

## 华北平原主要造林树种 107 杨扦插苗夏季茎流及耗水特性

周 源, 马履一

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 采用以热平衡为原理的 Dynamax 包裹式茎流测量系统, 于 2008 年夏季对 107 杨 *Populus × euramericana* ‘74/76’ 扦插苗的液流变化进行连续监测, 利用实验区自动气象站同步检测光合有效辐射、气温和相对湿度等气象因子, 结合人工记录的天气状况, 分别选取 3 种最典型的天气条件, 分析了 107 杨扦插苗的茎流变化、茎干耗水量及其与气象因子的关系。结果表明: 在不同天气条件下, 液流日变化波动曲线及其主要影响因子各异, 但光合有效辐射始终是液流变化的主导因子。茎干液流通量密度的变化是各种气象因子综合作用的结果。107 杨扦插苗日耗水量的总体变化趋势是从晴天、阴天到雨天依次减少, 其平均值分别为 1 064.126, 567.975 和 405.914 g·d<sup>-1</sup>。图 3 表 3 参 27

**关键词:** 森林培育学; 107 杨; 茎流; 耗水; 天气条件

**中图分类号:** S718.3; Q948.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2010)03-0391-07

## Sap flow and water consumption of *Populus × euramericana* ‘74/76’ saplings from cuttings planted on the North China Plain

ZHOU Yuan, MA Lü-yi

(The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Simultaneous measurement with a heat balance and sap flow measuring system (Dynamax Inc.) to monitor the sap flow of *Populus × euramericana* ‘74/76’ and with an automatic weather recording system to record meteorological factors, such as the photosynthetically active radiation (PAR), air temperature, and relative humidity, was undertaken. According to weather records, the three most representative weather conditions (sunny, cloudy, and rainy days) were used to analyze the relationship of water use and meteorological factors. Results showed that PAR was always the dominant factor influencing sap flow, but sap flow diurnal variation and the main factors affecting it differed with weather conditions. Differences in sap flow density were the result of multi-meteorological factors, and the overall water use for saplings was in the order: sunny days > cloudy days > rainy days. [Ch, 3 fig. 3 tab. 27 ref.]

**Key words:** silviculture; *Populus × euramericana* ‘74/76’; sap flow; water use; weather conditions

茎干液流具有特定的时空变化规律, 并受多种因素的影响。Fredrik 等<sup>[1]</sup>总结了国际上对茎干液流和蒸腾量关系的研究成果, 指出正常情况下下一天的蒸腾耗水量与茎干液流总量相等。因此, 茎干液流能够准确反映单株植物的蒸腾耗水量、蒸腾作用和水利用状况。自 1932 年德国 Huber 最早用热技术法测量木质部茎流以来, 热技术法得到了 Marshall, Swanson 和 Granier 等<sup>[2-5]</sup>不断改进和完善, 被广泛应用于通过植物茎流大小测算植株耗水量<sup>[6-9]</sup>。利用热技术法测算树木茎干液流是目前该领域最先进、应用最广泛的技术方法。该方法根据其设计原理可分为热脉冲法、热平衡法、热扩散法和激光热

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-07-13

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006 BAD24B01); 北京市教育委员会资助项目(2008)

作者简介: 周源, 博士, 从事苗木培育和植被恢复等研究。E-mail: zhouyuantrue@163.com。通信作者: 马履一, 教授, 博士, 从事植被恢复和苗木培育等研究。E-mail: malüyi@bjfu.edu.cn

脉冲法,其适用性各异。国内运用此技术进行耗水研究大多集中在高大的乔木上<sup>[10-12]</sup>,而运用热技术对直径较小的林木幼苗的耗水研究较少。使用以热平衡为原理的包裹式茎流探头,研究田间生长的苗木茎干液流及耗水,具有明显的优越性。热平衡法经 Sakuratani<sup>[13]</sup>, Baker 等<sup>[14]</sup>和 Steinberg 等<sup>[15]</sup>的发展与完善,实验准确性极高。严昌荣等<sup>[16]</sup>和许浩等<sup>[17]</sup>曾分别利用热平衡式茎流探头对生长中期的核桃楸 *Juglans mandshurica* 和一些荒漠植物的茎干液流进行过研究,取得了满意的结果。树干液流量大小除与植物本身生长状况有关外,还受光辐射、水汽压亏缺、土壤含水量、温度、降水和风速等环境因子的影响<sup>[18]</sup>。各环境因子之间还存在交互作用,并受植物的生理变化调节,不同地区影响液流变化的主要因子也不尽相同<sup>[19]</sup>。本研究以107杨 *Populus × euramericana* '74/76' 2年生扦插苗为研究对象,采用 Dynamax 茎流测量系统直接测定茎干液流速率,并通过 HOBO 便携式自动气象站同步获取气象数据,研究了107杨扦插苗夏季的茎流和耗水量在不同天气条件下变化规律和特性,以及与气象因子的关系;阐述了107杨扦插苗耗水的特征,并揭示了它对气象因子变化的响应规律,旨在为研究107杨扦插苗的水分利用提供理论和方法依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于北京市昌平,京昌公路的东侧的北京林学会菊花地苗圃(40°02'18" ~ 40°23'13"N, 115°50'17" ~ 116°29'49"E)。该地区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 8.5 ~ 9.6 °C,年平均降水量为 607 mm,6 - 8月的降水占全年的70%以上,年内分布不均,土壤为潮土,土壤平均田间持水量为 22.06%。

试验对象为107杨2年生扦插苗,于2007年4月中旬扦插,株行距为 40 cm × 50 cm(表1)。

### 1.2 研究方法

在2008年6月下旬,选取接近试验地107杨2年生扦插苗平均苗高地径的苗木为研究对象,使用 Dynamax 茎流测量系统进行连续测量。在苗木符合茎流探头 SGA13 规格部位安装 Dynamax 茎流测量系统,研究不同天气条件下,苗木的茎流及耗水特性,该部位以下如有分枝和叶片应除去,以保证所测茎流为整株苗木茎流,将选定的被测植株仪器安装区粗皮打磨掉,露出内层活树皮,用游标卡尺分别精确测量安装区的直径,然后在打磨好的安装区涂抹上 G4 油脂。将相应探头打开到足够宽度,紧紧包住处理好的茎干。在此过程中需注意不要将探头损坏,且保证探头缆线在下部,电热条包裹茎干至少完整一圈。然后紧贴探头上沿涂一层塑胶来避免雨水沿茎干流入。茎流探头一旦裹上茎干,不要再上下移动或拧动。最后,包裹好绝缘、防辐射材料,最后用胶带密封,防止雨水进入。安装好以后将馈线与数据采集器连接,接通电源,对数据采集器设置工作参数(茎的截面积、探头电压和茎的类型等),设置数据采集间隔期 30 min。Dynamax 茎流测量系统的详细安装步骤参考文献[20]。利用已安装的茎流测量系统,在2008年107杨2年生扦插苗生长旺盛的6 - 8月,对其液流速率进行连续监测。利用 HOBO 便携式自动气象站对实验区光合有效辐射、温度和相对湿度等气象因子每隔 30 min 进行自动检测记录,保证与茎流测量同步。同时,结合人工观测情况,在阴、晴、雨天气条件下各选出4个最典型的实验日进行数据分析。天气条件的划分以当地气象情况为依据,云量超过 4/5 且太阳不可见为阴天;无云且有持续的高温 and 强辐射为晴天;有持续或短暂降水发生为雨天。

Dynamax 茎流仪基本原理:茎流计热源以恒定的功率( $P_m$ )作用于茎干后,在不考虑茎干本身热容量的情况下用一能量平衡方程可表示为:  $P_m = Q_v + Q_r + Q_t$ , 其中  $P_m = V/R$ (欧姆定律),  $Q_v$  为一部分与垂直方向上的水流进行热交换;  $Q_r$  为一部分以辐射的形式向四周散发;  $Q_t$  为一部分则与树干内的水流一起向上传输。而  $Q_v = Q_u + Q_d$ , 其中  $Q_u$  为向上热交换;  $Q_d$  向下热交换; 根据 Fourier 定律  $Q_u$  和  $Q_d$  又可表示为:  $Q_u = K_s \cdot A \cdot dT_u/dx$  和  $Q_d = K_s \cdot A \cdot dT_d/dx$ , 其中,  $K_s$  为茎干的热传导特性( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $A$

表1 测定样地苗木基本参数

Table 1 Some parameters of the saplings in sample-plot for sap flow measurement

时间	调查株数/株	平均地径/cm	平均苗高/cm	测定部位高度/cm
2007年10月	720	2.51	314.48	
2008年6月	720	2.99	435.01	162~188

为茎干测定部位的截面积( $\text{m}^2$ ),  $dT_u/dx$  为向上热传导时的温度梯度( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ),  $dT_d/dx$  为向下热传导时的温度梯度( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ),  $dx$  为测定温度梯度时的 2 个热电偶之间的距离( $\text{m}$ ); 以辐射形式向四周散发的能量部分可表示为:  $Q_r = K_{sh} \cdot U_{ch}$ , 其中  $K_{sh}$  为护套的热电常数( $\text{W}\cdot\text{mV}^{-1}$ );  $U_{ch}$  为辐射源的电源电压( $\text{mV}$ ); 因而, 茎干中液流量公式为:  $F = (P_{in} - Q - Q_r)/(C_p \cdot dT) = (P_{in} - Q_u - Q_d - K_{sh} \cdot U_{ch})/(C_p \cdot dT)$ ;  $F = [P_{in} - K_{st} \cdot A(dT_u + dT_d)/dx - K_{sh} \cdot U_{ch}]/(C_p \cdot dT)$ 。其中:  $C_p$  为水的比热( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $dT$  为上下 2 个温度监测点间茎干水流温度的变化值( $^{\circ}\text{C}$ ), 且  $dT = (AH + BH)/2(^{\circ}\text{C})$ 。用树干液流量的 24 h 累计值作为单木日耗水量值。

### 1.3 数据处理

利用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对所有实验数据进行分析处理。日耗水量由实验日内 24 h 整点测得的液流量密度值累加求得。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同天气条件下的茎流变化

由图 1 可以看出, 典型晴天条件下的茎干液流量密度日变化趋势均呈宽峰曲线, 液流启动时间在 6:00 左右, 之后迅速上升至高峰状态。液流高峰前后可持续 5~8 h, 4 个晴天的峰值为  $110 \sim 160 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ , 通常, 液流速率在 16:00 左右开始急剧下降, 22:00 基本降至极低值, 之后进入夜间液流的微弱活动阶段。阴天条件下, 107 杨 2 年生扦插苗的液流的启动时间为 4:30~6:00, 液流量

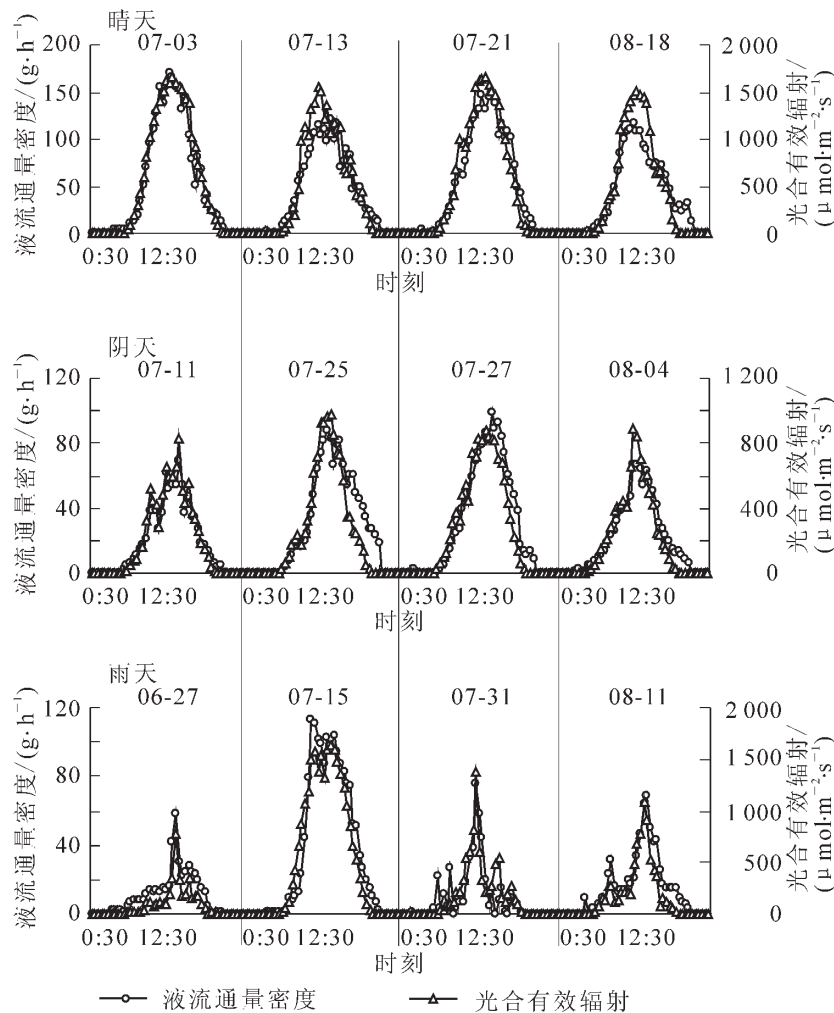


图 1 不同天气条件下 107 杨扦插苗茎干液流量密度日变化

Figure 1 Diurnal sap flow density fluctuation of *Populus x euramericana* '74/76' in different weather conditions

密度值的上升过程很不稳定,且时间延长。进入液流活跃阶段后,液流高峰出现的时间并不固定。4个阴天的峰值仅为 $67 \sim 93 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ ,低于晴天时的水平。在雨天,107杨2年生扦插苗的液流通量密度日进程曲线呈多峰。日间液流通量密度值有大幅度的起落,峰值为 $58 \sim 113 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

## 2.2 气象因子变化对茎流及耗水的影响

由图1可以看出,4个晴天的光合有效辐射变化一致,峰值位于 $12:00 - 13:00$ 。液流速率的连日变化趋势和太阳辐射的变化趋势基本一致,午间的太阳辐射强烈,气温在 $33.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,空气相对湿度只有 $30\% \sim 50\%$ (图2),导致植物体的蒸腾耗水不断增强,太阳辐射对液流的影响主要通过其引起空气温度的变化,使得林木蒸腾也随之改变,因此林木树干液流出现明显的日变化规律,说明树木的木质部水分上升速率、流量与太阳辐射、空气温度具有较好的生态学相关性。在阴天,由于云层的遮挡,太阳辐射强度较低,液流高峰状态时的变化曲线与光合有效辐射的变化相一致。日间最高气温 $29.5 \sim 34.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低湿度 $47.25\% \sim 78.75\%$ ,阴天的日耗水量为 $435.019 \sim 695.388 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ,平均耗水量 $567.975 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ,低于晴天时的水平。雨天时太阳辐射强度小,液流波形变化幅度和峰值也低,液流的变化曲线也与光合有效辐射的变化相一致。雨天比晴天和阴天的空气温度低,空气相对湿度大,液流波形变化幅度和峰值也低。由于持续的阴雨,空气相对湿度则在 $90\%$ 以上(图2),此时叶片内外蒸汽压差极小,气孔关闭,蒸发几乎为0,液流保持极低值。但如果夜间降水,白天为晴天,其日耗水量仍然很高,可达 $822.672 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。4个雨天日耗水量为 $236.712 \sim 822.672 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ,平均 $405.914 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。低于晴天和阴天时的水平(图3)。

## 2.3 液流速率与环境因子的关系

对不同天气条件下的液流通量密度值与4个环境因子监测值进行偏相关分析。求液流通量密度与

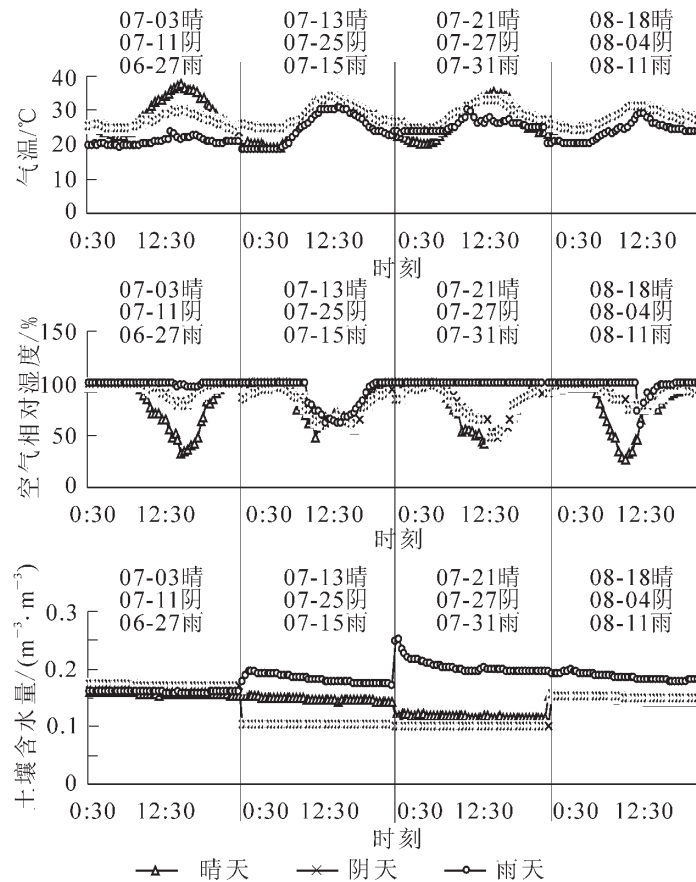


图2 不同天气条件下空气温度、空气相对湿度和土壤含水量的日变化

Figure 2 Diurnal variations of photosynthesis active radiation, air relative humidity, air temperature and soil water content in different weather conditions



其中 1 个环境因子的相关系数时, 对其他 3 个因素的影响进行变量控制, 结果见表 2。在以上偏相关分析的基础上, 利用多元线性回归方法对液流速率与光合有效辐射、空气相对湿度、空气温度和土壤含水量进行逐步回归, 以 0.05 和 0.01 可靠性作为变量入选和剔除临界值, 建立不同天气条件下液流速率与环境因子的多元线性模型(表 3)。

由表 2 和表 3 可以看出, 不同天气条件下环境因子对液流速率的影响从大到小的次序有所不同: 晴天为光合有效辐射、空气温度、空气相对湿度和土壤含水量; 雨天为光合有效辐射、空气相对湿度、土壤含水量和空气温度; 阴天为光合有效辐射、空气相对湿度、空气温度和土壤含水量; 经过回归系数和相关系数检验, 回归方程都达到了极显著水平。

### 3 讨论

植物都要经受昼夜带来的辐射和温度的变化。一般来说, 在植物生命活动正常进行的温度范围内, 环境温度升高能够增加水的自由能, 使得水分子扩散速度加快, 有利于根系吸水和水分的运输<sup>[21]</sup>。因此, 温度升高会在一定范围内引起液流的上升, 但当温度的升高超过了植物的耐受范围时, 则会对植物产生伤害, 并导致液流量下降。

温度与空气相对湿度具有协同效应。环境中的相对湿度增加, 将导致液流速度降低。空气中相对湿度提高, 水汽增大, 边界层水汽压与叶片气孔腔水汽梯度减小, 使水汽化过程变慢, 导致液流速度降低<sup>[22]</sup>。阴雨天气不仅能够产生较高的空气相对湿度, 还会使叶片的含水量达到饱和, 从而出现树干液流明显降低甚至液流为 0 的情况。

多数研究表明, 太阳辐射、空气温度、空气相对湿度和土壤含水量等是影响树干液流的主要环境因子<sup>[23-26]</sup>。不同天气条件下液流速率的日变化及其主导因子各不相同。尽管不同天气条件下 107 杨扦插苗液流速率的主要影响因素存在差异, 但光合有效辐射始终是液流变化的最主要影响因素。

在没有胁迫的条件下, 晴天白天随着光照的增加, 液流的速率一般逐渐增加, 这与光照引起气孔的开放有关。阴天和雨天光合有效辐射强度低, 空气湿度对液流的影响效应相对明显。由于温度下降和空气相对湿度的增高, 雨天往往出现液流活动的极低状态。另外, 太阳辐射的变化也会引起其他环境因子变化, 如光照的增加往往伴随着气温的升高, 降低空气湿度和增加水汽压亏缺。各种气象因子并不是独立存在和作用的, 其间还存在相互制约和相互协调, 茎干液流量密度的变化最终是各种气

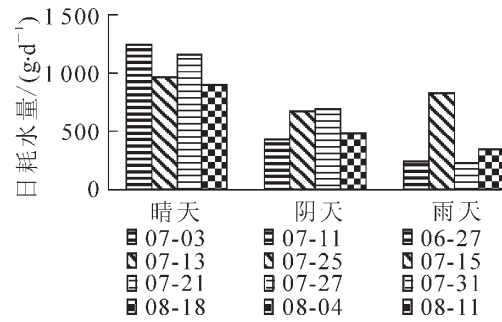


图 3 不同天气条件下 107 杨扦插苗日耗水量

Figure 3 Diurnal water use of *Populus × euramericana* '74/76' in different weather conditions

表 2 不同天气条件下液流速率与各环境因子相关分析的偏相关系数

Table 2 Partial coefficient between sap flow velocity and environmental factors of correlation analysis in different weather conditions

天气	系数	光合有效辐射	相对湿度	温度	土壤含水量
晴天	R	0.892**	0.235**	0.541**	-0.183*
	P	0.000	0.001	0.000	0.011
阴天	R	0.910**	-0.463**	0.384**	0.339**
	P	0.000	0.000	0.000	0.000
雨天	R	0.883**	-0.323**	0.129	-0.260**
	P	0.000	0.000	0.077	0.000

说明: \*\* $P < 0.01$ 。

表 3 不同天气条件下液流量密度与环境因子的多元回归模型

Table 3 Multiple linear model of environmental factor with sap flows velocity

天气	回归方程	R <sup>2</sup>
晴天	$q_{SF} = -74.433 + 0.077Q_{PAR} + 0.323\varphi_{RH} + 2.792T_a - 141.231C_{SWC}$	0.946**
阴天	$q_{SF} = -5.117 + 0.059Q_{PAR} - 0.588\varphi_{RH} + 2.002T_a + 83.617C_{SWC}$	0.965**
雨天	$q_{SF} = 57.050 + 0.053Q_{PAR} - 0.417\varphi_{RH} + 0.464T_a - 126.855C_{SWC}$	0.917**

说明:  $q_{SF}$  为液流速率( $g \cdot h^{-1}$ );  $Q_{PAR}$  为光合有效辐射( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $\varphi_{RH}$  为空气相对湿度(%);  $T_a$  为空气温度( $^{\circ}C$ );  $C_{SWC}$  为土壤含水量( $m^3 \cdot m^{-3}$ )。

象因子综合作用的结果。

日耗水量在夏季不同晴天和不同阴天之间差别不大,而在雨天天气条件下,其日耗水量的差异则十分明显,可能与雨天天气状况下气象因子的大幅波动有关。不同天气条件下107杨扦插苗日耗水量的总的变化趋势是从晴天、阴天和雨天依次减少。

基于苗圃土壤水分平衡原理的土壤水分收支计算,可为苗木灌溉提供依据,苗圃土壤水分的支出项包括:植物蒸腾、林下土壤蒸发、地表径流和土壤水分渗漏;苗圃土壤水分的收入项包括:降水和灌溉。蒸腾是植物耗水的主要方式,一般认为可将蒸腾视为植物的总耗水。

根据单株平均木日平均耗水数值及样地扦插密度,可计算出单位面积的蒸腾量数值<sup>[27]</sup>。由于本试验立地条件是平原且土层厚度可达70 cm以上,故就当地降雨强度而言,一般不存在地表径流及渗漏现象。根据土壤水分平衡原理,土壤水分收入项的灌溉量与降水量之和,应等于土壤水分支出项的植物蒸腾量与林下土壤蒸发量之和。因此,苗木耗水的研究可为苗木灌溉制度的制订提供依据。

### 参考文献:

- [1] FREDRIK L, ANDERS L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden [J]. *Agric For Meteorol*, 2002, **112**: 67 – 85.
- [2] HUBER B. Observation and measurements of sap flow in plant [J]. *Berichte der Deutscher Botanischen Gesellschaft*, 1932, **50**: 89 – 109.
- [3] MARSHALL D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport [J]. *Plant Physiol*, 1958, **33**: 385 – 396.
- [4] SWANSON R H, WHITFIELD D W. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice [J]. *J Exp Bot*, 1981, **32**: 221 – 239.
- [5] GRAINER A, HUC R, BARIGAH S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. *Agric For Meteorol*, 1996, **78**: 19 – 29.
- [6] OLIVER D, RONALDO R M. Regulation of xylem sap flow in an evergreen, a semideciduous, and a deciduous Meliaceae species from the Amazon [J]. *Trees*, 2002, **16**: 404 – 416.
- [7] HULTINE K R, WILLIAMS D G, BURGESS S S, et al. Contrasting pattern of hydraulic redistribution in three desert phreatophytes [J]. *Oecologia*, 2003, **135**: 167 – 175.
- [8] ALARCON J J, DOMINGO R, GREEN S R, et al. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees [J]. *Plant Soil*, 2000, **227**: 77 – 85.
- [9] ALARCON J J, DOMINGO R, GREEN S R, et al. Estimation of hydraulic conductance within field-grown apricot using sap flow measurements [J]. *Plant Soil*, 2003, **251**: 125 – 135.
- [10] 马履一, 王华田, 林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, **25** (2): 1 – 7.  
MA Lüyi, WANG Huatian, LIN Ping. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area [J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25** (2): 1 – 7.
- [11] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学, 2003, **39** (2): 1 – 7.  
XIONG Wei, WANG Yanhui, XU Deying. Regulations of water use for transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern Ningxia hilly area [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (2): 1 – 7.
- [12] 岳广阳, 张铜会, 刘新平, 等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, **42** (8): 102 – 108.  
YUE Guangyang, ZHANG Tonghui, LIU Xinping, et al. Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (8): 102 – 108.
- [13] SAKURATANI T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method [J]. *J Agric Meteorol*, 1984, **40**: 273 – 277.
- [14] BAKER J M, VAN B C. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants [J]. *Plant Cell Environ*, 1987, **10**: 777 – 782.
- [15] STEINBERG S L, VAN B C, MCFARLAND M J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants [J]. *J Amer Soc Hort Sci*, 1989, **114**: 466 – 472.
- [16] 严昌荣, ALEC Downey, 韩兴国, 等. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究 [J]. 生态学报, 2003, **23** (12): 2155 – 2161.

- 1999, **19** (6): 793 – 797.
- YAN Changrong, ALEC Downey, HAN Xingguo, *et al.* A study on sap flow of *Juglansm* and shurica of growth season in deciduous broad-leaf forest Beijing Mountain area [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (6): 793 – 797.
- [17] 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, **28** (8): 3713 – 3720.
- XU Hao, ZHANG Ximing, YAN Hailong, *et al.* Water consumption and transpiration of *Haloxylon ammodendron* in hinter land of Taklimakan desert [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 3713 – 3720.
- [18] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, **25** (9): 2145 – 2151.
- MA Ling, ZHAO Ping, RAO Xingquan, *et al.* Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (9): 2145 – 2151.
- [19] 高照全, 邹养军, 王小伟, 等. 植物水分运转影响因子的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2004, **22** (2): 200 – 204.
- GAO Zhaoquan, ZOU Yangjun, WANG Xiaowei, *et al.* Advance of influence factors for water transport in plants [J]. *Agric Rese Arid Areas*, 2004, **22** (2): 200 – 204.
- [20] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报, 2006, **26** (10): 3205 – 3213.
- YUE Guangyang, ZHANG Tonghui, ZHAO Halin, *et al.* Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejevii* and *Caragana microphyllain* Horqin Sandy Land, northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (10): 3205 – 3213.
- [21] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [22] 茹桃勤, 李吉跃, 孔令省, 等. 刺槐耗水研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, **12** (2): 135 – 140.
- RU Taoqin, LI Jiyue, KONG Lingsheng, *et al.* Review on the research of water consumption characteristic of *Robinia pseduoacia* [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2005, **12** (2): 135 – 140.
- [23] 赵丽娟, 蒋文伟, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉的茎干液流特征[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (2): 169 – 175.
- ZHAO Lijuan, JIANG Wenwei, YANG Shuzheng, *et al.* Stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu National Nature Reserve [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (2): 169 – 175.
- [24] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云. 南方红壤区杜仲(*Eucommia ulmoides*)树干液流动态[J]. 生态学报, 2006, **26** (9): 2887 – 2895.
- CAO Yun, HUANG Zhigang, OUYANG Zhiyun. Dynamics of stem sap flow velocity of *Eucommia ulmoides* in red soil region, southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (9): 2887 – 2895.
- [25] 张刚华, 陈步峰, 聂洁珠, 等. 热带山地雨林尖峰栲边材液流及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (4): 742 – 748.
- ZHANG Ganghua, CHEN Bufeng, NIE Jiezh, *et al.* *Castanopsis jianfengensis* sap flow and its relationships with environmental factors in tropical montane rainforest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (4): 742 – 748.
- [26] 张小由, 康尔泗, 张智慧, 等. 沙枣树干液流的动态研究[J]. 中国沙漠, 2006, **26** (1): 146 – 151.
- ZHANG Xiaoyou, KANG Ersi, ZHANG Zhihui, *et al.* Research on dynamics of stem sap flow of *Elaeagnus angustifolia* [J]. *J Desert Res*, 2006, **26** (1): 146 – 151.
- [27] 王鹤松, 张劲松, 孟平. 华北石质山区杜仲人工林蒸腾特征及水分供求关系[J]. 林业科学研究, 2008, **21** (4): 475 – 480.
- WANG Hesong, ZHANG Jinsong, MENG Ping. Transpiration variation and relationship between supply and demand of water for *Eucommia ulmoides* plantations in the rocky mountainous area of north China [J]. *For Res*, 2008, **21** (4): 475 – 480.