

基于叶面积与冠层辐射的果树蒸腾预测模型

李仙岳^{1,2}, 杨培岭^{1,*}, 任树梅¹, 张少炎¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为了揭示特色经济果树叶面积、冠层辐射与其蒸腾的关系, 采用液流技术连续监测了北京昌平北流果园试验地 15 年生杏树 (*Prunus armenica* L.)、16 年生樱桃 (*Prunus avium* L.) 5~7 月份蒸腾动态变化, 同步监测了气象与土壤水分数据。引入代表土壤、气象等环境因素的时间特征参数 (K), 代表不同果树吸收能量差异的叶面积 (LA) 与表示参照作用的参考蒸腾量 (T_0), 采用双系数方法建立了蒸腾预测模型 ($T = K \cdot LA \cdot T_0$)。通过叶面积、净辐射与蒸腾的相关分析, 确立了 5、6、7 月份的时间特征参数分别为 0.14、0.09、0.06。通过与仅考虑辐射的一元回归方程比较分析, 提出的模型精度显著提高, 5、6、7 月份的 R^2 (0.9、0.85、0.75) 提高 1 倍, $RMSE$ (2.50、1.92、1.57), ARD (12.51%、20.76%、19.62%) 则是后者的 1/2。进一步采用 Priestley-Taylor (PT) 计算值作为参考蒸腾量, 利用本模型计算了 3 个月 2 种果树共 177d 蒸腾量。将其与液流法实测蒸腾量进行拟合, 得到回归方程 $y = 1.01x$ ($R^2 = 0.92$)。可见本模型精度高, 形式简单, 便于应用。

关键词: 叶面积; 辐射; 蒸腾; 模型; 果树

文章编号: 1000-0933 (2009) 05-2312-08 中图分类号: Q142, Q945, S161.4, S662 文献标识码: A

The model of prediction of transpiration for fruit tree based on leaf area and canopy radiation

LI Xian-Yue^{1,2}, YANG Pei-Ling^{1,*}, REN Shu-Mei¹, ZHANG Shao-Yan¹

1 College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2 College of Water Conservancy & Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2312 ~ 2319.

Abstract: In order to reveal inherent relation between leaf area, canopy radiation and transpiration on economical fruit trees, dynamic changes of transpiration of 15 year-old apricot trees (*Prunus armenica* L.) and 16 year-old cherry trees (*Prunus avium* L.) were continuously monitored with sap flow measuring system in Beiliu orchard in Changping, Beijing from May to July, 2007. The meteorological data and soil moisture were also measured. Using time character parameter (K) which represents soil, weather and other environmental factors, leaf area (LA) which represents how much energy is absorbed by fruit trees, and reference crop transpiration (T_0) which serves as reference, the dual coefficient method was used to establish the model of predicting transpiration ($T = K \cdot LA \cdot T_0$). The correlation analysis between leaf area, net radiation and transpiration was carried out, and K was determined in May, June and July, which is 0.014, 0.09 and 0.06 respectively. By the comparison analysis between the model and linear regression model in that only the radiation was considered, the accuracy was significantly improved. R^2 (0.9, 0.85, 0.75) in May, June and July was twice, the $RMSE$ (2.50, 1.92, 1.57) and ARD (12.51%, 20.76%, 19.62%) were half of latter's. As reference transpiration which got by Priestley-Taylor (PT) was used in the model to calculate transpiration of 177 days on two fruit trees in three months. Then regressing with measured data, the equation that $y = 1.01x$ was got ($R^2 = 0.92$). It showed that the model was very simple to predict transpiration with high precision and easy to use.

基金项目: 北京市科委“十一五”重大科技攻关资助项目 (D0706007040191-08); 国家科技部科技司农业科技成果转化资金资助项目 (05EFN217100425); 北京市科技计划资助项目 (Z08040602990807)

收稿日期: 2008-01-09; 修订日期: 2008-05-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangpeiling@126.com

Key Words: leaf area; radiation; transpiration; model; fruit tree

根据作物实际需水量进行灌溉管理,确定灌溉时间和灌水量等,是果园水分管理的关键。目前有多种测定实际蒸发量的方法,较精确的方法有波文比-能量平衡法和涡度相关技术^[1,2]。它们要求研究对象有足够的均一下垫面^[3],并且设备昂贵,需要经常的技术服务,实际应用相当困难。而液流方法是一种相对简单、廉价、能连续测量整树蒸腾耗水过程的一种有效方法^[4,5],能精确测定果树实际蒸腾量。

虽然液流测定系统能准确记录树木瞬时蒸腾量,但出于成本与管理等因素考虑,在田间果园灌溉管理中很少采用。通过容易获取的资料进行模拟计算是解决的有效途径。作物系数-参考作物蒸发蒸腾量法是作物需水量计算最普遍的方法。研究表明,FAO 作物系数法,尤其是双值法作物系数能够较好的模拟作物日蒸发蒸腾量^[6,7],但是该方法需要进行逐日水量平衡计算,需要的数据量大,一般只用于灌溉制度的研究和田间水平衡的分析^[8]。对于 Penman-Monteith (PM)^[9]计算参考蒸腾量,虽然理论性强,准确计算作物蒸腾量^[10,11],但参数获取相对困难。而 Priestley-Taylor (PT) 公式由于输入的参数较少而得到广泛的应用,著名的作物生长模型如 CERES、EPIC 等都应用它计算蒸腾量,已有学者通过比较 PT 与 Penman^[12],PT 与 PM^[13]后认为 PT 方法完全能够满足田间灌溉管理的要求。果树叶面积、树冠结构、叶片光学性质的差异会导致相同的外部环境因素下实际蒸腾量明显不同,其中树冠总叶面积的大小对蒸腾影响最大^[14,15]。而外部环境中,冠层辐射是影响蒸腾最重要的因素,通过净辐射与叶面积估计的蒸腾量与液流法实测的蒸腾量极显著相关^[16]。

可见利用叶面积、净辐射、PT 公式预测果树蒸腾量,指导灌溉是可行的,本研究旨在建立以叶面积、冠层辐射为主要参数,建立形式简单,便于实际应用的果树蒸腾模型。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验在北京昌平区北流果园试验地(北纬 116° 4'10"、东经 40°10'54")进行,供试的果树为 15 年生杏树 (*Prunus armenica* L.),行距 4m,株距 3.5m,16 年生樱桃 (*Prunus avium* L.),行距 4.5m,株距 4m。试验区土壤表土 60cm 为客土,土质为砂壤土。为了减少土面蒸发,在土壤表面覆盖 10~15cm 的秸秆、草、有机肥等覆盖物。

1.2 观测项目与方法

试验开始于 2007 年 4 月中下旬,正值杏、樱桃果实生长期。试验共选 12 棵生长状况良好的样树安装 TDP 探针(热扩散式探针法),其中杏、樱桃各 6 棵。用生长锥法确定样树边材面积。由于树干分枝较低,统一在离地面 30cm 处,上下间隔 4cm 安装由一对热电偶组成的 Granier 热扩散探针,上方为加热探针,下方探针不加热,通过记录两探针之间温差变化,测定果树木质部液流密度。杏树探针长为 20mm,樱桃探针长为 30mm。

在距杏、樱桃附近的空地上安装自动气象站(太阳总辐射传感器、太阳有效辐射传感器、湿度传感器、大气压力传感器、风速传感器、雨量传感器),包括液流在内所有的数据 30s 读 1 次,每隔 5min 进行平均并记录数据到英国 Grant 公司的自动采集器的内存里(Squirrel Date Logger 2040 Series),定期下载数据。在杏、樱桃冠层上方采集的净辐射(TBB-1 净辐射传感器)也是每隔 5min 记录到净辐射记录仪(PC-2B)中,在离每棵安装 TDP 探针的样树树干 30cm 处,距地面 20、40、60cm 埋设 FDS 土壤水分传感器^[17],每天测量土壤水分,并 1 周左右用土钻校正 1 次。用 LAI2000 冠层分析仪测量每棵样树的叶面积指数。

蒸腾速率通过平均液流密度乘以边材面积求得,其中液流密度通过记录的温差电势数,根据 Granier 的液流密度经验公式求出^[18]:

$$f = 119 \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中, f 为平均液流密度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔT 为两个探针的温差 ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta T_{\max}$ 为两个探针的昼夜最大温

差(℃)。

1.3 蒸腾计算方法

根据 FAO 推荐的双作物系数法计算实际作物蒸发蒸腾量计算公式^[9]为:

$$ET = K_c \cdot ET_0 = (K_{cb} \cdot K_s + K_e) \cdot ET_0 \quad (2)$$

式中, K_{cb} 为基础作物系数; K_s 为水分修正系数; K_e 为表层土壤蒸发系数。树冠叶面积的大小与冠层吸收的能量成正比, 与蒸腾量紧密相关, 同时在不同季节土壤水分, 叶片本身光学特性、能量转化效率都存在很大的差异, 将这些因素用时间特征参数 K 表示。模仿双作物系数公式, 将蒸腾量公式简化表示为:

$$T = K \cdot LA \cdot T_0 \quad (3)$$

式中, K 为时间特征参数, LA 为叶面积, T_0 为不同公式计算的参考蒸腾量。

用 Priestley-Taylor 方法^[19]计算作物参考需水量, 用冠层净辐射代替标准净辐射计算参考蒸腾量:

$$T_{PT} = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R'n}{\lambda} \quad (4)$$

式中, Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率 ($\text{hPa}^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数, $0.066/\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$; $R'n$ 为树冠上方净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); λ 为汽化潜热 ($2.45 \text{ MJ} \cdot \text{L}^{-1}$); 令 $Rn = \frac{R'n}{\lambda}$ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。在同一时间、同一地点, 对不同果树冠层上方吸收能量的多少, 主要与叶面积大小、叶片本身特性、土壤水分、不同季节能量转化效率等有关, 可以将蒸腾量进一步表示:

$$T = K \cdot LA \cdot T_{PT} = K \cdot LA \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn \quad (5)$$

式中, K 是时间特征参数, LA 为叶面积, α 为 PT 系数计算确定。当缺少温度资料时, 可以将公式进一步简化只考虑辐射的情况:

$$T = K \cdot LA \cdot Rn \quad (6)$$

1.4 分析方法

利用均方根误差 (RMSE)、平均相对误差 (ARD) 分析计算值与实测值之间误差, 采用 Spass13 对回归方程进行方差检验:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (T_{\text{measured}} - T_{\text{estimated}})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$ARD = \frac{\frac{1}{n} \sum |T_{\text{measured}} - T_{\text{estimated}}|}{T_{\text{measured}}} \times 100\% \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 环境因子与蒸腾的变化规律

5 月份是杏树、樱桃蒸腾果实迅速膨大期, 缺水会明显影响果实产量, 6 月份已经到了成熟期, 水分对果实的影响有限, 7 月对水分的需求明显减少, 所以精确掌握果树不同时期需水量是进行灌溉管理的关键。影响蒸腾的环境因素主要有提供能量的辐射与提供生命代谢的水分, 而温度高低直接涉及到叶片气孔的开度。从图 1 可以看出, 由于 5 月份灌溉所以土壤水分较高, 从而蒸腾量明显高于其它月份。6 月、7 月份蒸腾明显下降了, 这与土壤水分有关, 另一方面是由于 6 月初果实成熟, 进行了采摘。总体上土壤水分随时间呈下降的趋势, 这与蒸腾变化的趋势一致呈正相关, 冠层净辐射呈波动变化, 温度变化比较有规律呈逐渐升高趋势, 但与蒸腾变化正好相反, 这可能是这几个月土壤水分与净辐射对杏树与樱桃的影响占主导地位, 特别是净辐射与果树蒸腾呈显著相关^[20]。

2.2 时间特征参数的确定

时间特征参数表示某一段时间内土壤、气象等外部环境因素引起蒸腾的综合效应, 从经验模型 ($T = K \cdot LA \cdot T_0$) 可以看出, 蒸腾量与时间特征参数、参考蒸腾量成比例关系。为了简化过程将参考蒸腾量仅考虑净

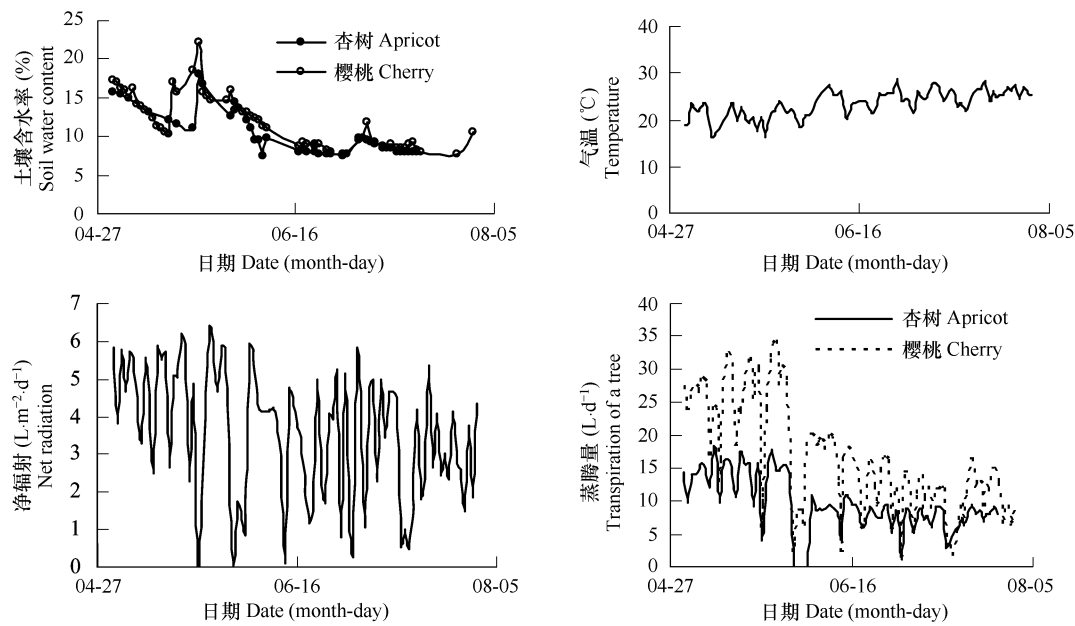


图1 杏树与樱桃环境因素与蒸腾量季节变化规律

Fig. 1 Seasonal variations of environmental factor and transpiration of apricot and cherry

辐射的情况下计算时间特征参数。

从图2可以看到杏树与樱桃日蒸腾量与日净辐射总量都呈线性相关,斜率大小变化存在两个特点:随月份逐渐变小,樱桃大于杏树。说明樱桃的蒸腾量要高于杏树,而且随时间蒸腾量总体上变小。净辐射取零时,截距趋于同一个平均数约为4.7。

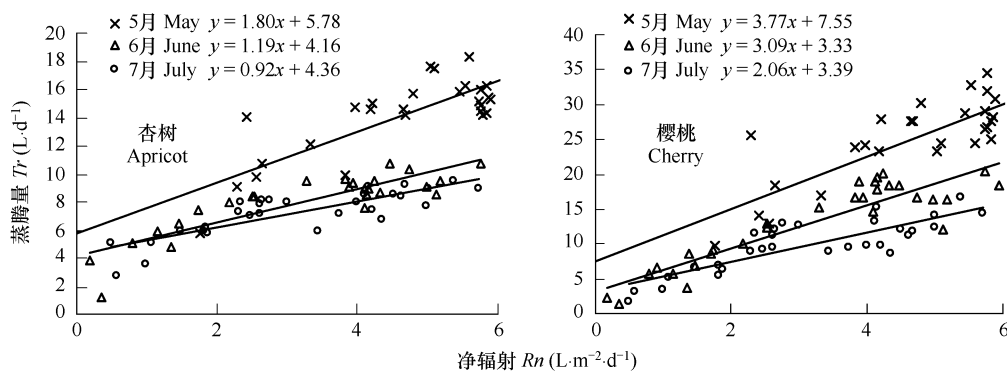


图2 杏树与樱桃不同月份净辐射与蒸腾的相关分析

Fig. 2 Relationship of monthly R_n and transpiration of apricot and cherry

为了简化净辐射与蒸腾的关系,将坐标轴通过平移变换,采用简单回归方程($Y = S - 4.7 = a \cdot R_n$)建立冠层上方日净辐射总和(R_n)与每棵树日液流总量($S, L \cdot d^{-1}$)的关系。表1详细统计了5、6、7月份杏树与樱桃蒸腾与冠层上方净辐射的相关信息,杏树与樱桃在不同月份蒸腾与冠层上方的净辐射都呈显著线性相关,但不同作物、不同月份存在明显差异,5、6月份相关系数相近但高于7月份,这是由于7月份天气变化频繁、降雨多导致相关系数较低,同时随着时间的推移回归方程的比例系数(a)都呈线性下降趋势,即在增加单位净辐射的条件下,蒸腾量减少,这与果树生长后期自身的需水量减少有关,而土壤水分降低也限制了果树蒸腾。

由于在果树叶面积相对稳定,将比例系数与叶面积相除作为果树的时间特征参数(K),则从表1可以发现杏树与樱桃在相同时间特征参数十分相近,不同月份呈直线下下降趋势且线性相关。可见叶面积与比例系数

存在某种联系,是不同树木蒸腾多少的关键参数,这与 Pereira A R 等^[16]认为比例系数与叶面积成比例关系不谋而合。由于樱桃叶面积比杏树大很多,在相同辐射强度条件下冠层吸收的能量较多,在公式中的比重较大,所以以樱桃时间特征参数为两种果树的特征参数。从表 1 中可以看出 5 月、6 月、7 月份两种果树的时间特征参数分别为 0.14、0.09、0.06,成线性减小,可见环境因子总体上抑制了蒸腾,主要是采摘后停止灌溉,土壤水分较低的原因。

表 1 不同月份冠层净辐射与蒸腾的回归分析

Table 1 Regression analysis of R_n and transpiration in different months

月份 Month	杏树 Apricot(每棵树 $LA = 12.77\text{m}^2$)、樱桃 Cherry(每棵树 $LA = 30.22\text{m}^2$)					
	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2	n	K	$RMSE$ ($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)	ARD (%)
5 月杏树 Apricot in May	$Y = 2.02 \cdot R_n$	0.73 **	30	0.16	1.70	10.03
5 月樱桃 Cherry in May	$Y = 4.33 \cdot R_n$	0.74 **	30	0.14	2.89	13.91
6 月杏树 Apricot in June	$Y = 1.06 \cdot R_n$	0.74 **	26	0.08	1.12	20.28
6 月樱桃 Cherry in June	$Y = 2.75 \cdot R_n$	0.81 **	29	0.09	2.28	17.10
7 月杏树 Apricot in July	$Y = 0.83 \cdot R_n$	0.68 **	31	0.06	0.93	11.99
7 月樱桃 Cherry in July	$Y = 1.72 \cdot R_n$	0.67 **	30	0.06	1.98	26.12

* * $P < 0.01$

2.3 基于叶面积、净辐射的预测蒸腾量

在同等辐射强度下,叶面积的大小决定着吸收能量的多少。不同果树因叶面积不同导致蒸腾存在很大差异,考虑叶面积后樱桃与杏树蒸腾量可用同一回归方程表示,而且相关系数得到提高、误差降低。图 3 是两种果树考虑叶面积与未考虑叶面净辐射与蒸腾的相关分析,同样通过坐标平移变换,采用 $Y = S - 4.7 = a \cdot R_n$ 简单线性回归进行分析。可以看出不考虑叶面积时净辐射与两种果树的相关性很低(图 2-a、b),明显低于考虑叶面积时净辐射与两种果树的相关系数(图 2-c、d)。将建立的统计模型通过误差分析,发现考虑叶面积时 $RMSE$ 、 ARD 明显低于不考虑叶面积情况(表 2)。

表 2 利用净辐射、叶面积预测不同果树蒸腾量的误差分析

Table 2 Error Analysis on predicting transpiration of different fruit trees based on R_n , LA

应用方程 Applied equation	月份 Month	统计模型 Statistical model	相关系数 R^2	n	$RMSE$ ($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)	ARD (%)
$T = \alpha \cdot R_n$	5 月 May	$Y = 3.15 \cdot R_n$	0.42 **	60	5.92	30.21
	6 月 June	$Y = 1.95 \cdot R_n$	0.48 **	55	3.60	35.29
	7 月 July	$Y = 1.28 \cdot R_n$	0.49 **	62	2.24	24.66
$T = K \cdot LA \cdot R_n$	5 月 May	$Y = 0.14 \cdot LA \cdot R_n$	0.90 **	60	2.50	12.51
	6 月 June	$Y = 0.09 \cdot LA \cdot R_n$	0.85 **	55	1.92	20.76
	7 月 July	$Y = 0.06 \cdot LA \cdot R_n$	0.75 **	61	1.57	19.62

* * $P < 0.01$

由表 2 可知,经验模型的时间特征参数(0.14,0.09,0.06)与表 1 中 K 的数值一致而且 R^2 高于仅考虑单种果树时的回归结果, $RMSE$ 、 ARD 甚至降低(表 1)。这也验证了叶面积大小将会通过影响冠层能量的吸收而影响果树的蒸腾。从表 2 知,蒸腾量主要有 3 部分组成,分别是时间特征参数、叶面积、净辐射。时间特征参数主要受到土壤水分、环境气象因素等外部条件的影响,本研究发现不同果树在同一段时间内 K 有相近的数值。叶面积与净辐射大小与果树能量吸收密切相关。可见在外界环境因素相同时,果树蒸腾量主要受净辐射与叶面积的影响,在生长后期果树通过减小叶面积的大小来调节蒸腾量,在果实膨大期通过调节叶面积加大蒸腾量,加快水分通过植物的运输过程,使更多的矿质盐及有机物运至植物上部供给快速生长的果实。

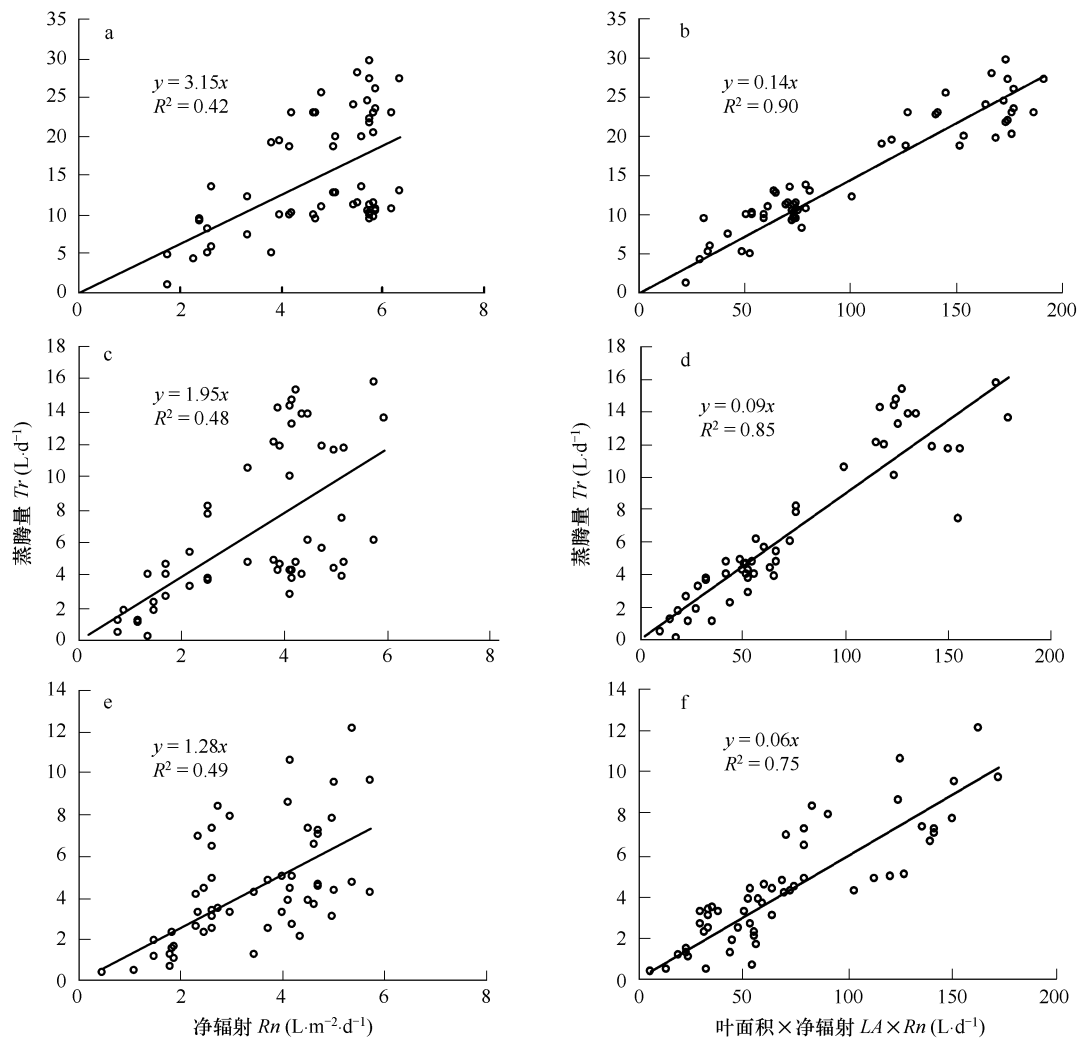


图3 两种果树蒸腾与净辐射、叶面积的相关分析

Fig. 3 Relationship between transpiration and R_n , LA of the two fruit trees

a、c、e 是 5、6、7 月份蒸腾与净辐射, b、d、f 是 5、6、7 月份蒸腾与叶面积 $\times$ 净辐射的关系分析 Relationship between transpiration and R_n for pictures of a, c and e, transpiration and $LA \times R_n$ for pictures of b, d and f in May-June

2.4 应用 Priestley-Taylor 公式预测蒸腾量

以冠层上方净辐射值和树冠叶面积为基本参数已经能够较准确估算作物蒸腾量^[16],但为进一步提高预测精确性还需要考虑其它气象因子。PT 公式在考虑净辐射的同时利用温度修正了计算值,精度得到提高。它将 PM 公式空气动力项通过系数表示,也是 Penman 公式缺失风速与空气相对湿度的简化版本^[21], Gunston^[22]根据 30 个热带气象站资料分析得到在当月降雨量超过同期 T_{PM} 时,完全可以与 PM 等同,从而达到用简单气象资料精确预测作物耗水量的目的。表 3 是用默认的 PT 系数(1.26)得到的蒸腾量与茎流计实测蒸腾量的相关统计表,可以看出相关系数比仅考虑净辐射时有所提高,同样都达到显著相关。均方根误差(RMSE)与相对误差(ARD)同比非常接近,这是由于虽然温度有上升趋势但是比较平稳,净辐射仍然是蒸腾的主要驱动力。

同样把蒸腾量看作是由冠层上方的能量转换的结果,可以用如下公式表示不同作物不同时间的蒸腾量:蒸腾量 = 特征参数 $\times$ 叶面积 $\times T_{PT}$ 。即 $T = K \cdot LA \cdot T_{PT}$,不同作物不同月份的回归方程是 $Y = 1.01x$ ($R^2 = 0.92$, $n = 177$, $\alpha = 1.64$) (图 4),达到极显著相关。预测方程均方根误差为 $2.01 L \cdot d^{-1}$,相对误差为 17.86%,这完全能满足实际灌溉的要求。

表 3 PT 计算值与实测蒸腾的相关统计表

Table 3 Statistics of calculated values of PT and measured values of transpiration

月份 Month	回归方程 ($Y = S - 4.7 = b \cdot T_{PT}$) Regression equation	相关系数 R^2	n	RMSE ($L \cdot d^{-1}$)	ARD (%)
5 月杏树 Apricot in May	$Y = 2.42 T_{PT}$	0.76 **	30	1.79	10.69
5 月樱桃 Cherry in May	$Y = 5.55 T_{PT}$	0.88 **	31	2.76	13.68
6 月杏树 Apricot in June	$Y = 1.43 T_{PT}$	0.76 **	26	1.18	21.04
6 月樱桃 Cherry in June	$Y = 3.59 T_{PT}$	0.81 **	29	2.24	20.53
7 月杏树 Apricot in July	$Y = 1.10 T_{PT}$	0.70 **	31	0.94	12.30
7 月樱桃 Cherry in July	$Y = 2.55 T_{PT}$	0.74 **	30	2.31	31.29

* * $P < 0.01$, $\alpha = 1.26$

从经验模型可以看出,不同月份蒸腾的差异主要是由于特征参数不同引起,主要与土壤水分,光的吸收效率等等;同 1 月份不同的蒸腾量主要是由于叶面积、净辐射不同引起的,表现为对冠层上方能量吸收的差异。

3 结论

试验结果显示:杏树与樱桃蒸腾主要受到冠层辐射的驱动,受到土壤水分不足的抑制作用,从 5 月份往后蒸腾量呈下降趋势,特别是 6 月份后土壤水分的下降明显影响果树的蒸腾作用,导致蒸腾较低。

采用冠层净辐射为基本资料,利用建立的经验模型计算以天为尺度单位的果树蒸腾量,精度较高,在果实的成熟期(5、6、7 月份),RMSE 为 2.50、1.92、1.57 $L \cdot d^{-1}$,ARD 为 12.51%、20.76%、19.62% 是线性回归方程的 1/2,可见经验模型能被用来辅助果园水分管理。考虑温度影响,采用 PT 计算值作为输入自变量后,经验模型的精度小幅提高,利用经验模型($T = K \cdot LA \cdot T_{PT}$, $\alpha = 1.64$)计算了 3 个月两种果树共 177d 的蒸腾量,RMSE = 2.01 $L \cdot d^{-1}$,ARD = 17.86%。与液流法得到的实测值进行回归($y = 1.01x$), R^2 达到 0.92。可见经验模型精度较高,而且实现了不同月份不同果树蒸腾量的预测,在实际应用较方便。

果园唯一需要提供的数据仅仅是叶面积,随着基于光传输理论测量叶面积技术的发展^[23,24],叶面积测量越来越容易与准确,可见将来经验模型在果园管理中将发挥重要作用。本文首次采用时间特征参数代表该时段内气候与土壤等引起的综合效应,根据本研究,京郊果树 5 月、6 月、7 月份时间特征参数分别为 0.14、0.09、0.06。同时利用叶面积与冠层净辐射计算果树蒸腾量,在实际应用有一定的参考价值,但条件所限仅研究了杏树与樱桃在 5 月、6 月、7 月份的蒸腾量,今后应该针对不同果树在不同月份的蒸腾量进行深入研究。建立不同地区不同月份时间特征参数表,以推广应用。

References:

- [1] Heilman J L, McInnes K J, Gesch R W, et al. Effects of trellising on the energy balance of a vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 81:79–93.
- [2] Paco T A, Ferreira M I, Conceição N. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: Comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, 2006, 85:305–313.
- [3] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Review on Methods of Estimating Evapotranspiration of Plants. *World Forestry Research*, 2004, 14(2):23–28.
- [4] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78:19–29.
- [5] Ambouze W, Bertuzzi P, Voltz. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a rowcropped vineyard. *Agricultural and Forest*

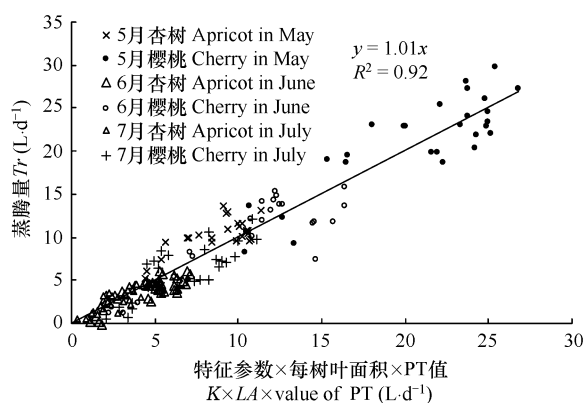


图 4 两种果树蒸腾、特征参数、叶面积和 PT 相关分析

Fig. 4 Relationship between transpiration, K , LA and PT of the two fruit trees

- Meteorology, 1998, 91: 193—208.
- [6] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an evapotranspiration intercomparison Study. *Journal of Hydrology*, 2000, 229: 27—41.
- [7] Allen R G, Pereira L S, Smith, *et al.* FAO-dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 2—13.
- [8] Liu Y, Pereira L S. Validation of FAO Methods for Estimating Crop Coefficients. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2000, 16(15): 26—30.
- [9] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [10] Gianfranco R, Nader K, Francesca d L. Measurement and modeling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 199—209.
- [11] Pereira A R, Green S, Nova N A. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management*, 2006 (83): 153—161.
- [12] Liu X Y, Lin E. Performance of the Priestley-Taylor equation in the semiarid climate of North China. *Agricultural Water Management*, 2005(71): 1—17.
- [13] Angel U, Imma F, Antonio M, *et al.* Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 2004, 66: 205—219.
- [14] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. *Agricultural Water Management*, 2004, 65: 173—191.
- [15] Rouspard O, Bonnefond J M, Irvine M. Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139: 252—268.
- [16] Pereira A R, Green S R, Nova N A. Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestly-Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees. *Agricultural Water Management*, 2007, 92, 48—52.
- [17] Gao Y, Sun Y R, Ma D K, *et al.* Two-step calibration of the FDS soil water content sensor. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(2): 78—81.
- [18] Granier A, Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiology*, 1987, 3, 309—320.
- [19] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 81—92.
- [20] Meng P, Zhang J S, Wang H S, *et al.* Rule of apple trees transpiration and its relation to the micrometeorology on the canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 5: 1075—1081.
- [21] Liu X Y, Lin E D, Liu P J. Comparative study on Priestley-Taylor and Penman methods in calculating reference crop evapotranspiration. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1): 32—36.
- [22] Gunston H, Batchelor C H. A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. *Agricultural Water Management*, 1983(6): 65—67.
- [23] Cohen S, Rao R S, Cohen Y. Canopy transmittance inversion using a line quantum probe for a row crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 86: 225—234.
- [24] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, *et al.* Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121: 19—35.

参考文献:

- [3] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸散耗水量计算方法综述. *世界林业研究*, 2004, 14(2): 23—28.
- [8] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. *农业工程学报*, 2000, 16(15): 26—30.
- [17] 高艳, 孙宇瑞, 马道坤, 等. FDS 土壤水分传感器的两步标定法. *中国农业大学学报*, 2006, 11(2): 78—81.
- [20] 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. *生态学报*, 2005, 5: 1075—1081.
- [21] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 32—36.