

文章编号: 1001-1498(2001)04-0383-05

# 果粮复合系统中单株苹果蒸腾需水量的计算

张劲松<sup>1</sup>, 孟平<sup>1</sup>, 尹昌君<sup>1</sup>, 陆光明<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091; 2. 中国农业大学, 北京 100094)

**摘要:** 利用单株苹果(树)蒸腾计算的修正模式, 计算了果粮系统中的单株苹果(树)日蒸腾需水量, 同时利用 LI-1600 稳态气孔仪进行实测, 结果表明: 计算值与实测值吻合效果较好 ( $R^2 = 0.9664$ ), 平均相对误差为 7.93%; 蒸腾需水量与饱和水汽压差和叶面积指数的乘积、水面蒸发和叶面积指数的乘积均具有很好的相关关系; 建立了以日水面蒸发和叶面积指数为自变量的蒸腾需水量经验模式, 并利用该经验模式逐日计算了 1998 年 4 月 1 日至 6 月 4 日单株苹果的蒸腾需水量, 日平均值为  $4.62 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

**关键词:** 果粮复合系统; 苹果树; 蒸腾需水量

**中图分类号:** S727.33; S715.4 **文献标识码:** A

植物蒸腾是土壤-植物-大气连续体水热传输过程中一个极为重要的环节。全面了解果树蒸腾发生的规律, 准确计算果树蒸腾需水量, 对于加强水资源的集约管理、提高水分利用效率和促进节水林果业的发展具有重要的理论指导作用。关于果树蒸腾的计算, 国内外许多学者做了一些非常有意义的研究工作, Thorpe 于 1978 年对 Monteith<sup>[1]</sup>提出的单叶蒸腾计算模式进行修正, 建立单株苹果蒸腾的计算模式<sup>[2]</sup>, 尔后 Caspari<sup>[3]</sup>、Green<sup>[4]</sup>和 Heping<sup>[5]</sup>等根据 Thorpe 模式<sup>[2]</sup>的基本原理, 提出各自的修正模式, 分别计算了梨树(*Pyrus* spp.)、核桃(*Juglans* spp.)、苹果(*Malus* spp.)等果树的蒸腾强度, 为树木蒸腾的测算提供了重要的借鉴思路。我国一些学者<sup>[6~12]</sup>利用实测法对苹果、桃树(*Amgdalus* spp.)、银杏(*Ginkgo biloba* L.)等幼林果树叶片蒸腾进行了测算。但因树体相对高大以及树冠结构复杂, 使果树蒸腾计算的研究工作进展较慢。目前, 长期、逐日地测算果粮复合经营条件下苹果(树)蒸腾的研究工作极为少见。我国也未见有利用理论公式计算苹果蒸腾强度的文献报道。

本研究根据 Thorpe 模式<sup>[2]</sup>原理, 对果粮复合系统中苹果(树)蒸腾需水量进行计算与分析, 并建立以气象因子、叶面积为自变量的果树蒸腾经验计算模式, 以能长期、逐日地计算果树蒸腾需水量。在试图探索、补充果粮复合经营条件下果树蒸腾需水量计算模式的同时, 旨在为试验区所在地发展果粮复合模式或节水果园提供一定的理论依据。

## 1 试验区概况

试验地设在河南省济源市裴村“太行山低山丘陵区复合农林业综合研究”试验区内( $35^\circ$

收稿日期: 2000-07-06

基金项目: “九五”国家科技攻关专题(96-007-04-05)及国家自然科学基金资助项目(39770624)的部分研究内容

作者简介: 张劲松(1968-), 男, 浙江永嘉人, 助理研究员。

11 N, 112 03 E)。试验区内各类农林复合经营模式总面积达 160 hm<sup>2</sup>。试验区地处太行山南段南麓, 属温带大陆性季风气候。全年日照时数为 2 367.7 h, 年日照率为 54%, 稳定通过 0 的多年平均积温为 5 282 , 大于等于 10 的多年平均积温达 4 847 。历年平均降水量 641.7 mm, 基本上能满足作物生长的需要, 但由于受季风气候的影响, 年内季节性分布不均匀。6~9 月份多年平均降水量为 438.0 mm, 占全年的 68.3%, 尤其集中在 7~8 月份, 占全年的 44.3%。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主, 土层厚度 50~80 cm, pH 值 6.8~8.5, 石砾含量为 10%~18%, 有机质含量在 10 g·kg<sup>-1</sup>左右, 速效氮 21.4~80.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 5.4~16 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 60~103 mg·kg<sup>-1</sup>。

## 2 试验设计

试验于 1998 年 4~8 月在苹果-小麦果粮间作园内进行。立地条件: 水平梯田, 梯田南北宽 36 m, 东西长 200 m。土壤质地: 沙壤-轻壤, 土层厚度为 80 cm, 面积为 0.72 hm<sup>2</sup>, 有灌溉条件, 苹果树栽植于 1992 年, 品种为新红星。株行距为 3 m×4 m, 东西行向。平均树高为 2.2 m, 南北冠幅 3.2 m, 果园郁闭度为 0.85(1998 年)。植物蒸腾需水量近似于潜在蒸腾量<sup>[2, 13, 14]</sup>, 试验地内设立土壤充分湿润的标准小区(土壤水分含量接近田间持水量, 约为 22.5%), 小区面积 75 m×30 m。

### 2.1 小气候观测

在小区正中部选择 1 株代表性较好的果树, 在冠幅边缘处设立南、北两个观测点, 于 1.6 m 高度处采用  $\Phi 20$  型蒸发皿逐日观测水面蒸发(雨天除外); 于 1.5 m 高度处采用通风干湿球表和轻便风速表进行温、湿度和风速的观测, 采用 ER-2008 红外测温仪测定冠层叶温(东南西北 4 个方位); 于果树冠层顶部和底部, 采用辐射平衡表进行净辐射的观测。

选择典型天气日, 每旬测定 3~5 d。测定时间: 7:00~19:00, 每隔 1 h 观测 1 次; 水面蒸发每日于 19:00 观测 1 次。

### 2.2 蒸腾速率的观测

随机选取苹果树冠层中部叶片, 采用 Li-1 600 稳态气孔仪测定叶片蒸腾速率。将叶片蒸腾速率乘以整株果树叶面积指数, 则可得到整株果树蒸腾量。测定时期与温、湿度观测同步, 测定时间: 7:00~19:00, 每隔 2 h 测定 1 次。

### 2.3 果树叶面积的测定

采用网格法, 每隔 15 d 左右测定 1 次。

## 3 主要计算公式

单片苹果叶片蒸腾量计算公式如下所示:

$$\lambda TR_{\text{Leaf}} = \frac{\Delta Q_{n, \text{Leaf}} + 0.93 \rho C_p D / r_b}{\Delta + 0.93r(2 + r_s / r_b)} \quad (1)$$

式中,  $TR_{\text{leaf}}$ : 叶片蒸腾量(mm);  $\lambda$ : 水的汽化潜热系数( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $\Delta$ : 饱和水汽压—温度曲线斜率;  $Q_{n, \text{Leaf}}$ : 叶片所接受的净辐射( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $r$ : 干湿球常数( $\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\rho$ : 干空气密度( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C_p$ : 空气的定压比热( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $D$ : 饱和水汽压差(hPa);  $r_s$ : 叶片气孔阻抗( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $r_b$ : 边界层空气动力学阻抗( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 可采用下式计算得到:

$$r_b = 58 P^{0.56} \overline{d/u} \tag{2}$$

式中,  $P$ : 树冠垂直剖面上的叶面积指数;  $d$ : 叶片的最大平均宽度(m);  $u$ : 冠层中部风速( $m \cdot s^{-1}$ )。

当土壤水分充分湿润时,  $r_s$  则约等于 0, 此时的蒸腾量为潜在蒸腾量, 可视为‘蒸腾需水量’<sup>[2, 13, 14]</sup>, 所以单株苹果(树)的蒸腾需水量可用如下公式计算:

$$\lambda TR_{tree} = \frac{\Delta Q_{n, tree} + 0.93 \rho C_p D / r_b}{\Delta + 0.93 \gamma} \times 2 \tag{3}$$

式中,  $Q_{n, tree}$ : 整个冠层所接受的净辐射( $W \cdot m^{-2}$ ); 其它符号的物理意义同公式(1)。

## 4 结果与分析

### 4.1 计算值与实测值的比较

从图 1、图 2 可知, 苹果树日蒸腾需水量的计算值与实测值之间具有较好的吻合效果。对 1998 年 4 ~ 8 月(64 d) 观测资料进行统计分析, 结果表明: 计算值与实测值的平均相对误差为 6.987%, 线性相关系数  $R^2 = 0.9644$ 。因此认为, 利用 Thorpe 单株苹果蒸腾计算的修正模式<sup>[2]</sup>, 计算果粮复合系统中单株苹果的日蒸腾需水量具有一定的可行性。

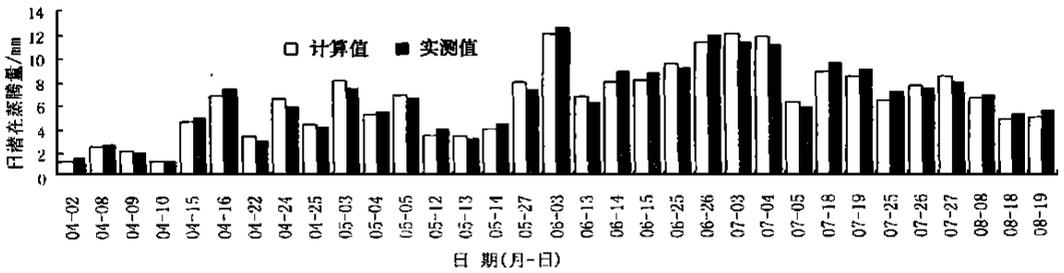


图 1 日蒸腾需水量计算值与实测值的比较(1998)

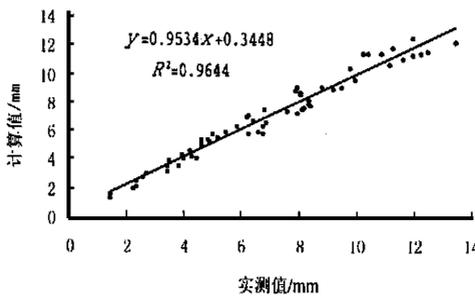


图 2 日蒸腾需水量计算值与实测值的拟合曲线

### 4.2 日蒸腾需水量与气象因子、生物因子的关系

4.2.1 与水面蒸发、叶面积指数的关系 植物蒸腾受大气、植物、土壤等因素的综合影响。水面蒸发作为一个能反映光、温、水、热等综合影响的小气候因子, 显然和植物蒸腾有着密切的关系; 叶面积指数是影响植物蒸腾的主要生物因子。回归统计分析结果表明: 苹果单株日潜在蒸

腾量( $TR$ )与日水面蒸发量( $EV$ )、叶面积指数( $LAI$ )具有较好的复相关关系(图3),  $R^3 = 0.9197$ (样本数  $n = 64$ ), 其关系表达式如下:

$$TR = 0.7009(EV \times LAI)^{0.8904} \quad (4)$$

4.2.2 与饱和水汽压差、叶面积指数的关系 饱和水汽压差是反映温度、湿度状况的重要指标, 和植物蒸腾有密切关系。回归统计分析结果表明: 苹果单株日潜在蒸腾量( $TR$ )与日饱和水汽压差( $D$ )、叶面积指数( $LAI$ )具有较好的复相关关系(图4),  $R^3 = 0.9190$ (样本数  $n = 64$ ), 其关系表达式如下:

$$TR = 3.5884(D \times LAI)^{0.7285} \quad (5)$$

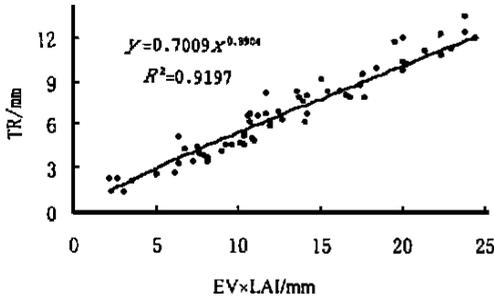


图3 日潜在蒸腾量( $TR$ )与日水面蒸发量( $EV$ )和叶面积指数( $LAI$ )的关系曲线

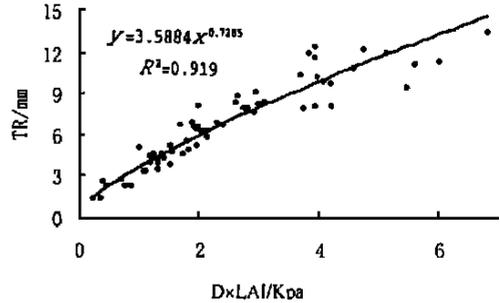


图4 日潜在蒸腾量( $TR$ )与饱和水汽压差( $D$ )和叶面积指数( $LAI$ )的关系曲线

### 4.3 逐日蒸腾需水量的计算

鉴于长期逐日进行光、温、水、热等因子的小气候观测具有很大的困难和艰巨性, 而逐日获取日水面蒸发资料相对比较容易。为此, 利用所建立的蒸腾需水量经验模式(式3), 逐日计算果粮复合系统中单株苹果日蒸腾需水量, 结果表明: 1998年4月1日至6月4日的蒸腾需水量的平均值为4.62 mm, 累计总量为300.04 mm, 日际变化过程见图5。

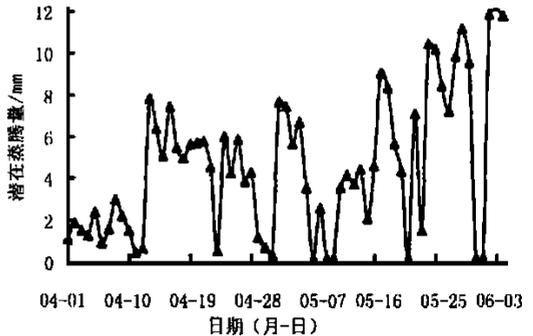


图5 日潜在蒸腾需水量日际变化曲线(1998)

## 5 结论与讨论

(1) 根据 Thorpe 苹果蒸腾计算修正模式<sup>[2]</sup>, 计算了果粮系统中的单株苹果(树)日蒸腾水量, 经实测结果验证, 计算值与实测值吻合效果较好。

(2) 水面蒸发和叶面积指数的乘积、饱和水汽压差和叶面积指数的乘积与单株苹果(树)日蒸腾需水量均具有很好的复相关关系。以水面蒸发和叶面积指数为自变量的经验模式为长期、连续逐日地计算苹果蒸腾量提供了借鉴思路。

(3) 水分胁迫条件下, 苹果蒸腾耗水量的计算, 因叶片气孔导度的异质性较大, 故有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Monteith J E. Evaporation and environment[J]. Symp Soc Expl Biol, 1965, 19: 205 ~ 234.
- [2] Thorpe M. Net radiation and transpiration of apple in rows[J]. Agri Meteorol, 1978, 19: 41 ~ 57.
- [3] Caspari H W. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by Lysimetry. Heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model[J]. Agric For Meteorol, 1993, 67: 13 ~ 27.
- [4] Green S R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree[J]. Agric For Meteorol, 1993, 64: 201 ~ 221.
- [5] Zhang H, Simmonds L P, Morison J I L, et al. Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with a combination equation[J]. Agri For Meteorol, 1997, 87(2~3): 155 ~ 169.
- [6] 王仲春, 黄镇, 罗新书. 水分胁迫对苹果蒸腾强度和气孔扩散阻力的影响[J]. 山东农业大学学报, 1988, 18(4): 33 ~ 40.
- [7] 王仲春, 黄镇, 罗新书. 几种果树蒸腾强度和气孔阻力的日变化与抗旱性的关系[J]. 山东农业大学学报, 1988, 19(1): 39 ~ 46.
- [8] 汪光义. 苹果水分状况及其与蒸腾光合的关系[J]. 山东农业大学学报, 1988, 19(3): 77 ~ 82.
- [9] 夏阳, 梁慧敏, 罗新书. 果树水分亏缺指标的探讨[J]. 果树科学, 1995, 12(4): 211 ~ 214.
- [10] 高丽萍, 张鹤英. 桃树叶片蒸腾的研究[J]. 安徽农业大学学报, 1995, 22(3): 272 ~ 276.
- [11] 郭俊荣, 杨培华, 谢斌, 等. 银杏光合和蒸腾特性的研究[J]. 西北植物学报, 1997, 17(4): 505 ~ 510.
- [12] 郭志华, 王伯荪, 张宏达. 银杏的蒸腾特性及其对遮荫的响应[J]. 植物学报, 1997, 40(6): 567 ~ 572.
- [13] 卢振民. 作物需水量的概念与计算方法[A]. 见: 中国科学院北京农业生态试验站. 农业生态环境研究[M]. 北京: 气象出版社, 1989. 335 ~ 343.
- [14] 谢贤群, 吴凯. 麦田蒸腾需水量的计算模式[J]. 地理学报, 1997, 52(6): 529 ~ 535.

## Estimation Transpiration-water Requirement from An Apple Tree in Apple-crop Intercropping System

ZHANG Jin-song<sup>1</sup>, MENG Ping<sup>1</sup>, YIN Chang-jun<sup>1</sup>, LU Guang-ming<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China;

2. China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The daily transpiration-water requirement ( $TR$ ) from an apple tree in Apple-crop intercropping system was estimated using the modified model of transpiration from an apple tree (Thorpe, 1978), and measured by LI-1600 steady state porometer. The main results were as follows: (1) The estimated value tallies well with the measured ( $R^2 = 0.9664$ ), and the average relative error between them was 7.93%. (2) Both  $EV \times LAI$  and  $D \times LAI$  tally with  $TR$  ( $EV$ : water surface evaporation;  $D$ : saturation pressure deficit of air;  $LAI$ : leaf area index per one tree); (3) A empirical model about  $TR$  and  $EV \times LAI$  was developed, and the averaged  $TR$  was  $5.546 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  from April 1 to June 4 in 1998 according to the empirical model.

**Key words:** Apple-crop intercropping system; daily transpiration-water requirement