

黄土高原苹果树生育期树干液流特征及其影响因子研究

曹 铨^{1,2}, 王自奎¹, 来兴发¹, 沈禹颖¹

(1. 兰州大学草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室/兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020;

2. 青海大学畜牧兽医科学院/青海省畜牧兽医科学院, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:为探究黄土高原半干旱区苹果树生育期液流特征及其与影响因子之间的关系,于2018年果树生育期利用热扩散式液流探针(TDP)对‘秦冠’苹果树(*Malus pumila* M. cv Qinguan)液流进行了连续观测,同步测定了果园土壤水分、苹果树叶面积指数、大气温度、大气湿度、太阳辐射和风速等指标,并计算空气水汽压差。结果表明:苹果树在萌芽开花期、幼果期、果实膨大期及果实成熟期的平均液流速率分别为0.85、1.34、1.53、0.82 mm·d⁻¹,果实膨大期液流速率较高。液流速率具有明显的昼夜波动性,不同生育时期夜间液流量约占总液流量的11.54%~19.22%。茎流计测定的苹果树生育期总液流量为264.14 mm,其中夜间累计液流量为35.60 mm。全生育期内苹果树的液流速率与太阳净辐射、大气温度、水汽压差和叶面积指数均呈极显著正相关关系,与风速和大气湿度呈负相关关系。萌芽开花期、幼果期及果实成熟期,水汽压差是影响果树液流速率的关键因子;而在果实膨大期,太阳净辐射是影响果树液流速率的关键因子。果树液流速率与0~20 cm土层土壤含水量相关性不显著,与20~160 cm土层土壤含水量显著正相关。

关键词:苹果树;树干液流;影响因子;生育期;黄土高原

中图分类号:S661.1;Q945.17⁺2 **文献标志码:**A

Characteristics and its influencing factors of sap flow of apple trees during growth period in the Loess Plateau

CAO Quan^{1,2}, WANG Zikui¹, LAI Xingfa¹, SHEN Yuying¹

(1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-Ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Qinghai University of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Key Laboratory of Adaptive Management of Alpine Grassland of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of the sap flow velocity of an apple tree and the relationships between the sap flow velocity and its influencing factors in the semiarid area of the Loess Plateau, the thermal dissipation probe (TDP) was used to continuously measure the sap flow velocity of ‘Qinguan’ apple trees during the growth period in 2018. And simultaneously the influencing factors such as soil moisture, leaf area index of the apple tree (LAI), air temperature (T_a), air humidity (RH), net radiation (R_n), wind speed (WS), and the vapor pressure deficit (VPD) were calculated. The results showed that the average sap flow velocity during the germination and flower stage, fruit formation stage, fruit expansion stage, and fruit ripening stage was 0.85, 1.34, 1.53, and 0.82 mm·d⁻¹, respectively, which was higher in the fruit expansion stage. Meanwhile, the sap flow velocity showed significant diurnal fluctuation, and the sap flow at night accounted for 11.54%~19.22% of the total sap flow in the different growth periods. The soil water consumption of the apple tree measured by the thermal dissipation probe was about 264.14 mm, and the water consumption at night was 35.60 mm. During the whole growth period,

the daily sap flow velocity of the apple tree was significantly and positively correlated with R_n , T_a , VPD , and LAI of the apple tree, negatively correlated with WS and RH . The VPD was the key factor affecting the sap flow rate of apple trees in the germination and flower stage, fruit formation stage and fruit ripening stage of apple trees, while the R_n was the key factor affecting the sap flow rate of apple trees in the fruit expansion stage. There was no significant correlation between sap flow velocity and soil water content in 0~20 cm soil layer, but significantly positive correlations were found in 20~160 cm soil layers.

Keywords: apple tree; sap flow; impact factors; growth period; Loess Plateau

黄土高原是我国重要的苹果产区^[1]。近年来,该区苹果种植面积大幅提高,产值效益不断增加,产业化水平稳步提升,苹果产业已成为当地农民增收致富的支柱产业^[2-3]。然而该地区降水变异大,季节性分布不均^[2],且随着苹果种植规模的扩大和种植年限的增加,其对土壤水分的消耗也逐渐增加^[4],苹果树生育期水分供需之间的矛盾突出。因此,探究苹果树蒸腾规律、准确量化苹果树生育期耗水量,对今后合理栽培种植果树、提高水分利用率、实现苹果树的优质高产具有重要意义。

夜间液流对果树的生长具有重要作用,目前在黄土高原等干旱地区已开展了大量苹果树生育期液流特征的研究工作^[5],但已有研究多侧重于探讨生育期果树蒸腾耗水量的变化,对不同生育时期夜间液流特征及液流量占比的分析不足。同时,有关果树蒸腾的影响因子也存在争议,如周玉燕等^[6]的研究结果表明,在日尺度下,太阳辐射强度、相对湿度、空气温度、饱和水汽压差、露点温度与树干茎流速率呈极显著相关关系,风速对茎流速率也有一定影响。而张静等^[7]则发现,苹果树干液流速率与水汽压差、太阳辐射、风速和地表温度仅在小时尺度上极显著相关;日尺度下,仅地表温度、水汽压差与苹果树干液流速率显著相关。本研究利用茎流计测定了黄土高原生长季苹果树白天和夜间液流速率,估算了不同生育时期蒸腾耗水量以及白天和夜

间耗水量的占比,分析了苹果树液流特征及其与环境因子之间的关系,以期为黄土高原半干旱区苹果园水分管理以及蒸散发模型的建立提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4—10 月在甘肃庆阳草地农业生态系统国家野外科学观测研究站进行。试验站位于甘肃省庆阳市西峰区什社乡(35°40'N, 107°51'E, 海拔 1 297 m)。试验区多年(1981—2017 年)平均降雨量 531.10 mm,多年平均气温 9.2℃、湿度 61.9%、风速 2.2 m·s⁻¹,无霜期 150~190 d。试验期间气象资料(太阳辐射、大气最高和最低温度、最大和最小相对湿度、2 m 高处风速及降雨量等)用试验田旁 50 m 处的自动气象站(Vantage Pro2, Davis Instruments, USA)测定。2018 年大气温度、湿度、降雨和潜在蒸散等基本气象要素的变化趋势如图 1 所示。

试验站内矮化中间砧‘秦冠’苹果树(*Malus pumila* M. cv Qinguan)建植于 2005 年,株行距为 4 m×4 m。苹果园采取黄土高原苹果园主要的清耕管理模式,定期进行除草。果树处于经济成熟期,2016—2018 年平均年产量分别为 59.3、45.0 t·hm⁻²和 20.9 t·hm⁻²,2018 年果树产量下降的主要原因是春季霜冻。根据实地观测,2018 年苹果树生育期划分见表 1。

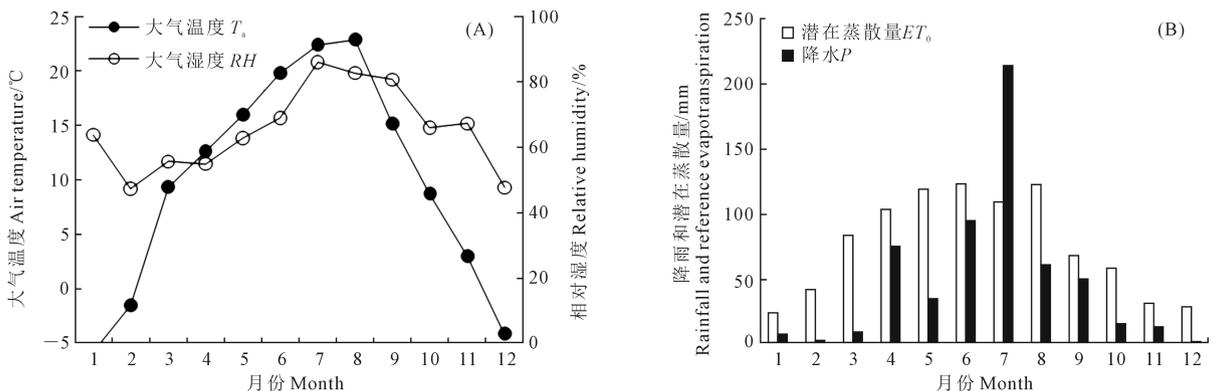


图 1 试验点大气温度、湿度、降雨和潜在蒸散变化趋势

Fig.1 Dynamics of air temperature, air relative humidity, rainfall and potential evapotranspiration at the experiment site

表1 2018年苹果树生育期划分表
Table 1 Timetable of growing seasons
for apple trees in 2018 (m-d)

生育时期 Growth stage	日期 Date
萌芽开花期 Germination and flower stage	04-01~04-30
幼果期 Fruit formation stage	05-01~06-13
果实膨大期 Fruit expansion stage	06-14~09-13
果实成熟期 Fruit ripening stage	09-14~10-31
落叶休眠期 Defoliation dormancy stage	11-01~12-31

1.2 测定指标与方法

1.2.1 苹果树液流测定 在试验区内选择3棵相同径级、生长良好、长势均匀、具有代表性的苹果树安装热扩散式液流探针。苹果树液流自2018年4月1日—10月31日连续测定。为避免安装高度和方位差异等引起的数据误差,降低地表积水、光照反射及散射对测定结果的影响,探针统一安装在距离地面60 cm高的树干北侧,并用防晒膜包裹,防止温度变化产生的影响,使用CR1000(Campbell Scientific Inc., Shepshed, UK)数据采集器收集数据,采样时间间隔设定为15 min。

1.2.2 土壤水分测定 在苹果树生育期4—10月,采用烘干法与土壤水分廓线仪(Diviner 2000, Sentek Pty Ltd., Australia)相结合的方法,测定果园0~160 cm土层的土壤水分动态,每10 cm测定1次。水分测定管布设在测定液流苹果树的行间和行向位置,分别于距离树干1 m和2 m的位置上共布设4个测定点,3棵苹果树合计12个水分测定管。水分测定频率为3~5 d(有降雨时进行调整)。

1.2.3 苹果树叶面积指数测定 在生育期每间隔半月用LAI-2000(LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA)沿东、西、南、北4个方向,分别于距树干0、0.5、1.0、1.5、2.0 m处测定试验树的叶面积指数。叶面积指数为各个测定点的平均值。

1.3 数据分析与作图

采用饱和水汽压差(VPD)来表达温度与空气湿度的协同效应,计算公式如下^[6]:

$$e_s = 0.5 \left(0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 273.7} \right) + 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 273.7} \right) \right) \quad (1)$$

$$e_a = e_s (RH_{\text{mean}}) / 100 \quad (2)$$

$$VPD = e_s - e_a \quad (3)$$

式中, e_s 为饱和蒸气压(kPa), e_a 为实际蒸气压(kPa), T_{\max} 为最大温度(°C), T_{\min} 为最小温度(°C), RH_{mean} 为平均湿度(%)。

基于Granier经验模型,通过测定插入树干边材的上下探针的温差换算得到树干液流速率^[8-9]。计算公式如下:

$$K = (d_{\text{TM}} - d_{\text{T}}) / d_{\text{T}} \quad (4)$$

$$V = 0.1199 K^{1.231} \times 3600 \quad (5)$$

式中, K 为无量纲“液流指数”,用于消除液流速率为0时的温差; V 为树干液流速率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); d_{TM} 为无液流时加热探针与参考探针间的最大温差值; d_{T} 为两探针间瞬时温差值。

单株液流量计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^n V_i \times A_s \times \Delta t \quad (6)$$

式中, F 为每日树干液流总量(cm^3); n 为每日取样次数; V_i 为第*i*次取样时的液流速率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); A_s 为边材面积(cm^2),生育期结束后用生长锥测量; Δt 为取样间隔时间(h)。

将3棵苹果树的*F*值平均后除以由林分密度换算的单株占地面积(16 m^2),作为果园苹果树蒸腾需水强度($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);同时将全天(0:00—24:00)液流特征分为白天(6:00—18:00)和夜间(0:00—6:00, 18:00—24:00)两部分,平均液流速率即为各时段测定瞬时液流速率的平均值。

采用Excel 2016和SPSS 20.0进行作图和数据分析。采用Pearson相关分析法分析气象因子、苹果树叶面积指数、不同土层土壤水分和液流速率之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 苹果树生育期树干液流速率变化特征

苹果生育期的树干日液流速率、白天液流速率和夜间液流速率如图2所示。日液流速率随生育期呈抛物线变化趋势。在萌芽开花期,苹果树干的液流速率较小,至幼果期液流速率逐渐增加,于果实膨大期的中期达到峰值,在果实膨大后期至果实成熟期液流速率呈下降趋势。生育期的日液流速率最小值和最大值分别出现在5月19日和7月25日,分别为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。生育期内白天液流速率较夜间波动大,白天液流速率最大值和最小值分别为 $4.16 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,夜间液流速率的最大值和最小值分别为 $1.03 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

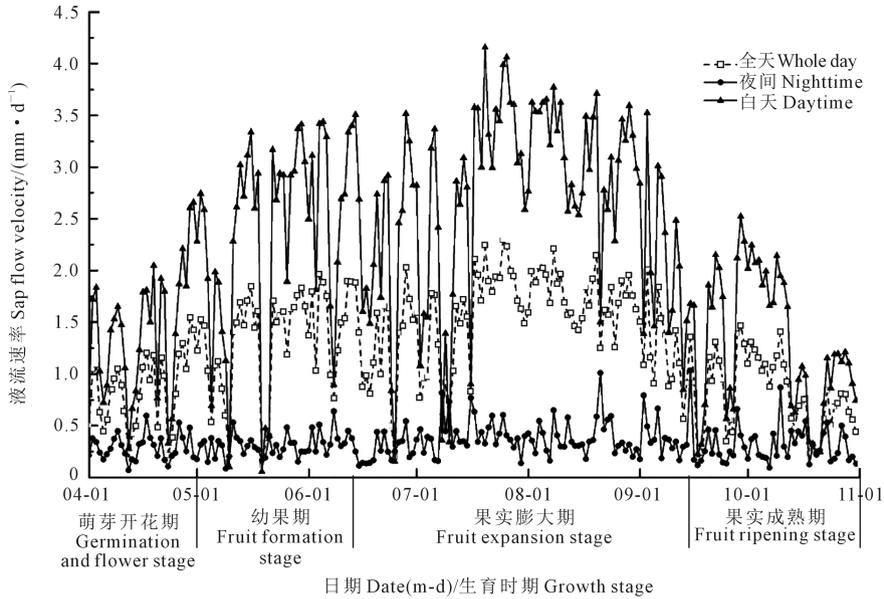


图 2 苹果树生育期液流速率变化

Fig.2 Variations of daily sap flow velocity of apple trees during the growth period

果树不同生育时期平均日液流速率如图 3 所示。萌芽开花期、幼果期、果实膨大期及果实成熟期夜间的液流速率分别为 0.29、0.31、0.37、0.31 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，白天的液流速率分别为 1.41、2.36、2.69、1.32 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，全天的液流速率分别为 0.85、1.34、1.53、0.82 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 苹果树生育期耗水量变化特征

苹果不同生育时期白天、夜间以及全天的累计液流量如图 4a 所示。累计液流量从萌芽开花期到果实膨大期逐渐增加，至果实成熟期逐渐降低。白天的累计液流量高于夜间。果实膨大期夜间的累计液流量最大，萌芽开花期最小，分别为 16.94 mm 和 4.33 mm 。整个生育期夜间累计液流量为 35.60 mm ，白天累计液流量为 228.55 mm ，总累计液流量为

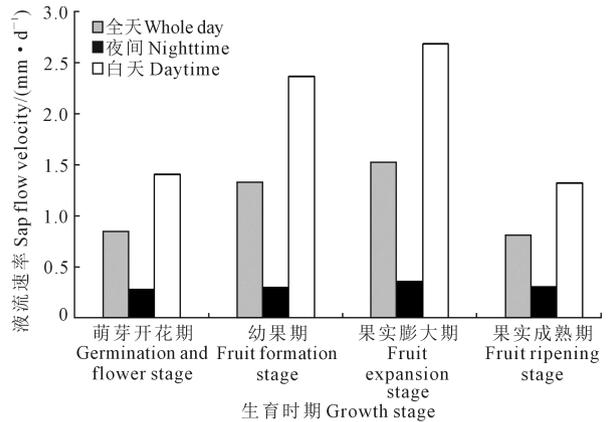


图 3 苹果树生育期平均日液流速率变化

Fig.3 Average daily sap flow velocity variations of apple trees during the growth period

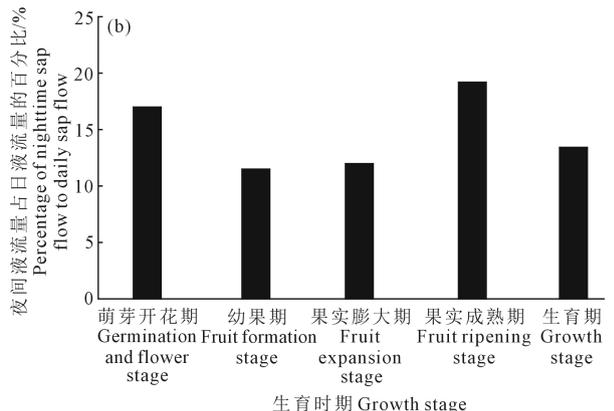
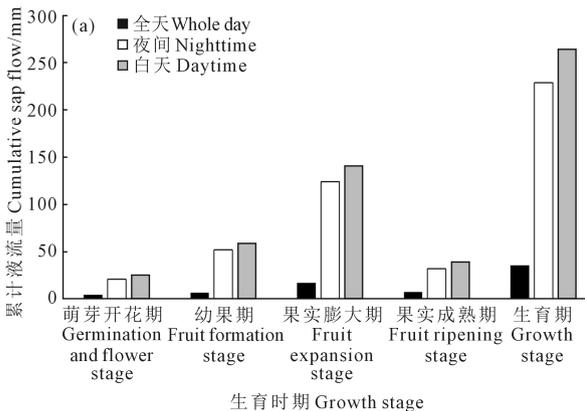


图 4 苹果树生育期累计液流量及夜间液流量占比

Fig.4 Cumulative sap flow during the growth period of apple tree and the proportion of nighttime sap flow

264.14 mm。夜间液流量在日液流量中占有一定的比重(图4b),萌芽开花期、幼果期、果实膨大期及果实成熟期夜间液流量分别占累计总液流量的17.0%、11.54%、12.04%、19.22%,全生育期夜间液流量占累计总液流量的13.48%。

2.3 日尺度下树干液流与其影响因子之间的相关性

生育期日均液流速率与其影响因子之间的相关系数如表2所示。在全生育期内,太阳净辐射、大气温度、水汽压差和叶面积指数等因子与液流速率均呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.833、0.737、0.496和0.362;风速与液流速率呈显著负相关关系,相关系数为-0.160。液流速率与其影响因子之间的相关性在不同生育时期存在差异。太阳净辐射与液流速率在不同生育时期均极显著相关,除萌芽开花期相关系数最小(0.718),其余生育时期相关系数均在0.800以上。大气温度与液流速率在果实成熟期相关性显著,其余生育期二者均呈极显著相关关系。大气湿度与液流速率在全生育期相关性不显著,但二者在幼果期、果实膨大期及果实成熟期均呈极显著负相关关系,萌芽开花期为显著负相关。风速与液流速率仅在全生育期显著相关,在不同生育时期相关性均不显著。水汽压差与液流速率在不同生育时期均呈极显著正相关关系。叶面积指数与液流速率在萌芽开花期和幼果期显

著相关,其余生育时期相关性均不显著。

对不同生育时期果树液流速率影响因子进行隶属函数分析(表3),结果表明:不同生育时期影响果树液流速率的关键气象因子存在差异。萌芽开花期、幼果期及果实成熟期,水汽压差是影响果树液流速率的关键因子;而在果实膨大期,太阳净辐射是影响果树液流速率的关键因子。果树不同生育时期大气温度和大气湿度对液流的影响均小于太阳净辐射和水汽压差,且大气温度在萌芽开花期、果实膨大期及全生育期对果树液流速率的影响大于大气湿度。风速对果树液流的影响在幼果期大于大气温度,在果实膨大期大于大气湿度,其余各生育时期影响最小。叶面积指数对果树液流速率的影响在萌芽开花期大于风速,其余生育时期影响较小,但在全生育期叶面积指数对果树液流速率的影响仅次于太阳净辐射。

生育期日液流速率均值与对应水分测定日不同土层平均土壤含水量之间的相关性如图5所示。液流速率与土层土壤含水量之间的相关性随土层深度的增加而增加。液流速率与0~20 cm土层土壤含水量相关性不显著,其与20~40、40~60、60~80、80~120、120~160 cm土层土壤含水量均呈显著正相关关系,决定系数 R^2 分别为0.1026、0.1128、0.2302、0.3204和0.2620。

表2 苹果树干液流与影响因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of sap flow of apple trees to influencing factors

生育时期 Growth stage	太阳净辐射 R_n	大气温度 T_a	大气湿度 RH	风速 WS	水汽压差 VPD	叶面积指数 LAI	样本数 N
萌芽开花期 Germination and flower stage	0.718**	0.604**	-0.374*	-0.142	0.704**	0.375*	30
幼果期 Fruit formation stage	0.896**	0.628**	-0.810**	-0.041	0.851**	0.353*	44
果实膨大期 Fruit expansion stage	0.876**	0.674**	-0.461**	-0.071	0.630**	0.162	92
果实成熟期 Fruit ripening stage	0.892**	0.348*	-0.378**	-0.067	0.523**	0.181	48
全生育期 Whole growth stage	0.833**	0.737**	-0.095	-0.160*	0.496**	0.362**	214

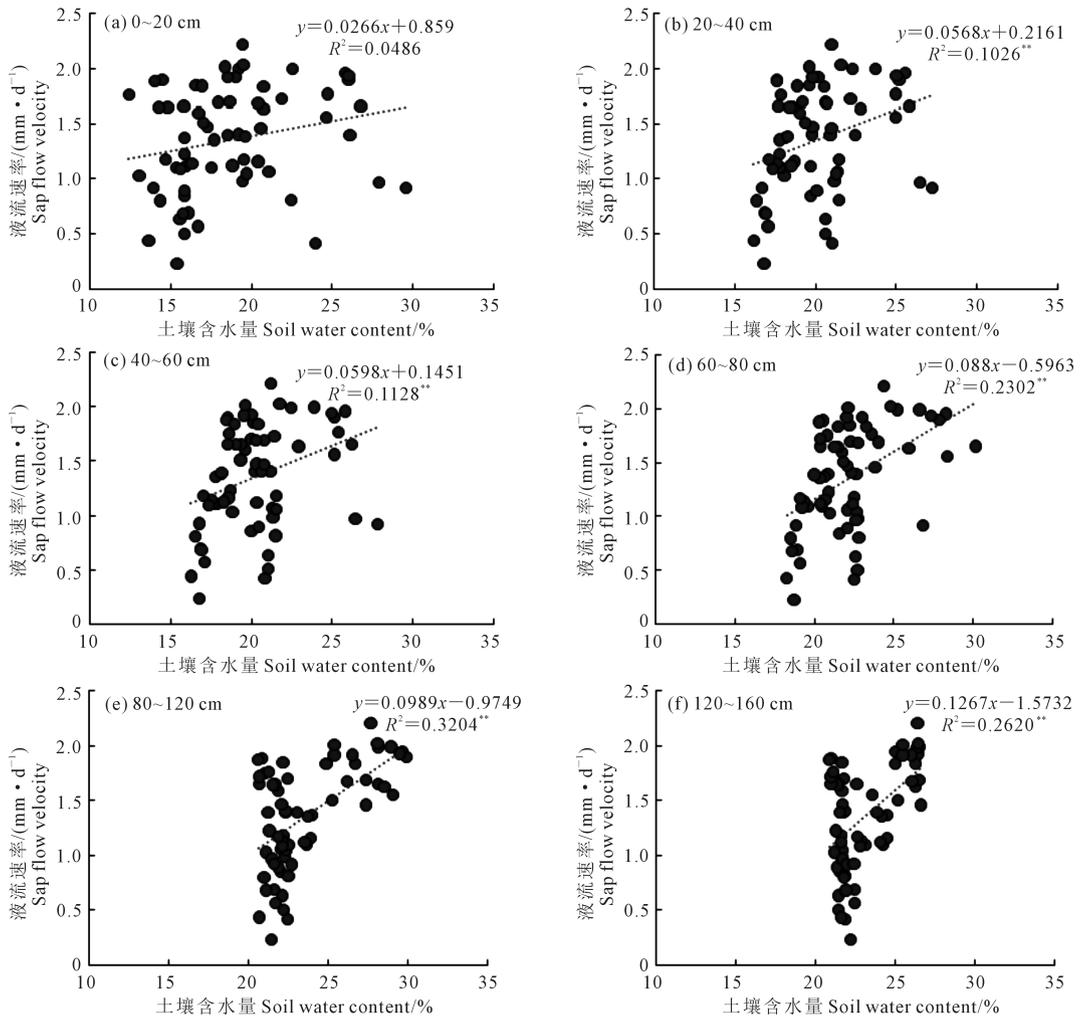
注: * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

Note: * indicates significant correlations at $P<0.05$ level, ** indicates significant correlations at $P<0.01$ level.

表3 苹果树干液流影响因子隶属函数值

Table 3 Subordinate function values of sap flow of apple trees of influencing factors

生育时期 Growth stage	太阳净辐射 R_n	大气温度 T_a	大气湿度 RH	风速 WS	水汽压差 VPD	叶面积指数 LAI
萌芽开花期 Germination and flower stage	2.94	2.48	2.13	1.64	3.59	2.07
幼果期 Fruit formation stage	5.83	2.20	2.83	2.32	5.88	1.94
果实膨大期 Fruit expansion stage	11.88	5.66	5.37	5.41	9.96	0.80
果实成熟期 Fruit ripening stage	3.82	3.45	3.76	2.08	6.48	1.00
全生育期 Whole growth stage	19.70	19.42	15.48	7.65	18.62	19.50



注: R^2 为决定系数; * 表示在 $P<0.05$ 水平上相关性显著, ** 表示在 $P<0.01$ 水平上相关性显著。

Note: R^2 is the determination coefficient. * indicates significant correlations at $P<0.05$ level, ** indicates significant correlations at $P<0.01$ level.

图 5 液流速率与不同土层土壤含水量的关系

Fig.5 Relationship between sap flow velocity and soil water content in different soil layers

3 讨论

3.1 苹果树生育期树干液流特征

蒸腾耗水是苹果树生长发育中重要的生理过程,蒸腾作用的强弱直接影响苹果树的生长和果实产量。果树在不同生育时期的液流速率直接反映了其蒸腾耗水的强度。本研究中,不同生育时期苹果树干液流速率有明显的差异,在果实膨大期液流速率最大,其余生育时期液流速率较低,这与大部分研究结果一致^[1,10]。果实膨大期蒸腾量的峰值与该时期果树生育活动旺盛、果实质量增加及果径迅速增长密切相关。同时,通过对液流速率及其影响因素的分析可知,液流速率受太阳净辐射和温度的影响最大。太阳辐射和温度升高时,果树代谢活动强烈,蒸腾加强。因此,果实膨大期的强太阳辐射

和较高温度也是该时期液流速率升高的重要原因。本研究中,2018年果实膨大期果树平均液流量为 $1.53 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;同年度党宏忠等^[1]在山西吉县红富士苹果园中测定的果实膨大期果树日最大蒸腾强度仅为 $1.37 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,而高荣^[10]在渭北高原红富士苹果园的测定结果表明,8龄苹果树的最高耗水强度可达 $3.59 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。各研究区果树蒸腾状况的差异与苹果树个体生长状况、修剪差异、管理水平、气候及土壤等多种因素相关。果树的液流速率具有明显的昼夜差异,且白天的蒸腾速率高于夜间,这与白天和夜间蒸腾速率的影响因子不同有关,后文将重点讨论。

3.2 树干液流与其影响因素之间的关系

树木蒸腾作用的强度不仅由树体自身特性(如树龄、冠幅等)决定,还受到环境因子(如大气温湿

度、太阳辐射、风速和土壤含水量等)的影响^[11-12]。本研究对果树液流速率影响因子进行相关性和隶属函数分析可知,太阳净辐射和水汽压差是影响果树液流速率的关键因子,且太阳辐射强度、气温和水汽压差与液流速率呈正相关关系,相对湿度与液流速率呈负相关关系;这与已有的研究结果一致^[13-16]。但风速与树干液流速率的关系存在争议。大部分研究表明风速与树干液流速率呈正相关^[17];但也有研究认为风速对蒸腾影响很小或二者呈负相关关系^[18-20],这可能是因为风速并不直接影响作物的蒸腾,而是通过影响叶片温度、水蒸气梯度等因子来间接影响蒸腾^[18]。本研究中,风速与液流速率呈负相关关系,可能是因为风降低了果树叶片表面温度,引起果树气孔关闭,从而影响了果树蒸腾^[15,21]。

决定液流速率的不仅有气象因子,苹果树冠幅的大小也直接影响液流速率。已有研究表明,树木的蒸腾量与叶面积指数呈正相关关系^[18,22]。本研究中,在全生育期尺度上苹果树的叶面积指数与液流速率极显著相关,但就不同生育时期而言,仅萌芽开花期和幼果期液流速率与叶面积指数显著相关。这可能主要是因为果树叶面积指数在萌芽开花期呈快速增长趋势,到果实膨大期基本无变化^[23],然而果树的液流速率仍随着太阳净辐射和大气温度而变化。果树需水量与叶面积指数的季节变化不同步现象得到不少研究结果证实^[1,18]。本研究隶属函数分析结果也表明叶面积指数在全生育期尺度上对液流的影响较大,但是在果树不同生育时期影响较小。树木的液流速率与土壤中可用水的含量密切相关^[11]。液流速率与各土层含水量呈正相关关系,但是表层土壤(0~20 cm)含水量与液流速率的相关性小于深层土壤(20~160 cm)。这主要是因为苹果树根系在土壤中的分布范围广^[24],蒸腾耗水会受根区土壤水分总量的影响,而表层土壤含水量随降雨补给和土壤蒸发波动明显,使其与苹果树液流速率的相关性降低。

3.3 夜间蒸腾耗水的生态学意义

树干液流具有明显的昼夜变化规律^[25],这与太阳净辐射和大气温度的昼夜变化规律一致。夜间的蒸腾对植物生长具有重要意义。已有研究表明,白天蒸腾作用的过度消耗会导致树体水分减少,而夜间蒸腾不仅具有补充树体水分和调节水分平衡的作用^[26-27],同时有利于夜间物质能量的输送。本研究中,夜间的树干液流速率及其波动虽然显著小于白天,但夜间的液流量仍占有相当比例。生育期

内各月苹果树夜间的液流量占总液流量的11.54%~19.22%,且不同生育阶段占比有所不同,在果实膨大期夜间液流占比相对较低,而白天液流占比增加。产生这种差异一方面是由于该时期太阳辐射和气温较高,另一方面主要是因为白天液流增加有利于光合产物的积累。这和夏桂敏等^[28]在辽宁省‘寒富’苹果树液流特征的研究中发现的规律相似。白天和夜间液流的差异还在于其影响和驱动因子不同。周玉燕等^[6]研究发现太阳辐射和温度是影响白天液流的主要因子^[6]。司建华等^[29]研究表明,水汽压差是夜间蒸腾的重要环境驱动因子;于占辉等^[30]研究指出,根压是夜间液流的主要驱动力,夜间树木通过根压主动吸收水分来补充白天丢失的大量水分。武鹏飞等^[31]对杨树林树干液流驱动因子的研究结果发现,日间树干液流与气温相关性最大,驱动力较强,而夜间树干液流与水汽压亏缺相关性最大,驱动力较强。

4 结 论

1) 苹果树的液流量在果实膨大期最高,在萌芽开花期和果实成熟期较低。单日液流速率具有明显的昼夜节律。

2) 矮化中间砧‘秦冠’苹果树生育期总液流量约为264.14 mm,其中夜间的液流量约为35.60 mm,累积占比13.48%。

3) 全生育期内苹果树的日蒸腾量与太阳净辐射、大气温度、水汽压差和叶面积指数呈极显著正相关关系,与风速呈显著负相关关系。萌芽开花期、幼果期及果实成熟期,水汽压差是影响果树液流速率的关键因子;而在果实膨大期,太阳净辐射是影响果树液流速率的关键因子。

4) 果树液流速率与0~20 cm土层土壤含水量相关性不显著,与20~160 cm土层土壤含水量显著相关。

参 考 文 献:

- [1] 党宏忠,冯金超,王檬檬,等.黄土高原苹果树各生育期需水特征研究[J].果树学报,2020,37(5):659-667.
DANG H Z, FENG J C, WANG M M, et al. A study on water demand characteristics of apple trees in different growing stages in the loess plateau area[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(5): 659-667.
- [2] 曹铨,王自奎,沈禹颖.陇东苹果园生草复合体系土壤水分季节动态[J].干旱区研究,2019,36(1):77-84.
CAO Q, WANG Z K, SHEN Y Y. Seasonal variation of soil moisture content in apple orchard and grass intercropping system in Longdong [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 77-84.
- [3] LIU Y, GAO M S, WU W, et al. The effects of conservation tillage

- practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the loess plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 7-12.
- [4] LIU Z J, MA P Y, ZHAI B N, et al. Soil moisture decline and residual nitrate accumulation after converting cropland to apple orchard in a semiarid region: evidence from the loess plateau[J]. *Catena*, 2019, 181: 104080.
- [5] 王棣.黄土塬不同林龄苹果园蒸散分割及土壤水动态特征研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
WANG D. Evapotranspiration partitioning and soil water dynamics of apple orchard with different ages on the loess plateau of China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [6] 周玉燕, 廖空太, 张莉, 等. 山旱塬区花牛苹果树干茎流及其与环境因子的关系[J]. *经济林研究*, 2017, 35(1): 30-35.
ZHOU Y Y, LIAO K T, ZHANG L, et al. Stemflow of Huanieu apple tree and its relationship with environmental factors at mountain plateau areas[J]. *Nonwood Forest Research*, 2017, 35(1): 30-35.
- [7] 张静, 王力, 韩雪, 等. 不同时间尺度下黄土塬区 19 年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(13): 2583-2592.
ZHANG J, WANG L, HAN X, et al. The relationship between sap flow velocity and environmental factors of the 19 aapple trees on the loess plateau at different time scales[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(13): 2583-2592.
- [8] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [9] 梁自强, 胡笑涛, 冉辉, 等. 渭北旱塬不同水肥条件下气象因子对苹果树干茎流的影响[J]. *节水灌溉*, 2020,(1): 10-14, 18.
LIANG Z Q, HU X T, RAN H, et al. Effects of meteorological factors on stem flow of apple under different water and fertilizer conditions in the upland of Weibei river[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020,(1): 10-14, 18.
- [10] 高荣. 渭北高原红富士苹果树蒸腾规律与水肥耦合研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
GAO R. Research of Fuji apple tree transpiration and fertilizer coupled in Weibei plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [11] 王力, 王艳萍. 黄土塬区苹果树干液流特征[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 152-158, 151.
WANG L, WANG Y P. Characteristics of stem sap flow of apple trees in Loess Tableland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 152-158, 151.
- [12] 丁日升, 康绍忠, 龚道枝. 苹果树液流变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(2): 21-25.
DING R S, KANG S Z, GONG D Z. Responses of apple trees sap flow to temporal change in weather condition and soil water content by heat-pulse technique[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(2): 21-25.
- [13] 王升, 容莹, 闫妍, 等. 干热河谷地区芒果树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(6): 1286-1295.
WANG S, RONG Y, YAN Y, et al. Characteristics of sap flow of mango trees and its response to environmental factors in the dry-hot river valley region[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sci-*
- ences*, 2021, 34(6): 1286-1295.
- [14] 吴佳伟, 李苇洁, 杨瑞, 等. 红阳猕猴桃生长发育期树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. *果树学报*, 2022, 39(3): 388-405.
WU J W, LI W J, YANG R, et al. Characteristics of trunk sap flow and its relationship with environmental factors during growth and development in Hongyang kiwifruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(3): 388-405.
- [15] 刘鑫, 卢桂宾, 刘和. 枣树蒸腾速率变化与气象因子的关系[J]. *经济林研究*, 2011, 29(2): 65-71.
LIU X, LU G B, LIU H. Relationship between variation of transpiration rate in jujube trees and meteorological factors[J]. *Nonwood Forest Research*, 2011, 29(2): 65-71.
- [16] 唐子舒, 王根绪, 胡兆永. 贡嘎山不同径级峨眉冷杉树干液流特征及其影响因素[J]. *山地学报*, 2022, 40(2): 220-234.
TANG Z S, WANG G X, HU Z Y. Characteristics of stem sap flow and influencing factors of *Abies fabri* in varied diameters on mount Gongga, China[J]. *Mountain Research*, 2022, 40(2): 220-234.
- [17] 毛行元, 葛波, 成举荣, 等. 饱和供水条件下无患子树干液流特征及其影响因子[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(7): 12-17, 85.
MAO H Y, GE B, CHENG J R, et al. Sap flow characteristics and influence factors of *sapindus mutans* under saturated water supply[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(7): 12-17, 85.
- [18] 刘文国, 刘玲, 张旭东, 等. 杨树人工林树干液流特性及其与影响因子关系的研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 96-101.
LIU W G, LIU L, ZHANG X D, et al. Characteristics of sap flow and its relation to influencing factors in poplar plantations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 96-101.
- [19] 陈孟涂, 覃鑫浩, 毛炎新, 等. 半干旱区华北落叶松林冠层蒸腾特征及其影响因子[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(4): 10-17.
CHEN M D, QIN X H, MAO Y X, et al. Transpiration characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in the semi-arid area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(4): 10-17.
- [20] 李宏, 刘帮, 李长城, 等. 不同生育期幼龄枣树茎流特征及其与环境因子的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(5): 54-61.
LI H, LIU B, LI C C, et al. Characteristics of stem flow of young jujube tree at different reproductive periods and their relationship with environmental factors[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 54-61.
- [21] 冯志文, 姜远茂, 田玉政, 等. 气象因子对红富士苹果树干茎流特性的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(1): 18-24, 29.
FENG Z W, JIANG Y M, TIAN Y Z, et al. Research on stem sap flow character of 'Fuji' apple trees and the response to main meteorological factors[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2013, 44(1): 18-24, 29.
- [22] ZHANG Q Y, JIA X X, SHAO M G, et al. Sap flow of black locust in response to short-term drought in southern loess plateau of China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6222.
- [23] WANG Z K, WU Y H, CAO Q, et al. Modeling the coupling processes of evapotranspiration and soil water balance in agroforestry systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106839.