

孙立,董晓华,陈敏,等.柑橘树液流变化规律及其影响因素[J].江苏农业科学,2015,43(4):175-179.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.04.063

柑橘树液流变化规律及其影响因素

孙立¹,董晓华^{1,2},陈敏¹,龚兰强³

(1.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443000; 2.水资源安全保障湖北省协同创新中心,湖北武汉 430072;
3.中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州贵阳 550081)

摘要:介绍了热平衡茎流计的原理,以宜昌市柑橘树为原料,通过野外盆栽试验,应用包裹式茎流计和便携式气象仪分别测量了柑橘树茎液流的日变化和同期的气象变化过程,并用 Stata 软件对树茎液流与主要气象因子的关系进行了相关分析。结果表明:(1)柑橘树茎液流速率在晴天多云和阴天的变化均呈现多峰曲线,白天变化比较明显,夜间由于没有辐射且温度低、湿度大,几乎没有液流;(2)柑橘树液流速率与太阳净辐射、大气温度、土壤温度呈正相关,而与大气相对湿度和瞬时风速呈负相关,其中太阳净辐射和大气温度为主要影响因子,大气相对湿度次之,土壤温度和瞬时风速与柑橘植株液流速率的相关性很小,可以忽略;(3)柑橘树蒸腾速率与液流速率的决定系数达到了 0.886,表明用包裹式茎流计测定的液流量来估计蒸发蒸腾量是有效可行的。

关键词:包裹式茎流计;柑橘树;液流规律;影响因素

中图分类号: S666.201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)04-0175-05

蒸腾作用是植物耗水的主要方式,在土壤—植物—大气连续系统 (SPAC) 的水热传输过程中占有非常重要的地位,一直是农学、林学、气象学、水文学、生态学等相关学科及领域共同关注的重要课题之一^[1]。植物蒸腾作用是一个复杂的过程,既受自身形态结构及生理过程的影响,又受周围环境的影响,

因此其测量一直是难题。测定植物蒸发蒸腾量的方法主要有称重式蒸渗仪法^[2]、水量平衡法、能量波文比法^[3]等,但它们只是计算植物的总蒸散量,无法将植物蒸腾与土壤的蒸发分开;此外,还有快速称重、地膜覆盖、茎流法等测量方法。近年来,利用包裹式热平衡茎流计法测定植物蒸腾过程的应用越来越广泛。茎流计^[4],又称树液仪,是通过加热植物茎秆来测量液流速率进而计算植物蒸发蒸腾量的一种仪器。

包裹式热平衡茎流计测定法由 Sakuratani 提出,后经 Baker 等改进^[5]。该方法 2 个最大的特点是不需要标定和不需要将温度传感器插入茎秆中便可直接测量。目前,国内外已经有不少对包裹式热平衡茎流计的应用研究,如国外 González-Altozano 等将包裹式热平衡茎流计应用于桃树的蒸

收稿日期:2014-12-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:40701024);三峡大学硕士学位论文论文培优基金(编号:2014PY005)。

作者简介:孙立(1988—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:m15071797870@163.com。

通信作者:董晓华,博士,教授,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:xhdong@ctgu.edu.cn。

[2]许美玲,赵立红,段玉琪,等.抗 TMV 烟草种质资源材料的筛选和综合评价[J].植物遗传资源学报,2004,5(2):142-146.

[3]刘旭,万宣伍,刘国军,等.3种药剂对烟草花叶病的控制作用及农艺性状的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2010,35(1):101-104.

[4]张满江,成巨龙,安德荣.影响陕西烟草蚜传病毒病发生因子的研究[J].中国烟草学报,2000,6(3):28-32.

[5]蔡健和,周兴华,黄福新,等.广西烟草病毒病发生相关因素分析及综合防治研究[J].广西农业科学,2009,40(2):159-163.

[6]翟海枝,高芳莹,沈建国,等.抗 TMV 的植物筛选及提取条件对抗病毒物质活性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(7):45-49.

[7]McGrath M T, Shishkoff N. Evaluation of biocompatible products for managing cucurbit powdery mildew[J]. Crop Protection, 1999, 18(7):471-478.

[8]杨海艳,谢雪梅,王波,等.纳米银对烟草病毒的体外抑制作用[J].贵州农业科学,2011,39(11):112-114.

[9]杨海艳,王福超,王浩华,等.纳米银对烟草花叶病毒的抑制作用及烟草酶活性的影响[J].江苏农业科学,2012,40(2):87-89.

[10]江兰,郑飞,冷鹏飞,等.纳米农药的研究进展[J].广东农业科学,2010,37(5):97-100.

[11]薛玉英,唐萌.纳米银生物学效应研究进展[J].东南大学学报:自然科学版,2009,39(6):1315-1320.

[12]向冬喜,郑丛龙.纳米银抗病毒作用的研究进展[J].大连医科大学学报,2009,31(6):716-719.

[13]杨楠,徐翠莲,杨国玉,等.壳寡糖希夫碱金属配合物的合成及其对烟草花叶病毒的抑制活性[J].农药学学报,2010,12(1):31-36.

[14]饶荣莲.浅析烟草花叶病的综合防治技术[J].福建农业科技,2011(2):51-52.

[15]李正,解昌盛,向永光,等.2011年巫溪烟区烟草普通花叶病发生规律及防治研究[J].河南农业科学,2012,41(11):96-99,106.

[16]李学卫,丁铭,阮红艳,等.丽江烤烟漂浮育苗烟草花叶病毒检测及发生规律[J].云南农业大学学报,2011,26(增刊2):129-131,138.

[17]汪代斌,辛静,王晗,等.烟草花叶病发生规律及生物源抗病毒研究进展[J].湖北农业科学,2011,50(11):2174-2176,2186.

发蒸腾量测定^[6],国内彭致功等先后将该法应用于单株植物,如番茄、灌木植物、玉米及葡萄的蒸腾规律的测定^[7-11],并取得了较为理想的结果。关于使用茎流计测量单株柑橘植株蒸腾的研究相对较少。柑橘树作为一种重要的经济作物,关于其蒸腾规律及水分利用效率的研究对农业节水灌溉具有十分重要的作用。

本研究采用包裹式茎流计法,对盆栽单株柑橘树的蒸腾过程进行了测量,研究单株柑橘树的蒸腾规律及其与主要影响因素之间的关系。

1 包裹式热平衡茎流计原理

当茎流计的热源以恒定功率(P_{in})作用于植物茎秆后,传输给茎秆液流的能量在不考虑茎秆本身热容量的情况下可以分解为 3 个部分(图 1):一部分用于与垂直方向上的液流进行热交换(Q_v),一部分以辐射的形式向四周散失(Q_r),另一部分则随茎秆内水流的上升而向上传输(Q_t)。

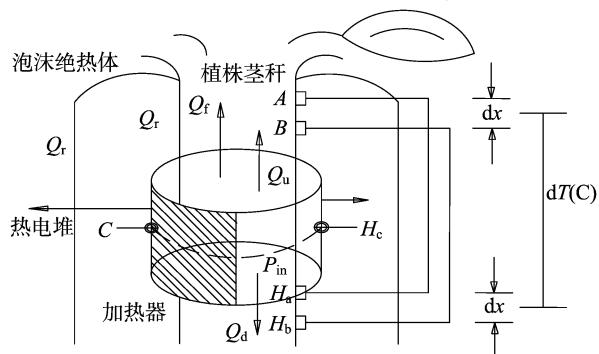


图1 包裹式茎流计传感器结构

其能量平衡表达式^[12-13]为:

$$P_{in} = Q_v + Q_r + Q_t \quad (1)$$

其中 $P_{in} = U^2/R$ (欧姆定律)。其中 U 为电压, V ; R 为电阻, Ω 。

用于垂直方向上热交换部分的能量 Q_v 可以分为向上热交换(Q_u)与向下热交换(Q_d)2 部分,表达为:

$$Q_v = Q_u + Q_d; \quad (2)$$

$$Q_u = k_{st} \cdot A \cdot dT_u/dx; \quad (3)$$

$$Q_d = k_{st} \cdot A \cdot dT_d/dx \quad (4)$$

式中: k_{st} 为茎秆的热传导特性 [$W/(m \cdot K)$]; A 为茎秆的横截面积 (m^2); dT_u/dx 为向上热传导的温度梯度 ($^{\circ}C/m$); dT_d/dx 为向下热传导的温度梯度 ($^{\circ}C/m$); dx 为测定温度梯度时 2 个热电偶接点之间的距离 (m)。

以辐射形式向四周散发的能量部分可用下式计算:

$$Q_r = k_{sh} \cdot CH \quad (5)$$

式中: k_{sh} 为护套的导电性 (W/mV); CH 表示 $C - H_c$ 处的电压差 (mV)。通过求解零流率 (即 $Q_t = 0$) 时的式(1)而确定:

$$k_{sh} = \frac{P_{in} - Q_v}{CH} \quad (6)$$

将以上计算得到的各项数值以及测定的温度增量值、水的热容量代入公式(1),并加以变换,可得到茎秆中液流通量的计算公式:

$$F = \frac{P_{in} - \frac{k_{st} \cdot A (dT_u + dT_d)}{dx} - k_{sh} \cdot CH}{C_p \cdot dT} \quad (7)$$

式中: C_p 为水的比热 [$J/(g \cdot ^{\circ}C)$]; dT 为上下 2 个温度监测点间茎秆水流温度的变化值 ($^{\circ}C$); $dT = (AH + BH)/2$ ($^{\circ}C$), 其中 AH 、 BH 分别为 $A - H_a$ 、 $B - H_b$ 的温度变化值。

2 材料与方法

试验区位于湖北省宜昌市三峡大学水文试验中心,该站位于 $111^{\circ}19'E$ 、 $30^{\circ}42'N$ 。试验地四季分明,春秋较长,雨水丰沛且多在夏季,属亚热带季风性湿润气候。全年日照时间为 $1\,261 \sim 1\,745$ h,平均海拔为 79.9 m,年平均降水量为 $992.1 \sim 1\,404.1$ mm。较长的降水过程都发生在 6—7 月,雨热同季,全年积温较高,无霜期较长,年平均气温为 $13.1 \sim 18.0$ $^{\circ}C$ 。

2.1 试验材料

供试柑橘树取自湖北省宜昌市秭归县茅坪镇柑橘园,该类果实具有果大无核、皮薄、色鲜、肉脆汁多,以及味甜而浓、质脆化渣、富有香气的特点。试验所用花盆的顶部直径为 50 cm,底部直径为 28 cm,高度为 30 cm。盆中土壤全部取自橘园内的原状土,经试验测定为沙壤土。

2.2 试验方法

2.2.1 试验仪器 SF-DL2 包裹式热平衡茎流测量系统 (DL2 数据采集器产于英国,液流测定传感器由美国 Dynamax 公司生产);FSR-4 便携式气象数据采集系统,由锦州阳光气象科技有限公司生产;监测的主要气象因子为:太阳辐射 (W/m^2)、大气温度 ($^{\circ}C$)、大气相对湿度 (%)、土壤温度 ($^{\circ}C$)、风速 (m/s);ES60KX1 系列高精度大称量电子天平,由沈阳神宇龙腾天平有限公司生产,量程为 60 kg,精度为 0.5 g;清华同方笔记本电脑,由北京赛格数码科技有限公司生产。

2.2.2 测定植株的预处理 试验前选择有代表性的柑橘植株移栽至花盆中并进行维护,让其正常生长,主要是适时适量地浇水,一般选择早上或晚上浇水。为了让其更好吸收阳光,盆栽中柑橘树叶朝向为东南方向。安装茎流计传感器时,先用游标卡尺测量植株茎秆的直径并记录读数,然后在打磨好的安装区涂上 G4 油脂。

2.2.3 选择并安装传感器 本试验采用美国 Dynamax 公司生产的 SGA13-WS 型号传感器。将传感器小心地安装在被测区,包裹好绝缘、防辐射铝箔材料,最后用塑料薄膜密封以防止雨水进入。安装好后将数据馈线与数据采集器 (DL2 Logger) 连接,接通电源并设置数据采集间隔为 30 min。仪器测得的液流速率单位为 g/h 。

2.2.4 电子天平、气象仪安装 试验开始前 0.5 h,启动天平开始预热。安装好包裹式传感器后,给盆栽覆盖 1 层保鲜膜,然后移至到天平上。设置天平、气象仪数据采集间隔为 30 min,测定时间与茎流计同步。测定时间:2014 年 6 月 9 日 20:00 至 2014 年 6 月 12 日 20:00。

2.3 数据采集与处理

将笔记本电脑和数据采集器连接,定期用笔记本电脑采集资料。利用 Microsoft Office Excel 2003 软件绘图,利用 Stata 软件对柑橘树液流速率与主要气象因子的关系做回归分析。

安装好传感器后就可以开始测量,本试验柑橘树液流监测和盆栽周围的气象因子监测过程见图 2、图 3。



图2 柑橘树液流速率测定



图3 盆栽周围气象因子测定

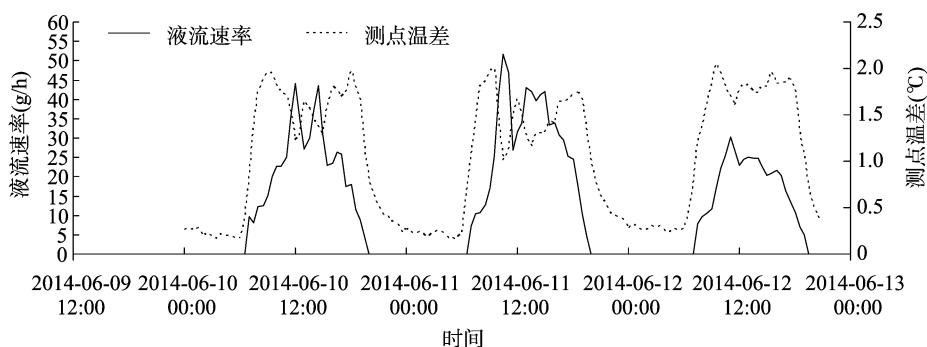


图4 液流速率与测点温差的日变化过程

3.2 植株液流速率与气象因子的关系

液流速率与太阳净辐射的日变化过程见图5。从图5可以看出,两者白天的变化趋势基本一致,但液流速率在07:00—07:30开始上升,净辐射变化在08:00—09:00才开始为正值并上升;晴天多云和阴天环境相比,液流速率与净辐射变化趋势吻合度有一些区别,阴天由于辐射强度波动不如多云天气明显,液流速率与净辐射变化的趋势吻合度更好。夜晚由于只有地面长波辐射,导致净辐射为负值,基本趋于稳定;05:00—05:30开始,随着地上部分太阳净辐射越来越强,净辐射也开始迅速上升,12:00—14:00达到最大值,其间出现多次波动,20:00左右下降至最小值。从图6可以看出,柑橘树液流速率与大气温度、土壤温度(15 cm深度)呈正相关,而与大气相对湿度呈负相关;从图7可以看出,柑橘树液流速率与瞬时风速的相关度很差,说明风速对柑橘树蒸腾速率的

3 结果与分析

3.1 单株柑橘树液流变化规律

从图4可以看出,单株柑橘树的液流速率有明显的日变化趋势。6月10日和6月11日,液流日变化过程为多峰曲线,夜晚由于没有辐射、温度低、湿度大等原因,植株大部分叶片气孔关闭,几乎没有液流量。07:00以后,随着太阳辐射增强,温度升高,液流速率急速增加,12:00左右第1次达到最大值,随后出现上下波动现象,连续2 d均在14:30左右最后1次达到较大值;之后随着太阳辐射的减弱,液流速率也快速下降,19:30只有很小的液流,20:00达到最小值。6月12日,液流速率在07:30以后开始迅速增加,11:00达到最大值,随后开始下降,12:00—14:00时段内由于辐射强度变化不明显,液流速率趋于稳定,之后呈下降趋势,16:00后迅速下降。从图中还可以看出,同一柑橘植株连续几天液流和测点温差的变化情况:柑橘植株液流过程呈明显的昼夜变化规律,白天液流以骤升骤降变化方式进行,夜晚则几乎为零;测点温差变化趋势类似于植株液流变化,但是白天温差变化启动时间早于液流变化,结束时间晚于液流变化,晚上温差变化趋于稳定。由此说明,植株茎秆对输入的热量有一定的储存作用^[14-17]。6月10日和6月11日为晴天,12日为阴天,晴天与阴天液流变化趋势基本相同,但阴天白天中间时段植株液流速率下降趋势更为缓慢。

影响很小,可以忽略。

为了进一步分析植株液流速率与各气象因子的相关关系,利用Stata软件对其进行回归分析,并建立柑橘植株液流速率与各气象因子的数量关系如下:

$$T_r = 6.651 + 0.096R_n, r^2 = 0.834; \quad (8)$$

$$T_r = -65.75 + 2.623T_E, r^2 = 0.806; \quad (9)$$

$$T_r = 53.14 - 0.738RH, r^2 = 0.696; \quad (10)$$

$$T_r = -29.73 + 1.337T_s, r^2 = 0.158; \quad (11)$$

$$T_r = 14.07 - 4.204v, r^2 = 0.013; \quad (12)$$

$$T_r = 10.98 + 0.017R_n + 2.295T_E - 0.309RH - 1.614T_s + 0.683v, R^2 = 0.952. \quad (13)$$

式中: T_r 为柑橘树液流速率(g/h); R_n 为太阳净辐射(W/m^2); T_E 为大气温度($^{\circ}C$); RH 为大气相对湿度(%); T_s 为

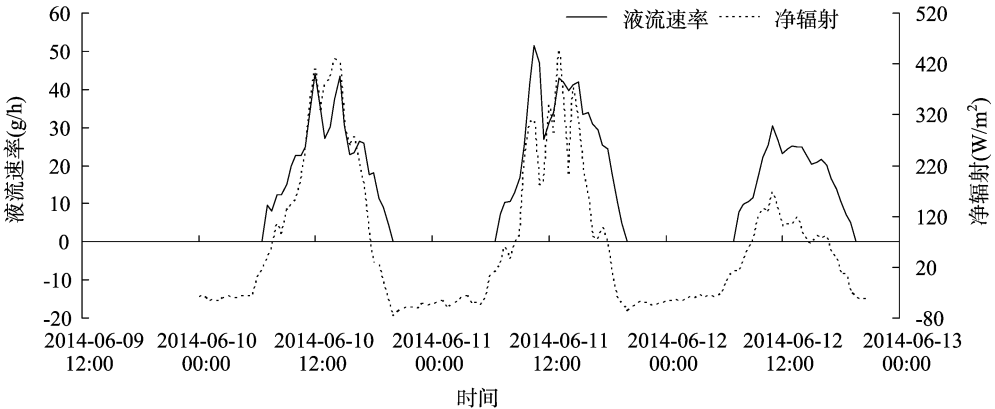


图5 液流速率与太阳净辐射的日变化过程

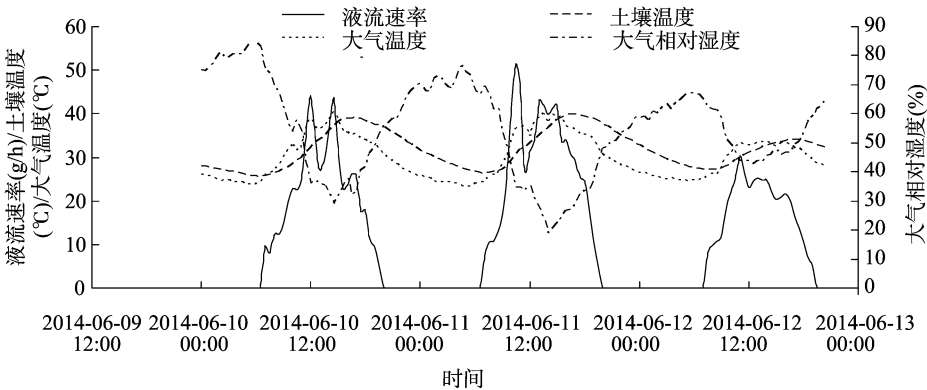


图6 液流速率、土壤温度、大气温度及相对湿度的日变化过程

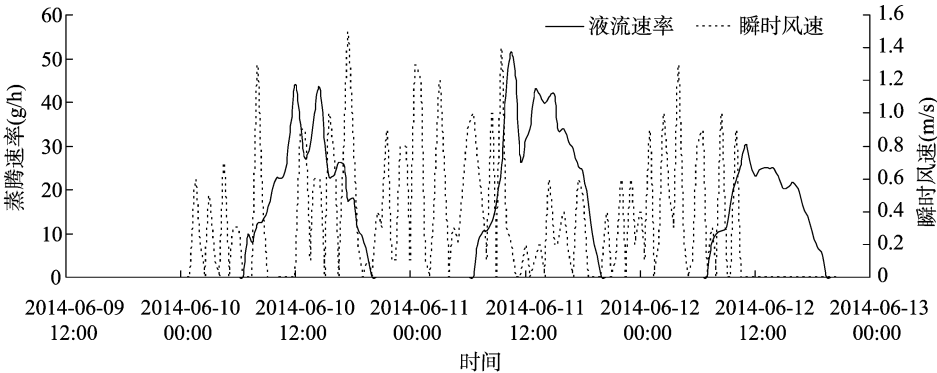


图7 液流速率与瞬时风速的日变化过程

15 cm 深度处土壤温度(℃); v 为瞬时风速(m/s)。

回归分析结果,柑橘植株与各气象因子的综合线性相关系数达到了 0.952,利用公式(13)预测柑橘树的蒸腾过程;其液流速率与太阳净辐射、大气温度、土壤温度呈正相关,而与大气相对湿度和瞬时风速呈负相关;其中太阳净辐射、大气温度为主要影响因子,大气相对湿度次之,土壤温度、瞬时风速与柑橘植株液流速率的相关性很小,可以忽略。

3.3 植株液流速率与蒸腾速率的回归分析

茎流计是根据能量平衡原理,通过数采内部程序计算植株茎秆内的液流量,而由于茎秆内的液流水分几乎全部用于植物蒸腾,所以植株蒸腾量近似等于植株液流量。天平称重法是传统的测量蒸散的方法,为了规避土壤蒸发的影响,试验过程中用塑料薄膜覆盖在盆栽表面,所以其测定的是柑橘树的蒸腾量。将天平测定的柑橘树蒸腾速率(y)与茎流计测定

的柑橘树液流速率(x)进行回归分析,得到:

$$y = 1.032 5x + 1.283 1, r^2 = 0.886. \tag{14}$$

柑橘树蒸腾速率与液流速率的决定系数达到了 0.886,说明用包裹式热平衡茎流计测定的液流量来估计其蒸腾量是可行的。从图 8、图 9 可以看出,天平测定结果的整体趋势与茎流计测定结果基本一致,但是天平测量的结果出现了上下波动的情况,可能是因为野外测量时风速的影响,晚上由于风速变化比白天更大导致波动更加明显。

4 结论与讨论

本研究利用包裹式热平衡茎流计测量盆栽柑橘树液流变化过程,并用传统的天平称重法对其进行标定,同时通过 Stata 软件对测定的液流速率与主要气象因子做回归分析,探讨柑橘树液流规律及其与各因子的相关关系,得出如下主

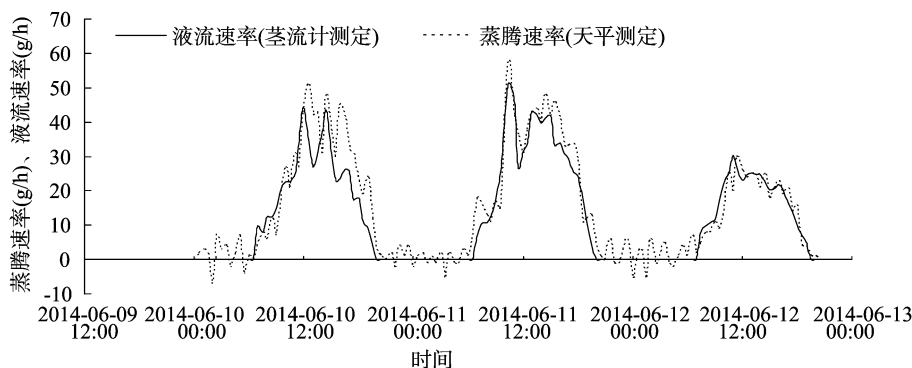


图8 蒸腾速率与液流速率的日变化过程

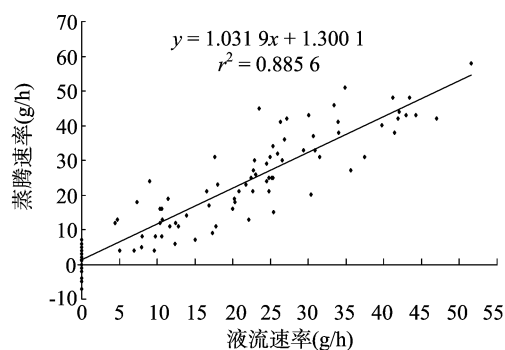


图9 蒸腾速率与液流速率的相关关系

要结论:(1)柑橘树茎液流速率在晴天多云和阴天的变化过程均呈现出多峰曲线形式,白天变化比较明显,夜间几乎没有液流。(2)柑橘树液流速率与太阳净辐射、大气温度、土壤温度呈正相关,与大气相对湿度、瞬时风速呈负相关;其中,太阳净辐射、大气温度为主要影响因子,大气相对湿度次之,土壤温度、瞬时风速与柑橘植株液流速率的相关性很小。(3)柑橘树蒸腾速率与液流速率的决定系数达到了 0.886,说明用包裹式茎流计测定的液流量来估计其蒸发蒸腾量是有效可行的。柑橘植株与各气象因子的综合相关系数达到了 0.952,因此可以利用公式(13)预测柑橘树的蒸腾。

如要更加深入地探讨柑橘树液流规律,还有许多工作要做,如利用正交试验通过控制变量的方法来研究柑橘树液流量与单个气象因子的关系,通过缩短数据采集器记录时间间隔,以期得到更加精细的监测数据,从而分析柑橘树白天液流变化的详细过程,为柑橘树的节水利用提供理论指导。

参考文献:

- [1] 孟平,张劲松,王鹤松,等. 苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系[J]. 生态学报,2005,25(5):1074-1079.
- [2] 陈建耀,刘昌明,吴凯. 利用大型蒸渗仪模拟土壤-植物-大气连续体水分蒸散[J]. 应用生态学报,1999,10(1):45-48.

- [3] 强小曼,蔡焕杰,王健. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比[J]. 农业工程学报,2009,25(2):12-17.
- [4] 龙秋波,贾绍凤. 茎流计发展及应用综述[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):18-23.
- [5] Steinberg S, van Bavel C H, McFarland M J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1989, 114(3): 466-472.
- [6] González - Altozano P, Pavel E, Oncins J, et al. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(5): 503-515.
- [7] 彭致功,段爱旺,刘祖贵,等. 日光温室条件下茄子植株蒸腾规律的研究[J]. 灌溉排水,2002,21(2):47-50.
- [8] 彭致功,杨培岭,段爱旺,等. 日光温室条件下番茄植株蒸腾规律研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(1):62-65.
- [9] 金红喜,刘左军,王继和,等. 热平衡茎流计在荒漠灌木植物耗水研究中的应用[J]. 防护林科技,2004(6):9-13.
- [10] 聂文果,张昞明,徐先英,等. 玉米液流速率及耗水量研究[J]. 中国农学通报,2009,25(7):230-234.
- [11] 南庆伟,王全九,苏李君. 极端干旱区滴灌条件下葡萄茎流变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):60-67.
- [12] Ham J. Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow[J]. Agronomy Journal, 1990, 82(1): 147-152.
- [13] Weibel F, De Vos J. Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method[J]. Plant and Soil, 1994, 166(2): 203-219.
- [14] 龚道枝,康绍忠,佟玲. 分根交替灌溉对土壤水分分布和桃树根茎液流动态的影响[J]. 水利学报,2004,10(10):112-118.
- [15] 李瑞娟,刘文兆,王培榛. 春小麦蒸腾测定中茎流计的标定及其应用[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):79-82,93.
- [16] 刘浩,孙景生,段爱旺,等. 温室滴灌条件下番茄植株茎流变化规律试验[J]. 农业工程学报,2010,26(10):77-82.
- [17] Sakuratani T, Aoe T, Higuchi H. Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat balance method[J]. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(9): 1153-1160.