

# 大青山油松人工林树干液流特征及其与 主要气象因子的关系<sup>\*</sup>

陈晓燕<sup>1</sup>, 谷忠厚<sup>2</sup>, 田有亮<sup>1</sup>, 何炎红<sup>1</sup>, 郭连生<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019; 2. 鄂尔多斯市森林资源林政管理站, 内蒙古 东胜 017000)

**摘 要:**应用 TDP 技术在干旱少雨的 6 月与雨季 9 月, 对大青山奎素试验区 30 a 生油松人工林树干液流变化特征及其与主要气象因子的关系进行了研究。结果表明: (1) 液流量日变化呈现“昼高夜低”典型的液流波形特征。(2) 油松单株液流量日平均值 9 月大于 6 月, 表现出雨季液流量大于干旱季节的特征。(3) 油松整株树干径向不同位点的液流速率变化趋势基本相同, 平均液流速率由外向内呈现“低 - 高 - 低”的态势。(4) 树干液流量与主要气象因子相关分析表明, 对于林分密度较小的林地, 6 月、9 月液流量与太阳辐射有极显著的正相关关系, 与 20 cm 土壤温度有极显著的负相关关系, 与气温和相对湿度相关性不高; 而对于林分密度较大的林地, 在较干旱的 6 月, 太阳辐射已不是影响液流量的主要因子, 只有 9 月液流量与太阳辐射有极显著的正相关关系, 与 20 cm 土壤温度有极显著的负相关关系。

**关键词:**油松; 树干液流; 大青山; 气象因子

**中图分类号:**S715

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)06-0097-05

## Stem Sap Flow Characteristics and the Relation to Meteorological Factors of *Pinus tabulaeformis* Carr. Plantation of Daqing Mountain

CHEN Xiao-yan<sup>1</sup>, GU Zhong-hou<sup>2</sup>, TIAN You-liang<sup>1</sup>, HE Yan-hong<sup>1</sup>, GUO Lian-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Erdos City Forest Resources Administration Management Station, Dongsheng, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** The stem sap flow characteristics and the relation with meteorological factors of 30 a *Pinus tabulaeformis* were researched by using TDP method in Kuisu forest farms of Daqing Mountain. The results indicated: (1) the diurnal variation of sap flow displayed a typical wave form characteristic. The sap flow flux in daytime was higher than that in nighttime. (2) Average sap flow flux of individual plant in September was higher than that in June. (3) The sap flow velocity variation in sun side at different radial depths of *Pinus tabulaeformis* stem had similar trend. And average sap flow velocity from exterior to interior showed the rule which was lower-higher-lower. (4) The results of correlation analysis of sap flow flux and the main meteorological factors indicated that different stand densities had different rules. For the lower density stand, there was a significant positive correlation between sap flow flux and the solar radiation. And there was a significant negative correlation between sap flow flux and soil temperature at 20 cm depth. The sap flow flux didn't have obviously interrelated with air temperature and relative humidity. While for the higher density stand, in arid June the solar radiation wasn't the dominant influence factor. In September there was a significant positive correlation between sap flow flux and the solar radiation, and a significant negative correlation between sap flow flux and soil temperature at 20 cm depth.

**Key words:** *Pinus tabulaeformis* Carr.; Stem sap flow; Daqing mountain; meteorological factors

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 内蒙古教育厅项目 (NJZZ07041)

作者简介: 陈晓燕 (1982 - ), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 博士研究生, 主要研究方向为森林培育理论与技术。E-mail: chenxiaoyanhuohot@yahoo.cn

通信作者: 田有亮 (1957 - ), 男, 内蒙古包头市人, 硕士生导师, 主要研究方向为森林培育理论与技术。E-mail: tianyouliang2008@yahoo.com.cn

油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 具有较强的抗旱性和低耗水性,加之其根系发达,速生性良好,是大青山区的乡土树种和主要造林树种,从 20 世纪 60 年代开始在大青山阳坡大面积栽植油松,现有的油松人工林,随着林龄增加,林水矛盾日益突出,已有相当部分林分出现早期衰退现象,生产力低,稳定性差。科学管理和合理利用水资源成为该区油松人工林培育的关键。为此以大青山阳坡油松人工林为研究对象,应用热扩散技术 (TDP) 测定树干液流量,并对其与主要气象因子的关系进行研究,为树木蒸腾耗水量的研究提供基础,进一步为研究人工林水分平衡和林地水分利用提供理论依据,对在半干旱石质山区造林和人工林的经营管理具有重要意义。

## 1 试验区概况及研究方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古大青山区古路板林场的奎素作业区,地理坐标为 111°54'E, 40°56'N, 该地区属半干旱大陆性季风气候地带,年均气温为 6.0℃,年平均风速为 1.8 m/s,年降水量为 350~450 mm,年蒸发量 1 800~2 300 mm,湿润度 0.3~0.6,试验地海拔 1 213~1 234 m,土壤类型为栗钙土,土层平均厚度为 40~60 cm。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置与林分调查 在 30 a 油松人工林坡中部设置固定的标准样地,并进行林分因子调查,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

样地号	坡向	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均树 高/cm	平均胸 径/cm
4	阳坡	1722	476	8.58
10	阳坡	3189	465	6.97

### 1.2.2 试验树的选择和 TDP 树干液流测定仪安装

每个样地依据测树因子选择 6 株试验树,试验树干通直圆满,不偏心,不偏冠。TDP 树干液流测定仪安装在试验树南向胸高 (1.3 m) 处。在待测的位置上用小刀将树干死树皮刮去约钻孔模板大小的长方形 (40 mm 宽, 100 mm 长, 钻孔模板两钻孔间距为 40 mm), 放置模板, 通过铅垂保持两钻孔位于同一铅垂线和两钻孔平行, 然后根据预定钻孔深度进行钻孔, 除去钻孔异物后, 将两 TDP 的探头插入钻孔, 并固定, 仪器原理参见文献 [1-2]。

1.2.3 气象因子和土壤含水量的测定 在样地外空旷处设置自动气象站 (Li-1400) 同步测定并记录气温 (°C)、太阳辐射 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )、空气相对湿度

(%)、20 cm 土壤温度 (°C) 等气象因子, 自动气象站每 1 h 自动采集一次数据, 利用计算机将数据导出。

土壤含水量使用烘干法测定。

### 1.2.4 数据处理

液流量计算公式为:  $F_s = 3600 A_s V$

式中:  $F_s$  ——液流量 ( $\text{cm}^3/\text{h}$ );  $A_s$  ——通过液流的木质部分的截面积 ( $\text{cm}^2$ );  $V$  ——液流速率 ( $\text{cm}/\text{s}$ )。

应用 Excel 和 SPSS 13.0 统计软件对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 油松树干液流量的日进程变化

分别在旱季 6 月和雨季 9 月选择晴朗的测定日, 进行树干液流的测定, 其日进程变化见图 1, 可以看出, 液流量日进程呈典型的“昼高夜低”单峰曲线, 液流在早上 5:00 - 9:00 启动, 之后迅速上升, 9:00 - 12:00 左右达到峰值, 高峰持续时间较短, 而后迅速下降, 在 18:00 - 19:00 趋于平缓, 无明显的液流停止界限, 在晚间液流相对稳定, 变化平缓, 维持较高水平。

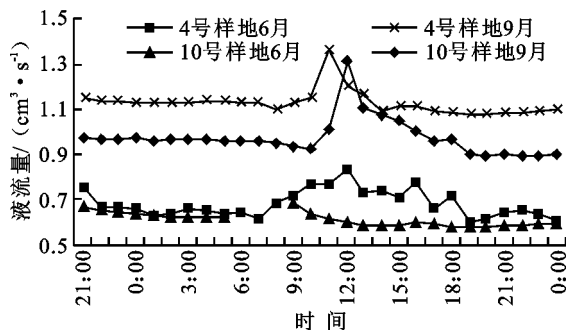


图 1 液流量日进程变化

6 月、9 月液流量日变化存在差异, 主要表现在液流启动、达到峰值的时间以及峰值和日均值大小等不同。将几个表达油松树干液流曲线特征的指标列于表 2, 从液流启动时间来看, 6 月启动较早, 9 月启动较晚。从达到峰值的时间来看, 4 号样地 6 月、9 月达到峰值时间相差不大, 10 号样地 6 月较 9 月早 3 h。对所观测日进行昼 (8:00 - 20:00)、夜 (20:00 - 8:00) 划分, 比较昼、夜液流量大小, 除 10 号样地 6 月, 昼液流量均值大于夜间液流量。总体来看, 两样地油松液流量日均值 9 月大于 6 月, 呈现出雨季液流量大于干旱季节的变化规律。

### 2.2 径向不同位点的树干液流空间变化规律

2006 年 6 月对油松从形成层开始进行 5 个点深度的布设, 依次为 1, 2, 3, 4, 5 cm, 其相对位点分别为 (该位点在形成层以内深度与树干半径的比) 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83。可以看出 (图 2), 相

对位点 0.50 处液流平均速率最大,0.67 和 0.33 处次之,0.17 处的液流平均速率最低,且油松整株树干径向不同位点的平均液流速度由外到内呈现低—高—低的态势。

表 2 6 月、9 月油松液流量曲线特征指标

样地	月份	观测日期	启动时间	峰值时间	液流量日均值/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	昼液流量均值/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	夜液流量均值/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
4	6	2006-06-02 - 03	7:00	12:00	0.6917	0.7188	0.6597
10		2006-06-10 - 11	5:00	9:00	0.6173	0.6013	0.6386
4	9	2006-09-10 - 11	8:00	11:00	1.1337	1.1340	1.1333
10		2006-09-14 - 15	9:00	12:00	0.9871	1.0071	0.9635

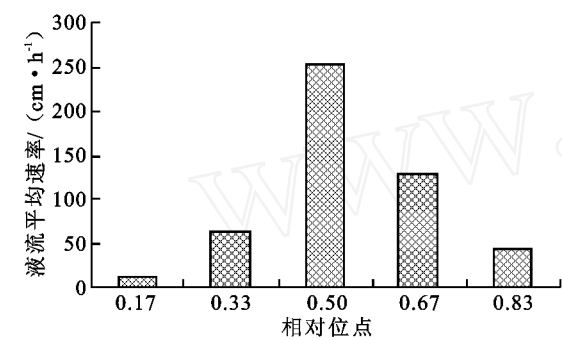


图 2 油松树干阳面不同位点深度的液流速率

图 3 为所观测油松树干液流速率在不同位点深度变化的过程曲线,可以看出,相对位点 0.17 和 0.83 处的液流速率变化趋势基本一致,液流于早上 5:00 左右启动,10:00 达到峰值,21:00 至次日 7:00 之间变化平缓。而相对位点 0.33,0.50,0.67 处液流无明显的启动和结束时间,达到峰值时间较前者早,大致在 5:00 左右,20:00 至次日 8:00 左右曲线变化较平缓。

2.3 气象因子对油松树干边材液流的影响

2.3.1 气象因子的日进程变化 图 4 为 4 号样地各主要气象因子的日进程变化,气象因子昼夜变化规律明显。气温日变化与太阳辐射的变化规律基本一致,而与相对湿度变化相反。太阳辐射峰值出现在 13:00,气温峰值和相对湿度谷值出现时间基本一致,并且滞后于太阳辐射峰值出现时间 2~3 h。土壤温度的变化规律深受空气温度变化的影响,表现出与气温相似的规律性,但由土壤巨大的热容性及传导阻力导致其变化明显滞后于气温<sup>[3]</sup>。同时可以看出 6 月太阳辐射、气温、20 cm 土壤温度平均值明显高于 9 月,相对湿度明显低于 9 月。

2.3.2 气象因子对树干液流的影响 气象因子对树干液流的影响是瞬时的、变动的,树木耗水作为一个开放的系统,外界气象因子的波动会在树体内部的液流上反应出来<sup>[4]</sup>。由图 1 和图 4 可知,试验地油松单株树干液流量变化规律与其同步检测的气象因子如太阳辐射、空气温度、空气相对湿度等环境因子相吻合。随着太阳辐射的增加液流量呈增加趋

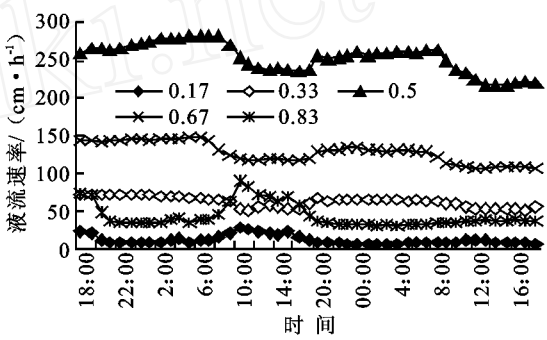


图 3 油松树干阳面不同位点深度液流速率变化

势,这说明太阳辐射是较为直接的因子。清晨太阳辐射弱、气温低、相对湿度高,油松树干液流小;随着太阳辐射的逐渐增大、气温增高、空气相对湿度变小,液流速度上升很快,达到峰值后随着光照强度的减弱,温度降低,叶内外水汽压差的减小,液流速度减小;到日落后,液流速度降低为最小值,而在晚上液流仍然存在。但油松树干液流与各气象因子变化具有不同步性,液流启动时间在日出后,出现峰值时间一般较辐射早约 1~2 h。

气象因子对植物的蒸腾作用影响强烈<sup>[5]</sup>,分析气象因子对液流的影响既可以揭示其对植物的水分生理的影响,也可以通过建立其与树干液流的关系模型,运用环境指标法来预测植物的蒸腾量,进一步分析水分平衡。故对 4、10 号样地 6 月与 9 月油松树干液流流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )与辐射 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、20 cm 土壤温度( )、气温( )、相对湿度(%) 分别进行 Pearson 相关分析,相关系数列于表 3。

从表 3 可以看出,在干旱少雨的 6 月,4 号样地油松液流量与太阳辐射以及气温呈极显著的正相关关系,与 20 cm 土壤温度呈极显著的负相关关系。而对于林分密度较大的 10 号样地油松液流量与太阳辐射呈负相关关系,与 20 cm 土壤温度和气温呈极显著的负相关关系,与相对湿度呈极显著的正相关关系。与 4 号样地的规律恰好相反。

在雨季 9 月,两样地树干液流量与太阳辐射均呈极显著的正相关关系,与 20 cm 土壤温度呈极显著的负相关关系,两样地树干液流与气象因子的关

系基本一致。说明在湿润季节太阳辐射和 20 cm 土壤温度是影响油松树干液流量的主要因子,而在干

旱季节对于林分密度较大的样地,太阳辐射已不是液流变化的主要影响因子。

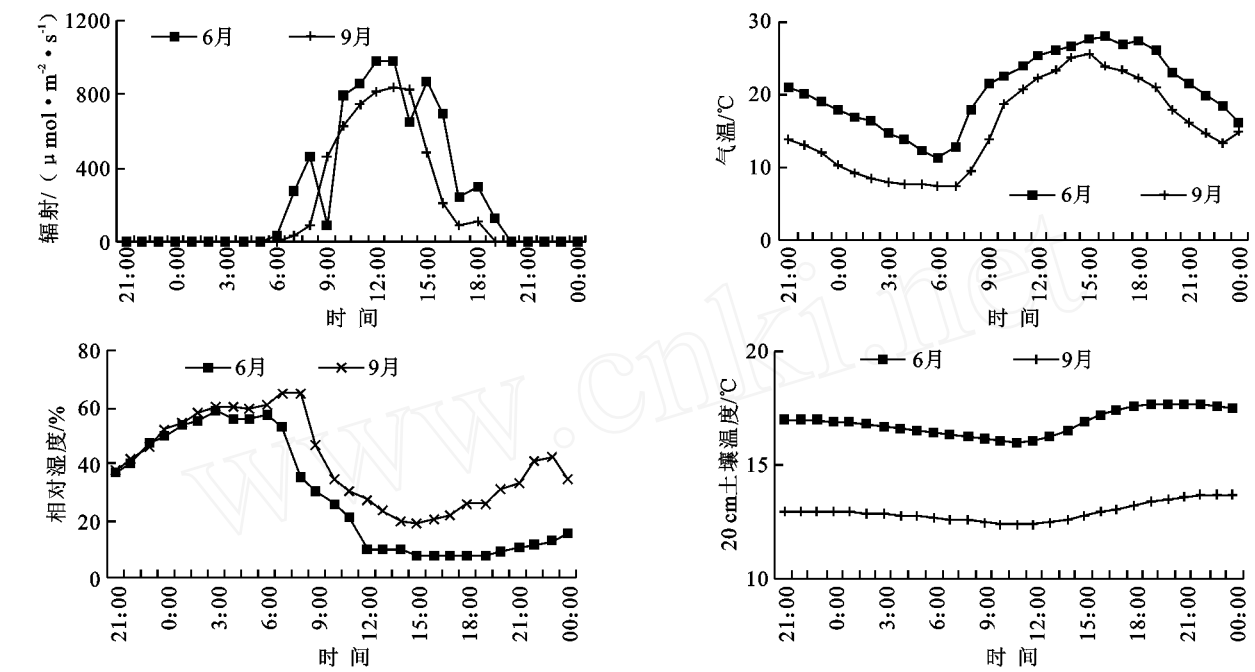


图 4 4 号样地气象因子日进程变化

表 3 液流量与气象因子相关性分析

月份	样地号	辐射	20 cm 土壤温度	气温	相对湿度
6 月	4 号	0.767 **	- 0.524 **	0.570 **	- 0.324
	10 号	- 0.059	- 0.552 **	- 0.664 **	0.687 **
9 月	4 号	0.515 **	- 0.599 **	0.054	0.002
	10 号	0.706 **	- 0.586 **	0.406 *	- 0.384 *

\*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 表示在 0.05 水平上显著相关。

对气象因子与油松边材液流量进行逐步回归,并以 5 %作为因变量的入选和剔除临界值,得到各月观测时段树干边材液流量与主要气象因子的多元线性回归模型共 4 个,且模型是极显著的。可以看出在不同时期同同样地,影响液流的主要因子也不尽相同,其中 6 月 4 号样地太阳辐射为主导因子,9 月 20 cm 土壤温度成为主导因子;对于 10 号样地,6 月 20 cm 土壤温度和相对湿度为主要影响因子,而 9 月太阳辐射为主要影响因子。4 个模型中只有气温始终未被引入方程。

4 号样地 6 月 :  $Y = 0.650 + 0.00012698 X_1$   
 $R = 0.767 \quad R^2 = 0.588$

4 号样地 9 月 :  $Y = 2.152 - 0.079 X_2$   
 $R = 0.599 \quad R^2 = 0.358$

10 号样地 6 月 :  $Y = 0.951 + 0.0023 X_4 - 0.026 X_2$   
 $R = 0.799 \quad R^2 = 0.639$

10 号样地 9 月 :  $Y = 0.941 + 0.00024975 X_1$   
 $R = 0.706 \quad R^2 = 0.499$

式中 :  $X_1$  ——太阳辐射 ;  $X_2$  ——20 cm 土壤温度 ;

$X_3$  ——气温 ;  $X_4$  ——相对湿度 ;  $R$  ——相关系数 ;  $R^2$  ——决定系数。

3 结论与讨论

(1) 试验地油松树干液流量日变化呈“早晨启动 - 中午前后出现峰值 - 峰值后下降 - 夜间进入低谷”昼高夜低的变化趋势。夜间存在液流,分析其原因可能是由于白天的强耗水,树体内各部分组织的水容储水被释放出来,导致组织水容降低。在水容作用下,根系仍处于缓慢吸水状态,吸收的水分用于恢复根系、树干和枝叶的水容,回填白天所产生的空穴<sup>[6-7]</sup>。

不同月份油松树干液流量存在差异,呈现出干旱季节(6 月)液流量小于雨季(9 月)的变化规律,这主要是由于土壤水分状况决定。在测定中,4 号样地 6 月土壤平均含水量为 9.71 %,9 月增加到 10.64 %。10 号样地 6 月,9 月土壤平均含水量相差不大分别为 :9.13 %和 8.87 %。

(2) 油松树干径向不同位点的平均液流速率不同,在形成层以下 3 cm(相对位点 0.50)处液流平均

速率最大,2 cm 和 4 cm(相对位点 0.33 和 0.67)处次之,1 cm(相对位点 0.17)处最低,由外到内呈现低-高-低的态势。结果进一步验证了 N. philips<sup>[8]</sup>等人在研究火炬松时指出的针叶树种液流主要发生在从形成层起到形成层以下 40 mm 左右的深度的结论。

(3) 各气象因子昼夜变化规律明显,油松单株树干液流量变化规律与其同步检测的气象因子如太阳辐射、空气温度、空气相对湿度等环境因子相吻合。但液流量与各气象因子变化具有不同步性,液流启动时间在日出后,其峰值出现时间超前于太阳辐射最大值出现的时间。

(4) 影响树木液流变化的因子大致可分为 3 类:生物学结构因素、土壤供水水平和气象因素。生物学结构决定液流的潜在能力<sup>[9]</sup>,例如树木木质部的木质与液质比、木质部的导水率、气孔导度等;土壤水分是植物蒸腾的水源,和植物蒸腾耗水关系密切<sup>[10]</sup>,决定液流的总体水平<sup>[11]</sup>,即每日液流速率的波峰值大小等,在土壤水分严重不足条件下尤为如此;气象因子决定树种液流的瞬时变动性。只有清楚环境因子对树干液流的影响机制,才能利用环境因子对树木的耗水量进行预测。

不同月份树干液流量日变化与相应的气象因子相关分析结果表明:除 10 号样地 6 月,液流量与太阳辐射无显著相关关系外,油松树干液流量与太阳辐射呈极显著的正相关关系,太阳辐射的昼夜变化节律与液流量的基本一致。油松树干液流量与 20 cm 土壤温度呈极显著的负相关关系,与气温基本呈正相关关系。4 号样地 6 月,9 月液流量与相对湿度均无显著相关性,说明相对湿度不是影响其液流变化的主要因子。进一步研究油松树干液流变化与相

应的气象因子的关系进行逐步回归,结果表明:对于 4 号样地 6 月太阳辐射为主导因子,9 月 20 cm 土壤温度为主导因子;对于 10 号样地,6 月 20 cm 土壤温度和相对湿度为主要影响因子,而 9 月太阳辐射为主要影响因子。可见在不同时期即使同样地,影响液流的主要因子也不全相同,说明了树干液流与气象因子关系的复杂性。

#### 参考文献:

- [1] Grannier A. A new method of sap flow measurement in tree stems [J]. Ann. Sci. For., 1985, 42(2):193-200.
- [2] 孙惠珍,周晓峰,赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报,2002,22(9):1387-1391.
- [3] 马长明,管伟,叶兵,等. 利用热扩散式边材液流探针(TDP)对山杨树干液流的研究[J]. 河北农业大学学报,2005,28(1):39-43.
- [4] 林平,李吉跃,马达. 北京山区油松林蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(S1):47-50.
- [5] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:84-111.
- [6] 周以良,董世林,聂绍荃,等. 黑龙江树木志[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1986:429-432.
- [7] 马长明,袁玉欣,翟明普. 基于物候期的核桃树干液流特征[J]. 东北林业大学学报,2008,36(1):4-9.
- [8] Philips N, R Oren, R Zimmermann. Radial patterns of xylem sap flow in none diffuse and ring porous tree species [J]. Plant Cell Environ, 1996, 19:983-990.
- [9] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠,等. 应用热技术研究树干液流进展[J]. 应用生态报,2004,15(6):1074-1078.
- [10] 张友焱,周泽福,党宏忠,等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流[J]. 水土保持研究,2006,13(4):78-80.
- [11] 奚如春,马履一,王瑞辉,等. 林木耗水调控机理研究进展[J]. 生态学杂志,2006,25(6):692-697.

(上接第 96 页)

- [20] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status [J]. Can J For For, 1987, 17:829-834.
- [21] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等. 黄土高原人工植被与水分环境相互作用关系研究[J]. 北京林业大学学报,1998,20(3):7-14.
- [22] 单长卷,梁宗锁,郝文芳. 黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1341-1346.
- [23] 余新晓,张建军,朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J]. 林业科学,1996,32(4):289-297
- [24] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Effects of altered water regimes on forest root systems[J]. New Phytol, 2000,147:117-129.
- [25] 赵忠,李鹏,王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. 应用生态学报,2000,11(1):37-39.
- [26] 李鹏,赵忠,李占斌. 渭北黄土区刺槐根系空间分布特征研究[J]. 生态环境,2005,14(3):405-409.
- [27] 赵忠,李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报,2002,16(1):96-100.
- [1] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):23-28.