

## 拉萨河谷杨树人工林细根的生产力及其周转

何永涛<sup>1,\*</sup>, 石培礼<sup>1</sup>, 张宪洲<sup>1</sup>, 钟志明<sup>1</sup>, 徐玲玲<sup>2</sup>, 张东秋<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 国家气象中心生态与农业气象室, 北京 100081;  
3. 北京市大兴区气象局, 北京 102600)

**摘要:**通过土钻取样和分解袋法对拉萨河谷杨树人工林细根的生长和周转进行了测定。结果表明,在该地区杨树人工林生态系统中,约 80% 的细根集中分布在 0~30cm 土壤表层中;接近树木一侧的活(死)细根生物量均高于外侧,但二者未达到显著的差异;在生长季期间,活细根生物量平均为 2.576 t·hm<sup>-2</sup>,死细根生物量平均为 1.566 t·hm<sup>-2</sup>,生长高峰出现在生长季初期。经估算,拉萨河谷杨树人工林细根年生长量为 3.030 t·hm<sup>-2</sup>,年周转率为 1.18 次;但受高原低温的影响,细根分解缓慢,分解系数  $k$  平均为 0.0007~0.0008。细根的这种生长特征是杨树对高原地区短暂生长季节和雨热同季气候条件的一种适应性表现。

**关键词:**细根;生产力;周转;杨树人工林;拉萨

文章编号:1000-0933(2009)06-2877-07 中图分类号:Q948,S718.5 文献标识码:A

## Fine root production and turnover of poplar plantation in the Lhasa river valley, Tibet Autonomous Region

HE Yong-Tao<sup>1,\*</sup>, SHI Pei-Li<sup>1</sup>, ZHANG Xian-Zhou<sup>1</sup>, ZHONG Zhi-Ming<sup>1</sup>, XU Ling-Ling<sup>2</sup>, ZHANG Dong-Qiu<sup>3</sup>

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 National Meteorological Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3 Daxing Meteorological Bureau, Beijing 102600, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2877~2883.

**Abstract:** Fine root production and turnover is a critical component of ecosystem nutrient and carbon cycling and is also a sink for plant primary productivity. Poplar is a common-introduced protective plantation in the Yalung Zangbo River valleys of south Tibet Autonomous Region (TAR). However, little information has been concerned on the growth and productivity of this forest, especially for the belowground fine root turnover. The 20-year-old poplar plantation with 780 trees·hm<sup>-2</sup> was sampled in Taktse county, in the lower reaches of Lhasa River valley. We measured the dynamics of fine root (with diameter < 2.0 mm) by soil core sampling every 10 cm layer to 50 cm depth in the growing season of 2004, May through October. Fine root samples in nylon bags were buried October, 2003 and collected in June and October of year 2004, 2005 and October of year 2006. Decomposition was evaluated by loss rates of fine root mass. 80% of the poplar fine root biomass was dominated in the 0–30 cm soil depths, with much of fine root mass distributed within 100 cm of trunk. The average biomass of fine root was 2.576 t·hm<sup>-2</sup> in the growing period, and dead fine root of that was 1.566 t·hm<sup>-2</sup>. Net primary productivity of the fine root was 3.030 t·hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, and turnover rate was 1.18 times per year. But the average decomposition efficiency ( $k$ ) ranged from 0.0007–0.0008 due to >0°C accumulated temperature was low. All of these characters favor the poplar trees to adapt the environment in the river valley of south TAR.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30700080; 40603024),中国科学院“西部之光”资助项目(2006)

收稿日期:2008-03-18; 修订日期:2008-08-15

致谢:中国科学院拉萨生态试验站的黄庆义、张谊贵、杨军平、安玉芳、邢道琼等,以及中国科学院植物研究所的何维明博士参加了本研究的野外取样和室内处理工作,特此致谢。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heyt@igsrr.ac.cn

**Key Words:** Fine root; production; turnover; poplar plantation; Lhasa

细根通常是指植被地下根系中直径小于 2 mm 的根<sup>[1]</sup>,它是植被生物量中最为活跃的部分。已有的研究表明,在森林群落中,细根虽然仅占林分根系总生物量的 3% ~ 30%<sup>[2]</sup>,但由于细根生长、周转迅速,生命周期短,其生长量可占到森林初级生产力的 50% ~ 75%<sup>[3,4]</sup>;另一方面,细根不仅是植被养分和水分吸收的重要器官,而且在森林生态系统碳分配和养分循环中有着重要的作用,通过细根周转进入土壤的有机物是地上凋落量的一至数倍,如果忽略细根的生产、死亡和分解,土壤有机物质和养分元素的周转将被低估 20% ~ 80%<sup>[2,5,6]</sup>。此外,随着全球变暖趋势的日益明显,生态系统碳平衡成了目前生态学研究中的热点问题,而细根在其中的作用也成了人们关注的焦点<sup>[7]</sup>,目前仍不清楚被忽略的地下细根周转量在多大程度上解释陆地生态系统的“失踪碳汇”问题<sup>[8]</sup>。但由于研究方法上的困难和森林生态系统本身的复杂性,目前森林根系(尤其是细根生物量及其周转)在森林生态系统中的重要作用尚未得到人们的充分认识,这也是当前植被生态学和全球碳平衡研究中的热点之一<sup>[9]</sup>。

西藏地处青藏高原腹地,在“一江两河(雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河)”等流域,沿河两岸分布着大量的农田,造就了西藏人口最为密集和农业最为发达的地区。20 世纪 80 年代,随着西藏农业综合开发治理的推进,大量的杨树被引入到河谷农田区域。由于杨树具有耐贫瘠,生长快速等特点,迅速成为西藏农田防护林建设和荒地绿化的主要树种,目前已遍及西藏的主要河谷地带。但高原地区自然条件恶劣,具有气温低、辐射强烈等特征,因此植物对这种特殊生长环境的适应性一直以来都是人们关注的焦点问题,而细根动态对环境变化具有重要指示作用,可反映树木或生态系统水平的健康状况<sup>[10]</sup>。因此,本研究拟通过对拉萨河谷地带的北京杨(*Populus Beijingensis*)人工林细根动态的研究,分析高原地区杨树林细根的生长特征,揭示高原特殊环境下植物的适应对策,为该地区农田防护林和荒地绿化的建设和管理提供科学依据,同时为青藏高原地区的碳循环研究提供基础数据。

## 1 样地选择与概况

所选样地位于拉萨生态站附近的达孜县苗圃防护林,地处北纬 29°40',东经 91°20',海拔 3 688 m,处于西藏典型的河谷农业区,距离拉萨河距离约 1 000m。样地为条带状,宽为 12 m,位于苗圃的四个周边,单边长约 500 m。栽培树种为北京杨纯林,20 年生,株距 0.65 m,行距 2 m,树高约 25 m,平均胸径为 14.5cm。林分密度为 780 株·hm<sup>-2</sup>,郁闭度约为 1.0,林下有凋落物覆盖,但无杂草生长。

研究区域属高原季风温带半干旱气候类型,年平均气温 7.5 °C,最热月平均气温 15.4 °C,最冷月平均气温为 -1.7 °C,极端最高和极端最低气温分别为 27.4 °C 和 -11.8 °C;≥ 0 °C 积温为 2 900 °C,持续日数 289d;≥ 10 °C 积温为 2 200 °C,持续日数 153d;无霜期 136d。年降水量 425.4 mm,主要集中在 6 月中旬至 9 月下旬,约占全年的 94%。太阳年总辐射接近世界最大值,达 7 700 MJ·m<sup>-2</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 细根生物量的测定

采用土钻法测定杨树的细根生物量,土钻内径为 3.5 cm。此处细根定义为直径 < 2 mm 的树木根系。每次调查时选择标准木 5 株,在行距方向以树干基部为交叉点设两条相互垂直的样线,在距树干基部 0.5 m 处(内侧,1/4 行距)和 1.0 m 处(外侧,1/2 行距)各设 1 对称的取样点,这样每株标准木就有内外各 4 个取样点。取样深度为 0 ~ 50 cm,取样时按 10 cm 为间隔分层,每一标准木每层同属内侧的 4 个点混合为一个样品,外侧的 4 个点混合为一个样品,这样每株标准木每次取内外各 5 个混合样。取样时间为 2004 年 5 ~ 10 月,每月 1 次,共计 5 次,具体时间为:2004 年 5 月 25 日,2004 年 7 月 6 日,2004 年 8 月 12 日,2004 年 9 月 12 日,2004 年 10 月 12 日。

样品处理方法为,样品取回后用 0.2 mm 的筛子冲洗,并根据细根的颜色和质地,结合漂浮法区分细根的死活。筛选出细根后,在 65 °C 恒温下烘干 48h 至恒重,称重。

### 2.2 细根分解试验

2003 年 10 月份采集杨树细根样品。分解袋由网眼为 2 mm 的尼龙网制成,规格为 20 cm × 15 cm,每袋装入杨树细根样品 5 g(干重)。2003 年 10 月 31 日将样品随机埋入杨树林 5 个不同地点的土壤中,分 5 cm 和 15 cm 两层,每层放置分解袋 5 个,该样地共计放入分解样品 50 袋。

定期从每个样点 5 cm 和 15 cm 的土壤中取回样品各 1 个,即每次共计取回 5 cm 和 15 cm 分解样品各 5 袋。取样时间具体为:2004 年 6 月 1 日,2004 年 10 月 2 日,2005 年 5 月 31 日,2005 年 10 月 31 日,2006 年 10 月 31 日。样品取回后,将根系冲洗干净,65℃ 恒温下烘干 48 h 后称重。

### 2.3 细根年生长量、周转率计算

采用以下方法计算细根生长量和周转率<sup>[11~12]</sup>:

$$\text{细根生物量}(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}) = \text{平均每土芯细根干重}(\text{g}) \times 100/\pi(d/2)^2 \tag{1}$$

$$M = X_{\max} - X_{\min} + D \tag{2}$$

$$P = Y_{\max} - Y_{\min} + M \tag{3}$$

$$T = P/Y \tag{4}$$

式中, $d$  为土钻的内直径; $M$  为细根年死亡量, $P$  为细根年生长量, $D$  为细根年分解量, $X_{\max}$  为年内死细根生物量最大值, $X_{\min}$  为年内死细根生物量最小值, $Y_{\max}$  为活细根年内生物量最大值, $Y_{\min}$  为活细根年内生物量最小值, $T$  为细根年周转率, $Y$  为活细根平均生物量。

## 3 结果与分析

### 3.1 杨树细根生物量及动态

根据统计结果,拉萨河谷地带人工杨树林细根的生长动态变化表现为生长季初期较高,其后则变化不是很大,且活根和死根的变化趋势基本一致。其最高值出现在生长季初期的 5 月底,活根和死根的生物量分别达到了 3.213 t·hm<sup>-2</sup> 和 2.754 t·hm<sup>-2</sup>,其后的 7 月份、8 月份、9 月份和 10 月份 4 次取样中活细根生物量均在 2.264 ~ 2.622 t·hm<sup>-2</sup> 之间,死细根生物量则在 1.048 ~ 1.462 t·hm<sup>-2</sup> 之间,均明显低于生长季初期的细根生物量,而且这 4 次之间细根生物量的差别也不是很大。与其他杨树细根研究的结果一样<sup>[13,14]</sup>,拉萨河谷杨树林活细根的生物量也一直高于死细根(图 1),全年平均活细根的生物量为 2.576 t·hm<sup>-2</sup>,死细根生物量为 1.566 t·hm<sup>-2</sup>。

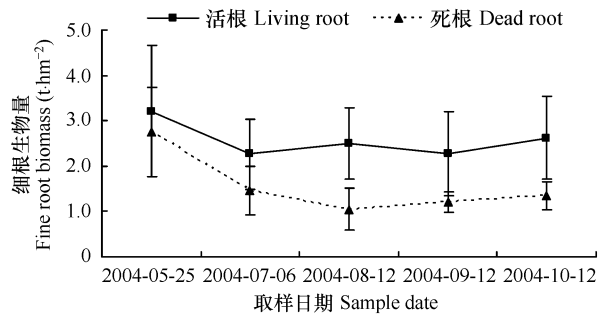


图 1 杨树细根生物量动态

Fig. 1 Dynamics of fine root biomass of poplar tree

### 3.2 细根分布的垂直特征

从不同深度土壤中细根分布的比例来看,拉萨杨树林细根在土壤中的垂直分布表现为逐层减少的趋势(图 2),86.1% 的活细根和 79.2% 的死细根都分布在 0~30cm 的土壤内。与死细根相比,活细根更为集中地分布于土壤的上层。0~10 cm 土壤中活细根的平均生物量为 1.114 t·hm<sup>-2</sup>,占 0~50 cm 土壤中活细根的 43.2%,而死细根年平均生物量为 0.572 t·hm<sup>-2</sup>,所占比例为 36.6%,活细根的比例明显高于死细根;而在 10~20 cm、20~30 cm 土壤中,活细根和死细根的比例大致相当;但在 30~40 cm、40~50 cm 两层,活细根的

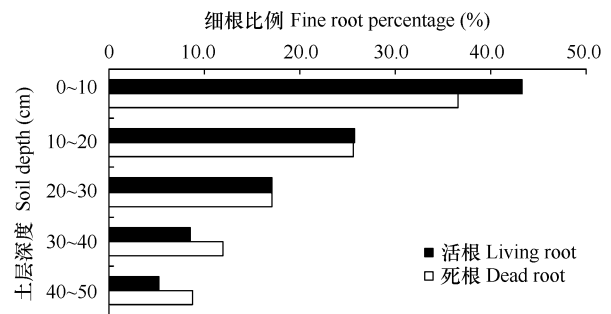


图 2 杨树细根垂直分布特征

Fig. 2 Depth distribution pattern of poplar fine root in soil

比例则低于死细根,分别为 8.8%、5.3% 和 12.0%、8.6%。这是因为青藏高原土壤发育历史较短,50cm 以下多为卵石层,加之河谷地带的土壤多为河水冲积和淤积而成,因此,当地土壤中的养分主要集中在上层,根系也就主要集中分布于土壤的这一层次。

### 3.3 细根分布的水平空间差异

统计结果显示,分布于树木内侧(距树干基部 0.5 m)的活细根和死细根生物量均高于外侧(距树干基部 1.0 m),但二者均未达到显著的差异(表 1)。其中分布于内侧的活细根生物量年平均为  $3.064 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,外侧为  $2.087 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;死细根生物量则分别为  $1.640 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $1.491 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,而不同取样时间的数据也表现为内侧的细根生物量高于外侧。这说明树木的细根分布在水平空间位置上也有着差异,提示人们在进行细根研究时,应更为合理地选择取样位置。

### 3.4 细根的分解

本文采用 Olson 提出的公式  $X/X_0 = e^{-kt}$  (即细根干物质残留率与分解时间  $t$  呈负指数关系)来计算细根的分解速率。其中, $X$  与  $X_0$  分别为细根分解  $t$  天时的残留干重和初始干重, $k$  为细根分解系数,它表明了解速率的大小, $k$  值越大说明干物质损失越快。依据上述公式,计算出不同时间细根的分解系数。

表 1 杨树细根分布的空间差异

Table 1 Difference of fine root biomass between sample site

取样日期 Sample date	活根-内	活根-外	死根-内	死根-外
	Living root 0.5m away from the tree	Living root 1.0m away from the tree	Living root 0.5m away from the tree	Living root 1.0m away from the tree
2004-05-25	3.818 ± 1.952 *	2.608 ± 0.725	2.977 ± 1.058	2.532 ± 1.093
2004-07-06	2.508 ± 0.770	2.021 ± 0.754	1.534 ± 0.752	1.389 ± 0.230
2004-08-12	2.763 ± 0.947	2.245 ± 0.557	1.047 ± 0.486	1.050 ± 0.503
2004-09-12	2.975 ± 0.785	1.576 ± 0.188	1.239 ± 0.099	1.188 ± 0.332
2004-10-12	3.258 ± 0.727	1.987 ± 0.555	1.403 ± 0.400	1.297 ± 0.189
$t$ 检验结果 $t$ -test	0.008 (双尾,成对检验 2 tails, parallel type)		0.130 (双尾,成对检验 2 tails, parallel type)	
查表 $t$ 值 $t$ value	2.776 (双尾, 2 tails, $P=0.05$ , $f=4$ )			

\* 平均值 ± 标准差 Mean value ± standard deviation

根据实验结果分析,拉萨杨树细根的具体分解过程见表 2。拉萨河谷地带杨树细根的分解极其缓慢,在近 1a 后,5 cm 和 15 cm 土壤中未分解的细根为 81.97% 和 74.39%;而近 3a 之后,细根的残留率仍然还有近 1/2。分解过程总体表现为起始阶段细根分解相对较快,而到了后期则开始减缓,细根开始分解的前几个月中,5cm 和 15cm 土壤中的分解系数分别达到了 0.0008 和 0.0012,是试验期间同一土壤深度中细根分解系数最大的阶段。其后分解速度减慢,分别在 0.0005 ~ 0.0008 和 0.0005 ~ 0.0009 之间。

表 2 拉萨人工杨树林细根分解特征

Table 2 Decomposition coefficient of poplar tree fine root in Lhasa

分解天数(d) Experimental days	残留率 Remaining (%)		分解系数 Decomposition coefficient	
	5cm	15cm	5cm	15cm
213	84.17	77.11	0.0008	0.0012
334	81.97	74.39	0.0006	0.0009
575	73.54	73.69	0.0005	0.0005
730	58.01	57.97	0.0007	0.0007
1095	48.34	51.83	0.0007	0.0006

不同土壤深度细根的分解速度略有差别。细根分解的第 1 年中,15 cm 土壤中细根分解的速度高于 5 cm;但之后二者的分解速度就基本趋于一致。整个试验的近 3a 期间,5 cm 土壤中细根的平均分解速率为 0.0007,而 15 cm 土壤中细根的平均分解速率则为 0.0008。

总体来看,拉萨河谷地带细根的分解速度极其缓慢,如果以 15 cm 和 5 cm 土壤中细根分解系数的平均值

0.00075 计,以 Olson 公式来计算,其细根分解 1/2 的总时间则需要大约为 924d。这也表明,在做高原细根分解实验时,应延长取样时间间隔,否则其结果可能会存在偏差。本文的细根分解系数  $k$  是根据细根分解近 3 年的时间推算得到的,而国内外目前大部分细根研究的  $k$  值则是根据一个生长季节的实验结果计算的。

### 3.5 细根的周转

根据 Olson 指数方程,采用以下方程进行计算杨树人工林细根 1a 内的残留率: $r = e^{-kt}$ ,再计算细根 1a 内的分解率: $d = 1 - r$ 。在此基础之上,根据 1 年时间内细根的分解速率和死亡细根生物量计算杨树细根的分解量,按公式(2)、(3)和(4)计算出细根年死亡量、年生长量和年周转率。结果表明,拉萨河谷地带人工杨树林的活细根生物量平均为  $2.576 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,死细根生物量为  $1.566 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,年分解量为  $0.375 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,年死亡量为  $2.081 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,年生长量为  $3.030 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,年周转率为 1.18 次。单建平等的研究结果表明,树木细根的年周转率一般为 0.29 ~ 1.2 次,多数为 0.5 ~ 1.2 次,拉萨河谷地带杨树林细根的周转速度也在这一范围之内。通过对比可以发现,这一结果与沈阳地区人工杨树林的细根周转率较为接近( $1.14 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[13]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 细根的生长动态

细根的生长和周转具有明显的季节动态。本文的研究结果表明,高原河谷地带人工杨树林细根的动态过程表现为一个单峰型,即在春季细根的生产出现了一个高峰期,其后细根的生长量便下降,进入一个变化不大的平稳时期。其他的一些研究也显示树木细根的生长动态表现为单峰型,峰值出现在春季或夏秋季<sup>[3,10]</sup>,这主要与土壤水分、养分以及其环境因子密切相关。地区环境因子(如土壤温度、大气温度和降水)的季节变化影响着树木生长节律和光合产物在树木体内分配格局,从而导致不同季节和不同土层细根的生长<sup>[16]</sup>。拉萨地区的雨季和热量资源多集中在生长季节(5 ~ 9 月份),而且表现为显著的雨热同季现象,而杨树林为落叶乔木,其生理活动的旺盛期主要集中生长季期间,因此在其生长季开始的春季,细根生长高峰的出现有利于树木迅速进入生长季节,利用大量的细根吸收养分和水分供树木生长。

### 4.2 细根分解系数比较

细根周转是碳和养分归还土壤的主要途径,而分解系数是表征细根分解速率大小的指标, $k$  值越大说明干物质损失越快。通过比较可以发现,拉萨的杨树细根分解系数明显低于内地,在拉萨细根的分解系数  $k$  平均为 0.0007 ~ 0.0008,而位于海拔较低地区的杨树细根,其分解系数则明显高于前者。其中分解系数最高的为北京潮白河林场, $k$  值达到了 0.0023,其次是沈阳的杨树人工林, $k$  值也达到了 0.0014,均明显高于前两者(表 3)。与此相对应,根据 Olson 公式推算,细根干物质分解 1/2 的时间在拉萨大约为 924d,而在沈阳则为 495d,北京为 301d。

表 3 杨树人工林分解系数比较

Table 3 Decomposition coefficient of fine root in different poplar stand

观测地点 Sample site	北京潮白河林场 Beijing	中国科学院沈阳生态站 Shenyang	中国科学院拉萨生态站 Lhasa
杨树品种 Tree species	加杨 <i>Populus canadensis</i>	锦新杨 <i>Populus</i> sp.	北京杨 <i>Populus beijngensis</i>
海拔高度 Altitude(m)	50	50	3688
年平均气温 Average temperature(°C)	11.5 ~ 12.3	7.0 ~ 8.0	7.5
年平均降水量 Precipitation(mm)	650 ~ 700	700	491 *
>0°C 积温 Accumulate temperature(°C)	4450 ~ 4650	3900	2900
细根深度 Soil depth(cm)	10	10	5/15
林龄 Stand age(a)	27	10	20
分解系数( $k$ ) Decomposition coefficient	0.0023	0.0014	0.00075 **
分解 1/2 时间 1/2 Decomposition time(d)	301	495	924 **
文献 Cited literature	[14]	[13]	本研究 This result

\* 2004 ~ 2006 年平均降水量; \*\* 5cm 和 15cm 分解系数平均值; \* Average precipitation of year 2004 ~ 2006; \*\* Average decomposition coefficient of fine root in 5cm and 15cm soil layers

根据以上研究结果,结合3个地点不同的气候条件因子可以发现,与细根分解关系最为密切的环境因子为  $> 0^{\circ}\text{C}$  积温,在拉萨当地  $> 0^{\circ}\text{C}$  积温为  $2900^{\circ}\text{C}$ ,沈阳为  $3900^{\circ}\text{C}$ ,而北京则达到了  $4500^{\circ}\text{C}$  左右,积温成明显增加的趋势。而随着积温的这种变化,3个地区之间细根的分解系数  $k$  也逐渐增加,1/2 分解时间依次减少。经过回归分析,以上3地杨树细根分解系数和积温表现出明显的线性相关, $R^2$  值达到了 0.9546,由此可见,树木生长季期间的积温是影响其根系分解的重要因子。其他一些研究结果也表明,温度是影响细根生长和周转的重要因子,较高的温度可促进细根周转<sup>[17~19]</sup>,本研究也证实了这一现象。

#### 4.3 高原杨树细根生长的适应性特征

综上所述,拉萨河谷地带的杨树林具有较高的细根周转率,但是具有较低的细根分解速度,这种生长方式是由于高原特殊的生长条件所造成的。在高原地区,杨树的生长季很短,仅有5个月(5~9月份)的时间。但这期间却是高原地区水分和热量条件最好且集中分布的时间,80%以上的降水量都集中分布在这一时段,非常有利于杨树的迅速生长。在生长季开始初期,杨树细根迅速生长,出现一个生长的高峰期,有利于对养分和水分的吸收,其后逐渐进入一个平稳的生长阶段。而高的周转率说明当地杨树在生长季期间充分利用有限的生长时间,迅速生长,这样才形成了高原河谷地区较高的生物量。但另一方面,较低的大气温度和积温,造成了土壤中细根的缓慢分解,从而有利于林地土壤中有机的长期积累。

### 5 结论

**5.1** 拉萨人工杨树林的细根主要集中分布在土壤的表层。其中0~30 cm之内分布的死细根和活细根分别达到  $2.218 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $1.240 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占0~50cm细根生物总量的86.1%和79.2%。

**5.2** 在水平空间分布上,分布于树木内侧(距树干基部0.5 m)的活细根和死细根生物量均高于外侧(距树干基部1.0 m),但二者均未达到显著的差异。

**5.3** 拉萨河谷地带人工杨树林的细根生长动态呈现为春季单峰型特征。即在生长季节开始的初期,杨树细根生长便出现一个高峰期,其活根和死根的生物量分别达到了  $3.213 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $2.754 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

**5.4** 拉萨河谷地带人工杨树林活细根年生物量平均为  $2.576 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,死细根生物量为  $1.566 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。年分解量为  $0.375 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,年死亡量为  $2.081 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,年生长量为  $3.030 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,年周转率为1.18次。

**5.5** 拉萨河谷地带人工杨树林不同土壤深度细根的分解速度略有差别,但不显著。受高原低温的影响,细根的分解非常缓慢,分解系数  $k$  平均为  $0.0007 \sim 0.0008$ ,细根干物质分解1/2的时间大约为924d。

#### References:

- [ 1 ] 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, 875—883.
- [ 2 ] Vogt K A, Crier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forests. *Advance in Ecology Research*, 1986, 15: 303—377.
- [ 3 ] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine root in the northern hardwood forest. *Ecology*, 1992, 73: 1094—1104.
- [ 4 ] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forestry ecosystem. *Ecology*, 1992, 73: 1139—1147.
- [ 5 ] McClaugherty C A, Aber J D. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystem. *Ecology*, 1982, 63(5): 1481—1990.
- [ 6 ] Ruess R M, Van-Cleve K, Yarie J, Viereck L A. Contributions of fine root production and turnover to the carbon nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Canada Journal of Forestry Research*, 1996, 26: 1326—1336.
- [ 7 ] Matamala R, Gonzalez-Meler M A, Jastrow J D, Norby R J, Schlesinger W H. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science*, 2003, 302: 1385—1387.
- [ 8 ] Rasse D P, Longdoz B, Ceulemans R. TRAP: a modeling approach to below-ground carbon allocation in temperate forests. *Plant and soil*, 2001, 229: 281—293.
- [ 9 ] Huang J H, Han X G, Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in the forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 46—49.
- [ 10 ] Vogt K A, Publicover D A, Bloomfield J, Perez J M, Vogt D J, Silver W L. Belowground responses as indicators of environmental change.

- Environmental and Experimental Botany, 1993, 33 (1): 189—205.
- [11] McLaugherty C A, Aber J D. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystem. *Ecology*, 1982, 63(5): 1481—1990.
- [12] Shan J P, Tao D L, Wang M, Zhao S D. Fine roots turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(3): 241—245.
- [13] Li P Z, Fan S H, Wang L H, Xu S M. Productivity and turnover of fine roots in poplar tree and grass roots. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 829—832.
- [14] Zhai M P, Jiang S N, Jia L M. Fine root dynamics in mixed plantation of poplar and black locust. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24 (5/6): 39—44.
- [15] Hendrick R L and Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1993, 23: 2507—2520.
- [16] 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* and *Fraxinus mandshurica* Plantations. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 333—342.
- [17] Hendrick R L, Pregitzer K S. Pattern of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature*, 1993, 361: 59—61.
- [18] Tyron P R, Chapin F S. Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1983, 13: 827—833.
- [19] Steele S J, Grower 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.

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [9] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, 19(2): 270~277.
- [12] 单建平, 陶大力, 王森, 赵士洞. 长白山阔叶红松林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 241~245.
- [13] 李培芝, 范世华, 王力华, 许思明. 杨树细根及草根的生产力与周转的研究. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 829~832.
- [14] 翟明普, 蒋三乃, 贾黎明. 沙地杨树刺槐混交林细根动态. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 40~44.
- [16] 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.