

DOI: 10.5846/stxb201401150113

陈彪, 陈立欣, 刘清泉, 刘平生, 张志强. 半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2015, 35(15): 5076-5084.
Chen B, Chen L X, Liu Q Q, Liu P S, Zhang Z Q. Transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to urban environmental factors in semi-arid area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5076-5084.

半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应

陈 彪¹, 陈立欣¹, 刘清泉², 刘平生², 张志强^{1,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083

2 内蒙古林科院, 呼和浩特 010010

摘要: 作为我国半干旱地区重要的造林绿化树种之一, 樟子松在城市林业建设中被广泛使用, 研究樟子松在半干旱地区城市环境下的蒸腾耗水及其环境响应对于城市森林建设具有重要的理论意义和应用价值。从 2012 年 8 月至 10 月, 以位于内蒙古呼和浩特市树木园内的 30 年生樟子松为研究对象, 按照其径阶分布, 选定 8 株样木, 采用热扩散探针法对其树干边材液流进行了连续动态监测, 并采用小型自动气象站和土壤水分传感器同步连续测定小气候因子与土壤含水量动态变化。结果表明: 在不同天气条件下, 樟子松树干液流密度日变化存在差异, 晴天时液流密度曲线表现为单峰曲线, 且液流密度较大, 阴天与雨天液流密度相对较小; 液流密度的大小与供试树木胸径无显著相关关系 ($P > 0.05$); 太阳辐射 ($r = 0.731$, $P < 0.01$) 和大气饱和水汽压亏缺 (VPD) ($r = 0.877$, $P < 0.01$) 是影响樟子松蒸腾的主要因子, 风速与液流密度极显著相关 ($P < 0.01$), 但相关系数仅为 0.518; 土壤水分并未显著影响液流密度 ($r = -0.071$, $P > 0.05$)。以太阳辐射 R_a 、VPD 作为自变量建立的模型能够分别解释樟子松 68%、71% 的液流变化。

关键词: 樟子松; 热扩散探针; 树干液流; 蒸腾耗水; 环境因子

Transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to urban environmental factors in semi-arid area

CHEN Biao¹, CHEN Lixin¹, LIU Qingquan², LIU Pingsheng², ZHANG Zhiqiang^{1,*}

1 College of Soil and Water Conservation at Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China

Abstract: As one of the most important afforestation and greening tree species in the semi-arid area of China, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* has been widely used in development of urban forests. Study on the transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to environmental factors has essential theoretical significance and application value for urban forestry practices. Using the thermal dissipation probes (TDP) method, sap flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* was monitored at the Hohhot Arboretum, Hohhot, Inner Mongolia, China from August to October in 2012, and environmental factors were measured simultaneously by using a portable automatic weather station and soil moisture sensors. Daily transpiration of trees varied with weather conditions. During sunny days, the transpiration rate curve showed a single peak, and the transpiration rate was higher than that on the cloudy or rainy days. The transpiration rate was not significantly correlated with the diameter of the tree trunk at breast height ($P > 0.05$). The main meteorological factors controlling the

基金项目: 国家“十二五”农村领域科技计划课题项目 (2011BAD38B03)

收稿日期: 2014-01-15; 网络出版日期: 2014-09-25

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

sap flow were solar radiation ($r = 0.731$, $P < 0.01$) and vapor pressure deficit (VPD) ($r = 0.877$, $P < 0.01$). The correlation coefficient between the sap flow and wind speed was significantly low ($r = 0.518$, $P < 0.01$). In addition, the soil water content did not influence the sap flow significantly. We concluded that VPD and solar radiation can explain 71% and 68%, respectively, of the daily sap flow change.

Key Words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; thermal dissipation probe (TDP); sap flow; transpiration; environmental factors

尽管城市树木与森林具有吸收 CO_2 、降温、增湿、改善局地小气候、净化空气、降低暴雨洪峰流量和洪水总量等多种生态效应^[1],但由于受水分条件的限制,耐旱与低耗水树种选择成为半干旱地区城市森林建设与管理的关键环节之一。因此,深入研究半干旱地区城市环境条件下,树木蒸腾耗水及其环境响应具有十分重要的意义。一般而言,树木蒸腾不仅与其自身的生理生态特性有关,同时也受到太阳辐射、气温、空气湿度、风速、降水等气象因子、土壤水分等环境因子的影响^[2-3]。其中太阳辐射直接影响树木生长等自身生理活动的同时,还间接控制着气温、空气湿度等环境因子。唐全^[4]等在混交林、纯林两种小环境下研究刺槐液流时发现,影响两种小环境下刺槐树干液流密度的主导因子分别为太阳辐射强度和大气温度。VPD 与液流密度间有很好的正相关关系^[2-4],但也有研究表明,气孔导度随 VPD 明显增加时会呈现下降趋势,从而影响植物蒸腾^[5-6]。O'BRIEN^[7]等研究十种雨林树种树干液流时发现,土壤湿度对树干液流影响不大,而在水分胁迫条件下^[8-9],土壤湿度对树干液流影响显著。可见随树种不同、环境变化,树干液流对环境的响应存在一定差异。

樟子松具有树干通直、生长迅速、适应性强等优良特点,是我国“三北”地区主要造林树种之一,目前针对其蒸腾耗水的研究多集中在沙地环境。尽管樟子松已经成为我国北方半干旱地区重要的城市林业建设树种,但目前尚未开展其城市环境条件下的蒸腾耗水规律研究。与沙地环境相比,城市环境更为复杂多变,诸如“热岛效应”可能会对植物蒸腾造成较大的影响。定量研究樟子松在半干旱地区城市环境下的蒸腾耗水为城市森林建设树种选择与水分管理提供了科学依据,对于资源性缺水地区城市森林建设具有重要的现实意义。

Granier 热扩散探针法(thermal dissipation probe, TDP)^[10]具有准确灵敏的反应边材液流以及对植物损伤小的特点,能够置于野外长期连续观测,通过结合胸径或边材面积等空间纯量调查,可推算林分蒸腾量^[11],在国内外被广泛应用于树木生理生态和森林水文研究中。本研究采用 TDP 树干液流测定系统,结合土壤水分和小气象连续观测,定量分析樟子松在城市环境下的蒸腾特性及其环境响应,讨论城市环境下樟子松蒸腾耗水特征与沙地环境下的差异及其原因。

1 研究区概况

研究地点位于内蒙古自治区呼和浩特市树木园内,该园地处呼和浩特南郊,占地 400 余亩,园内土壤为古河道冲积土,母质为粗沙土,表层沉积薄厚不等。树木园紧靠市区(111°70'98"—111°71'62"E、40°80'65"—40°80'93"N,海拔 1056m)。该区属典型蒙古高原大陆性气候,四季变化明显,年温差日温差大。春季干燥多风;夏季短暂、炎热少雨;秋季降温迅速,常有霜冻;冬季漫长、严寒少雪。年平均气温 5.6℃,1 月份平均气温 -13.1℃,最低温度可降至 -32.8℃;7 月份平均气温 21.9℃,最高温度可达 37.3℃。无霜期 130 d 左右,初霜始于 9 月上旬,终霜止于翌年 5 月中旬。年均降水量 417.5mm,降水量集中在 7、8、9 月,占全年降水量的 70%,年均蒸发量 1784.6mm。

2 材料与方法

2.1 研究材料

以 30 年生樟子松人工林为研究对象。由于园内条件限制,选取的樟子松样地为 10m×20m。样地内共有

树木 16 株,每 2cm 划为一个径阶,共 7 个径阶(图 1)。各径阶至少选取一棵样木,在分布频度较高的径阶选取 2 棵样木(径阶 26—28cm),要求所选样木健康且树干通直。所测样木边材与心材有明显颜色区分,以生长锥钻孔测量来确定边材面积。样木情况见表 1。将样地全部树木(16 株)按不同径阶进行分类,胸径分布频度和各径级边材总面积见图 1。

2.2 试验方法

2.2.1 树干液流通量及环境因子测定

2012 年 8 月 19 日—10 月 31 日进行树干液流测定。树干液流采用美国 Dynamax 公司生产的 TDP 热扩散探针测定,采用 Granier^[10]提出的经验公式进行计算。由于环境温度会影响探针,而北向树干受热干扰较南向弱,为消除方位对树干液流造成的影响,热扩散探针统一安装在树干北向距地面 1.3m 处。选定 5cm×5cm 区域,小心剥去树皮并进一步磨平直至出现木质部部分,使用配套钻头分别在上、下间隔 4cm 处垂直树干钻 2 个孔,根据不同样木边材深度确定,钻孔深度依据针长为 10—50mm,具体情况见表 1。仪器采用车用蓄电池供电,蓄电池连接太阳能电池板进行充电,以保证仪器连续工作。将 TDP (Dynamax, USA) 插入树干,与树干接触处用硅胶密封。探针安装好后,为防止太阳辐射和环境温度对探针产生影响,用锡箔纸包住其外部树干。探针与 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)连接,进行连续数据记录并定期下载。

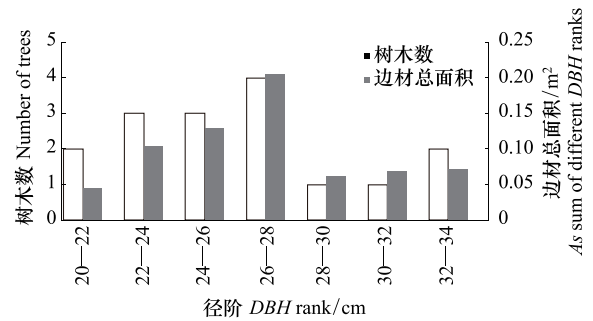


图 1 样地内樟子松树木径级分布及对应的边材总面积
Fig.1 Distribution of diameter at breast height (DBH) and sum of sapwood area of corresponding DBH ranks

表 1 樟子松样木统计表

Table 1 Statistic of sampling trees

编号 No. of sampling trees	胸径/cm Diameter at breast height	冠幅/m² Crown area	树高/m Tree height	边材面积/cm² Sapwood area	探针长度/mm Length of TDP (Heat dissipative probe)
P1	20.4	11.5	12.2	186.66	10
P2	23.9	38.6	14.7	380.68	10
P3	24.8	20.2	14.2	424.47	30
P4	25.1	22.9	13.7	448.52	30
P5	26	26.2	13.6	478.99	30
P6	27.9	40.3	14.2	556.24	30
P7	29.6	41.5	16.1	615.94	50
P8	32.9	52.5	16.8	706.43	50

Granier 根据热扩散探针(TDP)上下探针的温度差与树干液流密度(sap flux density)密切相关的原理,建立描述二者关系的经验公式^[10]:

$$Js = 0.0119K^{1.231} \quad (1)$$

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

式中, Js 为液流密度($\text{g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{s}^{-1}$); K 为量纲为 1 的参数; dT_m 为上下探针之间的昼夜最大温差; dT 为上下探针之间瞬时温差。

样木单株蒸腾量 E 可采用以下公式计算:

$$E = \sum_{i=1}^{48} Js_i \times As \times 1800 \quad (3)$$

式中, E 为单位时间内整树蒸腾量($\text{g H}_2\text{O/d}$), As 为边材面积(cm^2), 1800 为时间系数。本实验中程序设

定为数据采集器每 10s 读取 1 次瞬时值数据,并取 30min 内读数的平均值进行自动存储,因此,时间换算系数为 1800,一天共获得 48h 数据。

土壤水分监测采用 Campbell CS616 土壤水分传感器(Campbell, USA),监测深度为 30、50、90、120、150cm 和 200cm,记录数据间隔为 30min。

气象因子测定使用 Weatherhawk 公司生产小型自动气象站 Weatherhawk 232 测得,气象站置于树木园内空旷土丘上,土丘较地面高度约 2.5m。数据采集间隔为 30min,水汽压亏缺(VPD)由空气温度和空气相对湿度,经下式求出^[12]:

$$VPD = 0.611e^{\frac{17.502Ta}{Ta+240.97}}(1 - Rh) \tag{4}$$

式中, VPD 为水汽压亏缺(kPa), Ta 为空气温度(℃), Rh 为空气相对湿度(%)。

2.2.2 边材面积测定

本实验采用生长锥打孔钻取木栓的方法确定边材厚度,边材面积由下式计算:

$$As = \pi [(D/2 - d)^2 - r^2] \tag{5}$$

式中, As 为边材面积(cm^2), D 为胸径(cm); d 为树皮厚度 cm; r 为心材半径(cm)。树木胸径与边材面积间存在显著相关关系,通过建立胸径与边材面积的关系,进而推算树木的边材面积。

2.2.3 林分蒸腾的估算

以每个径阶选取样木测定的液流密度为标准,乘以该径阶所有树木边材总面积(结合图 1),得到该径阶所有树木蒸腾量,通过累加不同径阶树木蒸腾量得到整个试验样地内樟子松总蒸腾量,用林分总蒸腾量除以样地面积即可得到樟子松林分以毫米为单位的蒸腾量。

3 结果分析

3.1 日蒸腾进程与日蒸腾量

将不同胸径样木按照 4cm 划为 3 个水平(28—32cm 径阶不足俩株样木,胸径 29.6、32.9cm 划为一个水平),选择典型晴天(8 月 29 日)、阴天(8 月 31 日)、雨天(9 月 1 日),分析不同天气条件下樟子松树干液流日变化规律。从图中可以看出,各径阶样木液流密度变化趋势基本相同。晴天时,樟子松液流密度呈单峰曲线,8:00—10:00 液流迅速上升,大径阶样木液流启动时间更早、增长更迅速,液流在 13:00 左右达到峰值;阴天时,液流启动较晴天晚,变化也较缓慢,午后随着太阳辐射增加,液流出现回升。雨天时,液流密度大幅下降,且变化规律性差。

表 2 为试验期内各样木液流密度峰值的平均值,液流密度最大的 3 株样木胸径分别为 23.9、25.1、32.9cm,液流密度并未随胸径增大而变大。选取 8 株样木 8 月 19 日至 8 月 31 日期间液流密度数据,取液流密度最大值与边材面积进行回归分析,发现边材面积与液流密度之间不存在显著相关关系($P>0.05$),可见胸径并没有影响树木的液流密度。

表 2 试验期内樟子松液流密度日峰值平均值

Table 2 Average of sap flow density during experimental period

胸径/cm Diameter at breast height	液流密度/($\text{g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) Sap flow density	胸径/cm Diameter at breast height	液流密度/($\text{g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) Sap flow density
20.4	1.30	23.9	4.85
24.8	3.11	25.1	4.33
26.0	2.14	27.9	2.28
29.6	2.49	32.9	5.51

试验期内 8 月份 13 日数据、9、10 月份各径阶样木的单株日平均蒸腾量、单株单位边材面积的蒸腾量(表 3)表明,各月内胸径 32.9cm 样木蒸腾量明显高于其他树木,因为除了拥有较大的液流密度外,其边材面

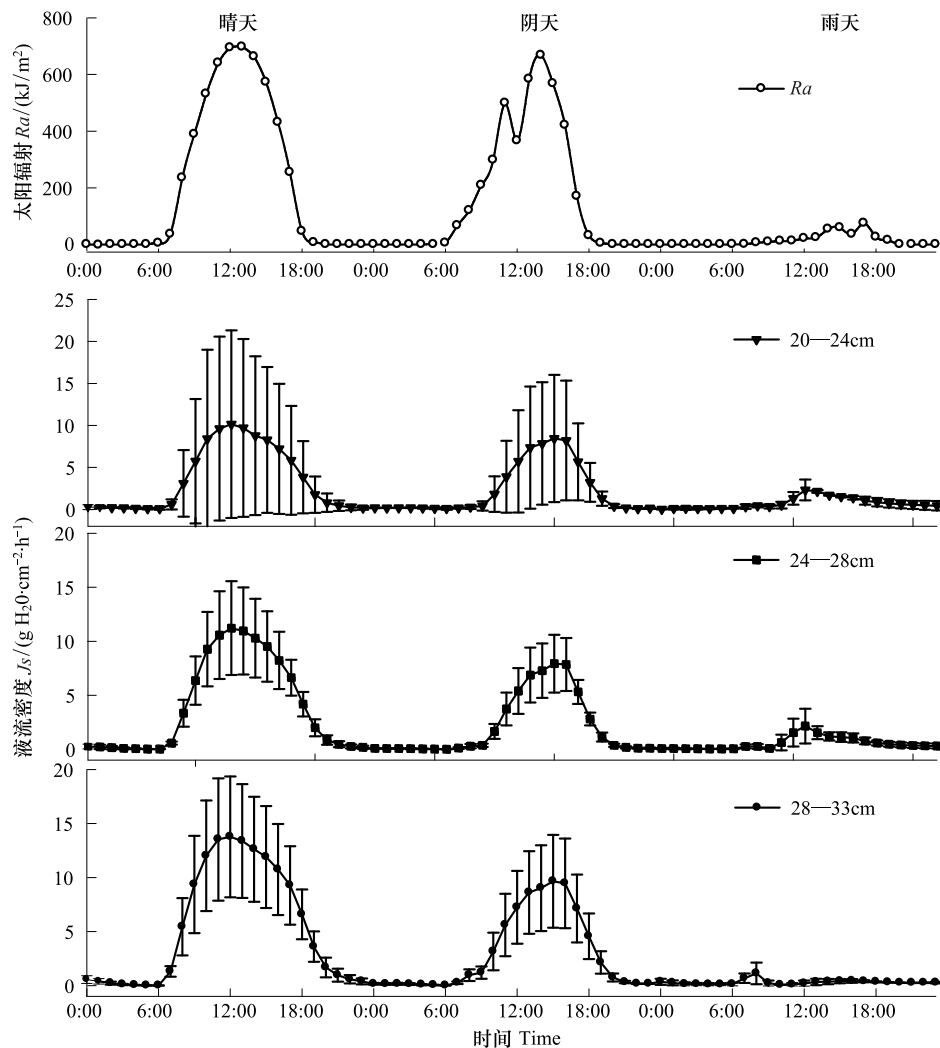


图2 不同天气情况下各径阶样木树干液流密度与太阳辐射变化

Fig.2 Daily changes of sap flow density and solar radiation in contrasting weather conditions

积也最大,二者导致了该样木蒸腾量最大。此外,胸径 25.1cm 样木也保持了较高的蒸腾量,这主要归于其较高的液流密度。总体上,樟子松单株日蒸腾量随胸径增大而增加,因为胸径较大的树木具有较大的边材面积从而导致其蒸腾量高。以胸径处单位边材面积来衡量日平均液流量,胸径为 25.1cm 的样木蒸腾量最大 ($0.03\text{—}0.16\text{ kg H}_2\text{O cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$),此外胸径为 20.4cm ($0.03\text{—}0.12\text{ kg H}_2\text{O cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$)、32.9cm ($0.03\text{—}0.11\text{ kg H}_2\text{O cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$) 的样木也有较高的蒸腾量,说明这几个胸径样木相同时间下通过单位边材面积的水量越多,其水分疏导效率就越高。胸径为 27.9cm 样木单位边材面积蒸腾量最小 ($0.01\text{—}0.06\text{ kg H}_2\text{O cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$),由此也可看出樟子松单位边材面积蒸腾量随胸径也不呈递增或递减趋势。

3.2 林分蒸腾耗水

表 4 给出了试验期内各月樟子松林分蒸腾耗水变化以及同期降雨量。可以看出,8 月份 13d 内樟子松蒸腾量为 24.44mm,而同期降雨量只有 2.28mm,此期间平均土壤体积含水量由最初的 $(34\pm 11)\%$ (S.D.) 减小为 $(32\pm 12)\%$ (S.D.),可见土壤水分被植物蒸腾进行了一定补充,但土壤体积含水率仍维持在较高水平。9 月份林分蒸腾与同期降雨量之比为 70%,10 月份 43%,相比 9 月有很大下降,主要因为 10 月份随着太阳辐射减弱、气温下降,樟子松每天只需少量的水分来维持自身的生理活动。

表 3 试验期内各径阶样木 8 月(8 月 19 日—)、9 月、10 月日均蒸腾量

Table 3 Averaged daily transpiration of sampling trees with different diameter classes in August, September and October							
胸径/cm Diameter at breast height	边材面积/cm ² Sapwood area	日均蒸腾量 (kg H ₂ O/d)			单位边材面积蒸腾量 (kg H ₂ O cm ⁻² d ⁻¹)		
		Averaged daily transpiration			Daily transpiration of unit sapwood area		
		8 月 August	9 月 September	10 月 October	8 月 August	9 月 September	10 月 October
20.4	186.66	21.89	12.81	5.31	0.12	0.07	0.03
23.9	380.68	26.27	14.64	3.94	0.07	0.04	0.01
24.8	424.47	42.09	20	9.74	0.1	0.05	0.02
25.1	448.52	72.64	36.76	12.42	0.16	0.08	0.03
26	478.99	44.61	24.11	9.4	0.09	0.05	0.02
27.9	556.24	31.64	13.48	4.38	0.06	0.02	0.01
29.6	615.94	56.43	26.15	7.77	0.09	0.04	0.01
32.9	706.43	80.44	45.13	19	0.11	0.06	0.03

表 4 试验期间各月林分蒸腾量

Table 4 Monthly stand transpiration during experimental period				
月份 Month	月蒸腾总量/mm Monthly transpiration	同期降雨量/mm Precipitation	当月最大日 蒸腾量/(mm/d) Maximum daily transpiration	当月最小日 蒸腾量/(mm/d) Minimum daily transpiration
8 月(8 月 19 日—) August	24.44	2.28	2.27	1.08
9 月 September	28.96	41.65	1.61	0.20
10 月 October	11.17	26.92	1.02	0.01

3.3 液流对环境因子的响应

对每半小时平均树干液流密度与同时间各环境因子数据(2012 年 9 月 10 日—9 月 22 日)进行相关分析(表 5),得到各环境因子对液流的影响程度。

表 5 樟子松半小时液流密度与环境因子相关系数($n=624$)

Table 5 Correlation between sap flux density of sampling trees and environmental variables ($n=624$)					
环境因子 Factor	皮尔森 相关系数 r Pearson coefficient	显著度 Significant degree	环境因子 Factor	皮尔森 相关系数 r Pearson coefficient	显著度 Significant degree
太阳辐射 Solar radiation	0.731 **	0.000	水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	0.877 **	0.000
风速 Wind speed	0.518 **	0.000	土壤含水量 Soil water content	-0.071	0.076

* * 表示双尾检验 Sig<0.01, * 表示双尾检验 Sig<0.05

结果表明,液流密度与太阳辐射、VPD 呈极显著相关($P<0.01$),与风速虽极显著相关,但相关系数 r 只有 0.518($P<0.01$),液流密度与土壤水分不存在显著相关关系($P>0.05$)。表明太阳辐射和 VPD 是影响树木冠层蒸腾的主要因子。

虽然液流随着太阳辐射的上升达到峰值,但液流密度变化与太阳辐射、水汽压亏缺变化间均存在时滞(图 3)。在整个日间液流进程中, J_s 变化一直滞后于太阳辐射,而先于 VPD 约 2 h 达到峰值。

分别以每半小时平均太阳辐射和 VPD 作为自变量,采用 sigmaplot10 对样木每半小时平均液流密度进行拟合分析(图 4)。结果表明,以太阳辐射 Ra 、VPD 作为自变量,液流密度作为因变量建立的 sigmoid 曲线函数模型能够分别解释樟子松 68%、71%(图 5)的液流变化。因此,可利用具有太阳辐射因子、VPD 因子的模型来模拟樟子松的树干液流密度。

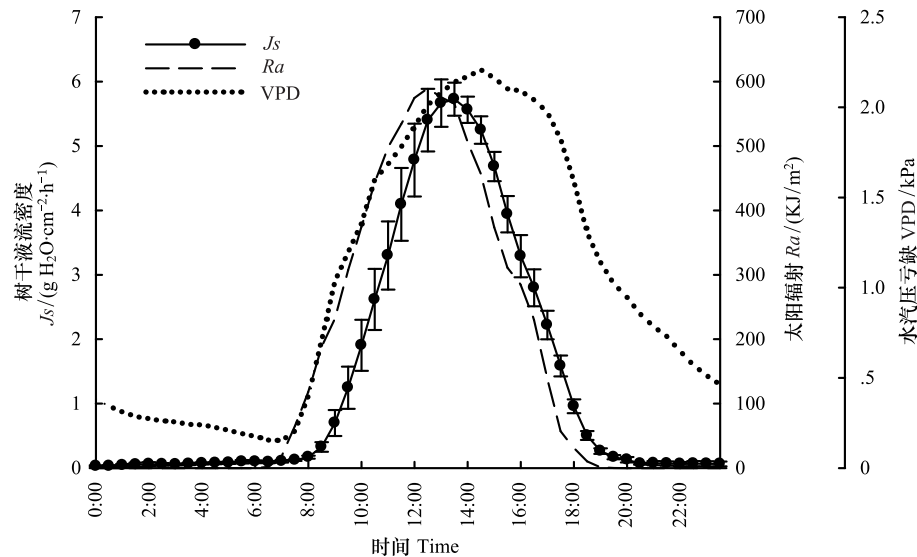
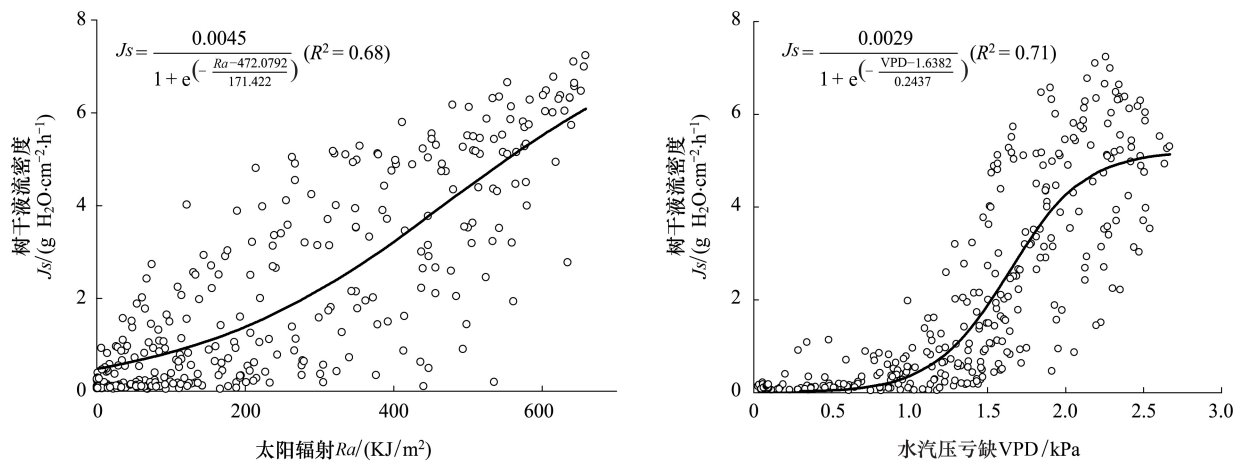


图3 樟子松液流密度、太阳辐射、水汽压亏缺日变化

Fig.3 Daily variation of sap flux density of examined tree with R_a and VPD图4 太阳辐射、VPD 对树干液流的影响 ($n=331$)Fig.4 Effects of solar radiation and VPD on sap flow of sampled trees ($n=331$)

4 讨论

4.1 蒸腾特性

樟子松树干液流日变化因天气状况而异,在张友焱^[13]对内蒙古乌审旗毛乌素沙地樟子松,郭成久^[14]、白雪峰^[15]对章古台沙地樟子松的研究中,晴天条件下樟子松液流密度变化均出现双峰,即“午休”现象,峰值分别出现在 10:00 和 14:00。本试验中,晴天条件下樟子松液流密度表现单峰曲线变化,并未出现“午休”现象,可能是由于城市环境下空气湿度较沙地环境下大,即使正午太阳辐射强烈也不足以导致树木气孔收缩或关闭。

本研究发现,城市环境下樟子松液流密度与边材面积不存在显著相关关系,这与 Oren.R 等^[16]对落羽杉的液流观测结果一致,但是,Granier 等^[17]研究山毛榉、马玲^[18]等研究马占相思时发现胸径与液流密度显著相关。同一树种,其边材面积越大,树体就越大,在林中能够占据有利空间,获得更多的太阳辐射。而在树冠层相对开放的林中,边材面积与液流密度的关系可能并不明显^[17]。前人对樟子松研究多以单株或单径阶为研

究对象,沙地与城市两种不同环境下,胸径不同对液流密度大小的影响是否存在差异有待进一步考证。

本研究 8、9、10 月各径阶樟子松单株日均耗水量分别为 21.89—80.44kg、12.81—45.13kg、5.31—19kg,白雪峰^[15]对章古台地区胸径为 13.15cm 樟子松研究中发现 8、9、10 月其日均单株耗水量分别为 27.39、13.09、6.67kg,不同胸径樟子松单株耗水量差别较大,除了大的液流密度会导致较高的蒸腾量外,树木具有较大的边材面积也会导致其耗水量较多。对比张劲松^[5]在毛乌素沙地、牛丽^[19]在科尔沁沙地樟子松单位土地面积上的日均蒸腾量(表 6),城市环境樟子松蒸腾量与沙地环境下对比有明显差异,有研究表明林分密度可以导致这种差异^[20-21]。3 个研究区樟子松林分密度分别为 800、1420、400 株 hm²,林分密度越大,单位土地面积上拥有更多树木,导致其蒸腾量也会出现较大差异。造林密度过大,可能会造成土壤水分供不应求,使其蒸腾速率和生长状况均处于较低水平^[20]。

表 6 不同地区樟子松日均蒸腾量对比

Table 6 Comparison of daily transpiration in different area

月份 Month	呼和浩特树木园(本研究) Hohhot Arboretum/(mm/d)	毛乌素沙 Mu Us sandland/(mm/d)	科尔沁沙地 Herqin sandland/(mm/d)
8	1.88	7.18	0.81
9	0.97	6.67	—
10	0.36	—	—

4.2 蒸腾对环境因子的响应

本研究发现树干液流受太阳辐射影响显著,这与其他对沙地环境中樟子松的研究一致^[13-15]。太阳辐射能够直接或间接诱导气孔开放,所以树木的蒸腾随辐射的升高而上升^[22]。VPD 对树木液流的影响目前存在争议,本研究中樟子松液流对 VPD 产生正反馈。但也有研究发现,水汽压亏缺明显上升时,气孔导度呈自然对数下降,进而造成树木蒸腾量减少^[5-6]。树干液流变化模式与同期监测的环境因子一致但并不同步。液流启动时间及达到峰值的时间均滞后于太阳辐射,这是因为日出后,在太阳辐射达到诱发气孔开启量之前,植物气孔并未立即打开,而随着太阳辐射达到阈值,气孔逐渐打开后才产生明显的液流活动。VPD 达到峰值时间滞后于液流,王华等^[22]研究马占相思时发现,无论干湿季,马占相思树干液流都滞后于太阳辐射,提前于 VPD。这主要是与植物体内储水有关,环境因子和树木个体的林中位置也可影响液流时滞长短。本研究发现树木液流与土壤水分相关性不显著。这与张有焱^[13]等、白雪峰^[15]沙地樟子松的研究存在差异。Irvine 等^[9]研究发现,当表层 20cm 土壤湿度低于 12%时,植物生理才会受到干旱胁迫。当土壤湿度下降,土壤自身保水能力增强,就会增加水分流向根部的阻力^[23]。本实验样地表层土壤体含水量一直维持在 20%以上,而沙地环境土壤保水能力通常较差,这可能是造成二者差异的主要原因。

5 结论

通过对樟子松液流密度日变化分析可以得出,樟子松液流密度昼夜变化较大,受天气影响,不同天气情况下,液流密度的日变化规律以及液流密度大小存在一定差异。晴天时,液流密度呈“单峰”曲线,液流密度最大且启动时间早。液流密度大小与树木胸径大小并不显示规律性。以液流密度计算的整树蒸腾,边材面积大的树木其蒸腾量也较大。

通过相关分析可知,液流密度与太阳辐射、VPD 具有较高的相关性,与风速的相关性较差,与土壤水分则不存在显著相关关系。对液流密度影响显著的气象因子排序为:VPD>太阳辐射>风速。以太阳辐射 R_a 、VPD 作为自变量,液流密度作为因变量建立的 sigmoid 曲线函数模型能够分别解释樟子松 68%、71%的液流变化。

参考文献(References):

- [1] Nowak D J, Dwyer J F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems//Urban and Community Forestry in the Northeast.

- Netherlands; Springer, 2007: 25-46.
- [2] 陈立欣, 李湛东, 张志强, 张文娟, 张晓放, 董克宇, 王国玉. 北方四种城市树木蒸腾耗水的环境响应. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2861-2870.
- [3] 黄德卫, 张德强, 周国逸, 刘世忠, Dennis O, 李跃林. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1159-1166.
- [4] 唐全, 曹帮华, 张玉娟, 秦永建, 吴丽云. 两种小环境下刺槐树干液流变化规律的研究. 山东大学学报: 理学版, 2011, 46(1): 6-10.
- [5] Monteith J L. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. Plant, Cell and Environment, 1995, 18(4): 357-364.
- [6] Whitehead D. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. Tree Physiology, 1998, 18(8/9): 633-644.
- [7] O'BRIEN J J, Oberbauer S F, Clark D B. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. Plant, Cell and Environment, 2004, 27(5): 551-567.
- [8] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 李妙伶. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量. 生态学报, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [9] Irvine J, Perks M P, Magnani F, Grace J. The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance. Tree Physiology, 1998, 18(6): 393-402.
- [10] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement. Tree Physiology, 1987, 4(3): 309-320.
- [11] 马李一, 孙鹏森, 马履一. 油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换. 北京林业大学学报, 2001, 23(4): 1-5.
- [12] Campbell G S, Norman J M. An Introduction to Environmental Biophysics. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [13] 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 李卫. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流. 水土保持研究, 2006, 13(4): 78-80.
- [14] 郭成久, 王莉, 苏芳莉, 尚佰晓, 韩辉, 王政. 辽西樟子松树干液流运动规律. 东北林业大学学报, 2008, 36(7): 3-5.
- [15] 白雪峰, 韩辉, 周凤艳, 张日升, 赵国军, 刘建华. 沙地樟子松蒸腾耗水的生态学特征. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 404-407.
- [16] Oren R, Phillips N, Ewers B E, Pataki D E, Megonigal J P. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. Tree Physiology, 1999, 19(6): 337-347.
- [17] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4): 291-308.
- [18] 马玲, 赵平, 饶兴权, 蔡锡安, 曾小平, 陆平. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [19] 牛丽, 岳广阳, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇, 刘新平, 赵玮. 利用液流法估算樟子松和小叶锦鸡儿人工林蒸腾耗水. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 1-8.
- [20] 杨爱国, 张建秋, 毕庆玲, 张玉玲, 王凤林, 范鹏辉. 吉林省西部不同造林密度杨树耗水特性的研究. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 142-145.
- [21] 孙鹏森, 马李一, 马履一. 油松、刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 1-6.
- [22] 王华, 赵平, 蔡锡安, 马玲, 饶兴权, 曾小平. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.
- [23] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条 (*Caragana korshinskii*) 树干液流动态及其影响因子. 生态学报, 2008, 28(4): 1376-1382.