

## 毛乌素沙地樟子松蒸腾变化规律及其与 微气象因子的关系

张劲松<sup>1</sup>, 孟平<sup>1</sup>, 孙惠民<sup>2</sup>, 周泽福<sup>1</sup>, 于延凤<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 内蒙古自治区科学技术厅, 内蒙古, 呼和浩特 010010)

**摘要:**本研究采用由热扩散植物液流技术测算得到的时间步长 10 min 的樟子松蒸腾速率数据, 结合同步观测得到的冠层微气象要素值, 分析了毛乌素沙区 20 年生樟子松主要生长季节蒸腾耗水规律及其冠层微气象的关系。结果表明: (1) 樟子松蒸腾速率具有明显的时间变化特征。多云天气日, 蒸腾速率日内变化总体呈多峰曲线趋势, 单株蒸腾速率 ( $T_r$ ) 在 4-9 月各月白天 (6:00—19:00) 的平均值为  $0.36 \sim 0.85 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 晴天日, 除 9 月蒸腾速率日内变化呈多峰曲线趋势外, 其余各月总体趋势呈单峰曲线, 9 月时  $T_r$  在 10:00 左右、13:00 左右、15:00 左右出现峰值, 在 14:00 左右出现谷值。4-8 月各月日内  $T_r$  在 10:00 左右出现峰值。4-9 月各月  $T_r$  白天平均值为  $0.37 \sim 0.83 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 阴天天气日, 蒸腾速率日内变化总体呈单峰曲线趋势, 日内  $T_r$  最大值出现在 10:00 左右。4-9 月各月  $T_r$  白天 (6:00—19:00) 平均值为  $0.29 \sim 0.63 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在日际变化或季节变化方面, 从 4 月份起, 樟子松蒸腾耗水量逐渐增加, 月耗水量在 7 月达到最高值, 此后有所减小。4-9 月总耗水量为 1 143.7 mm, 日平均为 6.25 mm, 7 月份月耗水总量相对最大。4、5、6、7、8 及 9 月耗水量分别占主要生长季节总量的 10.76%、13.62%、14.05%、24.56%、19.47%、17.52%。(2) 主要生长期中,  $T_r$  与冠层太阳总辐射 ( $R_a$ ), 空气温度 ( $T_a$ ), 湿度 ( $RH$ ), 风速 ( $V$ ) 等气象要素有很好的复相关性, 并通过显著性检验 ( $\alpha=0.01$ ), 且各月内影响樟子松蒸腾的最主要气象因子都是  $R_a$ 。

**关键词:** 毛乌素沙区; 樟子松; 蒸腾; 热扩散植物液流

中图分类号: S791.253

文献标识码: A

## Transpiration Rule of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and Its Relation to the Canopy Micrometeorology in Mu Us Sandy Area

ZHANG Jin-song<sup>1</sup>, MENG Ping<sup>1</sup>, SUN Hui-min<sup>2</sup>, ZHOU Ze-fu<sup>1</sup>, YU Yan-feng<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091;

2. Bureau of Science & Technology of Inner Mongolia, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The transpiration rule of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its relation to the canopy micrometeorology were analyzed through the experimental data of the tree sap flow and the canopy micrometeorology, which were measured by thermal dissipation sap flow velocity probe and CR10X automated meteorology system at a 10-minute recording interval respectively. The trees were 20 years old. The experiment was conducted in Mu Us sandy area during the main growing season (Apr. – Sep.) of 2004. The main results are as follows: The diurnal variations of the tree transpiration were demonstrated several-peak curve in cloudy day, but single-peak curve in the overcast day, and single-peak curve in clear day except Sep. The total transpiration of the main growing season was 1 143.7 mm, the average daily

收稿日期: 2005-04-04

基金项目: 国家“863”节水专项课题(2002AA2Z4271)部分研究内容

作者简介: 张劲松(1968—), 男, 浙江永嘉人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 复合农林业、农(林)业气象。

transpiration was 6.25 mm and monthly transpiration accounted for 10.76%, 13.62%, 14.05%, 24.56%, 19.47%, 17.52% in Apr., May, Jun., Jul., Aug., Sep., respectively. The transpiration per tree was significantly ( $\alpha = 0.01$ ) related to the canopy solar radiation ( $R_a$ ), air temperature, relative humidity, and wind velocity in the main growing period and  $R_a$  is the most important micrometeorological factor effecting transpiration in the main growing season of the tree by comparing the partial correlation coefficient.

**Key words:** Mu Us sandy area; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; transpiration; thermal dissipation sap flow velocity probe

蒸腾是植物耗水特征的主要方式,在土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热传输过程中占有极为重要的地位,一直是农学、林学、气象学、水文学、生态学等相关学科及领域共同关注的重要课题之一。随着水资源紧缺问题的日益严重化,蒸腾问题的研究已受国际社会的愈加重视。揭示林木耗水规律及其影响机制对水资源紧缺地区林业建设战略规划、林种布局、树种选择、林分结构配置及林地水分管理等具有重要的理论指导意义,可为我国正在实施的退耕还林工程建设提供必要的水分生态理论依据。毛乌素沙地为我国北部自东向西断续分布的一个典型内陆沙区,地跨内蒙古、陕西和宁夏三省(自治区),占据鄂尔多斯高原南部和黄土高原北部区域,总面积约 4 万  $\text{km}^2$ ,其中 2/3 分布在内蒙古鄂尔多斯市乌审旗境内。该沙地的历史演变及现实状况很大程度上代表了我国干旱半干旱沙区所存在的人类活动与自然环境间相互关系的许多典型问题。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin.)是鄂尔多斯毛乌素沙地主要优势人工林树种,属当地林业生态工程建设的优选乔木树种,但有关毛乌素地区樟子松蒸腾耗水规律及其影响机制等问题缺少深入研究,难以为该地区樟子松人工林的抗旱节水栽培及管理技术提供充足的理论依据。

选择合适的测算技术及方法是蒸腾研究的工作基础,热扩散植物液流(TDP)技术是当前测算林木蒸腾速率的最为稳定的技术。Fredrik 等<sup>[1]</sup>总结了国际上对树干液流量和蒸腾关系的研究成果,指出在正常情况下 1 d 的蒸腾量与液流量相等,因而在日时间尺度上,可以用树干液流量表征蒸腾量<sup>[2]</sup>。目前该技术在外国已得到普遍应用,我国在此方面的研究刚刚起步,有关樟子松蒸腾问题研究报告<sup>[2~10]</sup>因蒸腾速率测定技术条件的限制,致使原始数据时间连续性与稳定性差,代表性不大,不能深入

揭示蒸腾耗水规律而影响研究结果的应用价值。除吴丽萍等<sup>[9]</sup>曾采用热脉冲(HPV)技术对内蒙古自治区乌兰察布市中旗阴山山脉北部地区樟子松树干液流变异规律进行研究,陈仁升等<sup>[2]</sup>采用 TDP 技术试验研究黑河中游的临泽县樟子松蒸腾变化规律及其与气象因子的关系外,其余研究大多采用以 Li-1600 稳态气孔仪及 Li-6200 等光合分析仪为代表的气孔计法或离体枝快速称质量法,因叶片间变异程度剧烈,在由单叶蒸腾耗水量向整株推算时误差较大,也无法进一步了解蒸腾在一段时期内的连续变化规律。HPV 与 TDP 虽有相似之处,但 HPV 在脉冲信号和读数之间需要一个等待间隔期的不足,以致影响精度以及不能连续监测等局限性。TDP 就是针对 HPV 这一局限性而改进形成的液流测定技术。

本研究采用基于 TDP 技术测算得到的监测时间步长 10 min 的樟子松人工林蒸腾数据,结合同步观测得到的微气象要素值,分析毛乌素沙区 20 年生樟子松林蒸腾变化规律及其影响机制,旨在为该地区发展樟子松林提供必要的水分生态理论依据,并力图进一步完善樟子松蒸腾耗水理论。

## 1 试验设计

### 1.1 试验区概况

试验地位于鄂尔多斯市乌审旗图克苏木境内的毛乌素沙地开发整治研究中心试验区内。该试验区地处  $38^{\circ}57' \sim 39^{\circ}61' \text{N}$ ,  $109^{\circ}17' \sim 109^{\circ}21' \text{E}$ ,海拔高度 1 200 ~ 1 350 m,属温带半干旱与干旱区过渡地带,年均降水量为 360 mm 左右,主要集中在 7—9 月,占年降水量的 60% ~ 70%。年蒸发量为 2 100 ~ 2 600 mm,干燥度 1.6 ~ 2.0;年日照时数 2 700 ~ 3 100 h,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温 2 500 ~ 3 200  $^{\circ}\text{C}$ ,年均气温 6 ~ 8  $^{\circ}\text{C}$ 。年平均风速 3.3  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以西北风为主,年均大风扬沙日数 40 ~ 50 d,多集中在 4—5 月。地带性土壤为栗钙土,试验区的土壤除滩地上的沙

地草甸土外,绝大部分以风沙土为主,其中流动风沙土占65%,固定、半固定风沙土占10%,滩地土壤(丘间低地)占25%<sup>[11]</sup>。地带性植被为半干旱草原,试验区内的天然植被以油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)为主,其次为臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、乌柳(*Salix chelophila* Scheid.)等;人工植被多为沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)、樟子松和杨柴(*Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum* (Turcz.) Turcz. ex Fedtsch)等。

## 1.2 试验材料及方法

试验研究材料为20年生樟子松。樟子松林株行距2 m×6 m,南北行向,营造于1984年,现树高7.6 m,郁闭度约65%。林下植被主要以油蒿、杨柴、柠条为主。以15株树木的平均胸径为依据,在试验地中部选择3棵顺行相邻样株。主要观测内容及方法如下:

1.2.1 树干液流与蒸腾观测 2004年4月1日—2004年9月31日,在樟子松的南、北2个方向处,采用TDP技术测定树干液流,传感器型号:30 mm探针。数据采集器为CR10X,每2 min采集1次,每10 min输出1组平均值。树干液流速率计算公式<sup>[12]</sup>如下:

$$Fs = 0.0119 K^{1.231} \times SA \times 3.6 \quad (1)$$

$$K = \frac{dTM - dT}{dT} \quad (2)$$

式1、2中: $Fs$ 为树干液流速率( $L \cdot h^{-1}$ ),可近似为蒸腾速率; $SA$ 为边材面积( $cm^2$ )。  $dTM$ 为1日内最大温差值, $dT$ 为某时刻温差值。

1.2.2 冠层小气候观测 在中间1棵样株活动面

上1.0 m高处,采用小气候自动监测系统连续观测空气温度( $Ta$ )、相对湿度( $RH$ )及风速( $V$ ),太阳总辐射( $R_s$ )、降雨量( $P$ )。 $V$ 、 $Ta$ 和 $RH$ 、 $P$ 所采用的传感器(探头)分别为LI200X、05103、HMP45C、TE525M。数据采集器为CR10X。观测时间与树干液流观测同步。

1.2.3 土壤水分观测 以中间1棵样株为中心,以0.25、0.5 m为半径,在东、南、西、北4个方向处采用烘干称质量法,每隔10 cm测定土壤含水量,测定深度:0~200 cm。每10 d测定1次,雨后加测。

## 2 结果与分析

### 2.1 时间变化规律

2.1.1 日内变化规律 对晴天、多云、阴天3种类型天气日各对应时刻的蒸腾速率分别进行平均计算,结果表明:在樟子松主要生长期(4~9月)内,蒸腾速率都具有明显的日内变化特征(图1~3)。在清晨,太阳辐射弱,气温低,空气相对湿度高,樟子松蒸腾速率上升缓慢;随着太阳辐射的逐渐增加,气温逐渐升高,蒸腾速率逐渐增强,而后,光照强度减弱,温度降低,导致叶内外水汽压差减少,蒸腾速率减小;到次日日出时,蒸腾速率降低为最低值。多云天气日,蒸腾速率日内变化总体呈多峰曲线趋势,4、5、6、7、8、9月单株蒸腾速率( $Tr$ )全天平均值分别为0.21、0.24、0.29、0.41、0.48、0.39  $L \cdot h^{-1}$ ,其中,白天(6:00—19:00)平均值分别为0.36、0.40、0.47、0.71、0.85、0.69  $L \cdot h^{-1}$ 。

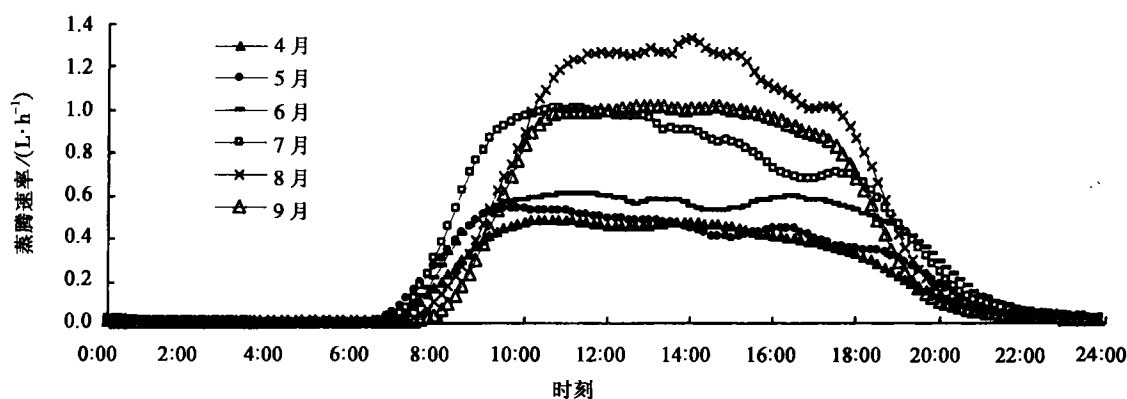


图1 2004年主要生长期樟子松单株蒸腾速率多云天气日内变化趋势

晴天日,除9月份蒸腾速率日内变化呈多峰曲线趋势外,其余各月总体趋势呈单峰曲线。9月时 $Tr$ 在10:00左右、13:00左右、15:00左右出现峰值,

在14:00左右出现谷值。4—8月各月日内 $Tr$ 在10:00左右出现峰值,4、5、6、7、8月该值分别为0.42、0.66、0.63、1.11、0.99、1.04  $L \cdot h^{-1}$ 。4、5、6、

7、8、9月  $T_r$  全天平均值分别为 0.20、0.30、0.31、0.50、0.43、0.44  $L \cdot h^{-1}$ , 其中, 白天(6:00—19:00) 平均值分别为 0.37、0.49、0.49、0.83、0.73、0.77  $L \cdot h^{-1}$ 。

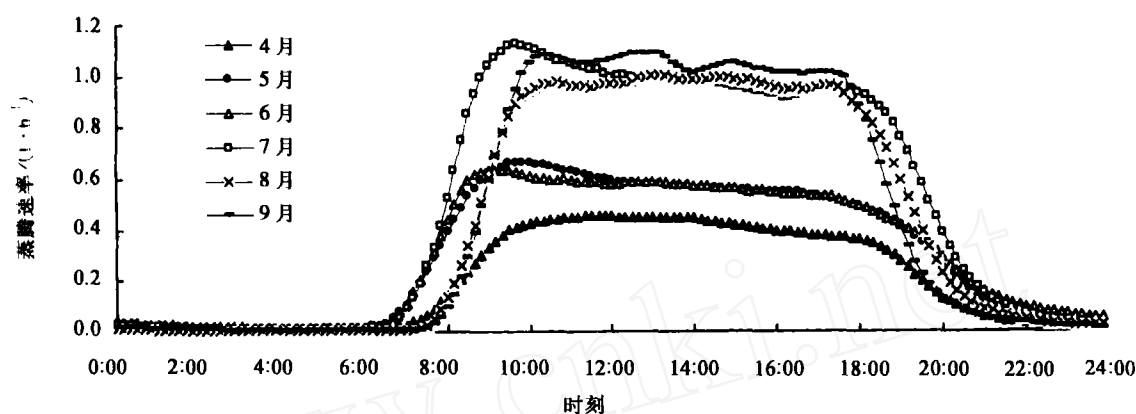


图2 2004年主要生长期樟子松单株蒸腾速率晴天日内变化趋势

阴天天气日, 蒸腾速率日内变化总体趋势呈单峰曲线(图3)。日内  $T_r$  最大值出现在 10:00 左右, 4、5、6、7、8月及9月其值分别为 0.55、0.44、0.48、0.32、0.34、0.35、0.63、0.29、0.39  $L \cdot h^{-1}$ 。4、5、6、7、8、9月  $T_r$  全天

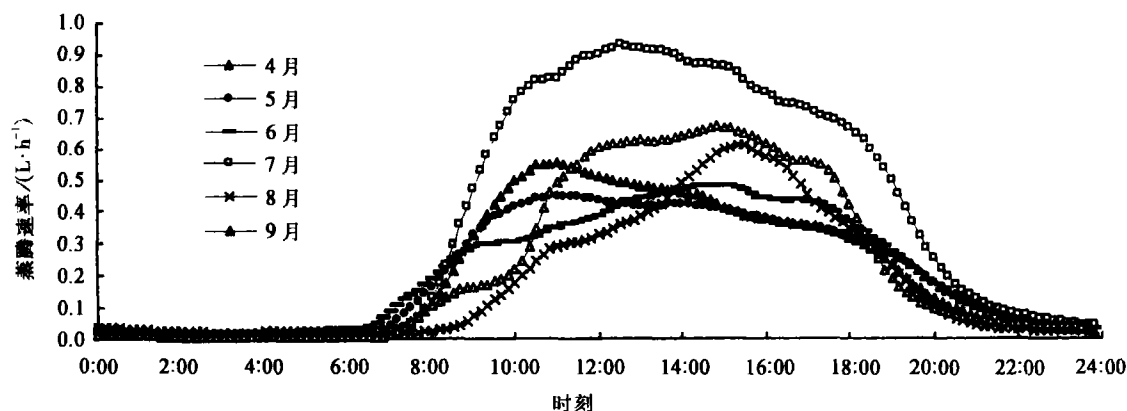


图3 2004年主要生长期樟子松单株蒸腾速率阴天日内变化趋势

比较图1~3可发现, 在同一月份内, 晴天、多云、阴天3种天气日间蒸腾速率差异并不十分明显。只不过由于各月的气象条件, 土壤水分以及樟子松自身的生理状况不同, 蒸腾的启动时间、结束时间、最大值及其出现的时间出现了一定的差异。具体来说, 各月樟子松蒸腾速率在夜间差异不大, 而在白天则明显不同, 其中, 7月蒸腾速率在 13:00 之前提高的速度最大。这是由于7月的气温、太阳辐射都较高, 需要吸收大量的水分, 故蒸腾速率较高。

2.1.2 蒸腾速率日际变化规律 按每公顷833株的密度将单株蒸腾速率转换为群体或单位土地面积

蒸腾速率, 并对2004年4月至9月内各日的蒸腾速率进行积分, 得到了樟子松全年蒸腾耗水量日际变化曲线(图4)。从图4可以看出: 樟子松日耗水量呈现出明显的日际变化或季节变化特征。从4月份起, 樟子松耗水量逐渐增加, 月耗水量在7月达到最高值, 此后有所减小。4—9月总耗水量为1143.7 mm, 日平均为6.25 mm。4、5、6、7、8、9月各月的耗水总量分别为123.1、155.8、160.8、281.0、222.7、200.0 mm, 分别占主要生长季节(4月—9月)总耗水量的10.76%、13.62%、14.05%、24.56%、19.47%、17.52%。可见, 在2004年主要生长季节期, 樟子松耗水量于7月份相对最高。

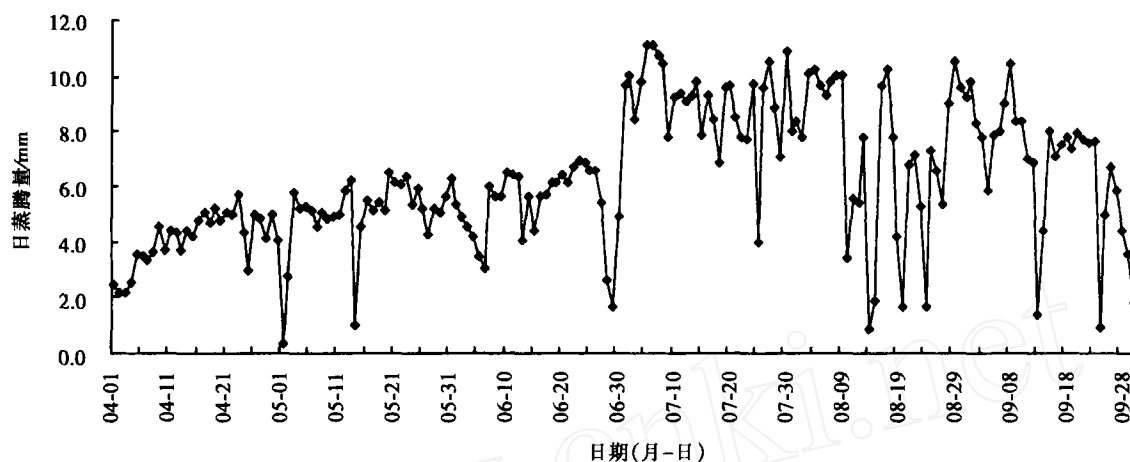


图4 樟子松林2004年主要生长季节蒸腾量日际变化曲线

## 2.2 樟子松蒸腾速率与冠层微气象要素的关系

回归分析2004年4—9月 $Tr$ 与冠层微气象要素的关系表明: $Tr$ 与冠层风速( $V$ )、大气温度( $Ta$ )、大气相对湿度( $RH$ )、太阳总辐射( $Ra$ )具有很好的相关关系,多元线性回归方程如下:

$$Tr = -0.0155 + 0.0078V + 0.02Ta - 0.0023RH + 0.0006Ra \quad (n=26535) \quad (3)$$

式中: $Tr$ 、 $V$ 、 $Ta$ 、 $Ra$ 的单位分别为 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ 、 $m \cdot s^{-1}$ 、 $^{\circ}C$ 、 $W \cdot m^{-2}$ ,  $RH$ 为无量纲数,以%计量。相关系数 $r = 0.8380$ ,  $F_{(4,26535)} = 16573.65 > F_{0.01} = 3.32$ ,通过显著性检验,其中 $V$ 、 $Ta$ 、 $RH$ 、 $Ra$ 的偏相关系数分别为0.0081、0.4269、-0.2240、0.5686。可见,影响樟子松蒸腾的最主要气象因子为太阳总辐射。各月内 $Tr$ 与 $V$ 、 $Ta$ 、 $RH$ 、 $Ra$ 也具有很好的相关关系,回归方程见表1。

表1 主要生长期各月影响樟子松蒸腾的主要气象因子模型与比较

月份	回归模型	$F$	$R^2$
4	$Tr = 0.0222 + 0.0065V + 0.0080Ta - 0.00082RH + 0.0004Ra$	1256.63	0.7779
5	$Tr = 0.0716 + 0.02208V + 0.0057Ta - 0.0015RH + 0.0004Ra$	1532.59	0.8052
6	$Tr = 0.0191 + 0.0122V + 0.0118Ta - 0.0017RH + 0.0004Ra$	3783.14	0.7781
7	$Tr = -0.1074 + 0.0001V + 0.0263Ta - 0.0030RH + 0.0007Ra$	4150.03	0.7782
8	$Tr = 0.3347 + 0.0018V + 0.0197Ta - 0.0066RH + 0.0008Ra$	6236.78	0.8484
9	$Tr = 0.1764 + 0.0008V + 0.0241Ta - 0.0052RH + 0.0007Ra$	5727.06	0.8575

## 3 结论与讨论

(1)樟子松蒸腾具有明显的时间变化规律:多云天气日,樟子松蒸腾速率日内变化总体呈多峰曲线趋势;晴天日,除9月份日内变化呈多峰曲线趋势外,其余各月蒸腾速率日内变化总体趋势呈单峰曲线,9月时蒸腾速率在10:00左右、13:00左右、15:00左右出现峰值,在14:00左右出现谷值,4—8月各月日内樟子松蒸腾速率在10:00左右出现峰值;阴天天气日,蒸腾速率日内变化总体呈单峰曲线趋势,日内樟子松蒸腾速率最大值出现在10:00左右。只不过由于气象条件、土壤水分以及林木自身的生理状况的不同使蒸腾的大小,启动时间、结束时间、最大值及其出现的时间各自不同。

从4月份起,樟子松耗水量逐渐增加,月耗水量在7月达到最高值,此后有所减小。4月—9月总耗水量为1143.7 mm,日平均为6.25 mm。

(2)主要生长期,单株蒸腾速率与冠层太阳总辐射、空气温度、空气湿度、风速等气象要素有很好的复相关性。各月内影响樟子松蒸腾的最主要气象因子都是冠层太阳总辐射。

(3)目前受土壤水分测定技术的限制,在测定蒸腾速率及冠层微气象参数的同时,日内没有同步自动观测土壤水分。为了进一步深入、系统地分析蒸腾速率的影响机制,需进一步开展蒸腾速率与包括土壤含水量在内的环境因子关系的研究。

(4)本文初步研究了2004年主要生长季节樟子

松蒸腾变化规律及其与气象因子的关系,为进一步深入揭示蒸腾变化规律及其影响机制,将开展不同年份的试验研究。

#### 参考文献:

- [1] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 67 ~ 85
- [2] 陈仁升, 康尔泗, 赵文智, 等. 中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 477 ~ 485
- [3] 赵雨森, 焦振家, 王文章. 樟子松蒸腾强度的研究[J]. *东北林业大学学报*, 1991, 19(5): 113 ~ 118
- [4] 赵文智, 常学礼. 樟子松针叶气孔运动与蒸腾强度关系研究[J]. *中国沙漠*, 1995, 15(3): 241 ~ 243
- [5] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J]. *内蒙古林学院学报(自然科学版)*, 1998, 20(3): 7 ~ 12
- [6] 王臣立, 韩士杰, 黄明茹. 干旱胁迫下沙地樟子松脱落酸变化及生理响应[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(1): 40 ~ 43
- [7] 李雪华, 蒋德明, 骆永明, 等. 不同施水量处理下樟子松幼苗叶片水分生理生态特性的研究[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 17 ~ 20
- [8] 吴春荣, 刘世增, 金红喜, 等. 樟子松在西北干旱沙区的蒸腾日变化[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(3): 16 ~ 18
- [9] 吴丽萍, 王学东, 尉全恩, 等. 樟子松树干液流的时空变异性研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 66 ~ 68
- [10] 全昌明, 邢小军, 李振昌, 等. 伊金霍洛旗樟子松和油松引种试验对比研究[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(4): 63 ~ 67
- [11] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(3): 1 ~ 9
- [12] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1996, 78: 19 ~ 29