doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.03.005

非生长季糖槭树干液流特征及影响因子分析

李明丹,王阿晴,汤祖翔,吴闰生,周婧涵,王 伟,刘 华*
(安徽农业大学林学与园林学院 安徽 合肥 230036)

摘 要:采用EMS 62包裹式植物径流测量系统连续监测非生长季(2016年9月~2017年3月)内4 a生糖槭幼树的树干液流速率的动态变化特征及其影响因素。结果表明:(1)不同月份的糖槭树干液流的日变化呈多峰型,且呈"昼高夜低"的变化趋势,夜间液流特征明显,且零液流速率持续时长不同;(2)糖槭树干液流速率在非生长季的月变化总体上呈下降趋势;(3)9月份,晴天、阴天和雨天3种天气条件下的液流速率日变化均为单峰型,其日均值大小排序为:晴天>阴天>雨天;(4)3种天气条件下,糖槭树体主干的液流速率均大于侧枝的,但液流峰值有差异;(5)非生长季树干液流变化均与太阳辐射和空气温度呈极显著正相关,与空气湿度和根部土壤湿度均呈极显著负相关。

关键词:糖槭;树干液流;环境因子
中图分类号:S792.35 **文献标识码**:A **文章编号**:1003-5508(2018)03-0024-05

Features and Influence Fectors of the Sugar Maple Sap Flow in the Non-growing Seasons

LI Ming-dan WANG A-qing TANG Zu-xiang WU Run-sheng
ZHOU Jing-han WANG Wei LIU Hua*
(School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to understand the dynamics variation characteristics of *Acer saccharum* sap flow of during 4 years, the sap flow rate was measured from September 2016 to March 2017 by the Sap Flow Set EMS 62, and environmental factors were recorded by the automatic meteorological station. The results showed that (1) diurnal changes of *A. saccharum* sap flow were of multiple peak types in different months, the high peak happened in daytime and low peak in nighttime. There were obvious characteristics of night sap flow and the durations of zero-rate sap flows varied. (2) The sap flow rate decreased generally from September 2016 to March 2017. (3) In September, the diurnal changes of the sap flow of *A. saccharum* displayed a single peak type. The order of the sap flow rate in different weather conditions were as follows: sunny > cloudy > rainy day. (4) The sap flow rate of main trunks were higher than that of branches in all weather conditions. But the peak value varied. (5) During the non-growing season, there was a significantly positive correlation between sap flow and light radiation or air temperature, and a significantly negatively correlated with the air humidity or soil moisture.

收稿日期:2018-02-24
基金项目:安徽省教育厅教学研究重点项目(2016jyxm0307);国家级大学生创新训练项目(201710364017)。
作者简介:李明丹(1994-),女,林学专业,主要从事森林植物生理生态特性的研究,e-mail:limingdan@126.com。
*通讯作者:刘华(1976-),女,内蒙古乌兰察布人,博士,副教授,主要从事森林生态系统结构及其功能特性研究,e-mail:liuhuanmg@ahau.edu.cn。

Key words:*Acer saccharum*,Sap flow,Environmental factors

水分在大气—森林—土壤循环中的一个重要过程是植物的蒸腾作用。林分蒸腾量在森林水循环中占有很大比重[1],蒸腾作用消耗树木从土壤中吸收水分的 90%[2],随着环境因子的变化,树木的蒸腾速率在不同时段、不同季节、不同的天气条件下均会发生相应的改变。树干液流是植物体内由于叶片的蒸腾失水并带动树木体内水分通过木质部运输到叶片的过程[3]。热扩散法是在不影响树木自然生长的情况下可连续准确的监测树干液流的方法[4],通过测定树干液流,可以反映出林木蒸腾耗水的变化[5]。

糖槭(*Acer saccharum* Marsh.)是槭树科槭属多年生的落叶乔木,原产于北美地区。其树型雄伟,木质坚硬,加之秋季叶色变化丰富,在城市绿化中具有极高的观赏价值和生态价值,在我国东北及南方各省区作为行道树栽培已有近百年的历史。同时,糖槭还是一种木本糖料树种,一般在生长 15a 后就可以提取枝液,并可加工成糖浆,具有较高的经济价值[6]。目前,我国对糖槭的研究主要在光合生理[7]、引种技术[8]、叶片成分分析[9]等方面,在树干液流方面的研究还未见相关报道。目前有关木本植物树干液流的研究主要集中在生长季[10],对于非生长季的树干液流变化研究相对较少,不同生长季节的树干液流速率是否存在一定的相似性,非生长季的树干液流存在意义如何仍未明确。本文基于 EMS 62 包裹式植物径流测量系统,通过连续监测 4 a 生的糖槭在秋冬季节的树干液流速率,分析其日变化和季节变化规律,以及水分运移过程中的分配特征,明确太阳辐射、土壤湿度、空气湿度等环境因子对其的影响,为准确评估森林水分蒸腾量对引进的加拿大糖槭在城市森林水分循环的作用,并为该树种在培育管理及开发利用等方面提供一定的理论基础。

1　研究区概况

试验地位于安徽农业大学的农翠园内的糖槭苗圃地。该地属亚热带季风气候,年平均气温 15.7 ℃,7 月平均气温 27.5 ℃,冬季月平均气温 1.5 ℃ ~5 ℃,年平均降雨量近1 000 mm,多集中在 5 月 ~ 6 月,年均日照2 100 h 左右,年平均相对湿度约为 77%,年平均无霜期约 228 d。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

试验材料为生长良好、无病害的 4a 生糖槭苗木,其特征见表 1。

表 1　试验样木情况

Tab. 1　Characteristics of sample trees

样木编号	年龄(年)	树高(m)	胸径(cm)	冠幅(m^2)	侧枝情况	
					有无侧枝	侧枝直径(cm)
A_1	4	2.0	2.0	0.16	无	
A_2	4	2.3	2.1	0.22	无	
A_3	4	2.5	1.9	0.38	有	1.1 0.9
A_4	4	2.2	2.0	0.33	有	1.0 1.2

2.2　试验方法

于 2016 年 9 月,对已选择的 4 株样树进行 Sap Flow Set EMS 62 包裹式植物径流测量系统(EMS Brno,Czech Republic)的安装。在树干的阳生面,根据热电偶探针的长度及距离,利用打孔器钻孔,然后将针垂直插入孔中,并用泡沫固定探针后,将其包裹紧实,然后再加上绝热罩,并用胶带密封两端(不要包得太紧,因为茎干在生长),避免水分沿树干流入;同时在绝热罩的下端辐射罩的下端,留一个空隙在线和茎干处,用于排水;然后将探针缆线与数据采集器(DT50)相应接口连接,接通电源。启动测定程序设定为每隔 10 min 记录一次数据。同时,利用样地内安装的 AMS-1000 自动气象站,监测大气温度、太阳有效辐射、空气相对湿度、风速、水汽压、土壤温度、土壤水分等指标。于 2016 年 9 月至 2017 年 3 月连续监测树干液流,每 10 d 下载一次数据。

2.3　数据处理与分析

选取每个月上、中、下旬任意一天的数据分析不同月份糖槭树干液流速率的动态变化;每个月每天连续监测的液流数据的平均值分析其月变化;以 9 月份为例,选取 A_1 与 A_2 的上中下旬的晴天、阴天和雨天数据对比分析不同天气条件下液流变化的差异;利用 A_3 和 A_4 的数据分析液流在主干和侧枝之

间的分配。用 Excel 2007 整理数据制作图表,SPSS 17.0 进行树干液流和环境因子的相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同月份糖槭树干液流速率的动态变化

糖槭树干液流的动态变化呈多峰型(见图 1)。不同月份日间液流和夜间液流发生时段、液流峰值及其液流最大值见表 2。9 月份到次年 3 月份,日液流的发生均在 20:00 时结束,但 11 月、2 月和 3 月的液流启动时间较其他月份有滞后现象。日液流速率和夜间液流速率的变化基本同步。? 其日液流的最大值和夜间液流速率平均值均呈现先下降再增加的趋势。其中,日液流速率在 11 月份液流速率下降明显,次年 1 月份的液流速率最大值最小,次年 2 月份开始液流速率快速增加。夜间液流速率在 12 月份下降明显,次年 1 月份最小,次年 2 月份开始增加。同时,11 月和次年 2 月份的夜间液流持续时间最长,且无零液流时段出现;其他月份均有时间长短不一的零液流速率存在。

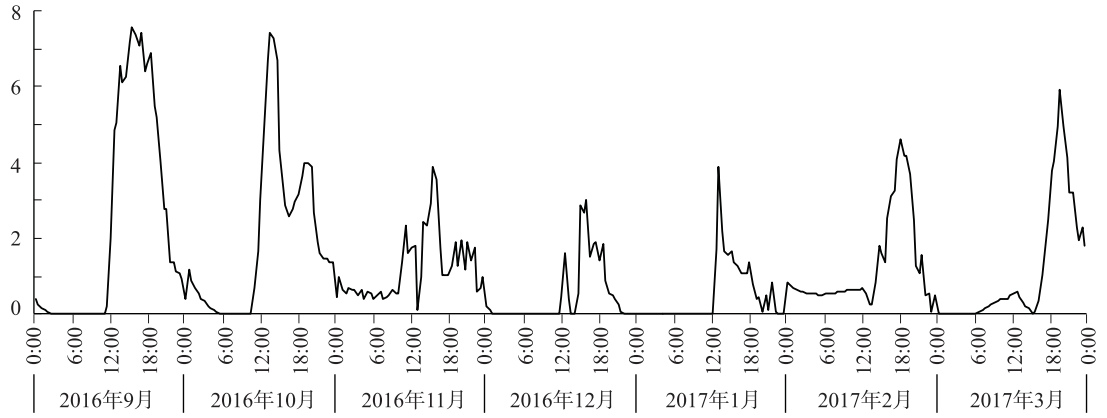

图 1 不同月份糖槭树干液流的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of sugar maple sap flow in different months

表 2 不同月份糖槭树干液流变化的关键参数

Tab. 2 The key parameters of *A. saccharum* sap flow in different months

月份	日液流			夜间液流		零液流
	发生时段	液流峰值时间	日液流最大值	发生时段	平均液流速率	发生时段
9 月	7:40 ~ 20:00	16:00	7.55	20:00 ~ 5:10	0.72 ± 0.31	5:10 – 7:40
10 月	8:00 ~ 20:00	14:30	7.40	20:00 – 6:00	0.59 ± 0.45	6:00 ~ 8:00
11 月	8:00 ~ 20:00	16:00	3.89	20:00 – 8:00	0.50 ± 0.23	
12 月	8:40 ~ 20:00	16:30	3.02	20:00 – 1:00	0.25 ± 0.17	1:00 ~ 8:40
1 月	10:00 ~ 20:00	15:00	1.66	20:00 – 24:00	0.18 ± 0.16	24:00 ~ 10:00
2 月	8:00 ~ 20:00	18:00	4.61	20:00 – 8:00	0.37 ± 0.25	
3 月	6:00 ~ 20:00	20:00	5.94	20:00 – 24:00	0.65 ± 0.41	24:00 ~ 6:00

3.2 糖槭树干液流速率的月变化

4 a 生糖槭树干液流在 2016 年 9 月至 2017 年 3 月期间的月变化呈现下降趋势(见图 2)。其中,9 月份糖槭的平均树干液流速率最大,其值为 5.784 cm · h^{-1};10 月份平均树干液流降为 2.126 cm · h^{-1},较 9 月份减少了 63%;11 月份的平均液流速率为 1.431 cm · h^{-1},较 10 月份减少了 33%;12 月份的平均树干液流分别为 0.164 cm · h^{-1},较上个月减少了 89%;1 月份平均值为 0.295 cm · h^{-1},较 12 月份增加了 80%;2 月份的平均树干液流速率为 0.296 cm · h^{-1},较 1 月增加了 3%;3 月份的平均树干液流速率分别为 0.421 cm · h^{-1},较 2 月增加了 29.7%。

3.3 不同天气条件下糖槭树干液流速率的比较

3.3.1 不同天气条件下的糖槭树干液流日变化

以 2016 年的 9 月份为例,分析晴天、阴天和雨天三种典型不同天气条件下 4 a 生糖槭树干液流速率的日变化见图 3。晴天树干液流速率变化最大,阴天次之,雨天最小。晴天、阴天、雨天时的液流速率变化曲线则呈单峰型,雨天时的液流日变化相对比较弱,但所有树干液流速率均呈“昼高夜低”的变化趋势。晴天条件下,4 a 生糖槭树干液流在日间在

7:40 开始启动,8:00 之后迅速升高,在 11:00 时达到最大值(5.539 ± 1.002) cm · h^{-1},在 11:00 ~ 13:00 间保持较高的液流速率,之后有所下降,到 16:00 时树干液流迅速下降,19:00 时的液流值很微弱,并在 20:00 ~ 5:10 时段内维持较弱的夜间液流,其液流速率在 0.024 g · h^{-1} ~ 0.426 cm · h^{-1}之间。阴天条件下,糖槭树干液流变化曲线均呈单峰型,夜间液流明显。其日间的液流速率较大的时段主要发生在 11:00 ~ 15:00 时之间,在 12:00 时左右的液流速率最大。雨天条件下,4a 生糖槭树干液流明显降低,且无明显的夜间液流,日也留的变化主要发生在 5:00 ~ 8:00 时段内,7:00 时达到最大值(1.037 ± 0.201) cm · h^{-1}。

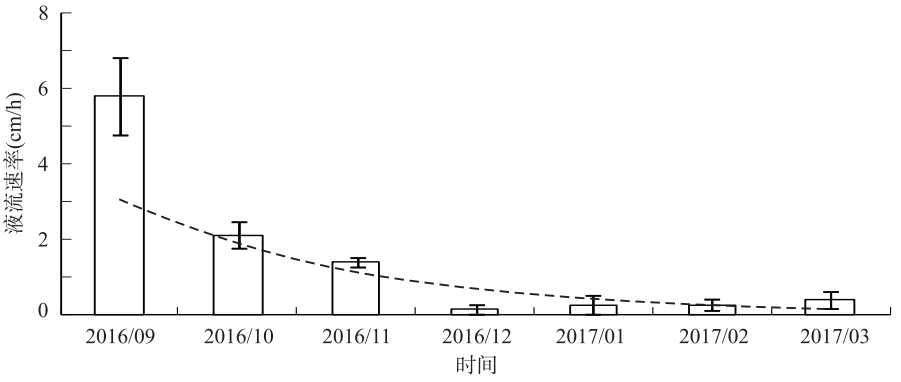

图 2　糖槭树干液流的月变化

Fig. 2　Monthly change of *A. saccharum* sap flow

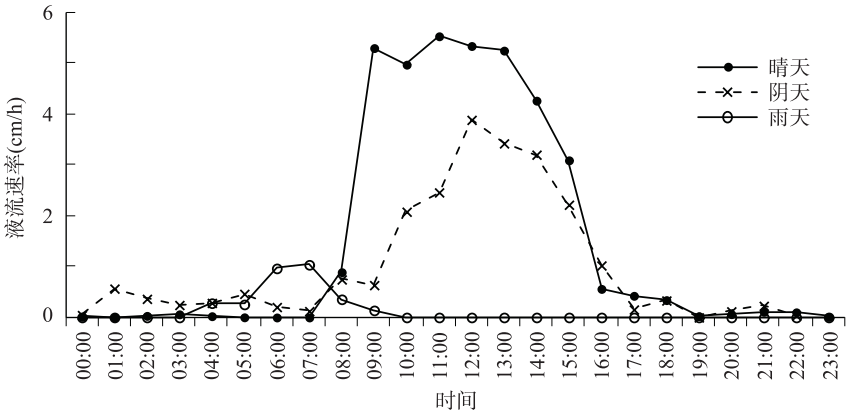

图 3　不同天气条件下的糖槭树干液流日变化特征

Fig. 3 Characteristics of *A. saccharum* sap flow in sunny, cloudy, and rainy days

3.3.2　不同天气条件下不同树体位置对树干液流速率的影响

不同位置的树干液流分配及日变化见图 4。晴天条件下,在树体的不同位置,其树干液流速率的峰值大小和到达峰值的时间均不相同;到达峰值的时间顺序为主干 > 小枝干 > 大枝干,峰值大小为主干 > 大枝干 > 小枝干。阴天条件下,不同树体位置的树干液流速率变化也呈单峰型,到达峰值时间为主干 > 大枝干 = 小枝干,峰值大小为大枝干 > 主干 > 小枝干。雨天条件下,主干树干液流速率变化呈单峰型,两侧枝树干液流为多峰型,其树干液流速率相对较低;其达到液流速率到达最大值的时间顺序为主干 > 大枝干 > 小枝干,峰值大小为主干 > 大枝干 > 小枝干。

3.4　不同环境因子对树干液流速率的影响

外界环境因子的波动在树体内部的液流变化上得到响应。整个非生长季内糖槭树干液流速率与环境因子的相关关系见表 3。与太阳辐射强度、空气温度极显著正相关,与空气湿度、土壤湿度极显著负相关。影响糖槭树干液流速率的环境因子排序为:

土壤湿度 > 空气温度 > 空气湿度 > 太阳辐射。

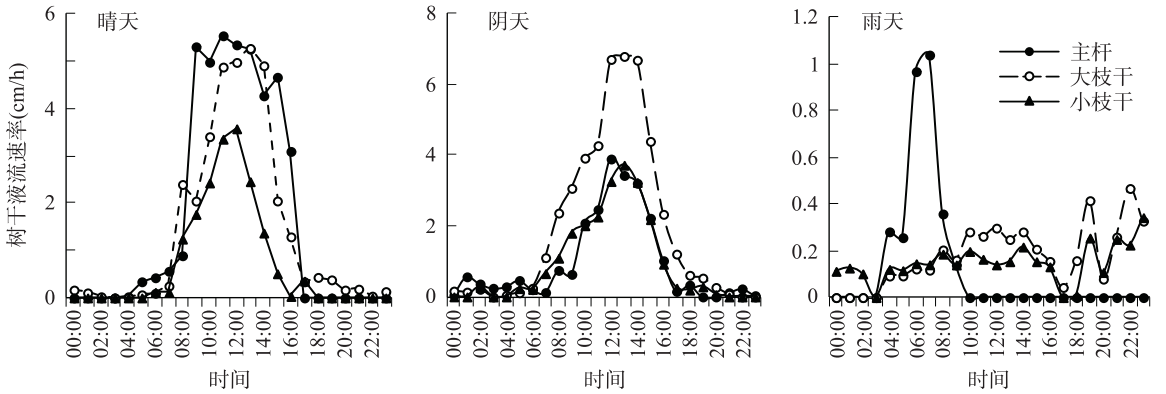

图 5 不同树体位置树干液流分配及日变化

Fig. 4 Distribution and diurnal variation of the sap flow in different tree positions

表 3 糖槭树干液流速率与环境因子相关分析

Tab. 3 Correlation analysis between *A. saccharum* the sap flow and environmental factors

项目		太阳辐射	空气温度	空气湿度	土壤湿度
液流速率	Pearson Correlation	0.050**	0.065**	-0.051**	-0.293**
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000	0.001	0.000

注：**P < 0.01；N = 4185；Pearson Correlation 相关系数；Sig.（2-tailed）-P 值（双侧）

4 讨论

糖槭树干液流速率昼夜变化特征都呈现“昼高夜低”。赵培强[11]等对华南地区常见树种的树干液流速率在干湿季变化其日变化格局均为“昼高夜低”变化格局。这主要是受光合有效辐射的影响，在不同的地域，不同树种的树干液流速率均呈现此种变化趋势。糖槭树体不同位置均存在大小不同的夜间树干液流速率，夜间液流主要用于夜间补水、夜间蒸腾和养分运输，以维持自身水分平衡[12,13]。晴天条件下不同树体位置糖槭树干液流速率均呈单峰曲线，这与柳杉[14]、枸杞[15]、木荷[16]、荔枝[17]和云杉[18]的晴天液流曲线变化趋势一致，均呈单峰曲线。糖槭树干液流在晴天，液流启动时间早，持续时间长，液流量大，变化幅度也大，阴天和雨天的液流量变化相差不大，启动时间晚，持续时间短，且雨天液流量变化幅度最小，液流量相对稳定。原因在于雨天时太阳辐射较弱，空气湿度相对较大，气温较低，糖槭蒸腾作用与晴天相比较弱，其树干液流量相对稳定，变化幅度较小。

糖槭月平均树干液流速率变化均为下降趋势，与叶面积指数的季节变化有很大关系[19]。9 ~ 11 月变化较明显，主要是因为 9 ~ 11 月内糖槭落叶速度快，叶面积指数快速下降，同时日照时间变短，气温逐渐降低，雨雪天气增多，因而导致蒸腾作用变小，树干液流速率随之变小，减小到较低水平后开始进入休眠状态。12 ~ 2 月份内基本保持不变，是因为糖槭叶片完全凋落进入休眠期，存在少量液流速率维持自身水分平衡及养分运输。1 月份的液流出现回升，这为新芽萌发运输营养，也可能是 1 月份天气开始回暖，维持自身水分平衡的需求增加。

糖槭树干液流速率受太阳辐射强度、空气温度、空气湿度、土壤湿度等环境因子的显著影响。糖槭树干液流均与太阳辐射呈极显著正相关，因为太阳辐射强度增加叶片气孔导度增大，树木树冠蒸腾量增大，树干液流量也随之增大。糖槭树干液流与空气温度呈极显著正相关，空气温度升高，水分汽化速度加快，蒸腾速率加快，树干液流速率随之加快，而空气温度随太阳辐射强度的升高而升高。与空气湿度呈极显著负相关，空气湿度的增加，水气压随之增加，使叶片周围水气压与叶片内部水气梯度减小，水分汽化速度减弱，树干液流速率随之减弱。土壤湿度对植物生长的影响主要表现在影响其呼吸作用和蒸腾作用，当土壤湿度在一定合适范围内，植物正常生长；当土壤湿度过高时，会引起气孔关闭，迫使蒸腾作用停止，而光合速率不受影响；当土壤湿度过低时，植物根系水分吸收会受到抑制，引发植物水分亏缺，进而导致气孔关闭避免水分继续亏缺[15]。本研究中，非生长季内叶片凋落导致的树木蒸腾降低，因此糖槭树干液流速率也与根部土壤湿度表现出极显著的负相关关系。 （下转第 43 页）

[6] 斯塔罗娃 H B. 杨柳科育种[M]. 马常耕,译. 北京:科学技术出版社,1984.
[7] Ronald W G. Intersectional hybridization of populus sections,leuce – aigeiros and leuce tacamahaca[J]. Silvae Genet,1982,31:94 ~ 99.
[8] 徐纬英. 杨树[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社,1988.
[9] 张绮纹,苏晓华. 克服杨树远缘杂交受精前障碍的研究[J]. 林业科学研究,1988(2):201 ~205.
[10] 吴鸿锦,刘志光,韩克展,等. 新杂交种沙毛杨的选育[J]. 北京林业大学学报,1996,18(3):48 ~53.
[11] 张金凤,朱之悌,张志毅. 黑白杨派间杂交试验研究[J]. 北京林业大学学报,1999,21(1):6 ~10.
[12] 张金凤,朱之悌,张志毅等. 中介亲本在黑白杨派间杂交中的应用[J]. 北京林业大学学报,2000,22(6):35 ~38.
[13] 庞金宣,郑世锴,刘国兴等. 窄冠型杨树新品种的选育[J]. 林业科学通讯,2001(4):8 ~9.
[14] 高建社. 黑杨与白杨远缘杂交技术的研究[D]. 西北农林科技大学,2005.
[15] 葛颂,王海群,张灿明,等. 八面山银杉林的遗传多样性与群体分化[J]. 植物学报,1997,39(3):266 ~271.
[16] 彭儒胜,赵鑫闻,王胜东,等. 美洲黑杨与胡杨杂交及其杂种子代亲子鉴定[J]. 辽宁林业科技,2013(5):1 ~4.
[17] 杨成超. 银白杨 × 白榆亲子鉴定及子代利用研究[D]. 中国林业科学研究院,2005.
[18] 张妍,杨成超,冯连荣,等. 杨树远缘杂交障碍克服及亲子鉴定技术研究进展[J]. 辽宁林业科技,2015(3):55 ~58.
[19] 赵鑫闻. 利用花粉管通道技术奖外源银白杨 DNA 导入黑杨[J]. 植物学报,2016,51(4):533 ~541.

(上接第 28 页)

参考文献:

[1] Jasechko S,Sharp Z D,Gibson J J,et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. Nature,2013,496(7445):347.
[2] Ortuno M F,Garciaorellana Y,Conejero W,et al. Stem and leaf water potentials,gas exchange,sap flow,and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees[J]. Trees,2006,20(1):1 ~8.
[3] 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,2016,30(5):98 ~105.
[4] Ballester C,Castel J,Testi L,et al. Can heat – pulse sap flow measurements be used as continuous water stress indicators of citrus trees? [J]. Irrigation Science,2013,31(5):1053 ~1063.
[5] Steppe K,Vandegehuchte M W,Tognetti R,et al. Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning[J]. Tree Physiology,2015,35(4):341 ~345.
[6] 许易梅. 复叶槭(糖槭)的应用现状及发展前景的综合评价[D]. 东北林业大学,2004.
[7] 闻婧,张俊,孟力力,等. 夏季遮光对糖槭光合特性和叶绿素荧光动力学特征的影响[J]. 江苏农业科学,2015(8):189 ~190.
[8] 马艳丽,王鹏. 糖槭的应用价值与栽培技术[J]. 黑龙江农业科学,2013,(5):154 ~155.
[9] 赵宏. 糖槭叶化学成分及抗氧化、抗炎活性研究[D]. 佳木斯大学,2008.
[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.
[11] 赵培强,赵平,牛俊峰,等. 华南地区常见树种导管特征与树干液流的关系[J]. 热带亚热带植物学报,2014,(6):537 ~548.
[12] 赵春彦,司建华,冯起,等. 胡杨夜间液流通量及其影响因子研究[J]. 干旱区研究,2015,32(6):1173 ~1180.
[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[J]. 林业科学,2006,42(7):21 ~27.
[14] 蒋文伟,杨广远,赵明水,等. 天目山柳杉树干液流的昼夜及季节变化[J]. 南京林业大学学报自然科学版,2012,36(5):77 ~80.
[15] 徐利岗,苗正伟,杜历,等. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素[J]. 生态学报,2016,36 (17):5519 ~5527.
[16] 周翠鸣,赵平,倪广艳,等. 广州地区木荷夜间树干液流补水的影响因子及其对蒸腾的贡献[J]. 应用生态学报,2012,23(7):1751 ~1757.
[17] 凡超,邱燕萍,李志强,等. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J]. 生态学报,2014,34(9):2401 ~2410.
[18] 万艳芳,于澎涛,刘贤德,等. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异[J]. 生态学报,2013,37(9):1771 ~1778.
[19] 常学向,赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化[J]. 生态学报,2004,24(7):1436 ~1441.