


# 基于修正 PM 模型的水分胁迫下柑橘树蒸腾速率模拟研究

高文杰<sup>1,2,3,4</sup>, 董晓华<sup>1,2,3,4\*</sup>, 赵文义<sup>1,2,3,4</sup>, 李璐<sup>1,2,3,4</sup>, 马耀明<sup>5\*</sup>, 夏志恺<sup>3,4</sup>

(1.湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2.水电工程智能视觉监测宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 5.中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**【目的】利用修正 Penman-Monteith (PM) 模型对土壤水分胁迫条件下的柑橘树蒸腾速率进行模拟。【方法】基于 2022 年 6—7 月的气象数据、红外温度、叶片气孔导度及实测柑橘树蒸腾速率, 对 PM 模型中的关键参数(冠层阻力和空气动力学阻力)进行模拟。采用 Ortega-Farias 模型模拟冠层阻力; 采用 Perrier 对数法和仿叶法分别计算空气动力学阻力, 将模拟的阻力参数应用于 PM 模型, 模拟柑橘树在不同土壤水分胁迫条件下的蒸腾速率, 评价不同阻力参数对 PM 模型输出精度的影响。【结果】柑橘树气孔导度和蒸腾速率随着土壤水分胁迫程度的增大呈下降趋势。Ortega-Farias 模型模拟的冠层阻力与实测值具有较好的一致性, 模拟值与实测值之间的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.63, 能够较好地反映柑橘树叶片冠层阻力在水分胁迫下的日变化情况。在模拟空气动力学阻力时, 仿叶法的模拟值大于 Perrier 对数法的模拟值, 且午时波动较大。在土壤水分充足、轻度土壤水分胁迫、中度土壤水分胁迫和重度土壤水分胁迫条件下, 采用 Perrier 对数法计算空气动力学阻力时, PM 模型的模拟值与实测值之间的  $R^2$  分别为 0.66、0.58、0.55、0.2; 而采用仿叶法计算空气动力学阻力时, PM 模型的模拟值与实测值之间的  $R^2$  分别为 0.71、0.64、0.62、0.24。【结论】当土壤含水率高于田间持水率的 50% 时, 使用 Ortega-Farias 模型模拟冠层阻力并采用仿叶法模拟空气动力学阻力能够提升 PM 模型模拟柑橘树蒸腾速率的精度。

**关键词:** 蒸腾速率; 水分胁迫; Penman-Monteith 模型; 冠层阻力; 空气动力学阻力; 气孔导度  
中图分类号: S666 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023216 OSID: 

高文杰, 董晓华, 赵文义, 等. 基于修正 PM 模型的水分胁迫下柑橘树蒸腾速率模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 15-21.

GAO Wenjie, DONG Xiaohua, ZHAO Wenyi, et al. A Modified Penman-monteith Model for Simulating Transpiration of Citrus Trees under Water Stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 15-21.

## 0 引言

【研究意义】全国各地高温的频率和强度日益增加。宜昌地区 2022 年夏季出现的连续高温无降水天气导致土壤蒸发强烈、空气干燥度增加, 严重影响当地柑橘的生长发育。精准模拟柑橘树在水分胁迫条件下的蒸腾速率对于保障柑橘树水分合理分配和利用具有重要意义。【研究进展】Penman-Monteith (PM) 模型是作物蒸腾估算研究中应用最广泛的机

理模型, 适用于作物蒸发蒸腾量的直接计算<sup>[1]</sup>。冠层阻力 ( $r_c$ ) 和空气动力学阻力 ( $r_a$ )<sup>[2]</sup>是 PM 模型中所需要确定的关键参数。 $r_c$  是植株与大气水汽交换的表面阻力, 无法直接测量, 往往通过测量植物的叶片气孔导度后进行尺度扩展至冠层导度 ( $r_c$  的倒数) 而获得<sup>[3]</sup>。鉴于  $r_c$  与环境因子之间的强相关性, Jarvis 模型得到了广泛应用, 该模型较为全面地考虑了土壤、植物和大气因素<sup>[4]</sup>。张宝忠等<sup>[5]</sup>以 Jarvis 模型为基础构建了  $r_c$  估算模型; 李彩霞等<sup>[6]</sup>以冠层内、外部温度差估算了玉米的  $r_c$ 。在日际和日间尺度上, 影响  $r_c$  的主导环境因子不同<sup>[7]</sup>, 作物叶片气孔阻力的日变幅较大, 而土壤水分的日变幅很小, 无法反映叶片气孔阻力在一日中不同时刻的差异。针对该问题, Ortega-Farias<sup>[8]</sup>建立了以土壤水分作为计算因子的  $r_c$  模型。在 PM 模型中,  $r_a$  控制着冠层表面至参考高度处的水汽和热量传输。Perrier<sup>[9]</sup>基于紊流传输理论和假设对数的风速剖面, 提出了 Perrier 对数法来计算  $r_a$ , 该方法在大田环境中得到

收稿日期: 2023-05-16

修回日期: 2023-08-08

基金项目: 水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室建设(2019ZYD007); 2020 年度水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金重点项目(2020SDSJ03); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20221209); 第二次青藏高原科学考察与研究项目(2019QZKK0103)

作者简介: 高文杰(1997-), 男(朝鲜族)。硕士研究生, 主要研究方向为水文学及水资源。E-mail: 3043869364@qq.com

通信作者: 董晓华(1972-), 男(汉族), 湖北秭归人。教授, 博士, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

马耀明(1964-), 男, 山西夏县人。中国科学院青藏高原研究所研究员, 中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站学术站长, 主要从事大气边界层观测及卫星遥感应用研究。E-mail: ymma@itpcas.ac.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

了普遍应用,但在风速为 0 的条件下存在  $r_a$  失真现象,在实际应用时会影响模型的估算效果。【切入点】柑橘树是宜昌地区的特色经济作物,其需水量较大,目前针对宜昌地区夏季水分胁迫下柑橘树蒸腾速率的估算研究较少。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究基于试验观测数据分析水分胁迫下柑橘树气孔导度和蒸腾速率的日间变化规律。对 PM 模型中的冠层阻力参数进行修正,并评价不同  $r_a$  计算方法对 PM 模型模拟精度的影响,为实现 PM 模型模拟非最佳土壤水分条件下的植物蒸腾速率提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于 2022 年 6—7 月在湖北省宜昌市三峡大学室外试验田进行,试验区气候类型为亚热带季风性湿润气候,年平均降水量为 992.1~1 404.1 mm,降水主要集中于每年的 6—8 月,年平均气温为 13.1~18 °C,日照时间为 1 261~1 745 h。田间持水率为 22.60%,凋萎系数为 5.12%。

### 1.2 试验材料与处理

试验开始前 15 d 在试验地选取一株长势良好、无病虫害、处于幼树期的柑橘树作为供试材料。将柑橘树移栽至盆中,放置于试验田中心区域,盆的规格为上直径 60 cm,下直径 50 cm,高 50 cm,在试验田中筛取细沙土和果园沃土,按 1:1 混合后填入盆中作为试验土壤。试验开始前对盆栽进行灌水处理,直至灌溉水溢出盆底部,试验期间不对盆栽进行任何水分处理,使盆栽土壤保持自然蒸发状态。试验期间于每日 08:00 和 18:00 使用 TDR 仪监测土壤水分状况。参考李进平等<sup>[10]</sup>研究中的标准,在后续的监测过程中重点关注土壤水分自然下降至田间持水率的 80%~100% (土壤水分充足)、60%~80%

(轻度水分胁迫)、50%~60% (中度水分胁迫) 和 40%~50% (重度水分胁迫) 区间的柑橘树蒸腾速率变化情况。

### 1.3 观测项目与方法

#### 1.3.1 气象数据的测定

气象数据由位于试验地中部 2 m 高度位置安装的 FSR-4 便携式气象站(北京天宇德科技有限公司,中国)监测,便携式气象站自动监测并记录气温 ( $T_a$ , °C)、湿度 ( $RH$ , %)、风速 ( $v$ , m/s) 及净辐射量 ( $R_n$ , W/m<sup>2</sup>),数据采集时间间隔为 1 min。

#### 1.3.2 蒸腾速率的测定

采用 Flow-32 包裹式茎流计<sup>[11]</sup>记录植株液流量,进而监测植株蒸腾速率。使用茎流计包裹距地面 10 cm 处的柑橘树主茎秆部位,然后在监测探头外部包裹绝缘防辐射膜以防止太阳辐射的干扰,最后用防雨布密封,防止雨水渗入。数据采集的时间间隔为 10 min。

#### 1.3.3 气孔导度的测定

采用 CIRAS-3 型光合仪(PP Systems 美国)观测冠层上、下部的叶片气孔导度。叶片气孔导度的观测均在晴朗日进行,选取冠层上、下部长势良好的 2 张叶片进行标记和观测,每 1 h 测定一次,每次测定重复 2~3 次,取其平均值作为该时刻的气孔导度,一日内叶片气孔导度测定的时间范围为 08:00—18:00。

#### 1.3.4 冠层叶片与仿叶温度的测定

使用 Testo890 热成像仪(Testo 亚洲有限公司,德国)在冠层顶部测定叶片温度 ( $T_p$ , °C) 和仿叶温度 ( $T_c$ , °C)。Testo890 热成像仪采用标准红外镜头,发射率为 0.97,测定的时间间隔为 30 min,获得的冠层红外温度图像使用 IRSoft 软件进行后续处理,冠层可见光与红外图像如图 1 所示。

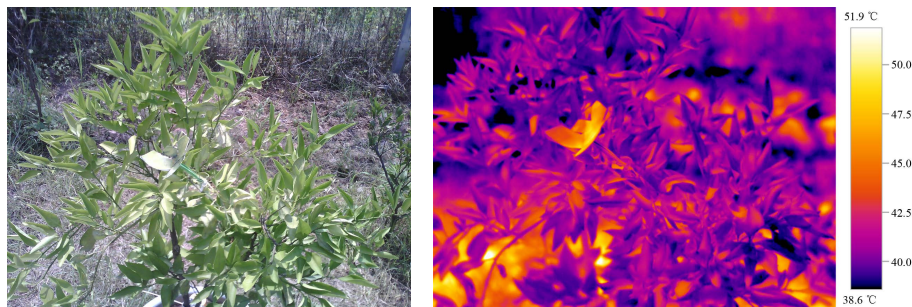


图 1 冠层可见光与红外图像

Fig.1 Visible and infrared images

#### 1.3.5 作物蒸腾量的模拟

采用 Penman-Monteith 模型模拟柑橘树的蒸腾速率,如式(1)所示:

$$T_r = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}, \quad (1)$$

式中:  $T_r$  为作物冠层蒸腾量 (mm/h);  $R_n$  为冠层截留的净辐射量 (W/m<sup>2</sup>);  $G$  为土壤热通量 (W/m<sup>2</sup>),在计算时忽略不计;  $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线的斜率 (kPa/°C),采用 Jackson 经验公式<sup>[12]</sup>计算;  $\rho_a$  为空气密度 (1.29 kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  为空气常压比热 (MJ/

( $\text{kg}\cdot\text{C}^\circ$ );  $e_s$  为饱和水汽压差 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa);  $\gamma$  为湿度计常数 ( $\text{kPa}/\text{C}^\circ$ );  $r_c$  为冠层阻力 ( $\text{s}/\text{m}$ ), 采用 Ortega-Farias 模型进行模拟;  $r_a$  为空气动力学阻力 ( $\text{s}/\text{m}$ ), 采用仿叶法和 Perrier 对数法进行模拟<sup>[13]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 进行数据处理, 采用 IBM SPSS 26 软件进行统计分析, 采用 Origin 2021 完成图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象要素和气孔导度的变化规律

由图 2 可知,  $R_n$ 、 $RH$ 、 $T$  (环境温度  $T_a$ 、冠层温度  $T_p$ 、仿叶温度  $T_c$ ) 及饱和水汽压差 ( $VPD$ ) 近似呈单峰曲线的变化规律。其中,  $R_n$ 、 $VPD$  与  $T$  的变化趋势基本相同, 均在正午时段达到最大值,  $RH$  则在夜间达到最大值。试验期间环境温度、冠层叶片温度和仿叶温度的关系为  $T_p > T_c > T_a$ 。

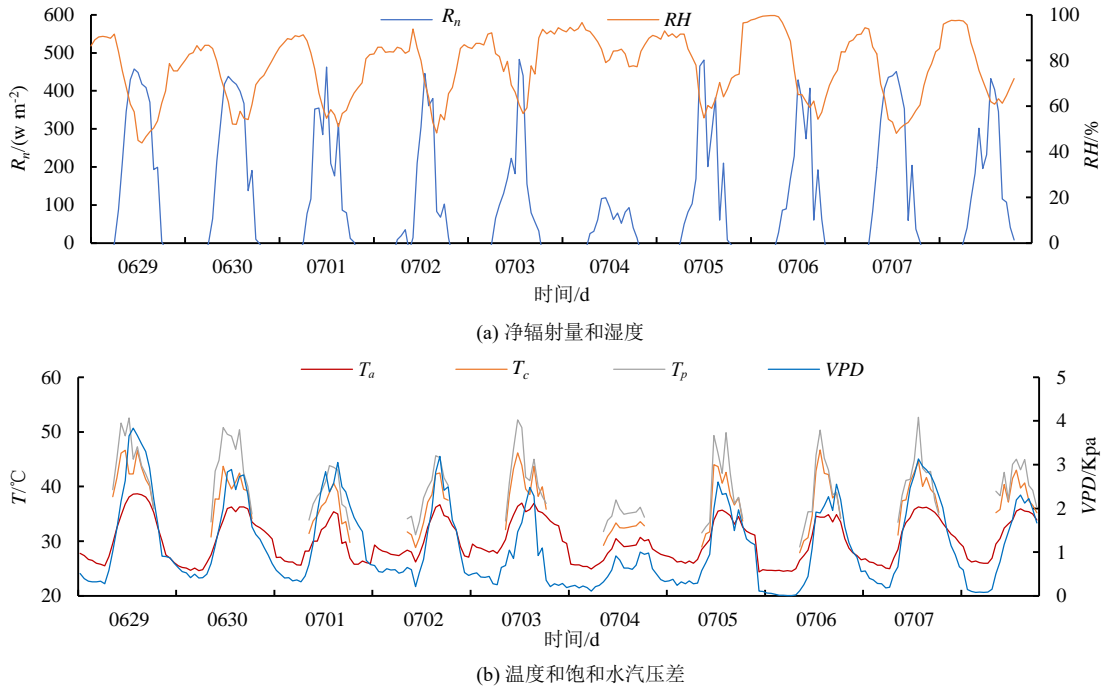


图 2 气象因子变化

Fig.2 Changes in meteorological factors

叶片气孔导度 ( $g_s$ ) 是影响植物蒸腾的关键因素, 58、42.7、21.9  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。土壤水分充足条件下,  $g_s$  的动态变化反映了植物的气孔行为和水分调节方式。上部冠层  $g_s$  明显大于下部冠层; 水分胁迫条件下, 上、下部冠层的  $g_s$  基本一致。 $g_s$  与土壤水分呈正相关性。

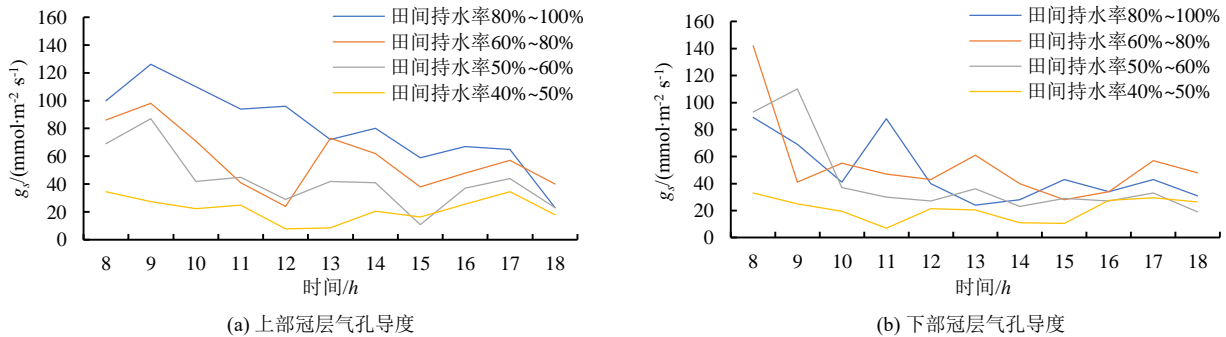


图 3 2022 年 6—7 月不同土壤水分条件下、下部冠层气孔导度

Fig.3 Stomatal conductance of upper and lower canopy under different soil moisture conditions from June to July 2022

### 2.2 空气动力学阻力模拟

采用仿叶法 ( $r_a^F$ ) 和 Perrier 对数法 ( $r_a^P$ ) 分别对  $r_a$  进行模拟。由图 4 可知, 2 种方法模拟的  $r_a$  在一日内的 08:00—18:00 均随时间呈下降趋势, 日间

$r_a$  平均值分别为 27  $\text{s}/\text{m}$  和 42  $\text{s}/\text{m}$ 。 $r_a^P$  的模拟值在 08:00—10:00 间存在较大变幅, 其余时段波动起伏较小, 而  $r_a^F$  模拟数值日间波动整体较大。

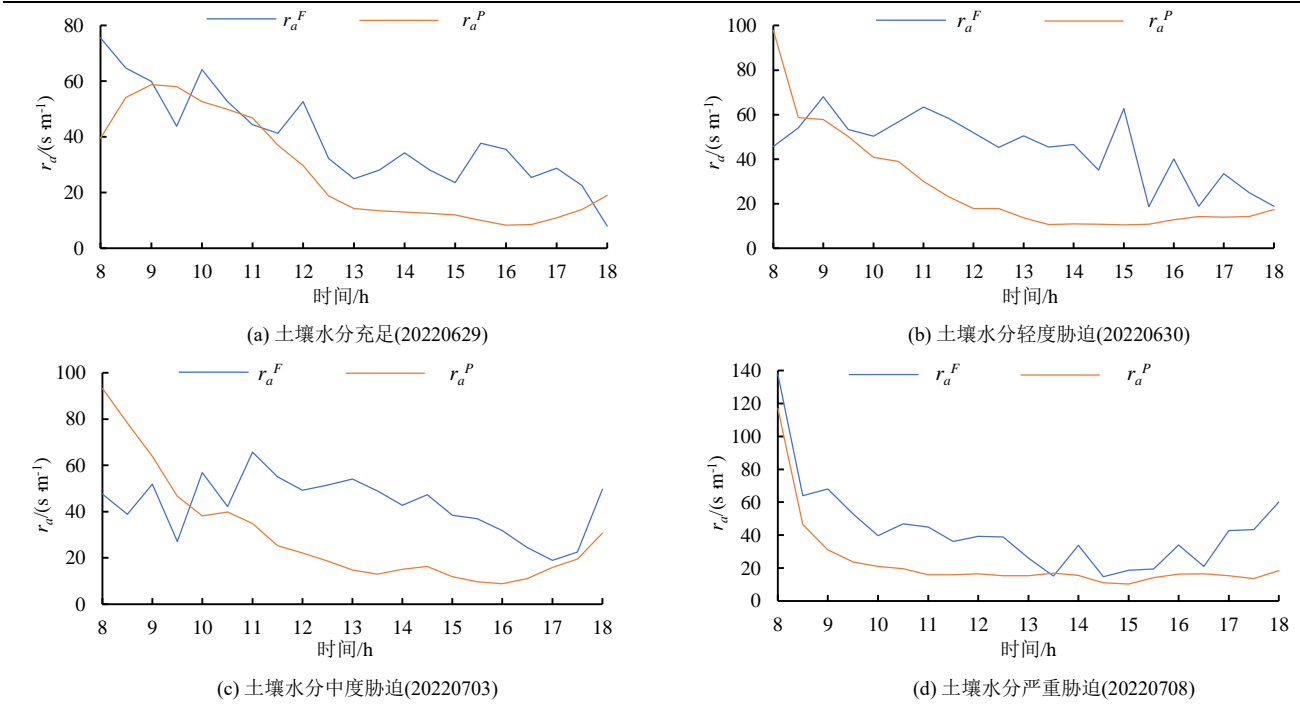


图 4 2022 年 6—7 月不同土壤水分胁迫条件下的  $r_a$  模拟结果

Fig.4 Measurement and simulation of  $r_a$  under different water stress conditions from June to July 2022

### 2.3 冠层阻力模拟结果

图 5 为 Ortega-Farias 模型模拟的  $r_c$  与实测  $r_c$  之间的对比结果。柑橘树  $r_c$  随水分胁迫程度的增加而

增大，呈日间波动的变化趋势。Ortega-Farias 模型在土壤水分充足条件下的模拟效果最优，土壤水分胁迫条件下的误差主要发生在 16:00—18:00 之间。

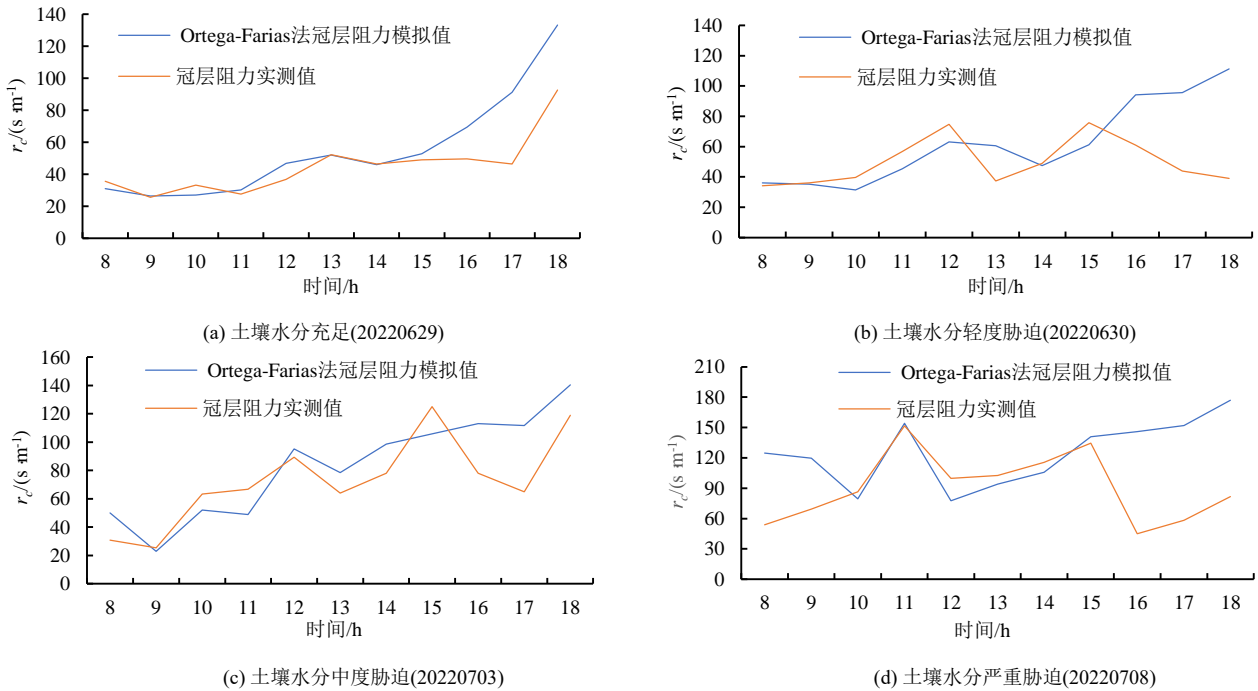


图 5 2022 年 6—7 月不同土壤水分  $r_c$  实测值与模拟值

Fig.5 Measurement and simulation of different soil moisture  $r_c$  from June to July 2022

### 2.4 土壤水分胁迫条件下的蒸腾速率变化规律及模拟效果

将基于 Ortega-Farias 模型模拟的  $r_c$  与基于仿叶法 ( $r_a^F$ ) 和 Perrier 对数法 ( $r_a^P$ ) 模拟的  $r_a$  共同应用于 PM 模型 (以下记为  $PM-r_a^P$  和  $PM-r_a^F$ )，对不同土壤水分条件下的柑橘树蒸腾速率 ( $T_r$ ) 进行模拟，

结果如图 6 所示。在土壤水分充足条件下， $PM-r_a^F$  和  $PM-r_a^P$  的模拟效果较好。轻度土壤水分胁迫条件下，2 种方法的模拟值在中午时段高于实测值。中度土壤水分胁迫条件下，2 种方法在上午均低估了  $T_r$ 。2 种方法在土壤水分严重胁迫条件下的模拟效果较差。

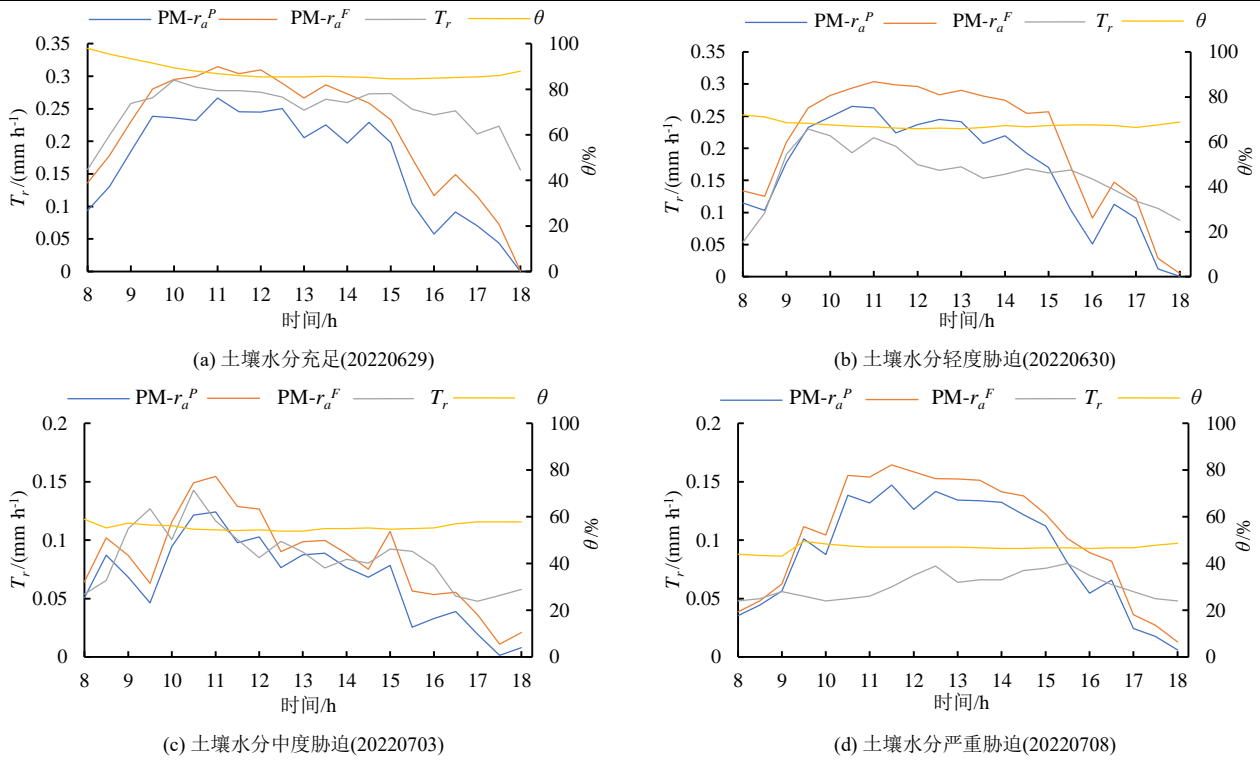


图 6 不同土壤水分条件下的  $T_r$  模拟与实测结果对比

Fig.6 Comparison of  $T_r$  simulation and measured results under different soil moisture conditions

由表 1 可知，随着土壤含水率的降低， $PM-r_a^P$  高于 0.5， $PM-r_a^F$  法的 MAE 略小于  $PM-r_a^P$  法，2 种方法的模拟值与实测值之间的  $R^2$  为 0.66、0.58、0.55、0.2； $PM-r_a^F$  法的模拟值与实测值之间的  $R^2$  为 0.71、0.64、0.62、0.24。在土壤水分降低至严重胁迫状态之前， $PM-r_a^P$  和  $PM-r_a^F$  模拟值与实测值之间的  $R^2$  均

表 1 不同土壤水分胁迫条件下蒸腾速率模拟值与实测值之间的关系

Table 1 The relationship between simulated and measured values of transpiration rate under different soil water stress conditions

统计指标	充分供水		轻度胁迫		中度胁迫		严重胁迫	
	$PM-r_a^P$	$PM-r_a^F$	$PM-r_a^P$	$PM-r_a^F$	$PM-r_a^P$	$PM-r_a^F$	$PM-r_a^P$	$PM-r_a^F$
$R^2$	0.66	0.71	0.58	0.64	0.55	0.62	0.2	0.24
相关系数	0.81	0.84	0.76	0.77	0.64	0.68	0.45	0.45
MRE	34.85	22.27	35.97	33.96	31.88	28.35	52.19	57.58
MAE	0.08	0.05	0.05	0.07	0.03	0.02	0.04	0.05
RMSE	0.05	0.05	0.06	0.06	0.03	0.03	0.04	0.05

### 3 讨论

柑橘树在土壤水分充足条件下的上部冠层  $g_s$  明显高于下部冠层  $g_s$ ，与朱永泰<sup>[14]</sup>等研究结论一致，这主要是由于植物在土壤水分充足条件下，太阳辐射量在一定范围内对叶片  $g_s$  具有显著影响<sup>[15]</sup>，上部冠层叶片截留了大量辐射，下部冠层叶片只能接收少量辐射，导致上、下部冠层  $g_s$  出现显著差异。土壤水分胁迫条件下，上、下部冠层  $g_s$  较为接近且呈下降趋势，此时影响叶片  $g_s$  的主要因素为土壤水分，辐射对叶片  $g_s$  的影响减弱。赵楠等<sup>[16]</sup>认为，较高的净辐射和温度对  $g_s$  具有积极作用，但对于本就处于水分胁迫条件下的植物，高温和高饱和水汽压会导致叶片气孔闭合。蒸腾量受作物本身生理过程和环

境条件的综合作用。柑橘树日间蒸腾规律呈双峰曲线变化特征，午间出现午休现象， $T_r$  明显降低，这与李璐等<sup>[17]</sup>对柑橘树蒸腾规律的研究结论一致。在轻度土壤水分胁迫和中度胁迫时， $T_r$  仅为充分灌水时的 64% 和 36%，但  $T_r$  曲线的“双峰”规律未发生明显变化，这一现象反映了柑橘树控制失水和维持体内水分的能力<sup>[18]</sup>。严重水分胁迫时  $T_r$  显著下降，午休现象消失，而此时叶片  $g_s$  同样较小，这与周平等<sup>[19]</sup>研究结论吻合。叶片边界层的水汽交换需克服  $r_c$  和  $r_a$  才能得以实现，基于模型模拟的蒸腾速率的准确程度与  $r_c$ 、 $r_a$  的取值有直接关系<sup>[20]</sup>。本研究引入 Ortega-Farias 模型计算  $r_c$ ，虽然该模型充分考虑了土壤水分动态变化和气象因素对  $r_c$  的影响，但下午 16:00 左右依然存在较大误差，而且误差具有连续

性。一方面,植物在光合作用和蒸腾作用时会依据自身发育状态和环境条件做出选择,而模型参数中未考虑到植物生理因素的变化。另一方面,试验期间由于云层遮挡使得模型计算的辐射项存在潜在偏差。基于 Perrier 对数法计算的  $r_a$  使得 PM 模型低估了  $T_r$ ,这与以往研究<sup>[21]</sup>指出的 Perrier 对数法不适合低风速环境的观点相符,而基于仿叶法模拟的  $r_a$  不仅精度优于 Perrier 对数法,而且能够避免当风速为零时  $r_a$  项的失真。

## 4 结论

1) 柑橘树气孔导度和蒸腾速率随土壤水分胁迫程度的增大呈下降趋势。

2) Ortega-Farias 模型模拟的冠层阻力与实测值具有较好的一致性,能够较好地反映柑橘树叶片冠层阻力在水分胁迫下的日间变化情况。

3) 在土壤含水率高于田间持水率的 50% 时,使用 Ortega-Farias 模型模拟冠层阻力并采用仿叶法模拟空气动力学阻力能够提升 PM 模型模拟柑橘树蒸腾速率的精度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] MONTERO J I, ANTÓN A, MUÑOZ P, et al. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 323-332.
- [2] YAN H F, ZHANG C, HIROKI O. Parameterization of canopy resistance for modeling the energy partitioning of a paddy rice field[J]. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16(1): 109-123.
- [3] INFANTE J M, RAMBAL S, JOFFRE R. Modelling transpiration in holm-oak savannah: Scaling up from the leaf to the tree scale[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(4): 273-289.
- [4] JARVIS, P. G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1976, 273(927):593-610.
- [5] 张宝忠,刘钰,许迪,等.基于夏玉米叶片气孔导度提升的冠层导度估算模型[J].*农业工程学报*,2011,27(5):80-86.  
ZHANG Baozhong, LIU Yu, XU Di, et al. Estimation of summer corn canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(5): 80-86.
- [6] 李彩霞,周新国,孙景生.基于冠层上下部温差的冠层阻力计算[J].*农业工程学报*,2013,29(10):123-129.  
LI Caixia, ZHOU Xinguo, SUN Jingsheng. Calculation of canopy resistance using air temperature difference between canopy top and bottom[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(10): 123-129.
- [7] 黄辉,于贵瑞,孙晓敏,等.华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟[J].*生态学报*,2007,27(12):5209-5221.  
HUANG Hui, YU Guirui, SUN Xiaomin, et al. The environmental responses and simulation of canopy conductance in a winter wheat field of North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5209-5221.
- [8] ORTEGA-FARIAS S, OLIOSO A, ANTONIOLETTI R, et al. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration[J]. *Irrigation Science*, 2004, 23(1): 1-9.
- [9] PERRIER A. Physical study of evapotranspiration in natural conditions. III. actual and potential evapotranspiration of plant canopies[J]. *Annales Agronomiques*, 1975, 26(3): 229-243.
- [10] 李进平,陈振国,杨艳华,等.水分条件对烤烟生理指标的影响及适宜土壤水分指标研究[J].*灌溉排水学报*,2007,26(1):93-96.  
LI Jinping, CHEN Zhenguo, YANG Yanhua, et al. Study on the adequate soil moisture indexes of flue-cured tobacco irrigation based on some physiological indexes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 93-96.
- [11] 龙秋波,贾绍凤.茎流计发展及应用综述[J].*水资源与水工程学报*,2012,23(4):18-23.  
LONG Qiubo, JIA Shaofeng. Review on the development and application of sap flow gauge[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(4): 18-23.
- [12] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [13] QIU G Y, YANO T, MOMII K. Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature. II. Application of imitation leaf temperature for detection of crop water stress[J]. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage & Rural Engineering*, 1996, 185: 245-246.
- [14] 朱永泰,陈惠玲,秦文华,等.干旱绿洲区葡萄园蒸腾特征及其对环境因子的响应[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,2022,58(5):569-578,587.  
ZHU Yongtai, CHEN Huiling, QIN Wenhua, et al. The characteristics and main influencing factors of vineyard transpiration in the arid oasis areas[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(5): 569-578, 587.
- [15] 张卫强,贺康宁,王正宁,等.光辐射强度对侧柏油松幼苗光合特性与水分利用效率的影响[J].*中国水土保持科学*,2006,4(2):108-113.  
ZHANG Weiqiang, HE Kangning, WANG Zhengning, et al. Effects of light radiation intensity on photosynthetic characteristics and water use efficiency to seedlings of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis*[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2): 108-113.
- [16] 赵楠,朱高峰,张扬,等.干旱绿洲区葡萄冠层上下方叶片气孔导度特征[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,2021,57(4):510-517.  
ZHAO Nan, ZHU Gaofeng, ZHANG Yang, et al. Characteristics of stomatal conductance in the upper and lower leaves of grape canopy in an arid oasis region ecosystem[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(4): 510-517.
- [17] 李璐,董晓华,赵乔,等.盆栽柑橘树蒸腾过程的观测与模拟研究[J].*灌溉排水学报*,2016,35(4):98-104.  
LI Lu, DONG Xiaohua, ZHAO Qiao, et al. Observation and simulation of the outdoors evapotranspiration for citrus trees[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(4): 98-104.
- [18] 张卫强.黄土半干旱区主要树种光合生理与耗水特性研究[D].北京:北京林业大学,2006.  
ZHANG Weiqiang. Studies on photosynthetic physiology and water consumption characteristics of main tree species in semi-arid region on loess plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [19] 周平,高鹏,陈文彬,等.不同水分处理下柑橘树光合参数对水分及气象因素的响应[J].*节水灌溉*,2022(6):90-95.  
ZHOU Ping, GAO Peng, CHEN Wenbin, et al. Response of photosynthetic parameters of citrus trees to water and meteorological factors under different water treatments[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(6): 90-95.
- [20] 王淼,罗新兰,尹佳琪,等.基于室内气象数据的适用于冬季日气温

- 室番茄蒸腾量各子模型对比研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 182-190.
- WANG Miao, LUO Xinlan, YIN Jiaqi, et al. Comparative study on submodels of tomato transpiration based on the weather data in soloar greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 182-190.
- [21] 王健, 蔡焕杰, 李红星, 等. 日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方法研究及其评价[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 11-14.
- WANG Jian, CAI Huanjie, LI Hongxing, et al. Study and evaluation of the calculation methods of reference crop evapotranspiration in solar-heated greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(6): 11-14.

## A Modified Penman-monteith Model for Simulating Transpiration of Citrus Trees under Water Stress

GAO Wenjie<sup>1,2,3,4</sup>, DONG Xiaohua<sup>1,2,3,4\*</sup>, ZHAO Wenyi<sup>1,2,3,4</sup>, LI Lu<sup>1,2,3,4</sup>, MA Yaoming<sup>5\*</sup>, XIA Zhikai<sup>3,4</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Intelligent Visual Monitoring for Hydropower Projects(Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. Hydropower Engineering Intelligent Visual Monitoring Yichang Key Laboratory(Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. College of Water Conservancy and Environment, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 5. State Key Laboratory of Earth System and Resource Environment, Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** **【Objective】** Transpiration is not only an important hydrological process but also a footprint of primary productivity of terrestrial systems under different environments. Its calculation at large scale is challenging. This paper proposes a method to fill this gap. **【Method】** The method is based on the modified Penman-Monteith (PM) model. The canopy resistance in the model is estimated using soil moisture based on the Ortega-Farias model, and the hydrodynamic resistance is calculated by two methods: one is based on wind speed and canopy temperature-environment relationship, and the other one is the Perrier logarithm method. The model was applied to simulate transpiration of citrus trees under water stress from June to July in 2022; its accuracy was evaluated against ground-true data. **【Result】** Water stress significantly reduced stomatal conductance and transpiration of the citrus trees. The canopy resistance estimated by the Ortega-Farias model agreed with the measured data with  $R^2 = 0.63$ , accurately capturing the diurnal variation in canopy resistance under water stress. The aerodynamic resistance calculated by the leaf-based method was significantly greater than estimated by the Perrier logarithmic method. The accuracy of aerodynamic resistance calculated by the Perrier logarithmic method varied with soil water content, and the  $R^2$  between the measured and calculated transpiration from the PM model decreased from 0.66 when the plant was under slight water stress to 0.2 when the plant was under severe stress. In contrast, for the transpiration calculated using the aerodynamic resistances estimated by the leaf-simulation method, the  $R^2$  decreased from 0.71 to 0.24 with the increase in water stress. **【Conclusion】** When the soil moisture was greater than 50% of the field capacity, using the Ortega-Farias model to estimate canopy resistance and the leaf-based method to estimate aerodynamic resistance can improve the accuracy of the PM model for simulating transpiration of the citrus trees under water stress.

**Key words:** transpiration rate; water stress; Penman-Monteith model; canopy resistance; aerodynamic resistance; stomatal conductance

责任编辑：韩洋