

城市森林建设四种乔木树种蒸腾耗水特征

张文娟^{1,2}, 张志强^{1,*}, 李湛东¹, 张晓放³, 董克宇⁴, 陈立欣¹, 王国玉¹

(1. 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019;
3. 大连市林业局林业科技推广中心, 大连 116023; 4. 大连市园林局风景园林处 大连 116023)

摘要:城市树木与森林作为城市生态系统的重要组成部分, 充分发挥其生态环境服务、景观美化和休闲娱乐等功能得到了社会各界越来越广泛的重视。配置合理的城市树木与森林, 建设节水型城市森林是水资源短缺地区城市生态建设必须重视的问题之一。以大连市劳动公园 4 种主要乔木树种雪松(*Cedrus deodara*)、榉树(*Zelkova serrata*)、丝棉木(*Euonymus bungeanus*)及水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)为研究对象, 应用 TDP (Thermal Dissipation Probe) 技术分别对每个树种 3 个径阶的单株树木蒸腾耗水进行了研究, 并测定同期气候环境因子及 0~25cm, 25~50cm, 50~75cm, 75~100cm 土壤含水量的动态变化。研究结果表明: 不同树种生长季内蒸腾耗水具有明显的昼夜变化规律, 3 个径阶雪松夜间蒸腾量占全天的 6.3%~33.9%; 榉树占 12.4%~30.8%; 丝棉木占 6.5%~27.6%; 水杉占 6.0%~21.1%。受气候环境因子、土壤含水量以及树木生长节律的影响, 各树种日蒸腾耗水量从 9 月以后表现为递减的变化。晴天、雨天与阴天 3 种典型天气条件下树木液流速率表现出不同的变化特征: 晴天液流速率曲线较平缓且峰值范围较宽, 液流开始升高时间最早, 开始降低时间最晚, 液流量最大; 雨天, 峰值陡且窄, 液流开始升高时间最晚, 开始降低时间最早, 液流量最小; 阴天表现居中。对各树种在整个生长季内蒸腾量从大到小的排序, 径阶为 10cm 的树种为: 丝棉木>榉树; 径阶为 14cm 的树种为: 丝棉木>榉树>雪松>水杉; 径阶为 18cm 的树种为: 雪松>丝棉木>榉树>水杉; 径阶为 24cm 的树种为: 雪松>水杉。

关键词:城市森林; 蒸腾耗水; 边材液流; TDP 热扩散计

文章编号: 1000-0933(2009)11-5942-11 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Transpiration of four tree species under an urban environment

ZHANG Wen-Juan^{1,2}, ZHANG Zhi-Qiang^{1,*}, LI Zhan-Dong¹, ZHANG Xiao-Fang³, DONG Ke-Yu⁴, CHEN Li-Xin¹, WANG Guo-YU¹

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 10083, China

2 College of Ecological and Environmental Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

3 Technical Extension Center, Dalian Forestry Bureau, Dalian 116023, China

4 Dalian Landscape Architecture Bureau, Dalian 116023, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5942~5952.

Abstract: Urban forests play a significant role in urban development because it provides valuable ecological and environmental services, landscape integrity, and recreation opportunities for urban residents. However, water saving approaches for urban forest development must be adopted in the cities that are facing water resources shortage. Many studies suggested that forests have much higher water demand than shorter plants. Therefore, it is critically important to select water-saving trees in urban forestry practices in order to achieve the sustainable urban greening and landscaping. We selected four major urban tree species including *Cedrus deodara*, *Zelkova serrata*, *Euonymus bungeanus*, *Metasequoia glyptostroboides*, to quantify whole tree water use in the Labor Park of Dalian City, Liaoning Province, China. Thermal Dissipation Probes were deployed to monitor the sap-fluxes continuously for 12 trees, three DBH classes of each species, from June through October in 2008. Climatic variables and soil moisture at the depth of 0—25cm, 25—50cm, 50—75cm,

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A1705)

收稿日期: 2009-01-05; 修订日期: 2009-05-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

and 75—100 cm were also measured by an automatic weather station and EMS70 soil moisture probes at the same time, respectively. The remarkable diurnal-nocturnal variation of sapflux for different species was observed during the growing season and the nocturnal water loss accounted for a certain proportion of the total transpiration: 6.3%—33.9% for *Cedrus deodara*, 12.4%—30.8% for *Zelkova serrata*, 6.5%—27.6% for *Euonymus bungeanus*, and 6.0%—21.1% for *Metasequoia glyptostroboides* across three diameter classes. Due to compounding impact of climatic factors, soil moisture regime, and the tree growth patterns, the diurnal transpiration rate declined since September for all trees. Contrasting characteristics of daily sapflux pattern were found under three typical weather conditions. Sapflux curves of clear sunny days were relatively flat with wide range of peaks, showing an earliest start time of sap-flow, an latest declining time with the highest daily sap-flux volume. Sapflux curves of raining days showed steep and narrow peaks accompanied by a latest sap-flow start time, and earliest declining time along with lowest sap-flux volume. The performance for cloudy days stood in between. The whole tree water use ranking from high to low during the entire growing season was as follows: *Euonymus bungeanus* > *Zelkova serrata* within the 10 cm diameter class, *Euonymus bungeanus* > *Zelkova serrata* > *Cedrus deodara* > *Metasequoia glyptostroboides* within the 14 cm diameter class, *Cedrus deodara* > *Euonymus bungeanus* > *Zelkova serrata* > *Metasequoia glyptostroboides* within the 18 cm diameter class, and *Cedrus deodara* > *Metasequoia glyptostroboides* within the 24 cm diameter class.

Key Words: urban forest; transpiration; sapflux; thermal dissipation probe

城市区域内的森林不仅是城市景观的重要组成部分,而且也是城市生态功能和环境功能维持的重要调节器,是城市生态环境建设的本底和主线^[1]。对于以资源性缺水为特征的北方城市而言,节水型城市森林建设与维护模式是城市生态环境建设考虑的首要问题之一。定量研究典型树种的蒸腾耗水特征进而选择低耗水树种是节水型城市林业建设技术的重要组成部分。以热扩散原理测定树干液流(sap flux)并据此推算树木耗水量是目前应用最广泛而准确的方法之一^[2~4]。一般认为单株树木的最大日蒸腾耗水量在 10~200 kg^[5]。树木的蒸腾耗水不仅与树木大小有关,同时也与树木冠层与大气间的耦合有关,这种耦合取决于空气动力学导度和冠层导度的大小^[6]。因此,树干液流呈现较大的时空动态变化特征^[7~10],在空间上主要表现在树干不同深度(不同边材深度)^[11,12]、不同方位^[12,13]的液流速率具有显著的变化;在时间上,则主要表现在液流具有明显的日、月、季节变化特征^[14,15]。最近大量研究表明,树木夜间液流速率不为零,夜间蒸腾占树木昼夜蒸腾耗水比例大约为 10%~20%^[16~18]。尽管土壤水分状况直接影响植物根系吸水进而影响植物蒸腾耗水量的变化,但以往这方面的研究较少。此外,树木蒸腾耗水主要是针对森林生态系统展开的,还没有针对城市树木开展类似的定量研究。本文根据城市森林特殊的环境特点,以城市植被建设中常用的绿化树种为对象,研究城市树木蒸腾耗水昼夜变化规律,探讨不同树种以及不同树种不同生长发育阶段(不同径阶)蒸腾耗水量的差异,分析土壤水分变化对蒸腾耗水的影响,为节水型城市森林建设树种选择及配置提供科学依据。

1 试验地自然概况

城市森林树木耗水研究应满足:(1)城市森林所界定的范围,即在市区、郊区及远郊区所有影响城市人居环境的以木本植物为主的植被群体^[19];(2)树种具有较为广泛的代表性,树种间年龄差异不宜过大;(3)研究对象相对集中,以便试验仪器的统一安装与观测。经过实地考察,本研究试验地选在大连市中山区劳动公园内。

大连市地处东经 120°58′~123°31′,北纬 38°43′~40°10′之间,属具有海洋特点的暖温带大陆性季风气候。全年日照总时数为 2500~2800 h,年平均气温 8~10℃左右,极端最高气温 30~36℃,极端最低气温为 -22~-29℃,无霜期为 200 d 左右;年降雨量在 550~800 mm 之间,夏季降水量占全年的 60%~70%,春季仅占 12%~15%,经常有春旱和秋旱发生。该区 6 级以上的大风全年可达 130 d 以上。

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

在实验林分内,分大中小 3 个不同径阶,选择生长良好具有代表性的雪松(*Cedrus deo dara* (Roxb) Loud.)、榉树(*Zelkova schneideriana* Hend. -Mazz.)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Hu et cheng)、丝棉木(*Euonymus bungeanus* Maxim)4 个乔木树种,作为液流测定样树。用生长锥测定各树种及其不同径阶边材和心材面积,结果见表 1。

表 1 试验材料

Table 1 General Situation of arbor

树种 Species	样树编号 Tree No.	树龄 Age of trees (a)	冠幅 Crown width (m ²)	树高 Tree Height (m)	树皮厚 Bark thickness (cm)	胸径 DBH (cm)	心材厚 Heartwood thickness (cm)	边材厚 Sapwood thickness (cm)	边材面积 Sapwood area (cm ²)
雪松	C1	12	10.18	6.10	1.60	13.60	1.60	4.50	26.42
<i>Cedrus deo</i>	C2	15	16.61	6.70	2.30	17.20	2.30	5.40	30.19
<i>dara</i>	C3	20	22.90	8.30	2.80	21.00	2.80	6.60	45.36
榉树	Z1	14	13.85	4.70	0.40	10.00	0.70	2.60	11.34
<i>Zelkova</i>	Z2	22	18.10	5.30	0.50	14.20	1.17	3.70	20.11
<i>schneideriana</i>	Z3	28	24.63	5.90	0.50	17.60	1.75	4.60	25.52
水杉	M1	18	2.01	10.30	0.60	14.60	2.20	4.50	16.62
<i>Metasequoia</i>	M2	22	5.31	11.60	0.50	18.80	2.60	6.30	43.01
<i>glyptostroboides</i>	M3	34	7.07	12.90	0.70	24.60	3.80	7.80	50.27
丝棉木	E1	14	22.90	5.20	0.80	10.40	0.50	3.90	36.32
<i>Euonymus</i>	E2	17	34.21	5.40	1.10	13.50	0.80	4.85	51.53
<i>bungeanus</i>	E3	26	47.78	6.30	1.30	16.60	1.20	5.80	66.48

2.2 实验方法

2.2.1 树干液流测定与单株耗水量计算

树木水分运移速率采用美国 Dynamax 公司生产的 TDP 热扩散液流探针(Thermal Dissipation Sap Velocity Probe)测定,仪器数据记录时间间隔设定为 30min,数据存储采用 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, Inc., Logan, USA),定时下载。该测量系统从 2008 年 5 月底开始,2008 年 10 月底结束,进行了一个生长季的测定。

平均树干液流 V_s (cm/s) 采用 Grainer 给出的经验公式计算^[12]:

$$V_s = 0.0119K^{1.231}$$

其中 K 为无量纲参数,采用下式计算:

$$K = (dT_m - dT)/dT$$

式中, dT 为测定期间各测点 TDP 探头两个探针之间的瞬时温差(℃); dT_m 为边材液流最小时的探针温差,即测定期间的最高探针温差(℃),本文选择一天内的最大值。

液流流量 F_s (cm³/h) 可由 $F_s = A_s \times V_s \times 3600$ 求得,其中 A_s 为测株的边材面积。

由于系统故障及其他干扰造成部分数据缺失,本研究采用平均日变化法(mean diurnal variation, MDV)^[20,21]进行数据插补,即通过用空缺值临近几天相同时间段的平均值来代替缺失观测数据,一般应用附近 7~15d 相似天气情况的数据进行计算平均值比较合适。

2.2.2 土壤含水量测定

在选定样点内采用 EM-5 土壤含水量测定仪(Decagon, USA)进行自动测定,观测土壤深度为 0~25cm, 25~50cm, 50~75cm, 75~100cm 4 个层次。仪器记录时间设为 30min 记录 1 次。每 10d 下载 1 次数据。

2.2.3 气象因子的观测

气象因子测定采用小型自动气象站,自动记录总辐射(W·m²)、降雨(mm)、空气温度(℃)、相对湿度

(%)、风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、风向、其中记录间隔时间为 30min。

3 结果与分析

3.1 树干边材液流日变化规律

3.1.1 典型天气不同树种不同径阶液流变化

8 月份是树木生长发育相对重要以及蒸腾速率最大的阶段,也是晴天、阴天、雨天出现频率相对一致的时期,适宜研究典型天气下树木的液流变化。将该月按照晴天、阴天、雨天分别统计(各 9d)树干液流速率数据,采用 SPSS13.0 软件进行分析,绘制典型天气平均液流速率日变化进程,并给出置信区间为 95% 的液流速率变化范围(图 1)。从图中可以看出,每种树木不同径阶边材液流日变化趋势其本相同,晴天液流速率变化幅度均较小,雨天最大,阴天居中。雪松的液流速率曲线为双峰曲线,在 3 种典型天气下,雪松都表现为中径阶的液流速率变化最快,其次为大径阶的,变化最慢的为小径阶的,其原因可能为中径阶(树龄为 15a)的树木正处于生命旺盛期,其自身的生理调节速度及对外部环境的响应速度都较快,因此表现在液流速率上也是最快的。但从图 2 各树种不同径阶平均日耗水量的比较可以看出,大径阶树木平均日耗水量最大,小径阶最小,中径阶居中,同一树种,大径阶植株一般具有较大的边材面积。从图 1 中还可以看出,雪松在晴天的液流速率曲线较平缓且峰值范围较宽,液流开始升高时间最早(5:30 左右),开始降低时间最晚(22:00 左右);在雨天,峰值较陡且较窄,液流开始升高时间最晚(7:00 左右),开始降低时间最早(18:00 左右);在阴天下表现状态居中。这说明在雨天太阳辐射弱、气温低、相对湿度大从而减弱了树木边材液流变化速率。图 2 还显示,雪松晴天平均日耗水量最大,阴天居中,雨天最小^[15]。8 月份降雨较多达 115.8mm,土壤含水量始终保持在 23%~31% 较高水平上,因此,造成这 3 种典型天气液流差距的主要原因为气象因子。也就是说同一种植物,在土壤水分相同的条件下,气象因素是影响蒸腾耗水的主要因子^[22,23]。桦树的液流速率呈单峰曲线,在晴天和阴天都表现为大径阶的液流速率变化最快,中径阶居中,小径阶最慢;在雨天则是中径阶液流速率最快,大径阶居中,小径阶最慢。另外雨天液流速率大于阴天,因为雨天内,气象因子的变化比较复杂,一些特殊的天气变化如雷电,会造成观测仪器电压的不稳定,使其数值或高或低,因此这种现象也在常理之中,但不能作为普遍的规律。其余的变化规律与雪松相同。丝棉木和水杉的液流速率曲线也为单峰曲线,其变化规律和雪松的变化规律基本相同,只是水杉不同径阶树木在 3 种典型天气下液流速率变化为大径阶的最快,中径阶和小径阶的较慢且二者比较接近。其原因有可能是水杉中径阶的树木和小径阶的树木是处于同一生命阶段,其自身生理调节及对外界环境的响应基本一致,因此边材液流也表现出相近变化速率。

3.1.2 生长季内蒸腾耗水变化

树木蒸腾耗水量受土壤含水量及降雨量的影响呈现出一定的变化规律,图 3 为 2008 年 5 月底~10 月底土壤含水量及降雨量的变化。从图中可以看出,不同层次的土壤含水量随着降雨量的增加都表现出不同程度增大的趋势,这是因为该样地内为砂质土壤,土层空隙大,透水性强,持水性差,当发生降雨时,土壤中的水分迅速向下运移,使各层土壤的含水量随即增加^[24]。表层土壤含水量增加速率最大,最深层土壤含水量增加速率最小,其余两层居中。在降雨较集中时段从 169d 到 245d 土壤含水量曲线呈明显上升趋势,因此可以以土壤含水量的变化为分界(因各层土壤变化趋势相似,所以以表层土壤的变化为例来进行划分),将整个植物生长季分为 4 个时段,即土壤失水期(150~155d):土壤平均含水量为 22.38%,这个时期,气温回升,植物复苏,需要大量的土壤水分供给植物生命活动,但这个时期大气降水少,植物生理用水主要依靠土壤储存的水分,使土壤水支不付出,土壤含水量逐渐降低,处于失水状态;土壤聚水期(156~245d),土壤平均含水量为 27.56%,这一时期土壤含水量呈升高趋势,这是因为此时期降水量充足,使土壤水收入大于支出而且有所聚集,故称为土壤聚水期;土壤退水期(246~271d),土壤平均含水量为 22.96%,这一时期降水量减少,植物生长仍在进行,使渗入土壤中的水分供不应求,土壤水分呈消退趋势,故称土壤退水期;土壤稳水期(372~291d):土壤平均含水量为 18.31%,这一时期,气温逐渐降低,树木生长逐渐停止,大气降水较少,这一时期土壤含水量呈平稳趋势,故称土壤稳水期^[25]。

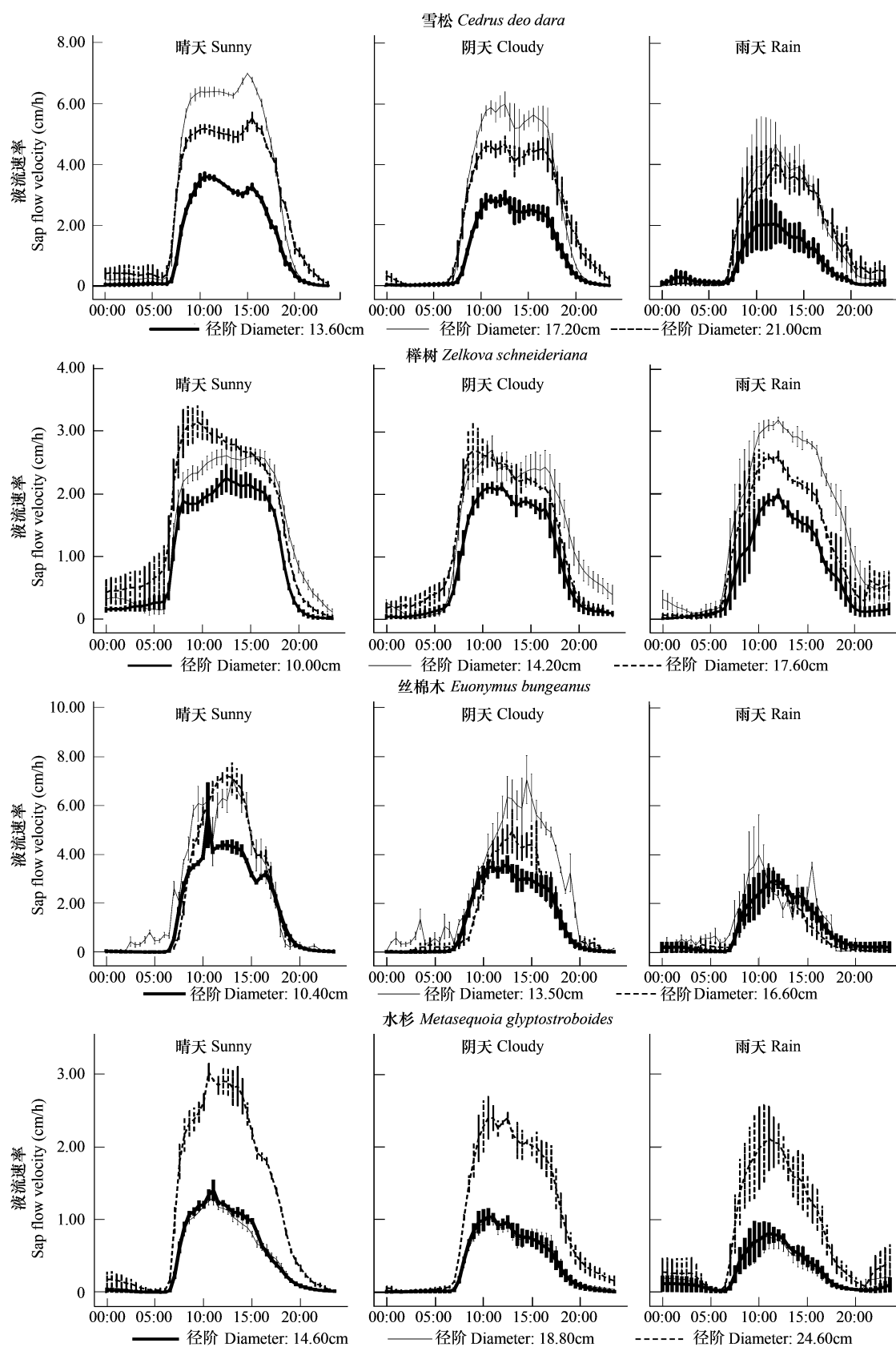


图1 8月3种典型天气下各树种不同径阶边材液流速率日变化

Fig. 1 Diurnal fluctuation of sap flow velocity at different diameter classes of different trees under three climate conditions in August

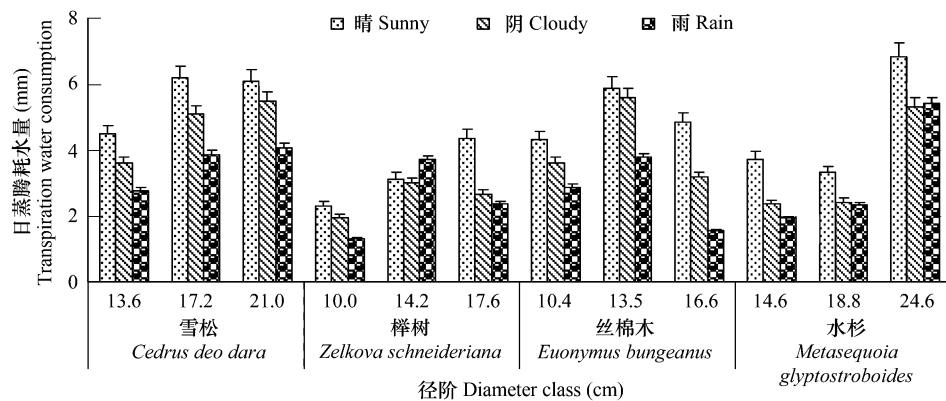


图2 8月3种典型天气下不同径阶的各树种平均日耗水量比较

Fig. 2 Comparison of transpiration water consumption at different diameter classes in different trees among three kinds of typical weather in August

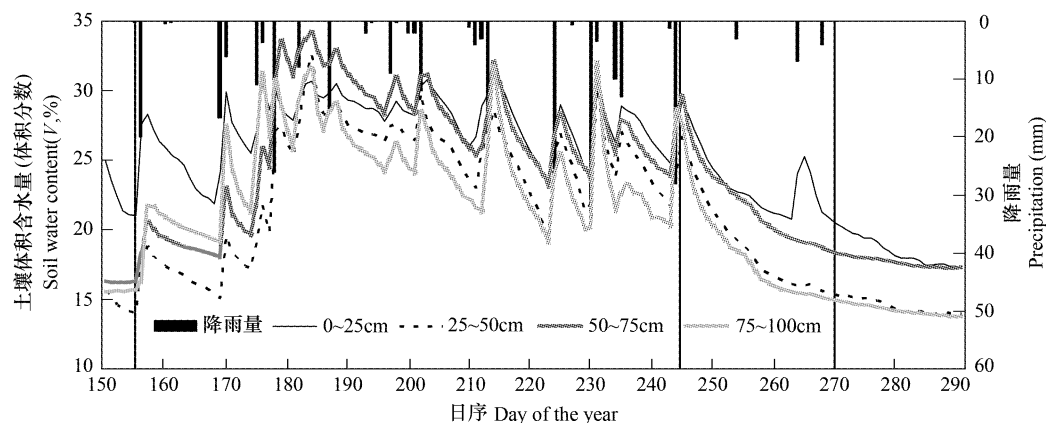


图3 2008年生长季内0~100cm土层土壤含水量及降雨量动态变化

Fig. 3 Soil moisture content for different layers and precipitation during the growing season of 2008

图4为各树种蒸腾耗水量的日变化规律,根据上述所划分的四个时期(参见图上的竖线分隔区),可以看出在土壤失水期内,蒸腾耗水量很小,因为各树种从5月开始进入了生长季,需水量开始增加,但这个月份的降雨量很少,土壤含水量较低,植物所需水分只靠体内木栓化组织运输水分,来维持最基本的生命需求,因此蒸腾耗水量较低;在土壤聚水期,各树种蒸腾量急剧增加,6月份以后进入雨季,土壤供水充足,树冠叶幕迅速形成,气温和土温都逐渐达到了一年中的最大值,土壤、植物、大气之间形成了足够大的水势差,因此树木耗水量急剧增加。进入土壤退水期,各树种的耗水量有所减少,因为这一时期,降雨量减少,土壤含水量呈现逐渐消退趋势,致使植物耗水受到一些影响。到了土壤稳水期,土壤温度和大气温度开始下降加上降雨量的减少,另外这一时期树木即将停止生长,因此耗水量会明显降低。

3.2 生长季内各树种蒸腾耗水量综合比较

表2对不同径阶的各树种在生长季内,典型天气下的昼夜变化做了综合比较。从表中可以看出,不同径阶的各树种在整个生长季内,晴天、阴天的昼夜变化相似,夜间蒸腾量占有较低的比例。各径阶的雪松夜间蒸腾量占全天的5.1%~11.8%;榉树占9.7%~11.3%;丝棉木占4.0%~11.4%;水杉占6.0%~15.0%。雨天夜间蒸腾量较高,雪松为30%左右,榉树为28%左右,丝棉木为25%左右,水杉为21%左右。据分析,夜间液流产生的原因有两个,一是满足夜间蒸腾的需要,虽然气孔在黑暗中关闭,在夜晚气孔蒸腾停止,但植物仍会通过角质层蒸腾失水;二是补充树体水分亏缺,由于植物以气孔蒸腾为主,角质层蒸腾只占总蒸腾量的3%~5%^[26],夜间液流应主要是补充树体水分亏缺。雨天夜间液流量较大的原因可能是由于多数雨天在夜间降雨停止,造成气象环境的改变,温度略有回升,相对湿度下降,树体对外界环境的响应相对剧烈一些,很有可能

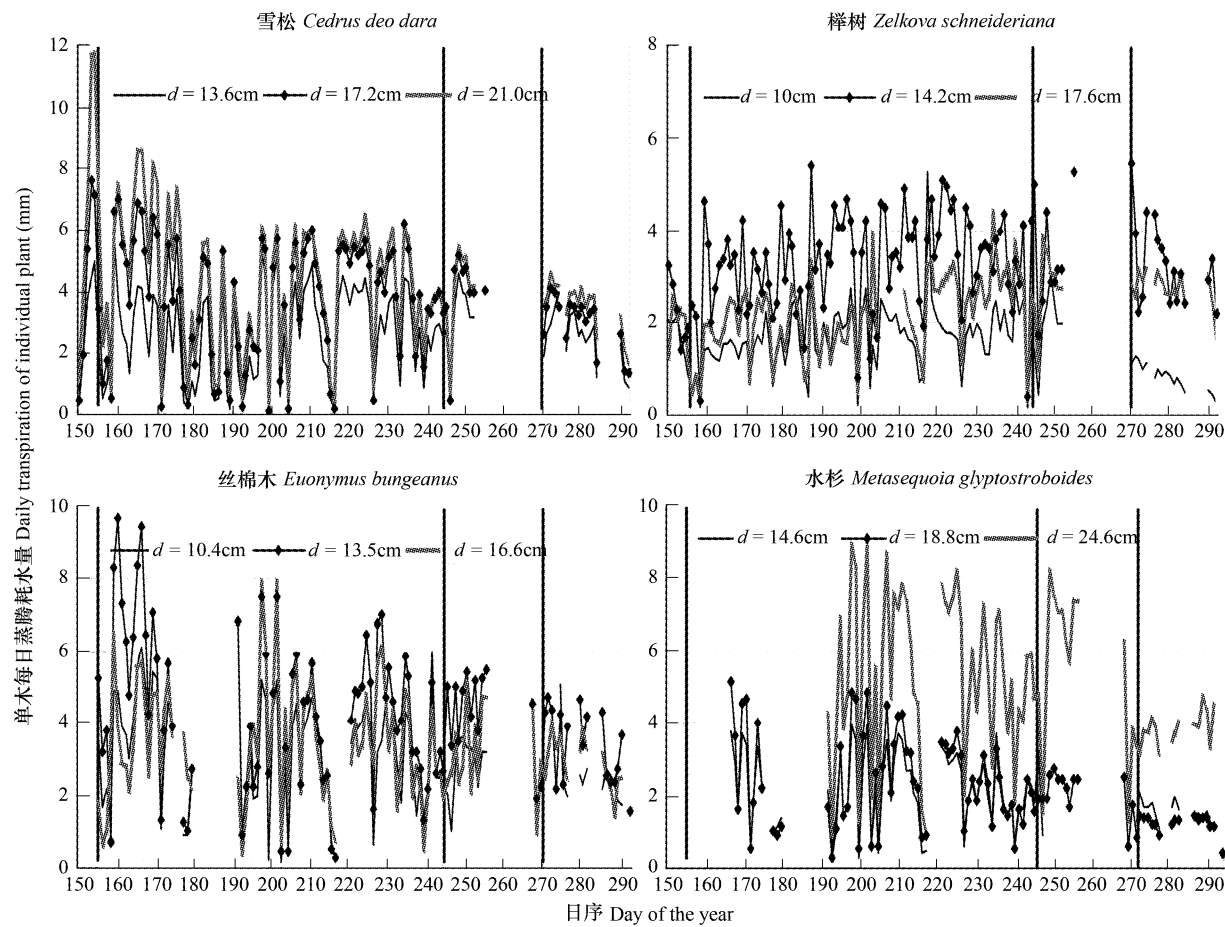


图 4 2008 年生长季内各树种蒸腾量的连日变化进程

Fig. 4 Daily transpiration of measured trees during the growing season of 2008

使液流速率升高。

表 2 2008 年长季内不同径阶各树种蒸腾耗水量综合比较

Table 2 Tree transpiration calculated by different species and their DBH under three contrasting weather conditions during the growing season in 2008

月份 Month	雪松蒸腾耗水量($d = 13.6\text{cm}$) Transpiration of cedar (mm) ($d = 13.6\text{cm}$)							雪松蒸腾耗水量($d = 17.2\text{cm}$) Transpiration of cedar (mm) ($d = 17.2\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	6	7	8	9	10	合计 Total	百分数 Percentage (%)	6	7	8	9	10	合计 Total	百分数 Percentage (%)
6	45.44	3.89	9.61	1.07	8.37	3.65	72.03	72.05	5.02	18.25	1.71	15.58	5.42	118.03
7	34.84	6.46	14.22	0.58	12.68	6.02	74.80	41.53	7.60	20.12	0.56	18.55	8.01	96.37
8	43.54	3.51	22.08	2.33	12.51	2.46	86.43	57.46	4.30	32.84	2.84	14.98	5.00	117.42
9	58.10	2.66	29.03	1.29	1.66	0.21	92.95	73.05	2.21	32.25	0.82	2.46	0.15	110.94
10	43.42	0.73	12.39	1.75	5.44	2.59	66.32	51.38	0.51	18.00	0.62	6.82	2.94	80.27
合计 Total	255.34	17.25	87.33	7.02	40.66	14.93	392.53	295.47	19.64	121.46	6.55	58.39	21.52	523.03
百分数 Percentage (%)	92.9	7.1	92.5	7.5	73.1	26.9		93.7	6.3	94.9	5.1	73.1	26.9	

月份 Month	雪松蒸腾耗水量($d = 21.0\text{cm}$) Transpiration of cedar (mm) ($d = 21.0\text{cm}$)							榉树蒸腾耗水量($d = 10.0\text{cm}$) Transpiration of Zelkova schneideriana (mm) ($d = 10.0\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	6	7	8	9	10	合计 Total	百分数 Percentage (%)	6	7	8	9	10	合计 Total	百分数 Percentage (%)
6	77.67	14.22	25.64	3.53	18.04	10.93	150.03	20.51	2.01	8.38	0.83	9.37	0.91	42.01
7	40.23	11.11	22.85	1.29	18.19	11.55	105.22	17.39	3.47	13.67	1.35	13.82	3.53	53.23

续表

月份 Month	雪松蒸腾耗水量($d=21.0\text{cm}$) Transpiration of cedar (mm) ($d=21.0\text{cm}$)							榉树蒸腾耗水量($d=10.0\text{cm}$) Transpiration of Zelkova schneideriana (mm) ($d=10.0\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
8	58.17	8.56	31.60	5.29	15.30	7.31	126.23	23.66	3.13	13.86	1.87	9.51	2.30	54.33
9	72.85	5.64	34.13	2.37	3.22	0.25	118.46	31.67	4.23	9.05	1.21	1.00	0.16	47.32
10	58.26	1.52	21.94	0.65	6.99	4.44	93.80	11.94	1.09	3.04	1.55	1.94	0.50	20.06
合计	307.18	41.05	136.16	13.13	61.74	34.48	593.74	105.17	13.93	48	6.81	35.64	7.40	216.95
百分数 (%)	88.2	11.8	91.2	8.8	64.2	35.8		88.3	11.7	87.6	12.4	82.8	17.2	
月份 Month	榉树蒸腾耗水量($d=10.0\text{cm}$) Transpiration of Zelkova schneideriana (mm) ($d=10.0\text{cm}$)							榉树蒸腾耗水量($d=10.0\text{cm}$) Transpiration of Zelkova schneideriana (mm) ($d=10.0\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
6	33.21	9.88	16.91	3.84	20.62	3.55	88.01	26.38	3.76	10.39	1.44	11.70	0.96	54.63
7	27.14	7.18	25.30	5.42	26.83	13.67	105.54	16.86	4.94	13.58	1.33	18.87	4.07	59.65
8	40.65	9.37	21.08	4.91	20.28	8.74	105.03	31.80	4.27	20.09	2.88	13.19	4.72	76.95
9	45.91	10.15	27.96	4.62	3.89	1.54	94.07	47.00	6.16	23.09	2.71	2.31	0.46	81.73
10	44.33	10.49	19.42	1.02	6.91	3.52	85.69	42.69	5.21	17.64	0.80	7.58	1.63	75.55
合计	191.24	47.07	110.67	19.18	78.53	31.02	478.34	164.73	24.34	84.79	9.16	53.65	11.84	384.51
百分数 (%)	80.3	19.7	84.7	15.3	71.7	28.3		87.1	12.9	90.3	9.7	81.9	18.1	
月份 Month	丝棉木蒸腾耗水量($d=10.4\text{cm}$) Transpiration of Euonymus bungeanus (mm) ($d=10.4\text{cm}$)							丝棉木蒸腾耗水量($d=10.4\text{cm}$) Transpiration of Euonymus bungeanus (mm) ($d=10.4\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
6	60.95	3.96	18.53	1.22	15.45	6.54	106.65	87.33	9.72	25.84	1.74	23.77	6.78	155.18
7	39.38	2.28	20.51	0.35	22.19	4.40	89.11	49.10	4.46	26.88	2.53	25.88	6.81	115.66
8	43.58	2.26	25.10	1.55	13.43	3.99	89.91	53.72	3.79	30.79	5.13	22.74	6.61	122.78
9	53.48	1.92	26.11	2.90	2.52	0.62	87.55	69.80	11.71	23.58	3.94	3.27	1.02	113.32
10	33.07	5.72	13.07	2.16	6.33	1.26	61.61	43.57	9.19	25.87	1.01	8.81	2.32	90.77
合计	230.46	16.14	103.32	8.18	59.92	16.81	434.83	303.52	38.87	132.96	14.35	84.47	23.54	597.71
百分数 (%)	93.5	6.5	92.7	7.3	78.1	21.9		88.6	11.4	90.2	9.8	78.1	21.9	
月份 Month	丝棉木蒸腾耗水量($d=16.6\text{cm}$) Transpiration of Euonymus bungeanus (mm) ($d=16.6\text{cm}$)							水杉蒸腾耗水量($d=14.6\text{cm}$) Transpiration of Metasequoia glyptostroboides (mm) ($d=14.6\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
6	57.68	3.32	13.09	0.83	16.95	11.93	103.8	42.53	3.10	16.26	1.49	8.21	3.29	74.88
7	51.14	2.31	20.56	0.33	25.06	12.21	111.61	29.87	2.75	15.05	1.46	16.41	4.43	69.97
8	41.68	1.45	28.24	1.45	20.93	1.41	95.16	32.78	1.51	19.32	1.44	11.24	2.07	68.36
9	61.37	2.91	23.59	1.21	2.13	0.27	91.48	25.84	1.35	14.62	1.31	1.10	0.17	44.39
10	42.03	1.56	18.28	0.54	5.88	2.87	71.16	24.49	1.19	3.15	6.36	3.90	1.05	40.14
合计	253.90	11.55	103.76	4.36	70.95	28.69	473.21	155.51	9.90	68.40	12.06	40.86	11.01	297.74
百分数 (%)	95.6	4.4	96.0	4.0	71.2	28.8		94.0	6.0	85.0	15.0	78.8	21.2	
月份 Month	水杉蒸腾耗水量($d=18.8\text{cm}$) Transpiration of Metasequoia glyptostroboides (mm) ($d=18.8\text{cm}$)							水杉蒸腾耗水量($d=18.8\text{cm}$) Transpiration of Metasequoia glyptostroboides (mm) ($d=18.8\text{cm}$)						
	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total	晴 Sunny		阴 Cloudy		雨 Rain		合计 Total
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N		昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	昼 D	夜 N	
6	53.10	4.09	14.16	0.91	7.26	3.29	82.81	—	—	—	—	—	—	—
7	35.61	4.09	16.17	0.51	19.83	5.28	81.49	64.83	9.36	36.74	1.86	42.45	11.52	166.76
8	34.59	2.07	17.40	1.59	12.18	2.01	69.84	77.49	7.03	42.31	4.85	24.35	6.52	162.55
9	35.36	4.06	10.10	1.80	0.71	0.12	52.15	98.37	14.53	27.76	5.30	2.67	0.64	149.27
10	19.88	1.65	6.08	2.43	3.33	0.89	34.26	62.89	4.74	21.09	3.38	10.19	2.77	105.06
合计	178.54	15.96	63.91	7.24	43.31	11.59	320.55	303.58	35.66	127.9	15.39	79.66	21.45	583.64
百分数 (%)	91.8	8.2	89.8	10.2	78.9	21.1		89.5	10.5	89.3	10.7	78.8	21.2	

从生长季内不同径阶各树种总蒸腾耗水量看,雪松($d = 13.6\text{cm}$)为 392.53mm、雪松($d = 17.2\text{cm}$)为 523.03mm、雪松($d = 21.0\text{cm}$)为 593.74mm;榉树($d = 10.0\text{cm}$)为 216.95mm、榉树($d = 14.2\text{cm}$)为 478.34mm、榉树($d = 17.6\text{cm}$)为 384.51mm;丝棉木($d = 10.4\text{cm}$)为 434.83mm、丝棉木($d = 13.5\text{cm}$)为 597.71mm、丝棉木($d = 16.6\text{cm}$)为 473.21mm;水杉($d = 14.6\text{cm}$)为 297.74mm、水杉($d = 18.8\text{cm}$)为 320.55mm、水杉($d = 24.6\text{cm}$)为 583.64mm。在植物生长季内的总降雨量为 394.8mm,除了小径阶的雪松、榉树、水杉和中径阶的榉树和水杉外,其余树种的蒸腾耗水量都大于降雨量,因此,对这些树种要进行适当的浇灌处理,才能满足其正常的生长需求。各树种在整个生长季内的耗水量排序,径阶为 10cm 的树种为:丝棉木 > 榉树;径阶为 14cm 的树种为:丝棉木 > 榉树 > 雪松 > 水杉;径阶为 18cm 的树种为:雪松 > 丝棉木 > 榉树 > 水杉;径阶为 24cm 的树种为:雪松 > 水杉。

3.3 结论与讨论

(1)4 个树种不同径阶边材液流速率日变化趋势基本相同,在 3 种典型天气下所有树种表现相同的变化规律:晴天液流速率曲线较平缓且峰值范围较宽,液流启动时间最早,停止时间最晚,液流通量最大;雨天液流峰值较陡且较窄,液流启动时间最晚,液流通量最小,停止时间最早;阴天下表现状态居中。王瑞辉在对北京丁香、栎树、元宝槭等树木的耗水研究,进行了晴天和阴天的对比分析,其结论是大部分树种都是晴天的液流速率大于阴天的液流速率^[23]。

(2)从降雨量和土壤含水量的大小看,将整个生长季划分为土壤失水期、土壤聚水期、土壤散水期和土壤稳水期四个时段,各树种在这几个时段内蒸腾耗水量的连日变化曲线都表现为递减的规律,其主要的耗水时期在土壤聚水期和土壤散水期。不同径阶相比,各树种表现为大径阶的蒸腾量最大,中径阶的居中,小径阶的最小。掌握各树种不同径阶耗水量的变化,可以为城市树木尺度扩展提供基础数据,为树木管理,灌溉制度的制定提供理论指导。

(3)不同径阶的各树种在整个生长季内,晴天、阴天的昼夜变化相似,夜间蒸腾量占有较低的比例。各径阶的雪松夜间蒸腾量占全天的 5.1% ~ 11.8%;榉树占 9.7% ~ 11.3%;丝棉木占 4.0% ~ 11.4%;水杉占 6.0% ~ 15.0%。雨天夜间蒸腾量较高,雪松为 30% 左右,榉树为 28% 左右,丝棉木为 25% 左右,水杉为 21% 左右。王华^[27]在对马占相思夜间树干液流的分配的研究中指出,实际所观察到的马占相思夜间液流主要用于树干水分补充。其树干夜间水分补充占日总蒸腾的 12% ~ 25%,旱季较湿季大,且受环境因子的制约,与其对整树蒸腾总量的贡献率是一致的,说明这个比例在一定程度上可以反映夜间水分补充对于日蒸腾的贡献。Joshua B Fisher 等^[28]对夜间树木边材液流速率的分析中指出,气孔导度可以以 3 种方式调节边材液流的变化:①气孔开放时,光合作用和蒸腾作用处于最佳状态;②当气孔关闭时,边材液流会以某种独立的形式存在,以补充减小的水势梯度;③气孔未完全关闭时,边材液流速率会受到环境因子的限制。这同样说明了在夜间边材液流的分配,他们的研究结果表明亚热带橡树夜间液流量占一天总蒸腾量的 18% ~ 21%。本研究除了对晴天的树干液流昼夜变化做了对比分析外,还对阴天和雨天的树干液流的昼夜变化做了研究。雨天的树干液流昼夜变化与晴天和阴天不同,其原因是由环境因子的差异造成的。

(4)除了小径阶雪松、榉树、水杉和中径阶榉树和水杉外(由于试验条件的限制未能将各树种放在相同的径阶范围内比较,因此这里的大径阶,中径阶,小径阶都是针对每一种树而言的,不具有相同的范围)其余树种的蒸腾耗水量都大于降雨量,因此,对这些树种要进行适当的浇灌处理,才能满足其正常的生长需求。

(5)对各树种在整个生长季内的排序,径阶为 10cm 的树种为丝棉木 > 榉树;径阶为 14cm 的树种为丝棉木 > 榉树 > 雪松 > 水杉;径阶为 18cm 的树种为雪松 > 丝棉木 > 榉树 > 水杉;径阶为 24cm 的树种为雪松 > 水杉。

References:

- [1] Peng Z H, Zhang X D. Discussion on Important Role of Trees in Urban Forest. Forest Research, 2004, 17(5): 666—673.
- [2] Granier A, Bobay V, Gash J H C, Gelpe J, Saugier B, Shuttleworth W J. Vapor flux density and transpiration rate comparisons in a stand of

- Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. Agric. For. Meteorol, 1990, 51: 309—319.
- [3] Smith, *et al.* Measurement of sap flow in stems. J. Exp. Bot, 1996, 47:1833—1844.
- [4] Grainer A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of Sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3:309—320.
- [5] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A critique of whole-plant water use studies in trees. Tree Physiology, 1998, 18:499—512.
- [6] Wullschlegel S D, Wilson K B, Hanson P J, Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees. Agric. For. Meteorol, 2000, 104(2):157—168.
- [7] Cermak J, Cienciala E, Kucera J, *et al.* Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. Tree Physiol, 1992, 10(4):367—380.
- [8] Köstner B, Granier A, Cermak J. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Ann For Sic, 1998, 55(1/2):13—27.
- [9] Wang H T, Ma L Y. Measurement of whole tree's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP). Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(6)661—667.
- [10] Li H T, Chen L Z. A Study on the Volume and Velocity of Stem-Sap flow of Betula Dahurica and Acer mono Forests by the Heat-Pulse Technique. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(1):1—6.
- [11] Chelcy R. Ford, Robert M. Hubbard, *et al.* A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145: 176—185.
- [12] Zhou G Y, Huang Z H, *et al.* Radial Variation in Sap Flux Density as a Function of Sapwood Thickness in Two Eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) Plantations. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(12):1418—1424.
- [13] Wang H T, Zhao W F, Ma L Y. Spatial Variation of Sap Flow of Platycladus orientalis and Its Affecting Factor. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(7):21—27.
- [14] Chelcy R Ford, Carol E Goranson, *et al.* Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. Tree Physiology, 2004, 24: 951—960.
- [15] Ma L, Rao X Q, *et al.* Diurnal and seasonal changes in whole-tree transpiration of *Acacia mangium*. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 67—72.
- [16] Lostau D, Berbigier P, Roumagnac P, Arruda-Pacheco C, David J S, Ferreira M I, Pereira J S, Tavares R. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. I. Seasonal course of water flux through maritime pine. Oecologia, 1996, 107:33—42.
- [17] Tanaka T, Kobayashi Y. Water flow and hydraulic characteristics of Japanese red pine and oak trees. Hydrological Processes, 2001, 15:1731—1750.
- [18] Phillips N G, Ryan M G, Bond B J, McDowell N G, Hinckley T M, Cermak J. Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest. Tree Physiology, 2003, 23:237—245.
- [19] Liu D F, Ma Y Z. Preliminary Report about the city forest. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1999, (3): 66—68.
- [20] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans G, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. Agric. For Meteorol, 2001, 107:71—77.
- [21] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N. -O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agric. For. Meteorol, 2001, 107:43—69.
- [22] Xia G M, Kang S Z, Li W C. Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for Caragana korshinskii on the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1186—1193.
- [23] Wang R H, Ma L Y, Xi R C. Fluctuation of Acer truncatum sap flow in rapid growth season and relevant variables. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(3): 231—237.
- [24] Liu X C, Song X F, Xia J, *et al.* An experimental study of the dynamic regime of soil water in mountainous slopes in northern China. Hydrogeology Engineering Geology, 2006, 4: 76—80.
- [25] Niu Y, Zhang H B, Liu X D, *et al.* Dynamic Characteristic on space-time of soil water of main vegetation in Qilian Mountains. Journal of Mountain Science, 2002, 20(6):723—726.
- [26] Wang S S, Gao R F, Wu G M. Plant Physiology. Beijing: China Forestry Press, 1991. 186—205.
- [27] Wang H, Zhao P, *et al.* Partitioning of night sap flow of *Acacia Mangium* and its implication for estimating whole-tree transpiration. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5):777—786.

- [28] Joshua B Fisher, Dennis D. Baldocchi, *et al.* What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California. *Tree Physiology*, 2007, 27: 597–610.

参考文献:

- [1] 彭镇华, 张旭东. 乔木在城市森林建设中的重要作用. *林业科学研究*, 2004, 17(5): 666~673.
- [9] 王华田, 马履一. 利用热扩散式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 661~667.
- [10] 李海涛, 陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究. *北京林业大学学报*, 1998, 20(1): 1~6.
- [13] 王华田, 赵文飞, 马履一. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子. *林业科学*, 2006, 42(7): 21~27.
- [15] 马玲, 饶兴权, 等. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 67~72.
- [19] 刘殿芳, 马玉珠. 城市森林初探. *内蒙古林学院学报*, 1999, (3): 66~68.
- [22] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化. *生态学报*, 2006, 26(4): 1186~1193.
- [23] 王瑞辉, 马履一, 奚如春, 等. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 231~237.
- [24] 刘相超, 宋献方, 夏军, 等. 华北山区坡地土壤水分动态实验研究. *水文地质工程地质*, 2006, 4: 76~80.
- [25] 牛云, 张宏斌, 刘贤德, 等. 祁连山主要植被下土壤水的时空动态变化特征. *山地学报*, 2002, 20(6): 723~726.
- [26] 王沙生, 高荣孚, 吴贯明编. *植物生理学*. 北京: 中国林业出版社, 1991. 186~205.
- [27] 王华, 赵平, 等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 777~786.