

基于液流量的苹果树蒸腾量模拟

刘春伟^{1,2} 邱让建^{2,3} 王振昌⁴ 郭维华⁴

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044;
3. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 4. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 利用热脉冲茎流计监测西北旱区盛果期苹果树茎干液流变化规律, 采用自动气象站测定气象因素的变化, 在试验基础上分析了苹果树液流量的动态变化并分别采用基于冠层变化的季节蒸发蒸腾模型(Cj)、双作物系数模型(K_{cb})和 Priestley-Taylor 模型对日均蒸腾量进行模拟。研究表明, 日均茎干液流量呈先增加后降低的单峰曲线, 基于冠层变化的季节蒸发蒸腾模型可以准确估算西北旱区盛果期果树的日均蒸腾量, 模拟的日均蒸腾量可以减小液流量的时滞影响, 提高长时间估算果树蒸腾量的精度。

关键词: 苹果树; 茎干液流; 季节蒸发蒸腾模型; 双作物系数模型; Priestley-Taylor 模型

中图分类号: Q945.17⁺2; S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0105-08

Transpiration Modeling of Apple Trees Based on Sap Flow Measurements

Liu Chunwei^{1,2} Qiu Rangjian^{2,3} Wang Zhenchang⁴ Guo Weihua⁴

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Sap flow is a key character in the understanding of plant hydraulic functioning and it is crucial in determining water consumption research of agriculture in Northwest China. The field experiment was conducted during 2008—2010 at the Shiyanghe Experimental Station for Water-Saving in Agriculture and Ecology. The site has a continental temperate climate with mean annual sunshine duration of more than 3 000 h, mean annual temperature of 8°C and mean annual precipitation of 164 mm. Apple trees (*Malus domestica* Borkh. cv. Golden Delicious) were planted in 1981, with row spacing of 6 m and plant spacing of 4 m. The experimental plots were irrigated four times per year by flood irrigation to avoid tree water stress. After measuring trunk sap flow using heat pulse method and wind speed, net radiation, relative humidity, air temperature with an automatic meteorological station, the seasonal variation of sap flow was analyzed and the daily transpiration was modeled using seasonal evapotranspiration model by canopy gap distribution (Cj), dual crop coefficient method (K_{cb}) and Priestley-Taylor method (PT). The Cj model combined hourly changes in canopy gap fraction to calculate the cover ratio of soil under the canopy and bare soil outside the canopy for soil evaporation, which was constant in the clumping model. Results showed that the seasonal sap flow increased at the beginning of the growing stages and reached peak value of 6.5 mm/d in mid-June. The Cj model performed well in modeling daily transpiration. Compared with the trunk sap flow, the average transpiration, determination coefficient (R^2), mean absolute error (MAE) and Nash and Sutcliffe modeling efficiency (NSE) of Cj model were 2.51 mm/d,

收稿日期: 2015-12-03 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309132、51509130)、江苏省基础研究计划青年基金项目(BK20130995、BK20150908)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(26120132013B06014)

作者简介: 刘春伟(1985—),男,讲师,博士,主要从事蒸散发理论与模拟研究,E-mail: liucw@nuist.edu.cn

0.49, 0.93 mm/d and 0.01, respectively. The C_j model and PT model were better in the leaf expanding period than in fruit expanding period for transpiration modeling, while the K_{cb} model kept stable during the whole season. The C_j model could decrease the effect of time lag of sap flow and be used for long time daily transpiration modeling. The long time scale transpiration modeling provided an efficient method for establishing the irrigation schedule in Northwest China.

Key words: apple tree; trunk sap flow; seasonal evapotranspiration model; dual crop coefficient model; Priestley – Taylor model

引言

苹果是石羊河流域的主要经济作物,至2006年,甘肃省武威市苹果种植面积1.12万 hm^2 ,年产量6.57万t,是河西走廊地区的优质苹果产业带之一^[1]。该地区水资源的短缺制约着苹果产业收入的增加,测定和估算苹果树蒸发蒸腾量有利于提高水分利用效率,加强水资源的田间管理,节约水资源。茎干液流量(SF)是指一定时段内通过植物树干截面的水流总量,是表示植物体内水分传输的重要指标。茎干液流量可很好地反映植物瞬时需水量^[2-3],也是明确植物体内水分传输特点的重要参数^[4]。液流量与蒸腾量之间呈线性关系,可通过SF计算植物蒸腾量^[5-7]。

龚道枝等对比了液流-微型蒸渗仪法测定和水量平衡原理计算的苹果树蒸发蒸腾量,发现2种不同方法得到的结果最大偏差在10%以内^[8]。孙慧珍等研究了不同时期不同位点树干液质比变化情况,认为距离形成层0~0.6(形成层到髓心为1)4个位点的液流量基本可以代表整树耗水量^[9]。Pereira等研究热脉冲测定的茎液流量与Penman-Monteith公式计算结果之间的关系,发现热脉冲技术可以很好地测量日尺度单棵果树的蒸腾耗水量^[10]。对盆栽幼年果树,液流量与蒸腾量是一致的,不存在时滞现象^[11]。液流量在估算盛果期果树蒸腾量时会因时滞现象产生一定误差,详细分析时滞现象对解释夜间液流量至关重要。夜间液流量为1mm/d,但净辐射为负值,蒸腾量近似为零。茎干直径的微变化也表明苹果树贮水显著。茎干储水量使得利用液流估算蒸腾量存在相当大的不确定性^[12]。

为了明确如何由茎干液流数据计算得到准确的蒸腾量,本文采用热脉冲茎流计监测盛果期苹果树的茎干液流变化,通过边材、心材及冠幅面积计算得到准确的蒸腾量。由盛果期苹果树液流量准确估算的蒸腾量,分析不同方法估算蒸腾量的差异,依据不同时段蒸腾量估算值与液流法测定蒸腾量的比较,得到模拟蒸腾量估算的最优方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2008—2010年在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站(甘肃省武威市)进行。该站位于北纬37°52',东经102°51',海拔高度1581m,属武威市平川灌区。年平均气温8℃,年积温(大于0℃)3550℃,年平均降水量164.4mm,年平均水面蒸发量2000mm,干旱系数在15~25之间,年平均日照时数3000h,无霜期150d左右,为典型温带干旱大陆性气候。地下水位为40~50m。土壤质地为砂壤土,平均土壤干容重为1.46 g/cm^3 ,平均土壤田间持水率为0.30 cm^3/cm^3 。

1.2 不同年份的灌溉制度

试验所用苹果树为元帅系列红香蕉品种,树龄为29a(至2010年)。苹果树分布呈东西走向,行距为6m,株距为4m。试验苹果树生育期分为发芽开花期、展叶幼果期、果实膨大期、果实成熟期4个生育期。依据多年平均耗水量计算灌水定额;采用小区畦灌的灌溉方式,用水表控制水量,依据果园实际管理情况和环境条件确定灌水时间。灌溉水源为地下水。每年施肥量相同^[13]。2008—2010年的灌溉制度见表1。

表1 不同年份灌溉制度

Tab.1 Irrigation schedules in different years

生育期	2008年			2009年			2010年		
	灌水量/mm	天数/d	灌水日期	灌水量/mm	天数/d	灌水日期	灌水量/mm	天数/d	灌水日期
发芽开花期	114.8	36	2008-04-23	114.8	33	2009-04-14	168.5	37	2010-05-03
展叶幼果期	151.9	35	2008-06-10	151.9	36	2009-05-26	125.2	35	2010-06-17
果实膨大期	149.0	78	2008-07-23	149.0	70	2009-07-04	149.0	74	2010-07-23
成熟采收期	62.5	30	2008-09-05	62.5	36	2009-08-25	86.3	27	2010-08-29
全生育期	478.2	179		478.2	175		529.0	173	

1.3 土壤含水率

根区土壤体积含水率采用管式时域反射仪 (Tube-TDR; IMKO Micromodultechink, Germany) 监测。试验选取 3 棵果树, 每棵树布置 4 根测管, 测管深度 180 cm, 每 5 d 测定 1 次, 测点垂向间距为 10 cm。每隔 30 d 用干燥称量法对 TDR 进行校正。

1.4 气象数据

苹果园安装了植物生理监测系统, 可以每小时记录一次采集到的净辐射、风速、空气温湿度、土壤热通量、土壤温度的平均值, 通过计算可以得到苹果园的参考作物蒸发蒸腾量 (ET_o)。

采用 FAO 56 中的 Penman - Monteith 公式计算 ET_o [14], 即

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中 R_n ——冠层表面的净辐射量, MJ/(m²·d)

G ——土壤热通量, MJ/(m²·d)

T_a ——2 m 高度处的平均温度, °C

e_s 、 e_a ——平均温度对应的饱和水汽压和平均实际水汽压, kPa

u_2 ——2 m 处平均风速, m/s

Δ ——饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/°C

γ ——湿度计常数, kPa/°C

1.5 液流

采用 SF100 型补偿式热脉冲原理茎流计 (Model SF100, Greenspan Technology Pty Ltd., Warwick, Australia) 自动监测液流量。探针为东西向布置, 探针深度分别为木质部 1.5 cm 和 2.0 cm。该深度是液流速率峰值区域, 而峰值深度处液流量对总液流量贡献最大, 因此该深度液流量可以用于计算整棵树液流量 [6]。茎流计布置在果树树干距离地面 20 cm 处, 用锡箔纸包裹探针, 以减小外界热量对探针的影响。热脉冲持续时间设为 2 s, 每 30 min 记录一次数据。液流量监测有 6 个重复。当加热探针发射热脉冲后, 由于热量扩散, 下部距离较近的热敏传感器温度首先上升, 随后由于液流流动使得上部探针温度升高, 经过一定时段后, 二者的温度达到相同。这个时段就是热脉冲峰值由液流运输传达到上下 2 个探针中心距离位置处的时间 (t)。热脉冲速率 (cm/h) 由时间 (t) 计算得到 [3, 15]。得到 t 的监测数据后, 结合树干参数, 利用液流探针计算软件 (Greenspan, Version 2.53) 计算液流速率及初始液流量 (S_{f_0}), 软件中考虑了探针伤口校正 (探针伤口

2.2 mm) 及木质部水分体积分数 (木质部占 64%, 水分占 36%) 的影响。初始液流量 S_{f_0} 单位为 L/d, 液流量 S_f (mm/d) 计算公式为

$$S_f = 1\,000 \times \frac{S_{f_0}}{S_A} \quad (2)$$

式中 S_A ——小区面积, mm²

1.6 基于冠层变化的季节模型计算蒸腾量

S - W 模型将蒸发蒸腾量 (ET) 分为土壤蒸发 (E) 和植株蒸腾 (T) 两部分, 但是冠层下方和裸露地表的土壤蒸发量差别较大。1997 年, Brenner 和 Incoll 建立了 Clumping 模型 (简称 C 模型), 将土壤蒸发分为冠层下方的土壤蒸发和裸露地表的土壤蒸发 [16], Liu 等引入冠层缝隙度和太阳高度角来计算冠层覆盖度 f , 建立 Cj 模型 [17]。由于充分考虑了冠层下方与裸地的土壤蒸发, Cj 模型有效提高了 S - W 模型的模拟精度。其表达式为 [17]

$$\lambda ET = \lambda T + \lambda E_s + \lambda E_{bs} = f(C_c P_{mc} + C_s P_{ms}) + (1 - f) C_{bs} P_{mbs} \quad (3)$$

$$\text{其中 } P_{mc} = \frac{\Delta A + (\rho C_p D - \Delta r_{ac} A_s) / (r_{aa} + r_{ac})}{\Delta + \gamma [1 + r_{sc} / (r_{aa} + r_{ac})]} \quad (4)$$

$$P_{ms} = \frac{\Delta A + (\rho C_p D - \Delta r_{as} A_c) / (r_{aa} + r_{as})}{\Delta + \gamma [1 + r_{ss} / (r_{aa} + r_{as})]} \quad (5)$$

$$P_{mbs} = \frac{\Delta A + [\rho C_p D - \Delta r_{abs} (A - A_{bs})] / (r_{aa} + r_{abs})}{\Delta + \gamma [1 + r_{sbs} / (r_{aa} + r_{abs})]} \quad (6)$$

$$C_c = R_{bs} R_s (R_c + R_a) / [R_s R_c R_{bs} + (1 - f) R_s R_c R_a + f R_{bs} R_s R_a + f R_{bs} R_c R_a] \quad (7)$$

$$C_s = R_{bs} R_c (R_s + R_a) / [R_s R_c R_{bs} + (1 - f) R_s R_c R_a + f R_{bs} R_s R_a + f R_{bs} R_c R_a] \quad (8)$$

$$C_{bs} = R_s R_c (R_{bs} + R_a) / [R_s R_c R_{bs} + (1 - f) R_s R_c R_a + f R_{bs} R_s R_a + f R_{bs} R_c R_a] \quad (9)$$

$$\begin{cases} R_s = (\Delta + \gamma) r_{as} + \gamma r_{ss} \\ R_c = (\Delta + \gamma) r_{ac} + \gamma r_{sc} \\ R_{bs} = (\Delta + \gamma) r_{abs} + \gamma r_{sbs} \\ R_a = (\Delta + \gamma) r_{aa} \end{cases} \quad (10)$$

$$f = \frac{S}{ab} = \frac{FS_0}{4ab} \left(3 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \right) \quad (11)$$

式中 E_s ——冠层盖度范围内土壤蒸发量, mm/d

E_{bs} ——裸露地表处土壤蒸发量, mm/d

λ ——水汽化潜热, MJ/kg

D ——饱和水汽压差, kPa

A ——苹果园冠层上方总能量, W/m²

A_c ——冠层截获的能量, W/m²

A_s ——冠层下方土壤获得的能量, W/m²

ρ ——空气密度, kg/m³

C_p ——空气定压比热, J/(kg·K)

- A_{bs} ——裸地土壤获得的总能量, W/m^2
 r_{abs} ——裸露地表区土壤表面到冠层通量平均高度处的空气动力学阻力, s/m
 r_{sbs} ——裸露地表的地表阻力, s/m
 a, b ——行距、株距, m
 S ——入射方向实际冠层投影面积, mm^2
 F ——缝隙度
 β ——太阳高度角
 S_0 ——冠幅面积, mm^2
 r_{aa} ——冠层通量平均高度与参照高度间的空气动力学阻力, s/m
 r_{as} ——土壤表层与冠层通量平均高度间的空气动力学阻力, s/m
 r_{ac} ——叶片表面到冠层通量平均高度的空气动力学阻力, s/m
 r_{sc} ——冠层气孔阻力, s/m , 采用修正的 Jarvis 模型计算^[1]
 r_{ss} ——土壤表面阻力, s/m , 采用表层土壤含水率计算(最小土壤表面阻力为 $100 s/m$)^[18]

3个空气动力学阻力 r_{aa} 、 r_{as} 和 r_{ac} 分别采用风廓线、植物边界层阻力 ($50 s/m$) 和湍流扩散系数 (2.5) 计算^[18]。

1.7 双作物系数模型计算蒸腾量

双作物系数模型是 FAO 56 提出的估算作物蒸发蒸腾量的方法。双作物系数中的基础作物系数与 ET_0 的乘积即为蒸腾量, 即

$$T = K_{cb} ET_0 \quad (12)$$

式中 K_{cb} ——基础作物系数

苹果生育初期、中期和末期基础作物系数初始值 K_{cbi} 分别为 0.35、0.90 和 0.65^[14]。当最小相对湿度不等于 45% 或者风速不等于 $2 m/s$, 且中期和末期的基础作物系数高于 0.45 时, 根据 FAO 56 推荐的修正公式对 K_{cb} 进行修正^[14, 19], 即

$$K_{cb} = K_{cbi} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (13)$$

($1 m/s \leq u_2 \leq 6 m/s$; $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$)

式中 RH_{min} ——最小相对湿度

h ——中期和后期作物平均冠层高度, m

1.8 Priestley - Taylor 模型计算蒸腾量

Pereira 等采用改进的 Priestley - Taylor 公式估算液流量^[20], 其表达式为

$$S_F = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{A_N}{\lambda} \quad (14)$$

其中 $A_N = 0.303(\pm 0.032) R_n L_A$
 $\alpha = 1.41 - 0.006 4L_A$

式中 A_N ——冠层表面吸收的净辐射总量, W

L_A ——叶面积, m^2

α ——经验系数^[20]

1.9 数据统计分析

采用平均值、决定系数、平均绝对误差 (MAE) 和 Nash 模型效率 (Nash and Sutcliffe modeling efficiency, NSE) 来评判蒸腾量模拟值与液流量测定值之间的差异性。平均绝对误差^[21]可以反映模拟值的绝对无偏性。NSE 是一个归一化统计量, 可以评估模型与实测值残差变化率^[17]。NSE 的范围在 $(-\infty, 1)$ 之间, 越接近 1 则模型模拟误差变化率越小。

2 结果与分析

2.1 气象因素的生育期变化

2008—2010 年试验时段为苹果园从发芽到收获采摘的整个生育期, 这期间日均风速从初期的 $2 m/s$ 降低到 $0.5 m/s$, 最大日均风速出现在 2010 年初期, 约为 $4 m/s$ (图 1a)。日平均空气温度呈单峰曲线变化, 从初期的 $0 \sim 5^\circ C$ 升高到 7 月中旬的 $25^\circ C$ 左右, 到果实成熟期又降低到 $10^\circ C$ 左右 (图 1b)。日均空气相对湿度呈逐步增加的变化趋势, 从生育初期的 30% 增长到生育末期的 90% 左右 (图 1c)。日均净辐射量呈单峰曲线, 在 7 月中旬达到最大值 $250 W/m^2$ 左右 (图 1d)。由 Penman - Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 整个生育期呈单峰型变化, ET_0 于 6 月底到 8 月初达到最大值, 约为 $7 mm/d$ (图 1e)。生育初期土壤平均体积含水率约为 $0.28 cm^3/cm^3$, 随着果树生长逐步降低, 灌水和降水后回升, 到生育末期降低到 $0.20 cm^3/cm^3$ (图 1f)。

2.2 日平均茎干液流量季节变化规律

苹果树在不同生育期的日均液流量呈先增加后减小的变化趋势 (图 2)。各生育期从萌芽开始, 日均液流量随着叶面积指数的增加而增大, 于 6 月中旬达到峰值, 约为 $5.0 \sim 6.5 mm/d$, 然后保持微弱的降低趋势, 于果实成熟期迅速降低。液流量的最小值出现在生育初期和末期, 约为 $1 mm/d$ 。

果实膨大期茎干液流总量较大, 持续时间较长。生育初期叶面积指数小, 植株蒸腾量占比例较小, 中后期随着叶面积指数的增加, 蒸发蒸腾量以蒸腾量为主, 液流量也维持在较高的水平。2008—2010 年总液流量分别为 576、512、556 mm。

2.3 不同模型估算蒸腾量与实际测定液流量对比

采用基于冠层变化的季节蒸发蒸腾模型 (Cj 模型)、双作物系数法及 Priestley - Taylor 模型 (PT 模

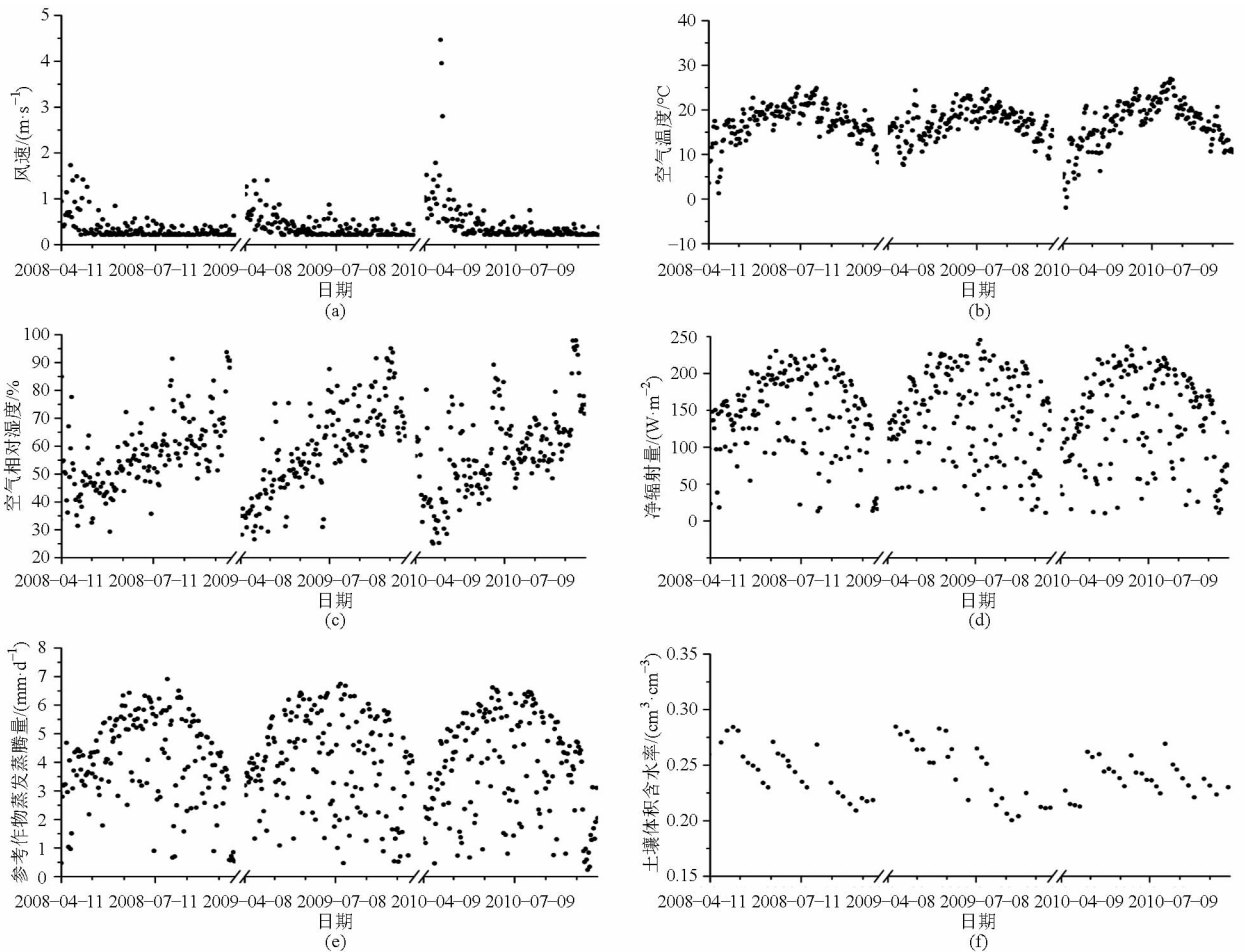


图1 2008—2010年气象因素和土壤平均体积含水率的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of meteorology factors and soil water content in 2008—2010

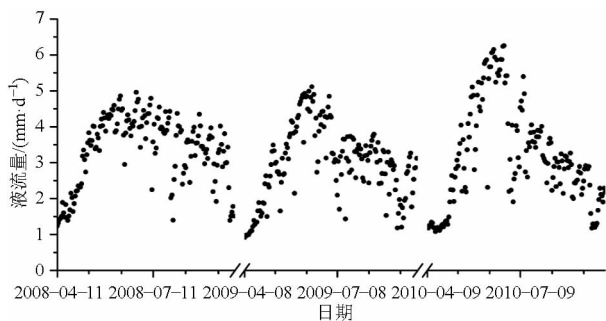


图2 2008—2010年日均茎干液流量的季节变化规律

Fig. 2 Seasonal variation of average daily sap flow in 2008—2010

型)分别计算日均蒸腾量并分生育前期和后期与日均液流量做对比(图3),生育前期和后期的划分以叶面积指数的季节变化划分,生育前期叶面积指数持续增长,生育后期叶面积指数保持稳定,具体划分见文献[22]。结果表明不同生育阶段蒸腾量模拟值和液流量实测值间决定系数均达到极显著水平($p < 0.01$),全生育期日均蒸腾量与液流量对比表明,PT模型最好,决定系数 R^2 为0.59,双作物系数法次之, R^2 为0.53,Cj模型稍差, R^2 为0.49。生育前期Cj模型和PT模型蒸腾量模拟值与实测液流量的

决定系数为0.67和0.78,均高于生育后期的0.45和0.59。

表2为不同模型模拟日均蒸腾量与实测液流量的对比。表2表明,Cj方法估算的蒸腾量与实测液流量间的MAE为0.93 mm/d,NSE为0.01,均优于PT模型和双作物系数法模拟值。Cj模型的决定系数 R^2 为0.49,模型均值为2.51 mm/d,低于实测液流量。PT模型和双作物系数法模拟值与实测液流量间的 R^2 分别为0.57和0.52,但其MAE均超过1 mm/d,NSE均小于0。综上分析,Cj模型模拟值最为理想,可以较好地实现果树蒸腾量的模拟。

3 讨论

液流量是表征果树蒸腾量的重要参数,液流量与冠幅面积结合可计算得到果树蒸腾量^[22]。生育初期,试验区日均风速较高,生育中后期,风速显著降低;空气温度和净辐射量呈单峰曲线变化,这些气象条件充分体现了本地区的干旱大陆性气候。在生育末期降水较多,空气相对湿度在生育末期保持在较高水平,不利于果实成熟、采收和保存。

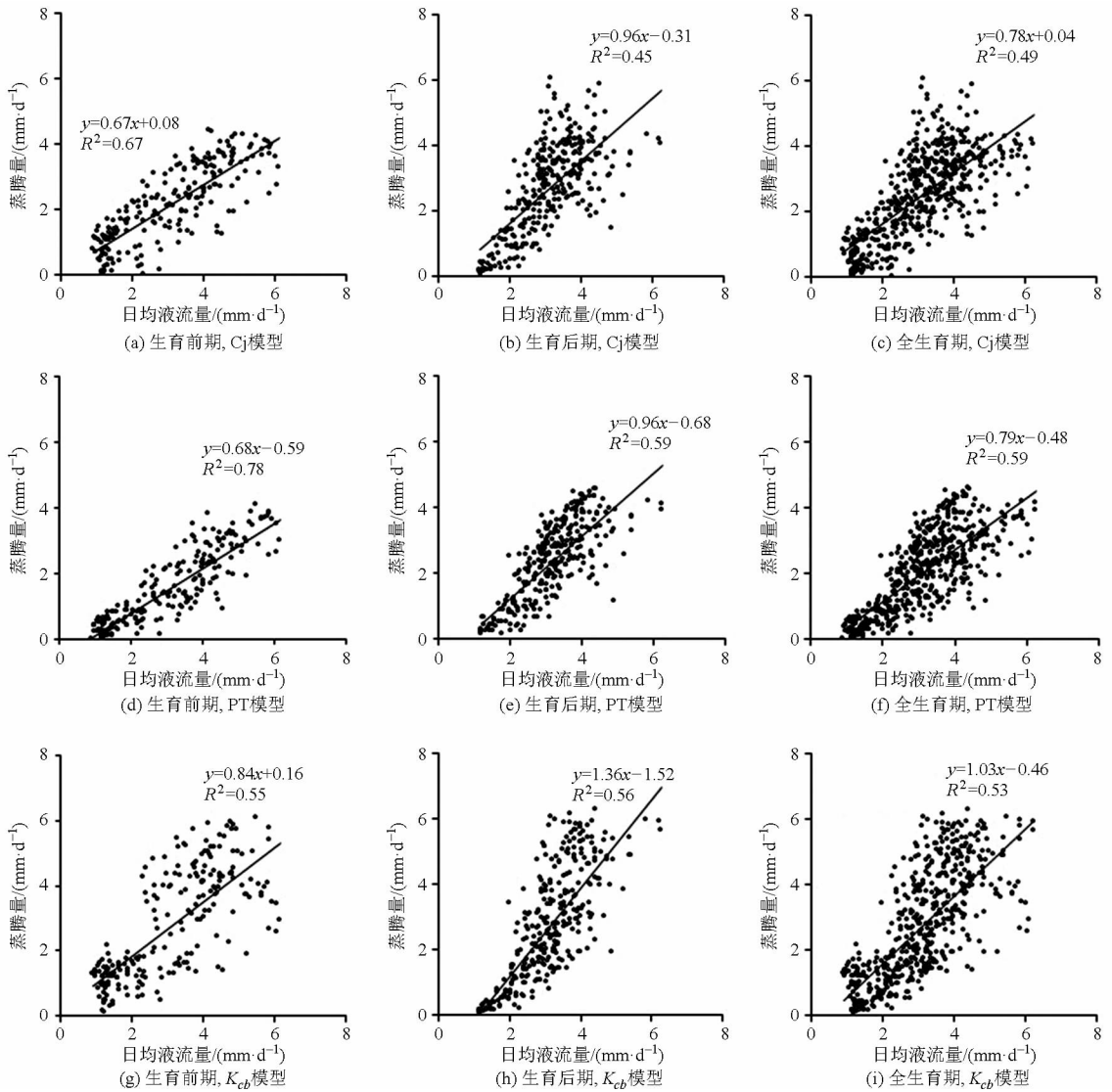


图3 生育前期、后期及全生育期模拟蒸腾量与日均液流量的对比

Fig. 3 Comparison of modeled transpiration with daily sap flow at leaf expanding, fruit growing and whole growth stages

表2 不同模型蒸腾量模拟值与实测液流量的对比

Tab. 2 Comparison of modeled transpiration and measured sap flow

模型	实测液流量/模型均值/ (mm·d ⁻¹) (mm·d ⁻¹)		斜率	R ²	MAE/ (mm·d ⁻¹)	NSE
Cj	3.17	2.51	0.79	0.49	0.93	0.01
PT	3.17	2.04	0.66	0.57	1.18	-0.41
双作物 系数法	3.17	2.81	0.90	0.52	1.00	-0.05

液流量的变化不仅与气象条件有关,还与果树的生育期有关^[23]。枝条的生长发育引起叶面积指数的增加,蒸腾量随着冠层的发展而增加。2008—2010年液流量日均值峰值呈增加趋势,这可能是由于2010年最高气温较高,土壤水分供应充足时,液流量也较大。Consoli等测定发现25a生柑橘树的日均液流量峰值约为4.0 mm/d^[24]。地中海气候条件下的滴灌橄榄树(3.5 m高)日均液流量峰值仅为2.54 mm/d^[25],但滴灌樱桃树(5 m高,7 a生)的日

均液流量可达到8.4 mm/d^[26]。

液流量是树干内水分传输的反映。高大的树或者果树体内有一定的储水能力^[27],瞬时液流量与实际蒸腾量并不能完全对应,即液流量存在一定的时滞效应^[11]。对日均蒸腾量进行模型模拟可以忽略时滞效应,得到良好的模拟结果,因此本研究选取不同模型对日均蒸腾量进行模拟。对小时液流量的模拟结果表明,特定时段下的气孔导度模型可以准确模拟蒸腾量^[28];但Paudel等的研究表明,小时液流量与气孔导度模型比较存在较明显的滞后现象,气孔导度模型对日均蒸腾量的模拟较好^[29]。日均蒸腾量的模拟不仅减小液流量时滞作用的影响,同时减小了估算季节尺度或月尺度测定蒸腾量过程中的不确定性,提高了模拟精度^[30]。本研究中,在生育初期,PT模型和双作物系数法可能会优于Cj模型,但整个季节蒸腾量模拟时,Cj模型稳定性较好。这可能是由于Cj模型以Penman-Monteith公式为基

础,充分考虑了叶面积指数和气象因素的变化。在枣林的蒸发蒸腾量模拟中也表明,复杂模型与液流量更符合^[31]。Cj 模型计算比较复杂,若对精度要求不高,也可以采用 PT 模型或双作物系数法进行蒸腾量模拟。

4 结束语

石羊河流域充分灌水条件下盛果期苹果树茎干

液流量呈单峰曲线的季节变化。基于液流量计算了蒸腾量,并采用基于冠层变化的季节蒸发蒸腾模型(Cj)、双作物系数法和 Priestley - Taylor 公式模拟果树蒸腾量,结果表明 Cj 模型估算的日均蒸腾量可以准确反映西北旱区盛果期果树的水分状况,为该地区合理制定苹果树的灌溉制度提供了良好的依据。

参 考 文 献

- 1 刘春伟. 西北旱区苹果园水分传输机理与耗水模拟[D]. 北京:中国农业大学,2012.
- 2 González-Altozano P, Pave E W, Oncins J A, et al. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(5): 503 - 515.
- 3 Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7 - 8): 1046 - 1056.
- 4 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.
- 5 Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(1 - 2): 85 - 94.
- 6 Kume T, Komatsu H, Kuraji K, et al. Less than 20-min time lags between transpiration and stem sap flow in emergent trees in a Bornean tropical rainforest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6 - 7): 1181 - 1189.
- 7 Nicolás E, Torrecillas A, Ortuño M F, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 72(2): 131 - 145.
- 8 龚道枝, 康绍忠, 张建华, 等. 苹果树蒸发蒸腾量的测定和计算[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5 - 6): 429 - 431. Gong Daozhi, Kang Shaozhong, Zhang Jianhua, et al. Measuring and estimating evapotranspiration of an apple (*Malus pumila* Mill.) orchard[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5 - 6): 429 - 431. (in Chinese)
- 9 孙慧珍, 康绍忠, 龚道枝. 测定位点对计算梨树树干液流的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2024 - 2028. Sun Huizhen, Kang Shaozhong, Gong Daozhi. Influence of measurement position on calculating pear tree stem sap flow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2024 - 2028. (in Chinese)
- 10 Pereira A R, Green S, Nova N A V. Penman - Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1 - 2): 153 - 161.
- 11 Uddin J, Smith R, Hancock N, et al. Evaluation of sap flow sensors to measure the transpiration rate of plants during canopy wetting and drying [J]. *Journal of Agricultural Studies*, 2014, 2(2): 105 - 119.
- 12 Kumagai T, Aoki S, Otsuki K, et al. Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(16): 2335 - 2344.
- 13 刘春伟, 关芳, 杜太生, 等. 西北旱区苹果园耗水规律研究[C]//中国农业工程学会农业水土工程专业委员会. 现代节水高效农业与生态灌区建设(上). 昆明:云南大学出版社,2010:171 - 176.
- 14 Allen R, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Roma, Italy, 1998: 300.
- 15 Swanson R H, Whitefield D W A. A numerical analysis of heat velocity theory and practice [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1981, 32: 221 - 239.
- 16 Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 84(3 - 4): 187 - 205.
- 17 Liu C, Sun S, McNulty S G, et al. An improved evapotranspiration model for an apple orchard in Northwestern China [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(5): 1253 - 1264.
- 18 Zhang B, Kang S, Li F, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of Northwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1629 - 1640.
- 19 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002(3): 50 - 54.
- 20 Pereira A R, Green S R, Nova N A V. Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley - Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 92: 48 - 52.
- 21 Zhang B, Liu Y, Xu D, et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(6): 1303 - 1316.
- 22 Liu C W, Du T S, Li F S, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with

- affecting factors in an arid region of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 193 – 202.
- 23 魏新光, 王铁良, 刘守阳, 等. 种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 171 – 180.
Wei Xinguang, Wang Tieliang, Liu Shouyang, et al. Effect of planting years on jujube transpiration in semi-arid hilly areas of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 171 – 180. (in Chinese)
- 24 Consoli S, Papa R. Corrected surface energy balance to measure and model the evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1159 – 1171.
- 25 Cammalleri C, Rallo G, Agnese C, et al. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 89 – 97.
- 26 Juhász Á, Hrotkó K. Comparison of the transpiration part of two sources evapotranspiration model and the measurements of sap flow in the estimation of the transpiration of sweet cherry orchards [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 142 – 150.
- 27 党宏忠, 杨文斌, 李卫, 等. 民勤绿洲二白杨树干液流的径向变化及时滞特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 9(9): 2501 – 2510.
Dang Hongzhong, Yang Wenbin, Li Wei, et al. Radial variation and time lag of sap flow of *Populus gansuensis* in Minqin Oasis, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 9(9): 2501 – 2510. (in Chinese)
- 28 Granier A, Bréda N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements [J]. *Annales des Sciences Forestières*, 1996, 53(2 – 3): 537 – 546.
- 29 Paudel I, Naor A, Gal Y, et al. Simulating nectarine tree transpiration and dynamic water storage from responses of leaf conductance to light and sap flow to stem water potential and vapor pressure deficit [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(4): 425 – 438.
- 30 Bell D M, Ward E J, Oishi A C, et al. A state-space modeling approach to estimating canopy conductance and associated uncertainties from sap flux density data [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(7): 792 – 802.
- 31 卫新东, 刘守阳, 陈滇豫, 等. Shuttleworth – Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 142 – 151.
Wei Xindong, Liu Shouyang, Chen Dianyu, et al. Applicability of Shuttleworth – Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in loess hilly-gully region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 142 – 151. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 142 页)

- 25 宋秋华, 李凤民, 王俊, 等. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响 [J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2015 – 2032.  
Song Qiuhua, Li Fengmin, Wang Jun, et al. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid loess plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2015 – 2032. (in Chinese)
- 26 夏冬, 李洁英, 王广龙, 等. 不同覆盖方式对土壤肥力和番茄产量及品质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1826 – 1832.  
Xia Dong, Li Jieying, Wang Guanglong, et al. Effects of different mulching methods on soil fertility and the yield and quality of tomato [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1826 – 1832. (in Chinese)
- 27 高亚军, 李云, 李生秀, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响 [J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2901 – 2910.  
Gao Yajun, Li Yun, Li Shengxiu, et al. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in dryland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2901 – 2910. (in Chinese)
- 28 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响 [J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 24 – 25.  
Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24 – 25. (in Chinese)
- 29 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208 – 214.  
Wang Cairong, Tian Xiaohong, Li Shengxiu. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rainwater-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat [J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2004, 37(2): 208 – 214. (in Chinese)