 8 月 12 日  $RLD_{NGR}$  达到最大 ( $0.179 \pm 0.125$ )  $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 之后逐渐减小, 在生长季末  $RLD_{NGR}$  出现负值。生长季中期 (5 月下旬至 8 月中旬) 细根生长迅速,  $RLD_{NGR}$  较高, 各个测值之间没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。但是, 这 3 个观测值与生长季初的  $RLD_{NGR}$  和生长季末的  $RLD_{NGR}$  均具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 细根净生长速率 ( $RLD_{NGR}$ ) 与环境因子的关系

2007 年生长季的气温变化大致呈中间向上突起的抛物线型 (图 4)。同期降水量为 437.9mm, 高于历年

同期平均降水量(419.4mm)。降水量季节变化特点为4月至7月逐渐增加,随后呈明显波动变化(图4)。

土壤温度的季节变化趋势与气温大致相同(图4)。年生长季的土壤平均温度随土层加深逐渐降低(图2b)。

土壤含水量4月10日至9月5日不断增加,此后急剧下降(图4)。年生长季的土壤平均含水量随土层加深逐渐增大(图2c)。表层土壤水分胁迫较为严重。

相关分析表明,柠条的  $RLD_{NGR}$  与气温的季节变化存在显著正相关关系( $r=0.944$ ,  $P<0.05$ ),其它环境因子与  $RLD_{NGR}$  的相关性均不显著( $P>0.05$ )。

## 2.5 柠条细根净生产力估算

在2007年4月至9月共进行了7次野外观测,获得6个  $RLD_{net}$  值,其中最后一个  $RLD_{net}$  为负值。将前5个  $RLD_{net}$  值求平均,可知柠条细根的平均  $RLD_{net}$  为  $(2.923 \pm 1.767) \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。将这5个值求和,即可得到柠条细根的生长季累计净(根长)生长量为  $14.61 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

如果假定柠条的全部细根均生长在0—100cm土层,根据细根的年生长季累计净(根长)生长量,同时可以估算出柠条细根的生长季累计净(根长)生产力为  $1.461 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 3 讨论

许多研究表明,细根生长多集中分布于表土层<sup>[26-29]</sup>。但也有研究表明一些树种的细根垂直变化不明显或中下部土层分布较多<sup>[30-32]</sup>。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<sup>[33]</sup>;在沙漠区,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)的大部分根系集中在0—100cm土层<sup>[34]</sup>,柠条的大部分根系集中在10—80cm土层<sup>[10]</sup>。本研究表明,50—100cm的土层是幼龄柠条细根的生长活跃区。细根主要生长于这一土层范围,可能与植物的耐旱特点和林地近地表土层的水分条件较差有关。柠条耐旱的主要特点之一就是根茎比大,根系发达。由于林地0—50cm土层的水分含量一般较少(图2c),而干旱胁迫能够增加深土层细根的比例<sup>[35]</sup>。所以,浅土层细根生长较少,深土层细根生长较为集中。值得注意的是,实验林分目前林龄尚小。随着年趋成熟,柠条细根在土层中的生长活跃区有可能向下延伸。对细根生长活跃区是否会进一步下移或下移程度如何则尚待进一步观测。

由于在一定深度之内,土层越深,其温度随气温上升或下降的时间愈滞后,大气降雨入渗到达的时间亦愈滞后。因此,在生长季前期,对植物根系生长最有利的水热组合条件大致自上而下先后出现。从而导致细根  $RLD_{NGR}$  最大值出现在深土层的时间晚于浅土层。

在生长季后期,浅土层细根净生长量出现负值的频率明显高于深土层,主要原因可能是与深土层相比,浅土层土壤水分含量一般较低,干旱胁迫较为严重;浅土层食根性动物活动较为频繁,对植物细根生长的负作用较大。

植物细根的季节生长节律可以是春季与秋季双峰型、春季单峰型<sup>[36-37]</sup>和夏季或秋季单峰型<sup>[17,38]</sup>。这主要与土壤水分状况<sup>[39-40]</sup>和土壤温度<sup>[26]</sup>有关。由于水分的多少和温度的高低可以影响根系对水分和矿质元素的吸收以及呼吸速率等生理过程,从而影响根系的生长发育<sup>[26]</sup>。本研究中柠条细根  $RLD_{NGR}$  的总体季节变化趋势呈单峰型,主要是由气温决定的,因为细根  $RLD_{NGR}$  与季节气温呈显著的正相关关系(图4)。

降水入渗到土壤中之后才对植物产生作用。而降水渗入土壤(尤其较深土层)具有滞后和积累现象。加之,2007年生长季降水波动较大。所以降水和土壤水分与柠条细根  $RLD_{NGR}$  的季节同步性较差,导致前两者与后者的相关性不显著(在黄土高原干旱区根系生长速率应该与降水或土壤水分具有密切的关系)。

本实验中,柠条细根的净生长速率为  $(0.1125 \pm 0.0692) \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。史建伟等<sup>[29]</sup>应用微根管法研究得到落叶松和水曲柳的细根生长速率分别为  $0.0255 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.0385 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (根据原文提供的数据与本文所使用 DOF 值重新计算)。由于细根生长速率显然比净生长速率要大,更可见柠条的细根生长速率明显高于落叶松和水曲柳。柠条的细根生长速率较大,可能是由于(1)柠条为灌木树种,长期适应干旱环境,具有较高的细根生长潜力;(2)观测年份的降水量高于一般年份,有利于柠条细根生长。

由于细根根长密度与土壤 N 的有效性具有明显的相关性<sup>[41-42]</sup>, 土壤生物(如真菌、病原菌和土壤植食性动物等)对细根生长亦有重要的影响<sup>[43]</sup>。本研究 DOF 取 0.2cm, 这可能与实际有一定偏差, 亦应结合根钻法进一步进行验证。对土壤养分和土壤生物等因子对柠条细根生长的影响和细根周转过程研究有重要意义。

## References:

- [1] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above and below ground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15:303-377.
- [2] 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.
- [3] Santantonio D, Grace J C. Estimating fine root production and turnover from biomass and decomposition data; a compartment flow model. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17:900-908.
- [4] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, 81(1):275-280.
- [5] Ruess R W, Cleve K V, Yarie J, 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, 26:1326-1336.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Majdi H. Root sampling methods-applications and limitations of minirhizotron technique. *Plant and Soil*, 1996, 185:255-258.
- [9] 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.
- [10] Niu X W. Study on *Caragana* in Chinese-species distribution and description. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(5):107-133.
- [11] Jia L. Research progress of *Caragana*. *Plant Research*, 2001, 21(4):515-518.
- [12] 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.
- [13] Li P, Zhao Z, Li Z B. Vertical root distribution characters of *Robinia pseudoscia* on the Loess Plateau in China. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(4):87-92.
- [14] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3):457-464.
- [15] Johnson M G, Tingey D T, Philips D L, Storm M J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45:263-289.
- [16] Craine J, Tremmel D. Improvements to the minirhizotron system. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 1995, 76:234-235.
- [17] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology*, 1992, 73:1094-1104.
- [18] Smit A L, Bengough A G, Engels C, Van N M, Pellerin S, Van de Geijn S C. Root methods: A handbook. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [19] 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.
- [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] 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.
- [22] Taylor H M, Huck M G, Klepper B, Lund Z F. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron. *Agronomy Journal*, 1970, 62:807-809.
- [23] 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.
- [24] Itoh S. *In situ* measurement of rooting density by micro-rhizotrons. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 361:59-61.
- [25] 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.
- [26] Fahey T J, Hughes J W, Pu M. Root decomposition and nutrient flux following whole tree harvest of northern hardwood forest. *Forest Science*, 1988, 34(3):744-768.

- [27] 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.
- [28] Yang LY, 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.
- [29] 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.
- [30] Jonsson I, Fidjeland L, Maghembe J A. The vertical distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro. Agricultural Systems, 1988, 6:63-69.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Niu X W. Study on the Biological Characteristics of *Caragana korshinskii*. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1998, 13(4):122-129.
- [34] Alamusa, Jiang D M, Pei T F. Relationship between root system distribution and soil moisture of artificial *Caragana microphylla* vegetation in sandy land. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3):78-81.
- [35] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in Boreal forests. Plant and Soil, 1983, 71:87-101.
- [36] Joslin J D, Henderson G S. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. Forest Science, 1987, 33:330-346.
- [37] Burke M K, Raynal D J. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystems. Plant and Soil, 1994, 162:135-146.
- [38] Rytter R M, Hansson A C. Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. Biomass and Bioenergy, 1996, 11(2):129-137.
- [39] Harris W F, Kinerson R S, Edwards N T. Comparison of belowground biomass in natural deciduous forests and loblolly pine plantations. Pedobiologia, 1977, 17:369-381.
- [40] Teskey R O, Hinckley T M. Influence of temperature and water potential on root growth of white oak. Physiologia Plantarum, 1981, 52:363-369.
- [41] Pregitzer K S, Zak D R, Maziasz J, Deforest J, Curtis P S, Lussenhop J. Interactive effects of atmospheric CO<sub>2</sub> and soil-N availability on fine roots of populus tremuloides. Ecology Applications, 2000, 10:18-33.
- [42] ML, Wang Z Q, Cheng Y H, Han Y Z, Zhang Z W. The relationship between soil available nitrogen and fine root distribution of *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(1):117-121.
- [43] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root life-span. Advances in Ecological Research, 1997, 27:1-60.

#### 参考文献:

- [2] 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.
- [10] 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.
- [11] 贾丽. 柠条研究进展. 植物研究, 2001, 21(4):515-518.
- [12] 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.
- [14] 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.
- [19] 白文明, 程维信, 李凌浩. 微根管技术及其在植物根系研究中的应用. 生态学报, 2005, 25(11):3076-3081.
- [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.
- [21] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [33] 牛西午. 柠条生物学特性研究. 华北农学报, 1998, 13(4):122-129.
- [34] 阿拉木萨, 蒋德明, 裴铁璠. 沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究. 水土保持学报, 2003, 17(3):78-81.
- [42] 梅莉, 王政权, 程云环, 韩有志, 张卓文. 水曲柳和落叶松细根分布和土壤有效氮的关系. 华中农业大学学报, 2008, 27(1):117-121.