

城市园林银杏液流变化特征及其主要影响因子

马靖涵¹,穆艳²,张瑞¹,孙昊蔚¹,王力^{1,3*}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100;2.西北农林科技大学 风景园林艺术学院,陕西 杨陵 712100;
3.中国科学院 水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨陵 712100)

摘要:园林植被的蒸腾作用对城市生态系统的水量平衡至关重要,并且能够调节小气候环境。本研究通过热扩散探针法(TDP),对校园绿地中29 a和24 a的银杏树干液流速率进行动态监测,量化不同时间尺度城市园林绿地中银杏的蒸腾变化规律,并分析其与环境因子的关系。结果表明,同一时期,29 a银杏的树干液流速率和液流通量均大于24 a银杏,且在生长季旺盛期差异显著($P < 0.05$)。29 a和24 a银杏蒸腾耗水季节性变动趋势相同,均为夏季>春季>秋季>冬季。除自身生理调节以外,银杏树干液流速率变化受多种因子影响,土壤因子中,树干液流速率对表层土壤温度的变化最为敏感;气象因子中,对太阳辐射的变化最为敏感。不同季节影响银杏树干液流速率的主要环境因子不同,从不同季节出发建立回归模型,能够更好地解释对环境因子的响应。树龄与环境因子的改变,都会影响城市园林植被的蒸腾耗水量,是园林绿化配置与管理应考虑的重要因素。

关键词:银杏;液流速率;环境因子;蒸腾耗水;城市园林绿地

中图分类号:S792.95

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0072-08

Characteristics of the Sap Flow and Its Impacting Factors of *Ginkgo biloba* in Urban Green Spaces

MA Jing-han¹, MU Yan², ZHANG Rui¹, SUN Hao-wei¹, WANG Li^{1,3*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The transpiration of garden vegetation is very crucial to the water balance of urban ecosystem and can regulate the environmental microclimate. In this study, the sap flow of *Ginkgo biloba* trees with the ages of 24- and 29-year-old in a campus was monitored by thermal dissipation probes (TDP). The characteristics of sap flow and its relationship with environmental factors were analyzed on different time scales. It was found that the sap flow velocity and flux of 29-year-old *G. biloba* tree were higher than that of 24-year-old one, and the differences were significant in the vigorous growth season ($P < 0.05$). The seasonal variation trend of transpiration water consumption of 24- and 29-year-old *G. biloba* on seasonal scale was the same. Transpiration water consumption was the highest in summer, followed by spring and autumn, and the lowest in winter. In addition to the regulation of plant physiological functions, the change of sap flow velocity of *G. biloba* was affected by various influential factors. Among soil factors, sap flow velocity was the most sensitive to the change of surface soil temperature. Among meteorological factors, it was the most

收稿日期:2021-08-08 修回日期:2022-01-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877014)。

第一作者:马靖涵。研究方向:城市生态水文。E-mail:majinghan@nwfau.edu.cn

*通信作者:王力,研究员,博士生导师。研究方向:生态水文。E-mail:wangli5208@nwfau.edu.cn

sensitive to the change of solar radiation. The impacting factors affecting the sap flow velocity of *G. biloba* in different seasons were different. The regression model based on season can better explain its response to environmental factors. Tree age and environmental factors had certain effects on transpiration water consumption of urban garden vegetation, which should be considered in the allocation and management of landscaping vegetation.

Key words: *Ginkgo biloba*; sap flow velocity; environmental factor; transpiration; urban garden green space

当今世界城市化进程不断加快^[1],预计到2050年全球城市化率将达到65%^[2]。城市化进程的推进对生态环境产生了以“热岛效应”为代表的诸多负面影响^[3],而园林植被可以通过蒸散作用对大气温室效应产生积极影响^[4],是改善城市热环境最有效的方法之一^[5-7]。为推动城市园林的可持续发展,在高效节水的同时,更好地发挥绿化植物的生态效益,适地适树打造生态园林城市,有必要明晰不同地区各个绿化树种的蒸腾耗水规律。

蒸腾作用是植被耗水最主要的方式之一,树干液流是水分从土壤通过木质部导管提升至叶片的过程,占树木蒸腾量的90%以上^[8],可以反映树木的水分消耗特征^[9]。液流速率的时空变化规律不仅受环境因素和土壤供水能力的影响和限制^[10],还与植被的树龄、胸径、边材面积等影响自身传输导度的诸多因素有关^[11]。对植物树干液流较常用的测定方法是热扩散探针法(TDP),可用于动态研究植被的蒸腾耗水规律^[12]。李浩等^[13]、卢志朋等^[14]、崔鸿侠^[15]分别对原生梭梭树(*Haloxylon ammodendron*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、华山松(*P. armandii*)树干液流进行了连续的观测,研究都表明,在小时尺度上,树干液流启动时间和达到峰值的时间具有节律性,月尺度上,树干液流通量具有季节性差异,具体的变化规律与地理环境和植物的物候期有关。目前,对树干液流的研究大多集中在农业和森林生态系统,对城市生态系统中园林植被的研究还相对较少^[16]。植物树干液流的变化复杂多样,有研究表明,同一地区的不同树种,液流变化趋势取决于不同的环境因子。王华等^[17]研究了北京城区植物园中6类树种树干液流变化及其与环境因子的关系,结果表明银杏(*Ginkgo biloba*)、七叶树(*Aesculus chinensis*)、玉兰(*Yulania denudata*)树干液流速率变化更依赖于太阳辐射,而刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*P. tabulaeformis*)、雪松(*Cedrus deodara*)树干液流速率的变化趋势在上午响应太阳辐射的变化,在下午则与饱和水气压差的变化趋势保持更好的一致性。相同树种在不同地区的树干液流特征也存在一定差异,例如黄雅茹等^[18]和

孙鹏飞等^[19]都以梭梭树为研究对象,分别在乌兰布和沙漠和古尔班通古特沙漠进行试验,前者树干液流速率呈明显的昼夜差异性,后者则没有这种规律,全天呈平缓波动。同一地区的相同树种处于生长期的不同阶段,其液流变化以及对环境因子的响应也有所不同,例如孙慧珍等^[20]在帽儿山对白桦树(*Betula platyphylla*)生长初期、中期和末期的液流进行分析,表明在生长末期液流变化曲线不再是规律的昼夜变化,而是呈全天连续波动型。

银杏具有独特的生物特性和景观特性,陕西是栽培种植的重点省份之一,银杏树被广泛应用于当地城市园林绿地建设^[21]。本研究以典型的园林乔木银杏为对象,对树干液流进行连续测定,从不同树龄、生长季的不同时期、不同天气状况等多角度、多时间尺度研究园林绿地中银杏的液流变化规律及其影响因素,从而探究不同季节和树龄银杏的蒸腾耗水规律,明确其作为绿化树种的生态适应能力,以期为该地区园林的配置造景和治理规划提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地与试验材料

研究区位于陕西省杨陵区西北农林科技大学(108°09'E, 34°24'N),属于温带大陆性季风气候,年平均气温为12.9℃,年太阳辐射总量为475.6×10⁷ J·m⁻²,年平均蒸发量为884.0 mm,降水集中在6—10月,年均降水量为637.6 mm^[22]。西北农林科技大学绿化层次丰富,校园绿地内有399种绿化树种,落叶乔木的种类约占41%,数量也最多^[23]。银杏作为代表性的落叶乔木,是重要的绿化建设树种,在南校区共有812棵。本研究在实地调研的基础上选择2处具有代表性的校园绿地为试验样地。2处试验绿地主要栽植的乔木均为银杏,树龄分别是29 a和24 a,总占地面积分别为9 457 m²和46 800 m²。园内还栽植有木槿(*Hibiscus syriacus*)、红瑞木(*Cornus alba*)、碧桃(*Amygdalus persica*)、丁香(*Syzygium aromaticum*)、梅花(*Armeniaca mume*)和玉兰等多种花木。在2个样地分别选择树干通直、长势良好的银杏各3棵,作为动态监

测液流数据的样树(表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流速率测定 2020 年 5 月至 2021 年 5 月采用热扩散法(TDP),对 6 棵银杏树干液流进行连续监测。样树胸高(距地面 1.3 m)处的正南方向安装 TDP 探针(参考探针和加热探针),采集器 CR1000 自动储存数据,银杏树干液流速率计算公式为^[24]:

$$V=0.0119 \times \left(\frac{T_{\max}-\Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \times 3600 \quad (1)$$

式中: V 为液流速率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, ΔT_{\max} 为无液流时 2 个探针之间的最大温差/ $^{\circ}\text{C}$, ΔT 为瞬时温差/ $^{\circ}\text{C}$ 。根据日累计液流通量和生长锥测得的边材面积,计算日蒸腾消耗水量。

$$F_d = A_s \times \sum_{i=1}^{24} V_i \quad (2)$$

式中: F_d 为日尺度下单株植被的液流量/L, A_s 为树干胸径处边材面积/ cm^2 。

表 1 样树基本特征

Table 1 Basic characteristics of the sample trees

编号	树高/m	胸径/cm	边材面积/ cm^2	树龄/a
1	9.32	16.55	81.89	29
2	8.81	15.17	80.48	29
3	8.04	15.96	79.23	29
4	7.82	13.52	77.12	24
5	7.27	12.81	77.89	24
6	6.91	12.23	75.69	24

1.2.2 气象因子的测定 常规气象数据由中国科学院水利部水土保持研究所气象站获取,实时监测太阳辐射(R_s , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、风速(W_s , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、空气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(R_H , $\%$)、降雨量(P_r , mm)等。引入饱和水汽压差(V_{PD} , kPa)^[25],其计算公式为:

$$E_s = 0.611 \times e^{\frac{17.502 \times T_a}{T_a + 240.97}}$$

$$V_{PD} = E_s - \frac{E_s \times RH}{100} \quad (3)$$

式中: E_s 为饱和空气压力/ kPa 。

1.2.3 土壤因子的测定 使用土壤水分监测系统(EM 50)测定样地 5 cm 和 10 cm 土壤温度(ST_5 , ST_{10} , $^{\circ}\text{C}$),使用中子仪(型号 CNC503B)测定土壤体积含水量(SWC, $\%$)。29 a 银杏试验地春季、夏季和秋季 0~300 cm 土层土壤含水量间无显著差异,3 个季节的平均值分别为 26.4%、27.1%和 25.9%(图 1)。

1.3 数据处理

用 Excel 2020 和 OriginPro 2020 进行数据统计和绘图,运用 SPSS 20.0 进行显著性检验,计算 Pearson 相关系数,使用逐步剔除法建立多元回归模型。

2 结果与分析

2.1 小时尺度下树干液流变化规律

2.1.1 生长季旺盛期与盛末期树干液流速率变化特征 从银杏的生长季旺盛期(6—8 月)和盛末期(9—10 月)各选取 2 个连续的晴天,分别为 6 月 28—29 日、10 月 2—3 日,在小时尺度下对树干液流变化特征进行分析(图 2)。在生长季旺盛期,24 a 银杏和 29 a 银杏液流几乎同时在 6:30 左右启动,下降至低谷和上升至峰值的时间也基本同步。24 a 银杏树干液流速率的平均峰值为 $12.72 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 29 a 银杏的平均峰值为 $18.99 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在盛末期,2 种树龄银杏的液流启动时间也比较接近,均在 7:30 左右,全天液流速率随时间的变化趋势也基本相同。24 a 银杏和 29 a 银杏液流速率的平均峰值分别为 $2.14 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $2.74 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 盛末期 2 种树龄液流速率峰值的差值小于生长季旺盛期。植物在生

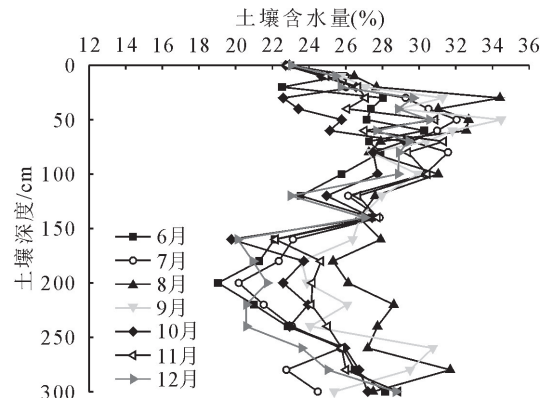


图 1 29 a 银杏试验地土壤体积含水量月变化

Fig. 1 Monthly variations of the soil volume water content in 29-year-old *G. biloba* experimental plot

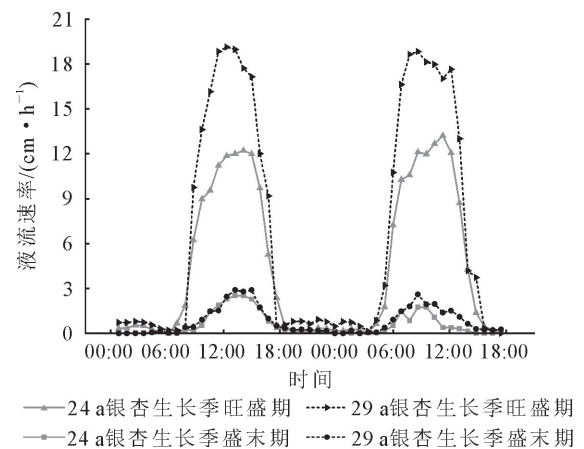


图 2 24 a 和 29 a 银杏生长季盛期和末期树干液流速率日变化特征

Fig. 2 Diurnal variation characteristics of sap flow velocity of 24- and 29-year-old *G. biloba* at the peak and end of growing season

长季旺盛期与盛末期时自身生理调控有所不同,生长季旺盛期为银杏叶片和新梢的速生期,该时期液流早上的启动时间较盛末期提前约1 h,树干平均液流速率表现为旺盛期比盛末期高 $5.07 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。无论在生长季旺盛期还是盛末期,银杏都存在一定的夜间液流,不同月份白天蒸腾耗水量有所差异,但夜间耗水量无明显差别。

2.1.2 不同天气树干液流速率变化特征 小时尺度上的液流速率变化曲线具有多样性,图3—图5分别为春季、夏季和秋季不同天气情况下29 a 银杏树干液流速率日变化特征。银杏树干液流速率日变化均呈现出明显的昼夜节律性,白天液流速率均大于夜晚,在晴天这种变化规律相较于雨天更加明显,且同一季节的晴天液流速率显著大于雨天($P < 0.05$)。

在晴天,春、夏和秋季银杏树干液流速率分别于7:00、6:30和7:30开始随太阳辐射的升高而稳步升高,分别于12:30、11:00和13:30到达峰值,随后逐步波动下降,在20:00—22:00降到低谷。晴天,春季和夏季的银杏液流速率变化曲线为“双峰”形,出现“蒸腾午休”现象,秋季则呈现“单峰”型变化曲线。液流速率的峰值夏季>春季>秋季,并且在夏季维持峰值的时间最长。在小时尺度上树干液流相对更依赖于太阳辐射的变化,环境因子对液流的影响存在季节差异性。液流与环境因子在小时尺度上的变化存在一定的时滞性。这种现象是由于植物夜间的组织补水作用,使得白天会对这部分储存水进行蒸腾;同时,导管或管胞的输水效率也会造成这种时滞效应^[26]。

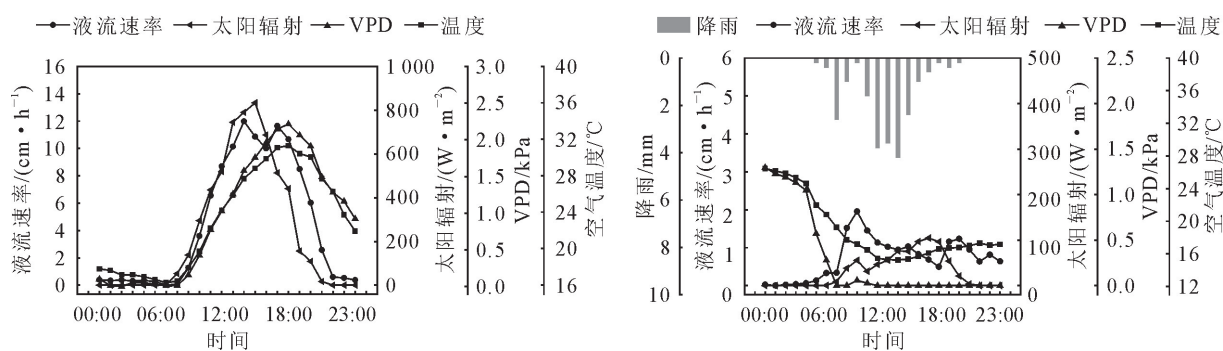


图3 春季晴天和雨天液流速率与环境因子的日变化

Fig. 3 Diurnal variation characteristics of sap flow velocity and environmental factors on sunny and rainy days in spring

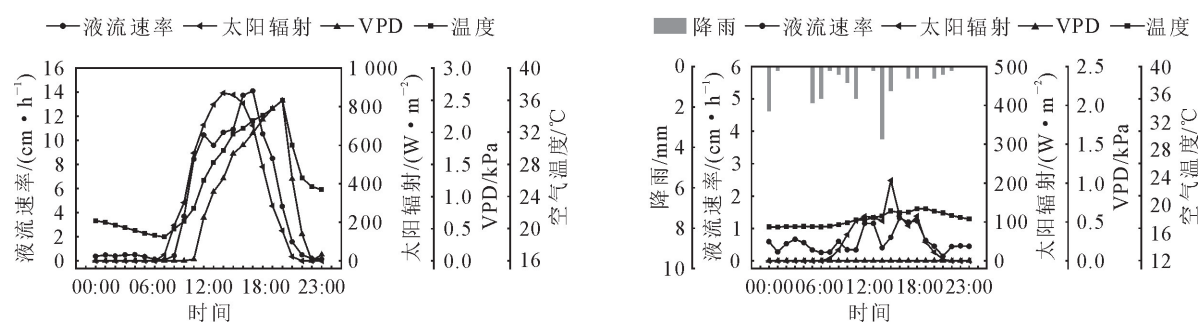


图4 夏季晴天和雨天液流速率与环境因子的日变化

Fig. 4 Diurnal variation characteristics of sap flow velocity and environmental factors on sunny and rainy days in summer

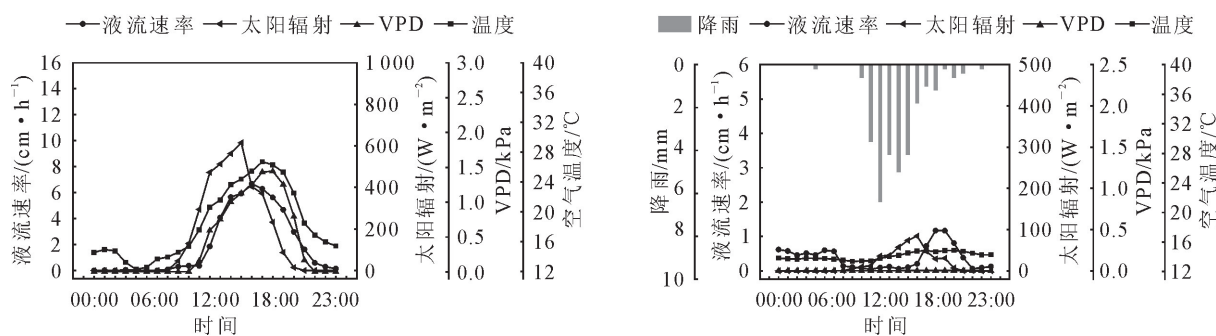


图5 秋季晴天和雨天液流速率与环境因子的日变化

Fig. 5 Diurnal variation characteristics of sap flow velocity and environmental factors on sunny and rainy days in autumn

在雨天,影响银杏树干液流速率变化的主要环境因子是降雨,通过减轻树木受到的水分胁迫,直接影响树木的蒸腾作用。随着降雨的形成,银杏树干液流速率大幅度降低,呈现不规则“多峰”形变化曲线。降雨结束后,液流速率有快速升高的趋势。以夏季雨天为例,13:00 发生降雨,液流速率低至 $0.41 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,而随着降雨结束,在 16:00 液流速率升高至 $1.32 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,这一时段峰值是谷值的 3 倍左右。

2.1.3 树干液流速率与环境因子的关系 土壤因子(温度和湿度)和气象因子都是影响植物液流的关键要素^[27],不同季节银杏树干液流速率的主导环境因子不同。分析表明,园林绿地银杏树干液流速率对气象因子的响应更强(表 2、表 3)。在春季和夏季,银杏树干液流速率与太阳辐射的相关性最强,在

秋季则与饱和水汽压差的相关性最强。不同季节,银杏树干液流速率与浅层(5 cm 和 10 cm)土壤温度存在一定的相关性。夏季和秋季液流速率与 5 cm 土壤温度呈现显著性正相关($P < 0.01$),而春季则没有相关性。3 个季节均与 10 cm 土壤温度呈现显著性相关($P < 0.01$),夏季和秋季呈现显著性正相关,而春季则呈现显著性负相关且相关系数最小。可以看出,虽然土壤因子的变化在一定程度上受温度和太阳辐射等影响,但与树干液流速率相关性的季节性规律与气象因子不尽相同。在城市园林中,会随时根据不同天气和土壤干湿状况进行及时合理的浇灌,土壤水分条件在各季节都保持较好,土壤含水量没有明显的季节性差异,因此土壤含水量可能不是城市园林银杏树干液流的关键制约因子。

表 2 液流速率与气象因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between sap flow velocity and meteorological factors

季节	太阳辐射	饱和水汽压差	空气温度	相对湿度	风速
春季	0.825 **	0.710 **	0.735 **	-0.623 **	0.59 **
夏季	0.877 **	0.758 **	0.671 **	-0.717 **	0.021
秋季	0.679 **	0.783 **	0.751 **	-0.503 **	-0.016

注: ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$ 。下同。

表 3 液流速率与土壤因子的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient between sap flow velocity and soil factors

季节	5 cm 土壤温度	10 cm 土壤温度	20 cm 土壤含水量	60 cm 土壤含水量	100 cm 土壤含水量	140 cm 土壤含水量
春季	0.064	-0.179 **	0.867	-0.782	-0.782	-0.394
夏季	0.197 **	0.188 **	0.833	0.945	0.962	-0.835
秋季	0.529 **	0.487 **	-0.290	-0.535	-0.782	-0.317

为进一步说明不同季节园林绿地银杏液流速率与环境因子的关系,采用逐步剔除法分季节进行多元线性回归分析(表 4)。以太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差、相对湿度、风速和土壤温度为自变量,银杏液流速率为因变量,在小时尺度上建立银杏树干液流速率与环境因子的回归模型。3 个模型的常数和系数的 t 检验都呈现极显著水平($P < 0.01$),决定系数 R^2 均大于 0.75,在晴天环境因子能很好地解释园林银杏树干液流速率的变化。

2.2 日尺度下树干液流速率变化特征

不同树龄的银杏树干液流速率都呈现明显的季节性变化(图 6),日平均液流速率夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。24 a 银杏春、夏、秋、冬 4 季平均树干液流速率分别为 2.09 、 3.79 、 0.99 和 $0.47 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,29 a 银杏的分别为 3.16 、 6.05 、 1.89 和 $0.69 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从不同月份上看,在夏季及前后 1 个月银杏树干的液流速率显著高于其他月份($P < 0.05$),24 a 和 29 a 银杏的月平均液流速率都在 6 月达到最大

值,分别为 $4.44 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $6.62 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从不同树龄上看,全年各个时期 29 a 银杏的液流速率均显著高于 24 a 银杏($P < 0.05$),7 月两者相差最大,月平均液流速率相差值为 $2.33 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 月尺度下蒸腾耗水量

29 a 银杏全年的月累计耗水量均显著高于 24 a 银杏(图 7)。24 a 银杏和 29 a 银杏均在 6 月耗水最多,月耗水量分别达到 245.88 kg 和 383.71 kg,分别占全年耗水量的 20.18% 和 18.80%。其次是 7 月,24 a 和 29 a 银杏的耗水量分别为 223.18 kg 和 368.55 kg。24 a 和 29 a 银杏 12 个月的累计耗水量分别为 1 218.46 kg 和 2 051.54 kg。本研究观测并记录了研究区银杏的物候期,展叶期为 3 月 25 日—4 月 25 日,落叶期为 10 月 1—20 日。夏季耗水量最多,秋季银杏开始落叶,根系活力下降,其耗水量较春夏有明显降低,这一规律与本研究区域银杏的物候期基本一致。

表 4 液流速率与环境因子的多元回归模型

Table 4 Multiple regression model of sap flow velocity and environmental factors

季节	多元线性回归模型	决定系数(R^2)
春季	$Y = -2.955 + 0.1R_s + 0.301T_a - 0.121ST_5 + 0.963W_s$	0.758
夏季	$Y = -3.367 + 0.013R_s + 0.09T_a + 0.148ST_{10} + 0.852V_{PD} - 0.2R_H$	0.843
秋季	$Y = -8.323 + 0.003R_s - 0.048T_a + 0.085ST_{10} + 5.342V_{PD} + 0.079R_H$	0.815

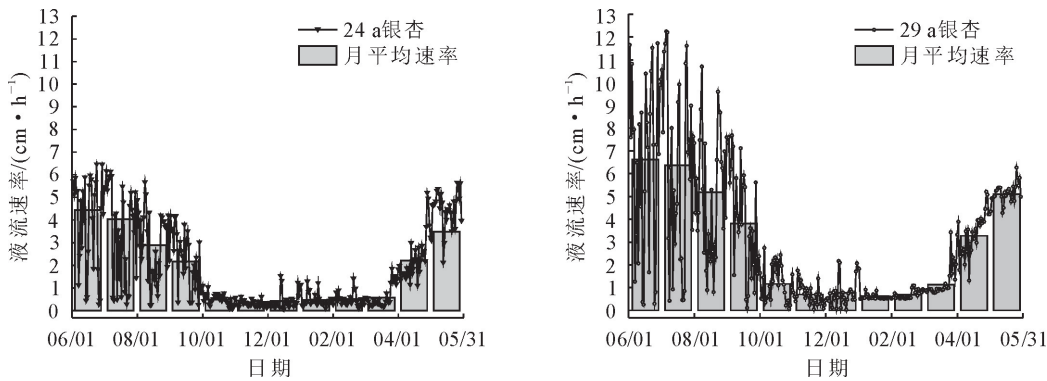


图 6 24 a 和 29 a 银杏树干液流速率季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of sap flow velocity of 24- and 29-year-old *G. biloba*

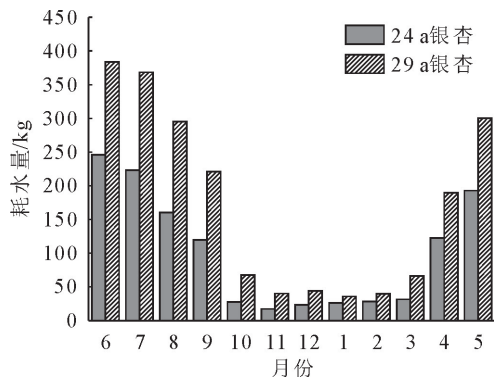


图 7 24 a 和 29 a 银杏月蒸腾耗水量

Fig. 7 Monthly transpiration water consumption of 24- and 29-year-old *G. biloba*

3 结论与讨论

3.1 银杏树干液流变化特征

银杏树干液流变化呈现明显的昼夜节律性和季节差异性。本研究中,银杏树干日平均液流速率最大的时期是夏季,其次是春季和秋季,而李广德等^[28]对北京园林绿地内银杏的研究结果为,春、夏、秋 3 个季节之间的树干液流速率没有显著性差异。可能因为不同地区的温度、降雨等环境因子有所不同、不同树龄银杏的自身调节策略也有所差异。本研究表明银杏树干液流速率与气象因子的相关系数较土壤因子的更大,这与刘鑫等^[29]对南京市杉木(*Cunninghamia lanceolata*)液流影响因子的研究结果一致。土壤因子中,浅层土壤温度与树干液流速率的相关性相对较大,主要是因为 5 cm 和 10 cm 土壤温度与太阳辐射关系密切,而整个生长季树干

液流速率又对太阳辐射的变化敏感。

不同季节或不同天气情况下影响树干液流的主要环境因子有所不同,针对不同季节选用不同的回归模型,便于通过环境因子估测银杏的树干液流速率。春、夏 2 季与银杏树干液流速率相关性最大的是太阳辐射,而秋季则是饱和水汽压差,这与王华等^[30]得出的研究结果略有不同,在 1 a 中不同季节影响马占相思树蒸腾作用的主要驱动因子都是太阳辐射和饱和水汽压。但都表明这 2 种气象因子与植物液流速率的变化密切相关,太阳辐射直接影响叶片气孔开闭和植物的光合作用,饱和水汽压差与叶内外的水势梯度相关。气象因子对蒸腾作用的影响既存在促进也存在抑制作用,当超过一定阈值后,植物会对环境变化进行自我适应,例如夏季的“蒸腾午休”现象。

3.2 不同树龄银杏的蒸腾耗水量

利用液流速率以及边材面积计算单木整株的蒸腾耗水量^[31]结果表明,园林绿地内 24 a 和 29 a 银杏树干液流速率均在 6 月达到最大值,此时单株植被的月累计蒸腾耗水量也为全年最大值。主要因为夏季温度较高且此时处于银杏生长旺盛时期,这与许蕊^[32]以 13 a 银杏为研究对象得出的结论一致。值得注意的是春季植被的蒸腾耗水量也很大,此时处于银杏的芽膨大期和展叶期,并且降雨量相对夏季较少,应注意及时灌溉。不同季节银杏都存在夜间液流,可能是由于夜间在根压的推动下,恢复白天蒸腾作用消耗的水分^[33]。从不同树龄上看,全年 29 a 银杏的树干液流速率均大于 24 a 银杏,该差异性

在生长季旺盛期更加显著。虽然 2 种不同树龄的银杏只相差 5 a,但是由于 2 处园林绿地移栽苗木的时期不同,导致 2 处园林中银杏的胸径和冠幅有明显的差异性,有研究表明植物树干液流速率与其直径大小具有正相关关系^[34]。在对园林植被进行灌溉时,应综合考虑具体的因素,依据季节变化以及植被的生物学特性及时调整。

参考文献:

- [1] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, *et al.* Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 2008, 319 (5864): 756-760.
- [2] UNITED NATIONS. World population prospects: The 2012 Revision[R]. New York, 2013.
- [3] WU J. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 1-4.
- [4] THOMA F, STENBJORN S, MICHAEL R, *et al.* Artificial photosynthesis as a frontier technology for energy sustainability[J]. *Energy and Environmental Science*, 2013, 6(4): 1074-1076.
- [5] TONG H, WALTON A, SANG J, *et al.* Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(19): 3549-3563.
- [6] CHEN Y, WONG N H. Thermal benefits of city parks-science direct[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2): 105-120.
- [7] 林世平, 梁伊任. 市域绿地系统规划初探(上)[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(2): 209-212.
LIN S P, LIANG Y R. A preliminary exploration of the green system planning in urban area (I) [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(2): 204-207. (in Chinese)
- [8] 吴鹏, 杨文斌, 崔迎春, 等. 喀斯特区天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7552-7567.
WU P, YANG W B, CUI Y C, *et al.* Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of *Acer wangchii* in the karst area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7552-7567. (in Chinese)
- [9] SHENG D, WANG Y L, KUME T, *et al.* Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1-10.
- [10] 殷秀辉, 程飞, 张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(5): 24-29.
YIN X H, CHENG F, ZHANG S X. Variation of stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* and its impact factors [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(5): 24-29. (in Chinese)
- [11] 李新宇, 李延明, 孙林, 等. 银杏蒸腾耗水与环境因子的关系研究[J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(4): 23-29.
LI X Y, LI Y M, SUN L, *et al.* Transpiration water consumption and its relationship with environmental factors in *Ginkgo biloba* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(4): 23-29. (in Chinese)
- [12] LINK P, SIMONIN K, MANESS H, *et al.* Species differences in the seasonality of evergreen tree transpiration in a mediterranean climate: analysis of multiyear, half-hourly sap flow observations [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 1869-1894.
- [13] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7187-7196.
LI H, HU S J, ZHU H, *et al.* Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendron* by using thermaldissipation technology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7187-7196. (in Chinese)
- [14] 卢志朋, 魏亚伟, 李志远, 等. 辽西北沙地樟子松树干液流的变化特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3182-3189.
LU Z P, WEI Y W, LI Z Y, *et al.* Characteristics of sap flow and its influencing factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land of northwest Liaoning [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3182-3189. (in Chinese)
- [15] 崔鸿侠, 唐万鹏, 胡文杰, 等. 神农架 2 树种树干液流特征及与环境因子关系[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 37-44.
CUI H X, TANG W P, HU W J, *et al.* Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of two tree species in Shennongjia [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 37-44. (in Chinese)
- [16] WU J, LIU H, ZHU J, *et al.* Nocturnal sap flow is mainly caused by stem refilling rather than nocturnal transpiration for *Acer truncatum* in urban environment [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 56(9): 126800.
- [17] 王华, 欧阳志云, 郑华, 等. 北京城区常见树种生长季树干液流的时滞特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2111-2117.
- [18] 黄雅茹, 辛智鸣, 李永华, 等. 乌兰布和沙漠人工梭梭茎干液流季节变化及其与气象因子的关系[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(6): 135-143.
HUANG Y R, XIN Z M, LI Y H, *et al.* Seasonal variation of stem sap flow of artificial *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge, and its relationship with meteorological factors in Ulan Buh desert [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44(6): 135-143. (in Chinese)
- [19] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6901-6909.
SUN P F, ZHOU H F, LI Y, *et al.* Trunk sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* growing in the Gurbantunggut desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [20] 孙慧珍, 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.
SUN H Z, ZHOU X F, ZHAO H X. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1387-1391. (in Chinese)
- [21] 李晓杰. 陕西主要银杏栽培品种氨基酸变异规律研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.
- [22] 申卫军, 张硕新, 刘立科. 几种木本植物木质部栓塞的日变化[J]. *西北林学院学报*, 1999, 14(1): 24-29.

- [23] 辛转霞,王文博,吉文丽,杨陵园林树种规划研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(6):177-180.
XIN Z X, WANG W B, JI W L. Investigation and planning of the tree species for gardening in Yangling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24 (6): 177-180. (in Chinese)
- [24] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4):309-320.
- [25] CAMPBELL G S, NORMAN J M. An introduction to environmental biophysics[M]. 2nd. New York: Springer-Verlag, 1998:5-9.
- [26] 韩磊,展秀丽,王芳,等. 河东沙区侧柏树干液流与蒸腾驱动因子的时滞效应研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1417-1423.
- [27] 赵春彦,司建华,冯起,等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5):98-105.
ZHAO C Y, SI J H, FENG Q, et al. Stem sap flow research: progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5):98-105. (in Chinese)
- [28] 李广德,付海曼,贾黎明. 银杏树干边材液流及水容特性研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4):54-58.
LI G D, FU H M, JIA L M. Studies on the characteristics of xylem sap flow and water capacitance of *Ginkgo biloba* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29 (4): 54-58. (in Chinese)
- [29] 刘鑫,张金池,庄家尧,等. 杉木幼树树干液流影响因子及其对杉木林蒸腾量的贡献[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):73-78.
- [30] 王华,赵平,蔡锡安,等. 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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.
- [31] 王华田,马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6):661-667.
- [32] 许蕊. 银杏的液流规律及与环境因子的关系[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [33] 孙守家,古润泽,丛日晨,等. 银杏树干茎流变化及其对抑制蒸腾措施的响应[J]. 林业科学, 2006, 42(5):22-28.
SUN S J, GU R Z, CONG R C, et al. Change of trunk sap flow of *Ginkgo biloba* and its response to inhibiting transpiration[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5):22-28. (in Chinese)
- [34] 许浩,张希明,闫海龙,等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3713-3720.

(上接第29页)

- [13] 罗彬莹,刘卫东,吴际友,等. 干旱胁迫对樟树幼苗光合特性和水分利用的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 49-55.
LUO B Y, LIU W D, WU J Y, et al. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics and water use of *Cinnamomum camphora* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39 (5): 49-55. (in Chinese)
- [14] 张淑勇,周泽福,张光灿,等. 半干旱黄土丘陵区4种天然次生灌木光合生理和水分利用特征[J]. 林业科学, 2008, 44(12): 140-146.
ZHANG S Y, ZHOU Z F, ZHANG G C, et al. Characteristics of photosynthesis, respiration and water utility of four tree species of natural secondary shrubs in a semi-arid Loess Hilly-gully region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(12): 140-146. (in Chinese)
- [15] 姜霞,苏春花,伍生磊,等. 盐肤木不同生育期光合特性及其与主要环境因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19):155-160.
- [16] GIMENEZC, MITCHELL V G, LAWLOR D W. Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress[J]. Plant Physiol, 1992, 98(2):516-524.
- [17] 许浩,张希明,闫海龙,等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3713-3720.
XU H, ZHANG X M, YAN H L, et al. Water consumption and transpiration of *Haloxylon ammodendron* in hinterland of Taklimakan desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3713-3720. (in Chinese)
- [18] 李彦瑾,赵忠,孙德祥,等. 干旱胁迫下柠条锦鸡儿的水分生理特征[J]. 西北林学院学报, 2008, 3:1-4.
LI Y J, ZHAO Z, SUN D X, et al. Hydrological physiological characteristics of *Caragana korshinskii* under water stress [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 3:1-4. (in Chinese)
- [19] CHEN S, BAI Y, LIN G, et al. Isotopic carbon composition and related characters of dominant species along an environmental gradient in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 71:12-28.
- [20] 董蕾,李吉跃. 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理[J]. 生态学报, 2013, 33(18):5477-5483.
DONG L, LI J Y. Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18):5477-5483. (in Chinese)
- [21] LIU W Z. Dynamic interrelations of crop production, water consumption and water use efficiency[J]. Journal of natural resources, 1998, 13(1):23-27.
- [22] 胡婵娟,刘国华,郭雷,等. 土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(4):702-708.
- [23] CHAVES M M, PEREIRA J S, MAROCO J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and Growth [J]. Annals of Botany, 2002, 89(7):907-916.