

# 黄土塬区苹果树干液流特征\*

王力 王艳萍

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 应用热扩散式树干茎流计(TDP)于2012年7~10月对黄土塬区长武县苹果树干液流速率进行了连续测定,分析了气象因子、土壤含水率等多个环境要素对树干液流的影响。结果表明,在晴天和阴雨天苹果树干液流速率变化均呈明显的昼夜变化单峰曲线,晴天液流启动早,停止晚,液流速率大;阴雨天液流启动晚,停止早,液流速率小。苹果树干液流速率与太阳辐射、水气压差、大气温度和相对湿度呈显著正相关,与空气相对湿度呈显著负相关,晴天条件下液流速率与各气象因子的相关关系比阴雨天条件下显著,且均可用线性表达式来估算。在不同的土壤水分环境条件下,苹果树干液流速率变化差异很大。水分胁迫条件下,全天液流速率水平较低,反映其蒸腾水平低;而水分充足条件下,液流速率的变化过程为一宽峰曲线,维持较高液流速率的时间较长,全天蒸腾水平高。

**关键词:** 苹果树干 液流速率 热扩散式探针 气象因子 土壤含水率 蒸腾

**中图分类号:** Q945.17; Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0152-07

## Characteristics of Stem Sap Flow of Apple Trees in Loess Tableland

Wang Li Wang Yanping

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** A thermal dissipation probe (TDP) was used to continuously measure the sap-flow rate of apple tree in Changwu county in loess tableland area of China from July to October, 2012. The effect of meteorological factors, soil moisture and other environment factors on sap flow was analyzed. The results showed that diurnal variation of the sap-flow rate of apple tree was a single peak curve in both sunny and rainy days. On sunny day, the sap-flow started more early and stopped more lately than on rainy day. The sap-flow rate of apple tree was positively correlated with solar radiation, vapor pressure deficit, atmospheric temperature and atmospheric relative humidity with a linear equation, and negatively correlated with air relative humidity. The dependency of sap-flow rate on various meteorological factors on the sunny day was more significant than on the rainy day. In addition, the sap-flow rate of apple tree varied distinctly in different environment conditions of soil moisture. Under the water stress condition, the sap-flow rate was significantly lower than that under the moist soil condition. The change of sap-flow rate showed a broad-peak curve, indicating that the transpiration was higher under the moist soil condition.

**Key words:** Apple trees Sap flow velocity Thermal dissipation probe Meteorological factors Soil water content Transpiration

### 引言

黄土塬区光照充足、温差大、通风好,是我国苹果最佳适生区之一,生产的苹果果面清洁,蜡质厚,着色鲜艳,硬度大,口味浓,耐贮存,货架期长,已被

国内外市场所公认,成为世界最大的苹果集中产区,其栽培面积和产量均为全国第一,目前苹果生产是该地区的主要经济来源之一。然而,该地区降水少且年内、年际分布不均,多年平均降雨量仅为 584 mm,年均蒸发量达 1 016 mm,潜在年水分亏缺量约

432 mm。加之苹果树蒸腾耗水作用强烈,地面蒸发大于降雨补给,造成苹果生长所需的水分供需矛盾十分突出,严重影响了苹果的产量和品质<sup>[1-2]</sup>。黄土塬区作为典型的旱作农业生产区,水分是限制作物生长的主要影响因子<sup>[3]</sup>。因此,研究该地区苹果树的蒸腾耗散特征,对于有限水资源条件下苹果发展的科学布局、制定科学合理的管理措施及充分挖掘苹果树生产潜力具有重要指导意义。

植物的蒸腾作用在植物生命过程中发挥着重要的作用<sup>[4]</sup>,蒸腾速率反映植物的水分胁迫及需水状况<sup>[5-6]</sup>。国内外研究表明,树木边材液流速率与气象因子<sup>[7]</sup>以及土壤水分密切相关<sup>[8]</sup>,通过研究树干液流与环境因子的相关关系,可以有效定量分析树木生长与蒸腾耗水的相互关系。热扩散探针法(Thermal dissipation probe, TDP),是在保持树木自然生活状态基本不变的条件下,将一对内置热电偶的探针插入具有水分传输功能的树干边材中,根据电热转换和能量平衡原理测定树干边材液流运移速率进而计算蒸腾量的方法<sup>[9]</sup>。因其具有能够在野外连续监测、时间分辨率高、对样木损伤较少、数据采集自动化等优点,在树木生理学、森林生态学和森林水文学的相关研究中得到了广泛应用。

本研究采用美国 DYNAMAX 公司生产的热扩散式(TDP)茎流计和自动气象站对苹果树干液流和环境因子进行同步观测,分析不同天气条件下气象因素和土壤含水率与树干液流速率的关系,进而分析苹果树水分运移规律,为提高果树水分利用效率、科学管理果园生态系统提供依据,为苹果园耗水量估算和耗水模型的建立提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武县城以西 12 km 的陕甘交界处(107°40'30"~107°42'30"E, 35°12'16"~35°16'00"N)王东沟小流域,是典型的黄土高塬沟壑区,塬面地势平坦,土层深厚,海拔 1 215~1 226 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。降水年际间变异大,最大年降水量为 813.2 mm,最小年降水量为 369.5 mm,多年平均降水量为 584.0 mm,且多集中在 7~9 月,占全年降水量的 54.9%。年平均蒸发量 1 016.0 mm,大于等于 10℃活动积温 3 029℃,年日照时数为 2 230 h,日照率 51%,年辐射总量为 4 837 kJ/m<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。试验果园土壤类型为粘黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,田间持水率为 21.1%,萎蔫系数为 8.8%,地下水埋深 50~80 m。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样地选择

试验苹果林地呈东西走向,长 70 m,宽 16 m,面积 1 120 m<sup>2</sup>,地势平坦,无灌溉。试验林为栽植 17 年生红富士苹果树,品种均一,长势一致,无病虫害。平均树高 3.5 m,平均冠幅 3 m,平均胸径 33 cm。株距 3.5 m,行距 4 m,林分密度 720 株/hm<sup>2</sup>,郁闭度为 0.58。果园定期进行病虫害防治,适时拉枝修剪和套袋,保墒追肥,定期清除杂草,果树生长管理措施在该区域具有代表性。

### 1.2.2 树干液流的测定

热扩散液流探针法利用热扩散原理,通过测定插入树干边材两根探针间的温差来计算平均液流速率。

Granier<sup>[9]</sup>定义了一个无量纲参数  $K$  用于消除液流速率为零时的温差,并建立了  $K$  与实际液流速率的关系,进而利用被测木的边材面积计算被测木的边材液流通量。

$$K = \frac{T_m - T_d}{T_d} \quad (1)$$

$$v = 0.0119K^{1.231} \quad (2)$$

$$Q = Av \quad (3)$$

式中  $T_m$ ——无液流时加热探针与参考探针的最大温差,℃

$T_d$ ——瞬时温差,℃  $Q$ ——液流量,kg/d

$v$ ——液流速率,cm/s

$A$ ——胸径处边材面积,cm<sup>2</sup>

本研究采用美国 Dynamax 公司生产的 FLGS-TDP 型插针式植物茎流计,所用的探针型号为 TDP-10 型,探针长 10 mm,探针头直径为 1.2 mm。试验林地内选择 8 株标准果树,用数据采集器 CR1000 型(Campbell Scientific, UN)和 PC 400 来调节茎流计的工作电压和检测热电偶,每 60 s 获取一次数据并记录每 0.5 h 的平均值,从 2012 年 7 月 16 日~2012 年 10 月 10 日进行连续不间断的测量。

### 1.2.3 环境因子的测定

气象数据均由位于距固定样地 50 m 处自动气象观测站连续监测而得,测定的指标主要有太阳总辐射  $R$ 、空气温度  $T$ 、相对湿度  $R_H$ 、风速  $v_w$  和降雨  $P$  等指标,每 1 h 记录一次。

为综合反映大气温度和相对湿度的协同效应,采用水汽压差  $V_p$  这一指标。其计算公式为

$$V_p = 0.611e^{17.502T/(T+240.97)}(1 - R_H) \quad (4)$$

为明确区分晴天和阴雨天气,本文利用日照百分率对天气情况进行划分,日照百分率大于等于 60% 记为晴天,小于 20% 记为阴天(监测到降雨时

即为雨天)。日照百分率为当地日照时数与可照时数的比值。根据 1981 年世界气象组织(WMO)第八届仪器和方法观测委员会规定<sup>[8]</sup>,日照时数由总辐射大于等于 120 W/m<sup>2</sup> 计算。可照时数计算式为

$$T_a = \arcsin \sqrt{\frac{\sin \left( 45^\circ + \frac{\varphi - \delta + \gamma}{2} \right) \sin \left( 45^\circ - \frac{\varphi - \delta - \gamma}{2} \right)}{\cos \varphi \cos \delta}}$$

式中  $T_a$ ——可照时数

$\varphi$ ——观测点纬度, (°)

$\delta$ ——赤纬, (°)  $\gamma$ ——蒙气差, 取  $\gamma = 34'$

以上参数均由自动气象观测站直接监测获取, 实际野外试验中, 自动气象站可以直接给出具体观测日是晴天、阴天或雨天。

#### 1.2.4 土壤含水率的测定

在林内矩形样地随机布置 6 个土壤含水率监测点。利用中子仪于每月 15 日和 30 日测定土壤含水率。根据调查以及试验观测情况, 苹果树根系的垂直分布主要集中在 0~60 cm 深度, 该区根系数量约占根系总数的 2/3, 60~120 cm 深度范围内根系分布数量较少, 约占根系总数的 1/3, 因此本试验土壤含水率测量深度为 200 cm。0~100 cm 土层按 10 cm, 100~200 cm 土层按 20 cm 记录读数一次, 并与容积密度结合, 求出每个土壤含水率监测点土壤容积含水率, 用 6 个测点数据的平均值来表示此一时期的土壤平均含水率, 并用土钻法校准 0~40 cm 土层所测得的数据。

#### 1.2.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 和 SPSS 17.0 统计分析软件对试验数据进行统计分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果树干液流速率与气象因素的关系

#### 2.1.1 不同天气条件下液流速率与气象因素日变化

为直观显示苹果树干液流速率与气象因子间的变化特征, 选取典型晴天(2012 年 8 月 9 日、9 月 15 日、9 月 22 日)和阴雨天(2012 年 8 月 23 日、8 月 24 日、9 月 3 日)树干液流数据与气象数据作图(图 1)。晴天和阴雨天气条件下苹果树干液流速率均呈明显昼夜变化规律, 白天高, 夜晚低, 呈单峰曲线。液流速率的日变化规律与太阳辐射强度、空气温度、水气压差的变化规律基本一致, 呈正相关; 而与相对湿度呈负相关。从图 1 中还可看出, 树干液流与太阳辐射、大气温度、水气压差的变化具有不同步性, 最高峰值较太阳辐射晚 0.5 h 左右, 较大气温度、水气压差最大值提前 0.5 h 左右。

晴天天气条件下, 早晨太阳辐射弱、大气温度

低、相对湿度高, 苹果树干液流小。随着太阳辐射由弱变强, 气温逐渐增高、空气相对湿度减小, 诱导苹果树叶片气孔张开, 气孔导度不断升高<sup>[10]</sup>, 光合与蒸腾逐渐增强, 产生的蒸腾拉力带动液流启动, 从 7:00 开始液流速率迅速上升, 在 12:00~13:00 时达到峰值约 23.0 cm/h, 日液流启动时间和峰值出现时间均滞后于太阳辐射约 0.5 h。由于气温和光照强度在正午达到最大, 植物受到的水分胁迫最大, 气孔张开度减小甚至部分关闭, 气孔阻力增大, 导致液流速率有所下降。随着光照减弱, 气孔张开度增加<sup>[11]</sup>, 气孔阻力减小, 液流速率回升, 但回升的幅度比较小。其后随着太阳辐射减弱, 大气温度降低, 叶内、外水气压差减小, 液流速率开始逐渐降低, 17:00 迅速下降, 在 20:00 降速变缓直到维持在较低水平, 约在 0~4 cm/h 范围内波动, 直至次日 7:00 又迅速上升, 全天平均液流速率为 8.24 cm/h。

而在典型阴雨天天气条件下, 太阳辐射弱, 大气温度相对较低, 空气湿度相对较大, 使得苹果树干液流速率明显低于晴天。液流速率在 9:00 迅速上升, 启动时间比晴天晚 2 h, 12:00 达到峰值 7.5 cm/h, 仅为晴天的 32.6%。19:00 达到较低值, 此后维持在 0~0.5 cm/h, 直到次日 9:00 液流速率又迅速上升, 全天平均液流速率为 1.78 cm/h, 仅为晴天的 21.6%。与白天相比, 夜间的液流速率很小, 但不为零, 此时的液流主要是由根压引起的, 用来补充树体由于白天蒸腾导致的水分亏缺, 且水分补充的主要时间段为前半夜<sup>[12]</sup>。

#### 2.1.2 液流速率与气象因素的相关分析

为了进一步分析不同天气条件下各气象因子对苹果树干液流速率的影响, 选取典型的 10 个晴天和 10 个阴雨天对树干液流速率与太阳辐射、空气温度、相对湿度、水气压差、风速等 5 个主要气象因子在小时尺度上的观测数据进行相关分析。液流速率为 8 株苹果树平均流速值。

结果表明, 不同天气情况下液流速率与主要气象因子的相关性均达到极显著, 其中与相对湿度呈显著负相关, 与其他 4 个气象因子呈显著正相关(表 1)。晴天和阴雨天气情况下液流速率与水气压差的相关性均最强, 且晴天条件下对各气象因子的相关程度要高于阴雨天。晴天时水气压差、相对湿度、空气温度、风速、太阳辐射对树干液流速率影响相关程度依次降低; 阴雨天时其相关程度随水气压差、相对湿度、太阳辐射、空气温度、风速顺序依次降低。

空气温度和太阳辐射在晴天和阴雨天对树干液流速率影响不同, 这可能是阴雨天气温相对低, 叶片生理活性低, 光合速率和蒸腾速率亦低。太阳辐射

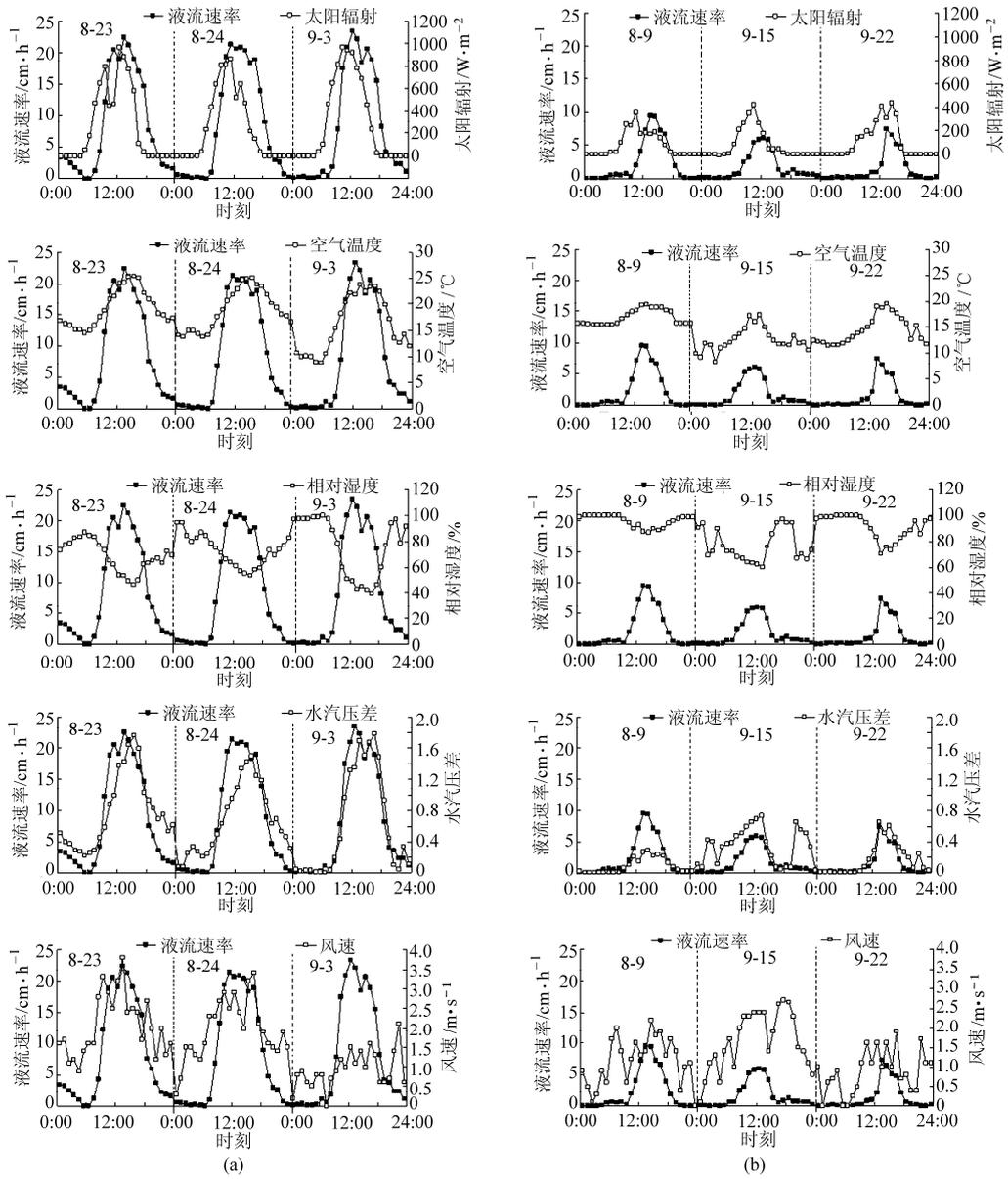


图 1 不同天气条件下苹果树干液流速率与各气象因子的日变化情况

Fig. 1 Diurnal changes of sap flow velocity of apple trees and meteorological factors under different weather conditions

(a)晴天 (b)阴雨天

表 1 不同天气条件下液流速率与气象因子的 Pearson 相关系数 (n = 240)

Tab. 1 Pearson correlation coefficient of sap flow rate to meteorological factors under different weather conditions

天气情况	空气温度	相对湿度	水汽压差	太阳辐射	风速
晴天	0.752 **	-0.816 **	0.902 **	0.627 **	0.684 **
阴雨天	0.559 **	-0.622 **	0.770 **	0.583 **	0.299 **

注：\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

是光合作用的驱动力,影响气孔的开放程度,进而影响到蒸腾作用的强弱,太阳辐射对蒸腾作用起着决定的作用。而晴天太阳辐射强,光照充足,叶片生理活性强,光合速率和蒸腾速率高,蒸腾拉力大。空气温度影响叶片气孔开放程度;同时,苹果树为了从土壤中吸水,必须要有足够大的根压,温度对根压起着决定性作用。

对晴天和阴雨天树干液流速率日变化与各气象

因子观测数据进行曲线估计拟合,选择拟合优度最高的模型列出(表 2)。树干液流速率与空气温度、相对湿度、水汽压差、风速之间为二次关系,与太阳辐射则为三次关系,并且,晴天时各气象因子对液流速率解释效果均优于阴雨天。

### 2.1.3 液流速率与多气象因子的复合分析

为了阐明多气象因子对苹果树干液流速率变化的复合影响,以液流速率为因变量,各气象因子(太

表 2 晴天、阴雨天树干液流速率日变化与  
各气象因子的关系模型

Tab.2 Empirical model for correlating microclimate and  
sap flow velocity in sunny day and rainy day

天气情况	气象因子	回归方程	决定系数
晴天	空气温度	$v = -0.317T^2 + 0.037T + 0.272$	0.614
	相对湿度	$v = -0.641R_H^2 + 0.002R_H + 43.267$	0.672
	水气压差	$v = 13.209V_p^2 - 0.890V_p - 0.370$	0.815
	太阳辐射	$v = 0.060R^3 + 9.037 \times 10^{-8}R + 2.929$	0.433
	风速	$v = 2.255v_w^2 + 1.259v_w + 0.884$	0.487
阴雨天	空气温度	$v = -2.463T^2 + 0.088T + 17.528$	0.444
	相对湿度	$v = 0.067R_H^2 - 0.002R_H + 9.499$	0.389
	水气压差	$v = 3.533V_p^2 + 10.283V_p - 0.306$	0.629
	太阳辐射	$v = 0.047R^3 + 3.342 \times 10^{-7}R + 0.701$	0.376
	风速	$v = 3.586v_w^2 - 0.819v_w - 0.375$	0.106

阳辐射、空气温度、相对湿度、水气压差、风速)为自变量,根据引入因子  $P_1 < 0.05$ ,剔除因子  $P_2 > 0.10$  的准则,利用多元线性逐步回归分析中自淘汰变量法,建立液流速率与气象因子的综合关系模型。不同天气情况下液流速率与气象因子的回归方程如表 3 所示。

表 3 不同天气条件下液流速率与气象  
因子的多元回归模型

Tab.3 Multivariable regression models of sap flow  
velocity and factors under different weather conditions

天气情况	回归方程	决定系数
晴天	$v = 11.966 V_p + 0.006R + 0.099R_H + 0.811v_w - 10.498$	0.865
	$v = 25.826V_p + 0.396R_H + 0.008R + 0.548v_w - 0.102T - 38.656$	
阴雨天		0.780

注:置信水平为 95%。

回归方程均达到了显著水平 ( $P < 0.01$ ),能较好地预测苹果树干液流速率变化与各气象因子变化的复合相关关系。从入选回归方程的气象因子可以看出,在这两种天气情况下,水气压差、相对湿度和大气辐射均是控制树干液流速度的主要因素。

## 2.2 不同土壤水分条件下苹果树干液流速率的变化规律

选取研究期内果园处于水分胁迫条件下的两个典型日(7月19日、10月1日)和无水分胁迫条件下的两个典型日(7月22日、8月22日)对树干液流速率进行对比。其中7月21日降水31.4 mm,8月17至8月21日降水21.8 mm。7月19日和10月1日的液流速率日变化过程反映了林地水分亏缺条件下苹果树的蒸腾变化特征,7月22日和8月22日的液流速率日变化过程反映了林地水分供应

相对充足条件下苹果树的蒸腾变化特征。从图2可以看出,林地水分亏缺和水分供应相对充足条件下苹果树的液流日变化存在一定的差异。在水分胁迫条件下(7月19日、10月1日),液流速率日变化为单峰型。7:00~8:00左右蒸腾速率开始缓慢上升,14:00左右液流速率出现峰值,分别为14.46 cm/h和12.00 cm/h,随后迅速下降。18:00左右液流速率变化缓慢,在20:00降速逐渐变缓直到维持在较低水平,至次日液流启动前达到最小值。全天平均液流速率分别为3.96 cm/h和3.54 cm/h。在无水分胁迫条件下(7月22日、8月22日)液流速率为一宽峰曲线,12:00到达峰值24.89 cm/h、26.14 cm/h后略有起伏变化,至16:00均保持在22.50 cm/h和26.00 cm/h左右,之后才开始持续下降。全天平均液流速率为8.38 cm/h和9.92 cm/h,是水分胁迫条件下全天平均液流速率的2~3倍。在大气温度和风速指标无明显差异的情况下,比较4个典型日的液流速率变化过程,可以看出,在无水分胁迫条件下,苹果树干液流速率维持在较高水平的时间长,即其蒸腾作用十分强烈,整个白天时段内液流速率上升和回降的变化均较为剧烈。可见,土壤含水率直接影响苹果树的蒸腾水平和蒸腾过程。

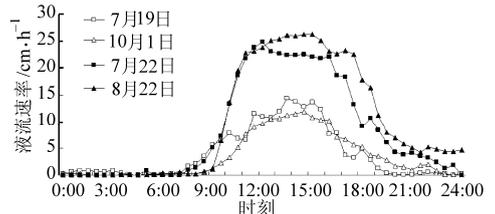


图 2 不同土壤含水率条件下苹果树干液流速率日变化  
Fig.2 Diurnal changes of sap flow velocity of apple trees  
under different moist soil conditions

## 3 讨论

苹果树干液流速率随太阳辐射日变化呈明显的规律性波动,但变化的进程并不与太阳辐射同步。树干液流的启动时间与太阳辐射较一致,随着辐射强度的增加,液流速率也明显增加,但液流速率到达峰值的时间较太阳辐射晚 0.5 h,这一现象证明液流对太阳辐射的响应约延迟 0.5~1 h<sup>[13]</sup>。在太阳辐射强度较高的时段,液流速率出现下降的现象,这可能是由于辐射强度过于强烈,气温较高,引起叶片气孔的关闭<sup>[11]</sup>,从而使得蒸腾速率下降,树干液流速率受到影响。总体来说,气象因子之间相互作用、相互制约,从而影响树干液流昼夜变化。太阳辐射强烈、空气温度高时,植物代谢活动强烈,蒸腾加强;空气相对湿度和植物的蒸腾是相互作用的过程,空气干燥时,空气相对湿度减小,水气压差变大,水势梯

度增加,植物蒸腾加强,使得空气相对湿度增加。风将气孔外的水蒸气带走,使更多干燥空气充盈在植物周围,减小叶片边界层阻力,进而影响树木的蒸腾,白天风速通常比夜晚大,树干液流速率的变化与其有一定关系。郑睿<sup>[8]</sup>等在研究不同天气条件下的葡萄植株耗水规律时则以日照百分率 60% 为界,对天气情况进行划分。两种天气情况下苹果树夜间均存在微弱的液流,且时断时续,这并不是因为植物在晚上仍存在蒸腾作用,可能是由于树木白天树冠蒸腾消耗过多的水分导致树体内储水减少,形成了叶片-冠-根的水势差,日落后气孔关闭,而植物体内的水势梯度并没有立即消失,从而推动推动树干中液流的流动,补充白天过度的水分蒸腾所造成的树干水分减少,形成夜间补偿流,使树干部位的水分储存得以恢复<sup>[14]</sup>。还有研究表明<sup>[15]</sup>,树体的主要蓄水部位为树冠和大枝条,树木在夜间仍有微弱的液流是由于夜间水流由根部上升至树冠贮存,为第二天的蒸腾做好准备。本文只分析了苹果树在晴天、阴雨天两种天气条件下的液流速率变化规律,没有充分考虑其他天气,如多云条件下的树干液流速率变化。因此,应确定不同天气条件的判定指标,同时完善各天气条件的判定标准。

气象因子是影响植物蒸腾作用的重要因素,在自然条件下,各气象因子并不是独立作用的,而是综合影响植物的蒸腾过程。很多研究表明,太阳辐射、水气压差与树干液流之间相关显著,可以解释树干液流的变化。曹文强等<sup>[16]</sup>对辽东栎的树干茎流进行研究得出,在晴天,影响树干茎流变化的主要气象因子为太阳辐射、空气温度和相对湿度,在阴天其主要影响因子为太阳辐射和空气湿度。孟平等<sup>[17]</sup>研究表明,在主要生长期,苹果树蒸腾速率与冠层净辐射、空气温度、湿度和风速等气象要素有很好的相关性,且影响苹果树蒸腾的最主要气象因子是冠层净辐射。张劲松等<sup>[18]</sup>研究表明,苹果单株日潜在蒸腾量与日饱和水气压差、叶面积指数具有较好的复相关关系。Cochard 等<sup>[19]</sup>认为太阳辐射是起到间接影响树干液流变化格局的因子,即太阳辐射增高,气孔导度增大,树干液流加快,对于针叶树,水气压差和气孔导度是控制蒸腾的基本因子。Granier 等<sup>[20]</sup>等研究热带雨林树干液流变化与环境因子的关系,得出树干液流与水气压亏缺的相关性高于太阳辐射和空气温度。而本文研究认为,在晴天和阴雨天气条件下,水气压差始终是苹果树干液流变化的最主要影响因子,与其结果一致。

土壤含水率是影响液流的另一个重要因素,土壤水分状况决定了树干液流的总体水平。很多研究

表明,蒸腾速率随着土壤含水率的下降而减少,气候因素对植物蒸腾影响的相关性远不如土壤含水率。Irvine 等<sup>[21]</sup>的研究表明,在各主要环境因子中,水分起绝对主导作用。Teskey 等<sup>[22]</sup>研究表明,树木蒸腾与土壤含水率、辐射、空气温度均有关,但土壤含水率占主导地位。徐先英等<sup>[23]</sup>认为干旱胁迫下植物液流速率日变化具有双峰或者多峰特性,存在“午休”现象。本文研究发现,由于 7 月 20 日之前较长一段时间没有降雨,使得果园处于干旱状态,苹果树干液流速率日变化呈现单峰型。Germak 等<sup>[24]</sup>研究得出树木在土壤水分胁迫状态下,蒸腾量减少。本文的测定分析结果表明,在不同土壤含水率条件下,苹果树的树干液流差异显著,在土壤水分充足条件下,其树干液流速率明显高于土壤水分供应不足条件下,且峰形加宽,这可能是由于降雨后林内相对湿度增高,导致叶片气孔导度增大,叶片蒸腾速率增大。这与郑睿等<sup>[8]</sup>在不同土壤含水率下,葡萄植株液流速率随着土壤含水率的降低而明显下降的研究结果一致。

## 4 结论

(1) 树干液流是植物蒸腾在拉力作用下产生的,因此树干液流的变化能够反映植物蒸腾作用的变化。苹果树干液流速率日变化在晴天和阴雨天条件下均呈明显的昼夜变化的单峰曲线。但由于受天气的影响,不同天气条件下苹果树干液流速率的日变化规律存在一定的差异。晴天液流启动早,停止晚,液流速率大;阴雨天液流启动晚,停止早,液流速率小。

(2) 每日的液流启动时间均比太阳辐射晚约 0.5 h,证明了太阳辐射对树干液流速率的影响有时滞效应。两种天气情况下苹果树夜间在没有太阳辐射的情况下仍存在微弱的液流,这主要是由根压引起的,这对树干补充白天消耗的水分以及增强自身生理适应性等方面具有重要意义。

(3) 黄土塬区苹果树干液流速率与太阳辐射、大气温度、相对湿度、水气压差和风速都有很强的相关性,各气象因子综合影响苹果树的树干液流速率和耗水。苹果树干液流速率与太阳辐射、水气压差、大气温度和相对湿度呈显著正相关,与空气相对湿度呈显著负相关。且晴天条件下液流速率与各气象因子的相关程度要优于阴雨天。晴天时液流速率与气象因子的关系模型为  $v = 11.966 V_p + 0.006R + 0.099R_H + 0.811v_w - 10.498$ ; 阴雨天时液流速率与气象因子的关系模型为  $v = 25.826V_p + 0.396R_H + 0.008R + 0.548v_w - 0.102T - 38.656$ 。

(4)液流对土壤含水率的响应较为敏感,在不同的土壤水分环境条件下,苹果树的液流速率差异很大。水分胁迫条件下,全天液流速率水平较低,即蒸腾水平较低;而水分充足条件下,液流速率的变化过程为一宽峰曲线,维持较高的液流速率的时间较长,全天蒸腾水平高。

## 参 考 文 献

- Zofia Z, Eugeniusz P, Czeslaw P. Effect of water deficit on the growth and yield of 'Topaz' apple trees planted in different former soil management [J]. *Folia Horticulturae*, 2004, 16(2):71~78.
- Naor A, Naschitz S, Peres M, et al. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load [J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(8):1255~1261.
- 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟 [J]. 农业机械学报,2011,42(5):73~78. She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Water balance simulation in SPAC systems of slop lands covered with typical vegetations on Loess Plateau. [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5):73~78. (in Chinese)
- 刘艳伟,朱仲元,乌云,等. 浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较 [J]. 农业机械学报,2010,41(11):84~88. Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Wu Yun, et al. Comparison of evapotranspiration of the natural vegetation in the Otindag Sandy area using two calculation methods [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11):84~88. (in Chinese)
- 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验 [J]. 农业机械学报,2012,43(11):87~91. Hu Yongxiang, Li Yuannong, Zhang Ying. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation jujube in Loess Plateau of China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11):87~91. (in Chinese)
- Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 112(2):67~85.
- Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1996, 78(1~2):19~29.
- 郑睿,康绍忠,佟玲. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律 [J]. 农业工程学报,2012,28(20):99~107. Zheng Rui, Kang Shaozhong, Tong Ling. Water consumption of wine grape under different weather conditions in desert oasis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20):99~107. (in Chinese)
- Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4):309~320.
- 宋孝玉,康绍忠,沈冰,等. 黄土区不同下垫面农田降雨入渗及产刘关系的数值模拟 [J]. 农业工程学报,2005,21(1):1~5. Song Xiaoyu, Kang Shaozhong, Shen Bing, et al. Simulating the relationship between the infiltration and runoff of different underlying farmland in the loess region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1):1~5. (in Chinese)
- Yu Qiang, Wang Tianduo. Simulation of the physiological responses of  $C_3$  plant leaves to environmental factors by a model which combines stomatal conductance, photosynthesis and transpiration [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(8):740~754.
- 胡兴波,韩磊,张东,等. 黄土半干旱区白榆和侧柏夜间液流动态分析 [J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):51~56. Hu Xingbo, Han Lei, Zhang Dong, et al. Analysis on the dynamics of nighttime sap flow of *Ulmus pumila* and *Platycladus orientalis* in semi-arid area of Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4):51~56. (in Chinese)
- Steppe K, Lemeur R, Samson R. Sap flow dynamics of a beech tree during the solar eclipse of 11 August 1999 [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 112(3~4):139~149.
- 李海涛,向乐,夏军,等. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究 [J]. 林业科学,2000,42(10):31~38. Li Haitao, Xiang Le, Xia Jun, et al. Applying the heat dissipation technique to study the sap flow of *Pinus elliottii* in the red earth area of subtropical China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 42(10):31~38. (in Chinese)
- 刘静,布和,贾俊生. 河套灌区节水型农田防护林建设与节水潜力 [J]. 内蒙古林学院学报:自然科学版,1999,21(3):29~32. Liu Jing, Bu He, Jia Junsheng. The plantation of farm-shelter forest of Hetao-irrigated district and the water-saving potential [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1999, 21(3):29~32. (in Chinese)
- 曹文强,韩海荣,马钦彦. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究 [J]. 林业科学,2004,40(2):174~177. Cao Wenqiang, Han Hairong, Ma Qinyan. Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaf forest of Taiyue mountain in Shanxi province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2):174~177. (in Chinese)
- 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):1075~1081. Meng Ping, Zhang Jinsong, Wang Hesong, et al. Rule of apple trees transpiration and its relation to the micrometeorology on the canopy [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5):1075~1081. (in Chinese)
- 张劲松,孟平,尹昌君,等. 果粮复合系统中单株苹果蒸腾需水量的计算 [J]. 林业科学研究,2001,14(4):383~387. Zhang Jinsong, Meng Ping, Yin Changjun, et al. Estimation transpiration-water requirement from an apple tree in apple-crop intercropping system [J]. *Forest Research*, 2001, 14(4):383~387. (in Chinese)

- water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2 671 ~ 2 677. (in Chinese)
- 19 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要农作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- 20 Ledoigt G, Griffaut B, Debiton E, et al. Analysis of secreted protease inhibitors after water stress in potato tubers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2006, 38: 268 ~ 271.
- 21 Lynch D R, Foroud N, Kozub C C, et al. The effect of moisture stress at three growth stage on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties[J]. American Journal of Potato Research, 1995, 72(6): 375 ~ 385.
- 22 Steyn J M, Plessis H F, Fourie P, et al. Yield response of potato genotypes to different soil water regimes in contrasting seasons of a subtropical climate[J]. Potato Research, 1998, 41(3): 239 ~ 245.
- 23 Luisa Costa, Vedove G, Gianquinto G, et al. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress[J]. Potato Research, 1997, 40(1): 19 ~ 34.
- 24 Ali Eskandari, Hamid Reza Khazaie, Ahmad Nezami, et al. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59(6): 889 ~ 897.
- 25 Radmila Stikic, Zorica Jovanovic, Milena Paukovic, et al. Deficit irrigation techniques in potato growing: practical application of stress physiology knowledge[C]//45th Croatian & 5th International Symposium on Agriculture, 1992: 639 ~ 642.
- 26 刘战东, 肖俊夫, 于秀琴. 不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 1 ~ 3, 7.  
Liu Zhandong, Xiao Junfu, Yu Xiuqin. Effects of different soil moisture treatments on morphological index, water consumption and yield of potatoes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 1 ~ 3, 7. (in Chinese)
- 27 Clinton C Shock, James C Zalewski, Timothy D Stieber, et al. Impact of early-season water deficit on russet Burbank plant development, tuber yield and quality[J]. American Journal of Potato Research, 1992, 69(12): 793 ~ 803.
- 28 Shock C C, Feibert E B G, Sanuders L D. Potato yield and quality response to deficit irrigation[J]. Hort Sciences, 1998, 33(4): 655 ~ 659.
- 29 王俊国. 建薯 1 号马铃薯生育期适宜土壤水分指标研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18 119 ~ 18 120, 18 154.  
Wang Junguo. Potato suitable maturity indicator of soil moisture Jianshu 1[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(32): 18 119 ~ 18 120, 18 154. (in Chinese)
- 30 Fabeiro C, Martin de Santa Olalla F, Juan J A. Yield and size of deficit irrigated potatoes[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(3): 255 ~ 266.
- 31 李合生, 孟庆伟, 夏凯, 等. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 32 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 68 ~ 72.  
Pei Dong, Sun Zhenshan, Chen Silong, et al. Effects of water stress on physiological and agronomic features of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 33 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 88 ~ 92.  
Meng Zhaojiang, Liu Anneng, Pang Hongbin, et al. Study on physiological mechanism and indices of regulated deficit irrigation in summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 34 王婷, 海梅荣, 罗海琴, 等. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(5): 737 ~ 742.  
Wang Ting, Hai Meirong, Luo Haiqin, et al. Effect of water stress on leaf photosynthetic characteristics and yield of potato[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(5): 737 ~ 742. (in Chinese)
- 35 李毅, 任鑫, 司炳成. 覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 738 ~ 744.  
Li Yi, Ren Xin, Si Bingcheng. Movement in layered soils during evaporation under perforated plastic mulch[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(6): 738 ~ 744. (in Chinese)

(上接第 158 页)

- 19 Cochard H, Rodolphe M, Patrick G, et al. Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L. [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(348): 1 255 ~ 1 259.
- 20 Granier A, Loustau D. Measuring and modeling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 71(1 ~ 2): 61 ~ 81.
- 21 Irvine J, Perks M P, Magnani F, et al. The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance [J]. Tree Physiology, 1998, 18(6): 393 ~ 402.
- 22 Teskey R O, Sheriff D W. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation [J]. Tree Physiology, 1996, 16(1 ~ 2): 273 ~ 279.
- 23 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895 ~ 905.  
Xu Xianying, Sun Baoping, Ding Guodong, et al. Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895 ~ 905. (in Chinese)
- 24 Germak J, Hzulak J, Penka M. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of root system depth[J]. Biologia Plantarum, 1980, 22(1): 34 ~ 41.