

网络出版时间:2022-07-28 12:00 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.02.009
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220727.1502.010.html

基于光辐射时滞效应的温室番茄蒸腾量模型的构建

孙一鑫,马乐乐,苗丽丽,何佳星,李建明

(西北农林科技大学 园艺学院/农业部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**构建基于光辐射时滞效应的温室番茄蒸腾量模型并确定其应用参数。**【方法】**依据自动连续记录仪实际称重获得的番茄单株小时蒸腾量,分析番茄蒸腾与温室环境因子的时滞关系,构建基于光辐射时滞效应的温室番茄蒸腾量模型,并对模型进行检验。按照模型预测蒸腾量(ET),设置 T1(1.0 ET)、T2(1.2 ET)、T3(1.4 ET) 3 个灌溉处理,研究其对番茄基质含水量、光合作用、叶片解剖结构和干物质积累的影响,对模型应用参数进行求证。**【结果】**晴天时,光辐射与番茄蒸腾量存在 1 h 的时滞关系,阴天时无时滞关系。考虑时滞效应有利于提升晴天蒸腾模型的精度,时滞模型标准误差与相对误差分别从无时滞模型的 0.117 2 mm/h 和 31.00% 降至 0.088 5 mm/h 和 23.42%,纳什系数从 0.72 升至 0.84。T3 处理番茄的光合能力强于 T1、T2 处理;T2 和 T3 处理番茄的叶片厚度、栅栏组织厚度、栅海比显著高于 T1 处理;T3 处理番茄的干物质积累量显著高于 T1,但与 T2 间差异不显著。考虑水分利用效率因素认为,T2 处理综合最优。**【结论】**晴天时光辐射时滞效应 1 h 的温室番茄蒸腾模型误差最小,精度最高;在番茄果实膨大期,模型灌溉参数为 1.2。

[关键词] 设施园艺;温室番茄;光辐射;蒸腾量模型;时滞效应;Penman-Monteith 方程

[中图分类号] S641.207

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2023)02-0083-10

Construction of greenhouse tomato transpiration model based on light radiation time-lag effect

SUN Yixin, MA Lele, MIAO Lili, HE Jiaxing, LI Jianming

(College of Horticulture/Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest China, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**This study constructed a greenhouse tomato transpiration model based on light radiation time-lag effect and determined its application parameters. **【Method】**According to hourly transpiration of tomato obtained from automatic continuous crop water consumption recorder and the time-lag relationship between tomato transpiration and greenhouse environmental factors, a greenhouse tomato transpiration model based on the time-lag effect was constructed and verified. Based on the transpiration model, treatments of T1 (1.0 ET), T2 (1.2 ET), and T3 (1.4 ET) were set. The effects of different irrigation amount on tomato photosynthesis, anatomical structure and dry matter were studied, and the model application parameters were determined. **【Result】**The time-lag effect between light radiation (R_n) and transpiration on sunny days was 1 h, and there was no time-lag effect on cloudy days. The time-lag effect was beneficial to improve the accuracy of transpiration model on sunny days, the standard and relative errors were decreased from 0.117 2 mm/h and 31.00% to 0.088 5 mm/h and 23.42%, and the Nash coefficient was in-

[收稿日期] 2022-01-08

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2019YFD1001903);陕西省技术创新引导专项(基金)(2021QFY08-04);陕西省科技创新驱动项目“优势产业技术研发”(NYKJ-2020-YL-08)

[作者简介] 孙一鑫(1997—),男,辽宁本溪人,在读硕士,主要从事设施作物栽培研究。E-mail:syx1997@nwafu.edu.cn

[通信作者] 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士生导师,主要从事设施园艺研究。E-mail:Lijianming66@163.com

creased from 0.72 to 0.84. The photosynthetic capacity of T3 was better than T1 and T2, and leaf thickness, palisade tissue thickness, and palisade tissue/spongy tissue ratio of T2 and T3 were significantly higher than those of T1. Dry matter of T3 was significantly higher than T1, without significant difference with T2. Considering water use efficiency, T2 treatment was the optimal. 【Conclusion】 Greenhouse tomato transpiration model with light radiation time-lag of 1 hour had the smallest error and highest accuracy. The model irrigation parameter in fruiting stage was 1.2.

Key words: protected horticulture; greenhouse tomato; light radiation; transpiration model; time-lag effect; Penman-Monteith equation

合理的灌溉制度是提高作物产量和品质的关键^[1-2],也是提高作物经济效益的基础^[3]。番茄作为世界上种植面积广、产量高的蔬菜之一^[4],具有高耗水、高营养、高产量、高效益等特点^[5-6]。灌溉是保证番茄生产的主要措施,既可调节改善番茄土壤微环境,还可影响番茄生长^[7]。实际生产中,现代连栋温室一般通过光照辐射来确定番茄灌溉量,光照辐射量每积累 80~100 J/cm² 灌溉 1 次,理论上光照辐射量每积累 1 J/cm²,需灌溉 3 mL/m²^[8]。目前有关灌溉量对作物影响的研究,一般以天为基础设置不同水分处理,研究灌溉量对植株产量、品质等方面的影响^[9-10]。但在实际生产中,由于椰糠、岩棉等基质储水性较差,因此需按小时灌溉,上述研究结果可能不适于少灌多次的生产模式。

植物蒸腾对太阳辐射、饱和水汽压差、温度、风速等气象因子存在不同程度的时滞效应^[11-12]。受储水、根系吸水和木质部水分传输效率以及蒸腾耗水策略的遗传特性等多种因素影响,环境因子与植物蒸腾变化动态之间存在几分钟到几小时不等的时间差,即时滞效应^[13]。这种时滞效应存在明显的时间变异性,在不同季节、不同阶段的变异程度不同^[14]。彭曼公式是基于大气物理特性及植物生理特性估算作物蒸腾蒸发量最可靠、最适用的模型之一,广泛应用于作物蒸腾模拟。但由于时滞效应的存在,若将环境因子直接带入蒸腾模型,模拟出的蒸腾量并不是植物此时此刻的蒸腾量,已有研究表明时滞校正可以提高樟树蒸腾预测模型的精度^[15]。

本试验通过研究时滞效应,将光辐射错位代入小时尺度彭曼公式,构建并验证了基于光辐射时滞效应的温室番茄灌溉决策模型。另设置不同灌溉量处理,测定环境因子及植株蒸腾量、光合速率、干物质积累等指标的变化,对模型效果进行验证,求证模型应用参数,研究基于蒸腾模型的不同灌水量对番茄光合作用和干物质积累的影响,以完善设施番茄蒸腾模型决策与智能灌溉系统。

1 材料与方法

1.1 试验方法概述

试验于 2021 年 5—7 月在西北农林科技大学园艺场大跨度非对称保温大棚内进行,温室长 32 m,跨度 17 m,脊高 5.4 m,南屋面投影 10 m,北屋面投影 7 m。供试番茄品种为“金鹏 14-8”。采用盆栽法进行试验,每盆 1 株,盆口覆膜,使用的基质由鲁源育苗基质有限公司生产。番茄幼苗 5 叶 1 心时开始定植,单杆整枝。自动连续作物耗水记录仪长 110 cm、宽 80 cm,每个记录仪上放置 4 盆番茄。供试番茄每 5 天施一次金正大生态工程集团生产的生物能水溶性肥亲土一号,稀释 200 倍后,每株番茄浇 1 L。

1.2 温室环境因子和番茄蒸腾量的测定

1.2.1 温室内环境因子 于 2021 年 6 月 5 日至 7 月 19 日使用美国 Onset 公司生产的 HOBO H21-USB 小型气象站,配备 S-LIB-M003 光照传感器、S-SMD-M005 传感器分别实时监测冠层净辐射(R_n)和基质含水量(θ_v)。使用 HOBO MX1101 无线温湿度记录仪实时监测空气温度(T_a)和空气相对湿度(H_R),所有因子均每 10 min 记录 1 次数据,每小时记录 6 个数据,取其平均值作为该时段的结果。按下式计算饱和水汽压差(VPD):

$$\text{VPD} = 0.61078 \times e^{\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}} \times (1 - H_R) \quad (1)$$

1.2.2 植物蒸腾量 于 2021 年 6 月 5 日至 6 月 30 日采用自动连续耗水记录仪(国家专利号 CN 105699244 A)对整株蒸腾量进行实时监测,每 10 min 记录 1 次数据,每小时记录 6 个数据,取其平均值作为该时段的结果。

1.3 蒸腾量模型的建立及验证

试验以自动连续记录仪实际称量的单株小时尺度的蒸腾量进行灌溉(需将以“g/h”为单位的蒸腾量转化为以“mm/h”为单位的蒸腾量),以 0.5 h 为步长,分析番茄蒸腾量与环境因子的时滞关系,得到时

滞时间与作物系数,利用时滞效应改良彭曼公式,构建并检验温室番茄小时尺度的蒸腾模型。由于夜间光辐射较弱,为探明时滞效应对彭曼公式的改良效果,所建模型为日间蒸腾量模型。

1.3.1 模型建立 FAO-56 彭曼公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸腾量,单位为 mm/d(日尺度)或 mm/h(小时尺度); Δ 为饱和水汽压随温度变化曲线的斜率, kPa/°C; R_n 为冠层净辐射,单位为 MJ/(m² · d)(日尺度)或 MJ/(m² · h)(小时尺度); G 为土壤热通量, MJ/(m² · d); γ 为湿度计常数, kPa/°C; T_a 为空气温度, °C; u_2 为距地面 2 m 高处的日平均风速, m/s; e_s 、 e_a 分别为室内饱和水汽压和实际水汽压, $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差(VPD), kPa; C_n 、 C_d 为随参考作物类型及计算时间步长变化的常数, C_n 单位为 (K · mm · s³)/(mg · d)(日尺度)或 (K · mm · s³)/(mg · h)(小时尺度), C_d 单位为 s/m^[16-17], 详见表 1。

表 1 FAO-56 彭曼公式常数

Table 1 C_n and C_d values for the FAO-56 PM equations

时间尺度 Calculation time step	C_n	C_d
日 Day	900	0.34
小时 Hour	37	0.24

将 C_n 和 C_d 代入公式(2),可分别得到日、小时尺度下的彭曼公式:

日尺度: $ET_0 =$

$$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

小时尺度: $ET_0 =$

$$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.24u_2)} \quad (4)$$

基于温室内空气流动缓慢的特点,陈新民等^[18]利用 Thom 和 Oliver 的阻力公式计算出了彭曼公式中的 u_2 ,得到温室日尺度上参考作物蒸腾蒸发量的公式:

日尺度: $ET_0 =$

$$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1\,713}{T_a + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + 1.64\gamma} \quad (5)$$

同法可推出小时尺度上参考作物蒸腾蒸发量公式:

小时尺度: $ET_0 =$

$$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{70}{T_a + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + 1.46\gamma} \quad (6)$$

作物实际蒸腾量(ET)可通过参考作物蒸腾量、作物系数(P)、土壤水分系数(S)求出^[19]:

$$ET = ET_0 \cdot f(P) \cdot f(S) \quad (7)$$

本试验设置的水分处理均为充足灌溉,因此 $f(S)$ 取 1, $f(P)$ 采用 FAO 推荐的分段单值平均法确定。取番茄开花坐果期与果实成熟期的实际蒸腾量与模型估计值的比值来表示 $f(P)$,取定值 1.20。由于小时尺度上土壤热通量(G)可忽略不计,故可得小时尺度上温室番茄的蒸腾模型:

$$ET = \frac{0.490\Delta R_n + \gamma \frac{84}{T_a + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + 1.46\gamma} \quad (8)$$

无时滞效应情况下可直接利用公式(8)计算蒸腾量;有时滞效应时,需错位带入冠层净辐射(R_n)值,若时滞时间为 1 h,计算时需使用 1 h 前的 R_n 。

1.3.2 模型检验 对比分析番茄单株小时蒸腾量的模拟值与实测值,采用回归估计标准误差(RMSE)、相对误差(RE)、纳什系数(NSE)及决定系数(R^2)4 个指标,对模拟值和实测值的拟合程度进行分析。

1.4 模型应用参数的求证

为检验模型的可靠性,求证应用参数,将试验当天之前相似天气的气象数据带入蒸腾模型中得到日间蒸腾量(evapotranspiration, ET),每小时灌溉 1 次,当所需灌溉量较小时累计至下小时灌溉。再根据计算得到的 ET 设置 3 个不同的灌溉水平: $T1$ 为 ET , $T2$ 为 1.2 ET , $T3$ 为 1.4 ET 。每个处理 3 次重复,每个重复 4 株番茄。研究基于模型的不同灌溉量对番茄基质含水量、光合作用、叶片解剖结构和干物质积累的影响,除基质含水量需实时测量外,光合作用、叶片解剖结构和干物质积累量于试验开始 20 d 后测量。

1.4.1 基质含水量 使用美国 Onset 公司生产的 HOBO H21-USB 小型气象站,配备 S-SMD-M005 传感器实时监测 3 个处理的基质含水量(θ_v)。

1.4.2 番茄光合指标 在番茄成熟期,选取生长点往下第 4—5 片生长叶中部叶位的小叶,于晴天上午 09:30—12:00 使用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6800 便携式光合仪在透明叶室内测定番茄叶片的光合指标,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s),并计算水分利用效率(WUE): $WUE = P_n / T_r$ 。采用酒精浸提法测量

叶绿素含量,每个处理 3 个重复。

1.4.3 番茄叶片解剖结构 选取生长点下第 4—5 片生长叶,剪取叶片过中脉、5 mm×10 mm 的小块样品,用甲醛-醋酸-酒精(FAA)固定液固定,进行乙醇脱水、氯仿透明、浸蜡、包埋、切片、染色、封片等处理^[20-21]。在 Olympus 显微镜下观察,拍照测量叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度,每个处理制作 3 个样片,每个样片观察 3 个视野。计算栅海比^[22]：

栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度。(9)

1.4.4 干物质积累 于果实成熟期,各处理分别取 3 株番茄,将根、茎、叶剪下后分装于信封中,再置于烘箱内 105 ℃杀青 20 min,65 ℃烘 3—7 d 至恒质量后称量干质量。

2 结果与分析

2.1 温室内气象因子的变化

以 2021 年 6 月 15 日至 6 月 21 日的气象数据(6 月 16 和 17 日为阴天,其他时间为晴天)为例,分析温室内气象因子的变化情况。由图 1 可知,晴天温室内温度为 19.76~44.82 ℃,于 06:00 附近达低点,之后升高,在 12:00 附近达到高点后开始回落;阴天温度为 17.19~24.44 ℃,变化规律与晴天一致。晴天温室内相对湿度为 26.48%~100%,于 12:00 附近达低点,00:00 附近达到高点;阴天相对湿度为 78.01%~100%,于 15:00 附近达低点,之后升高。

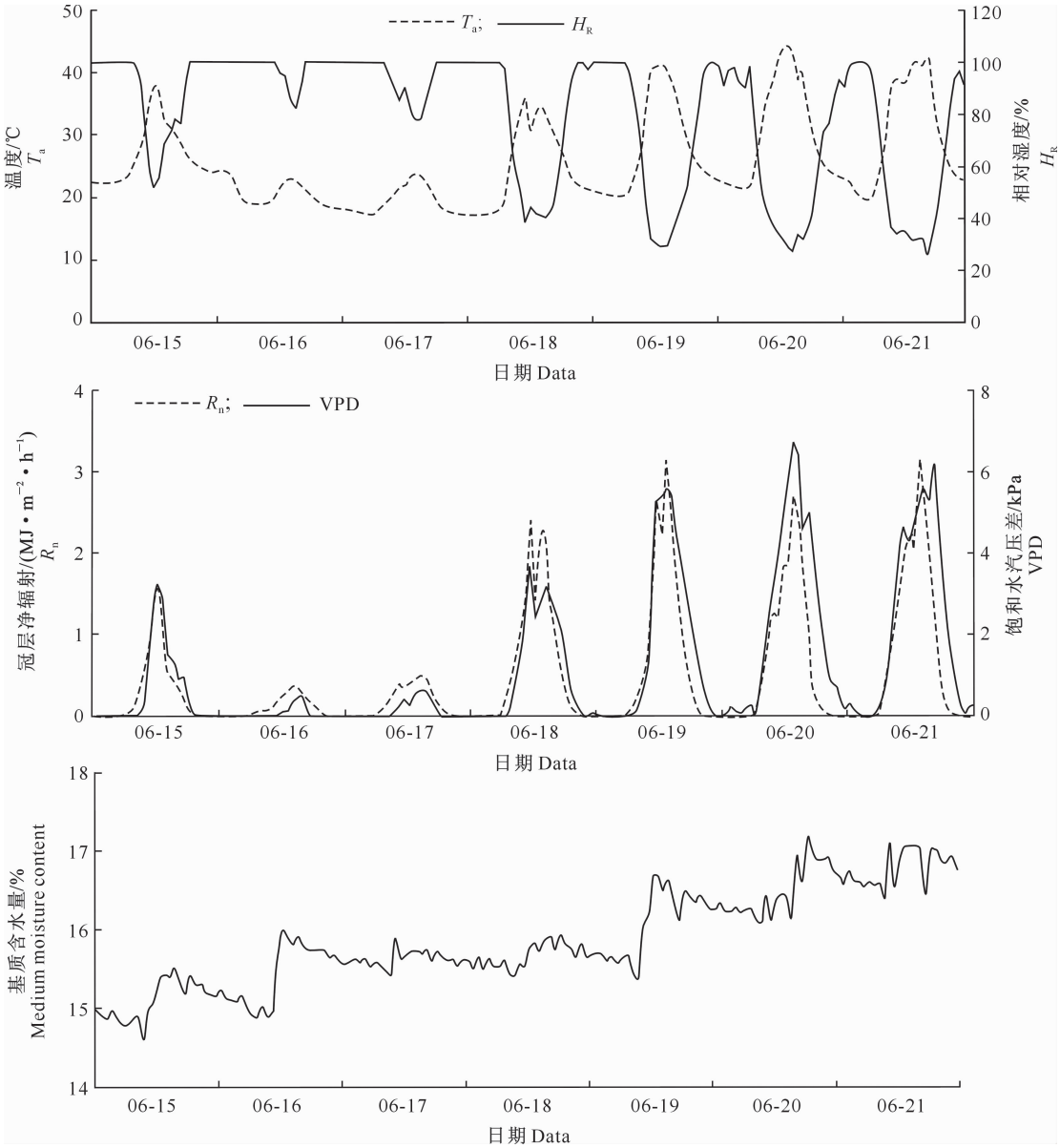


图 1 番茄生长环境气象因子的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of weather condition in growing environment of tomato

从图 1 可以看出,冠层净辐射(R_n)与饱和水汽压差(VPD)的变化规律相似,一般于 12:00 左右达高点,晴天 R_n 为 $2.16\times 10^{-3}\sim 3.12\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, VPD 为 $0.00\sim 6.71\text{ kPa}$;阴天 R_n 为 $2.16\times 10^{-3}\sim 0.32\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, VPD 为 $0.00\sim 0.64\text{ kPa}$ 。基质含水量为 $14.59\%\sim 17.18\%$,基质含水量在每次灌溉后都有提升,之后回落。

2.2 温室番茄植株蒸腾量的日变化

由图 2 可知,晴天时番茄植株蒸腾量变化于

$2.5\sim 132.75\text{ g/h}$,在 07:00 开始升高,至 13:00 达到高点,之后回落,夜间蒸腾量的变化不大;阴天时番茄植株蒸腾量变化于 $3.5\sim 26.5\text{ g/h}$,07:00 开始升高,至 12:00 达到高点,保持一段时间后回落。受太阳辐射的影响,夜间植株的蒸腾量远小于日间。晴天时,由于正午光照强度大,在 11:00—15:00 的蒸腾量可占到日总蒸腾量的 50%;阴天 11:00—15:00 与 15:00—19:00 的蒸腾量差异不大。

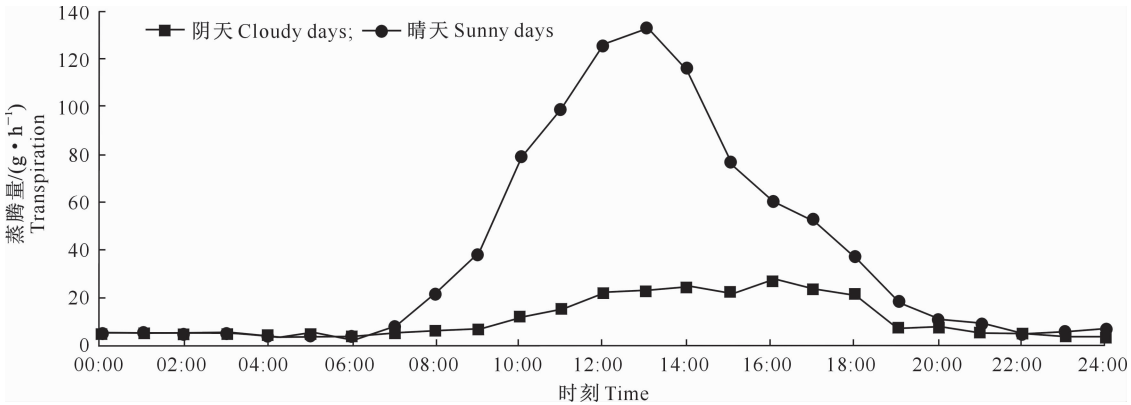


图 2 番茄植株蒸腾量的日变化

Fig. 2 Daily variation of tomato transpiration

2.3 温室番茄蒸腾量模型的建立

2.3.1 时滞效应分析 对番茄蒸腾量与不同气象因子进行回归分析,将作物蒸腾量按 0.5 h 步长前移 3 次,进行 3 次错位分析,通过比较决定系数(R^2)得到温度、空气相对湿度、冠层净辐射与蒸腾量间的时滞关系。由表 2 可知,晴天时无时滞和时滞 0.5 h 下番茄蒸腾量与各气象因子间回归关系均显著;时滞 1 h 下蒸腾量与温度、冠层净辐射回归关系显著,与空气相对湿度回归关系不显著;时滞 1.5 h 下蒸

腾量与温度、空气相对湿度回归关系均不显著,与冠层净辐射回归关系显著。随时滞时间的延长,晴天时番茄蒸腾量与温度、空气相对湿度回归的决定系数逐渐减小,与冠层净辐射回归的决定系数先增大后减小,说明蒸腾量与温度和空气相对湿度间不具有明显的时滞关系,但滞后于冠层净辐射,时滞时间为 1 h。阴天时,番茄植株蒸腾量与各气象因子间的回归关系均不明显,也没有时滞发生。

表 2 不同时滞下气象因子与蒸腾量错位分析的决定系数(R^2)

Table 2 Coefficient of determination (R^2) of dislocation analysis between weather condition and transpiration under different time delays

时滞 Time delay	晴天 Sunny days			阴天 Cloudy days		
	温度 T_a	空气相对湿度 H_R	冠层净辐射 R_n	温度 T_a	空气相对湿度 H_R	冠层净辐射 R_n
无时滞 Delay free	0.859 2	0.887 3	0.631 0	0.034 4	0.296 7	0.319 4
时滞 0.5 h Delay 0.5 h	0.822 2	0.780 5	0.740 8	0.023 3	0.200 5	0.270 7
时滞 1 h Delay 1 h	0.650 4	0.541 7	0.770 9	0.014 8	0.080 8	0.200 5
时滞 1.5 h Delay 1.5 h	0.392 4	0.282 9	0.673 0	0.007 1	0.020 4	0.121 5

注:决定系数(R^2)大于 0.6 时回归关系显著,反之回归关系不显著。

Note:The regression relationship was significant with coefficient of determination (R^2) greater than 0.6.

2.3.2 模型的建立与检验 将实测的以“g/h”为单位的蒸腾量转化为以“mm/h”为单位的蒸腾量,建立温室番茄蒸腾模型,并对模型进行检验。由图 3 可知,无时滞模型的决定系数为 0.746 0,低于时滞

1 h 模型的 0.856 6,说明时滞模型的回归性更好。在模型精度上,时滞模型也优于无时滞模型,无时滞与时滞模型的标准误差分别为 0.117 2 和 0.088 5 mm/h,相对误差分别为 31.00%和 23.42%,纳什系

数分别为 0.72 和 0.84(表 3)。

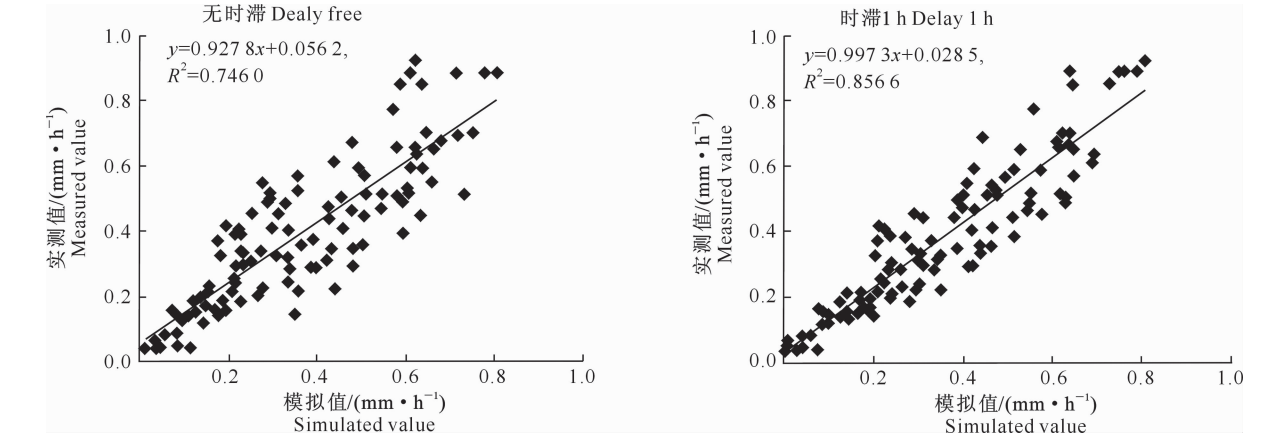


图 3 温室番茄蒸腾量模型模拟值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison between simulated and measured values of tomato transpiration in greenhouse

表 3 温室番茄单株小时蒸腾量模型误差分析

Table 3 Error analysis of transpiration hourly model for individual greenhouse tomato

模型 Model	标准误差/(mm·h ⁻¹) RMSE	相对误差/% RE	纳什系数 NSE
无时滞模型 Delay free model	0.117 2	31.00	0.72
时滞 1 h 模型 Delay 1 h model	0.088 5	23.42	0.84

2.4 温室番茄蒸腾量模型应用参数的求证

2.4.1 灌溉量对基质含水量的影响 如图 4 所示，各处理的基质含水量为 14%~30%，其中 T1 处理的基质含水量为 14.67%~17.13%，T2 处理为

15.69%~21.86%，T3 处理为 17.47%~28.59%；基质含水量在每次灌溉后都有提升，提升幅度为 T3>T2>T1，之后回落。

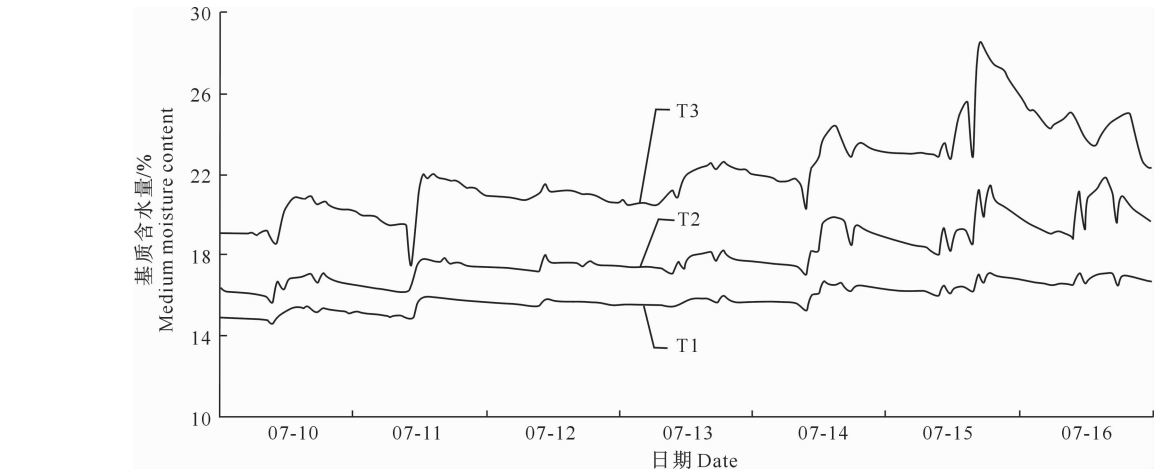


图 4 基于蒸腾量模型的灌溉量对基质含水量的影响

Fig. 4 Effects of irrigation amount on medium moisture content based on transpiration model

2.4.2 灌溉量对番茄光合作用的影响 灌溉量的增加可促进番茄的光合作用。由表 4 可知,T3 处理的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著高于 T1、T2 处理,其中净光合速率比 T1、T2 处理分别提高了 54.5%和 38.2%,蒸腾速率分别提高了 68.6%和 43.1%,气孔导度分别提高了 34.0%和 31.3%。

不同处理胞间 CO₂ 浓度表现为 T3>T2>T1,水分利用效率表现为 T1>T2>T3,但各处理间差异均不显著。叶绿素含量表现为 T3>T2>T1,说明灌溉量对光合作用的促进作用可能与提高了叶绿素的合成有关。

表 4 基于蒸腾量模型的灌溉量对番茄光合作用的影响

Table 4 Effects of irrigation amount on tomato photosynthesis based on transpiration model						
处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) C_i	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) G_s	水分利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE	叶绿素含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlorophyll content
T1	12.80 b	5.80 c	334.30 a	0.50 b	2.20 a	3.719 a
T2	14.31 b	6.83 b	335.34 a	0.51 b	2.10 a	3.828 a
T3	19.78 a	9.78 a	340.03 a	0.67 a	2.02 a	4.119 a

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note; Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

2.4.3 灌溉量对番茄叶片解剖结构的影响 叶片是植物进行光合作用的主要器官,叶片解剖结构被认为是决定植物光合能力及水分平衡的内在因素^[18]。发达的栅栏组织有利于植株进行光合作用,叶片结构紧、密度大、栅海比高的作物抗旱能力也更强^[23]。由图 5 可以看出,不同处理间叶片解剖结构存在差异。由表 5 可知,与 T1 处理相比,T2、T3 处理的叶片厚度分别增大 13.5%和 8.7%,栅栏组织厚度分别增加 21.4%和 15.7%,栅海比分别提高 19.1%和 14.5%;各处理叶片海绵组织厚度差异不显著。上述结果表明,提升灌溉量会改变番茄叶片的解剖结构。

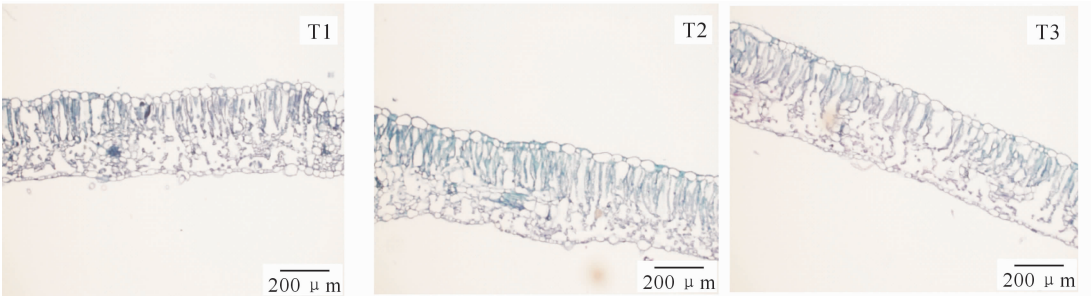


图 5 不同灌溉量下番茄叶片横切面的显微结构
Fig. 5 Cross-section microstructures of tomato leaves under different irrigation amounts based on transpiration model

表 5 基于蒸腾量模型的灌溉量对番茄叶片解剖结构的影响

Table 5 Effects of irrigation amount on anatomical structure of tomato leaves based on transpiration model				
处理 Treatment	栅栏组织厚度/ μm Palisade tissue thickness	海绵组织厚度/ μm Sponge tissue thickness	叶片厚度/ μm Leaf thickness	栅海比 Palisade tissue/ spongy tissue
T1	144.18 b	131.15 a	310.17 b	1.10 b
T2	175.03 a	133.98 a	353.02 a	1.31 a
T3	166.79 a	132.25 a	337.30 a	1.26 a

2.4.4 灌溉量对番茄干物质积累和分配的影响 随灌溉量增加,番茄的干物质积累量呈上升趋势。由表 6 可知,各处理番茄不同器官干物质量大小表现为叶>茎>根,叶、茎、根干物质量占干物质总量的比例分别为 58%~60%,34%~36%和 5%~6%,T3 处理的叶片和茎干物质量显著大于 T1,根干物质量各处理间差异不显著;T3 处理干物质总量显著大于 T1 处理,与 T2 处理差异不显著。

表 6 基于蒸腾量模型的灌溉量对番茄干物质积累和分配的影响

Table 6 Effects of irrigation amount on tomato dry matter based on transpiration model					g/株
处理 Treatment	根干质量 Root dry matter	茎干质量 Stem dry matter	叶干质量 Leaf dry matter	干物质总量 Total dry matter	
T1	5.45 a	34.00 b	55.77 b	95.22 b	
T2	6.54 a	42.27 ab	73.80 ab	122.61 ab	
T3	6.49 a	48.57 a	84.17 a	139.23 a	

3 讨 论

植物的蒸腾作用与环境因子密切相关,但由于受储水、根系吸水和木质部水分传输效率等多因素的影响,环境因子与蒸腾量的变化动态之间存在一定的时间差^[13],即时滞效应。引入时滞效应,可更

好地描述蒸腾作用与环境因子间的关系,也可使基于环境因子的蒸腾量预测更为精准。有关园艺作物时滞效应的研究较少,这可能是由于与树木相比,园艺作物较矮小,时滞效应不明显。本研究发现,番茄的蒸腾量与环境因子间的时滞效应只在特定气象条件下存在。本试验以 0.5 h 为步长,分析温室番茄蒸腾量与环境因子间的时滞效应,发现晴天冠层净辐射与蒸腾量的时滞关系最为明显,为 1 h,温度和湿度与蒸腾量间不存在时滞效应,与树木蒸腾一般滞后于光辐射 40~240 min 的结论^[12,24]相似。光辐射是影响植物蒸腾的主要因子^[25],在温室半封闭的环境中,温度和湿度受光辐射影响较大,其变化一般也滞后于光照变化,这可能是温室内温湿度与蒸腾量不存在时滞关系的原因。阴天时,番茄的蒸腾量与环境因子间无时滞效应,可能是因为在小时尺度上,当土壤水分充足时,时滞会随主要日均气象因子的增大而延长^[15],但阴天时光辐射弱,所以时滞也不明显。

前人有关彭曼公式的改良研究一般集中在参考作物蒸腾量与实际蒸腾量间的系数上^[22,26-28],即对作物系数、土壤水分系数进行改良,目的是使修正后的参考作物蒸腾量与实际蒸腾量更为接近。本研究基于番茄蒸腾量与环境因子间的时滞效应,将环境因子错位代入小时尺度彭曼公式,改良了参考作物蒸腾量的计算过程。本研究发现,考虑时滞效应有利于提升晴天蒸腾模型的精度,时滞模型标准误差与相对误差分别从无时滞模型的 0.117 2 mm/h 和 31.00% 降至 0.088 5 mm/h 和 23.42%,纳什系数从 0.72 升至 0.84。本试验按照 FAO 推荐的分段单值平均作物系数法确定了作物系数^[29],但由于只选取了 2 个月的气象数据,因此不能适用于温室番茄生产的所有情况,今后可通过测量温室多年数据,分季节与生长期给出作物系数来提高模型精确度。

随灌溉量的增加,番茄的净光合速率有显著提升、干物质积累量有明显增加,与前人研究得到的光合能力、株高、干物质积累量在一定范围内随灌溉量的增加而增大的结论^[30-32]一致。水分对光合作用的影响分为气孔因素和非气孔因素,气孔因素是水分通过调节气孔导度的大小,来影响叶片对 CO₂ 的吸收,进而影响光合作用;非气孔因素是指在水分胁迫下叶片结构发生不可逆变化,进而影响光合作用^[33]。本研究发现,随着基于蒸腾模型的灌溉量的增加,番茄植株的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和气

孔导度均呈上升趋势,其中 T3 处理的净光合速率和气孔导度均显著高于 T1、T2 处理,说明随灌溉量增加,净光合速率的提升可能与气孔因素有关,水分通过调节气孔导度,促进了番茄叶片对 CO₂ 的吸收,极大程度上提高了番茄的光合能力。比较番茄叶片解剖结构发现,T2 与 T3 处理的叶片厚度、栅栏组织厚度和栅海比显著高于 T1 处理,说明 T1 处理可能受到水分胁迫,叶片结构发生变化,影响了光合作用。T1 处理与 T2、T3 处理间净光合速率的差异可能主要受非气孔因素影响,T2 与 T3 处理间主要受气孔因素影响。分析蒸腾模型可知,与实测值相比,模型的模拟值对番茄实际蒸腾量有一定的低估,结合叶片解剖结构,说明 T1 处理下番茄受到了干旱胁迫。

光合作用是干物质形成的基础,受净光合速率影响。本研究结果表明,番茄的干物质积累量随灌溉量的增加呈上升趋势,T3 处理的干物质积累量显著大于 T1 处理,但与 T2 处理差异不显著,且 T3 较 T2 处理的干物质增加量小于 T2 较 T1 处理的增加量,这与李建明等^[10]的研究结论一致。这可能因为在灌水量小时,增加灌水可促进植株生殖生长;但过多水分,对植株生殖生长的影响不再明显,反而会造成一定涝害,损害植株根系,对植株的生长产生抑制。T3 处理虽在光合作用、干物质积累上优于 T2 处理,但考虑水分利用效率,T2 处理更优。本试验于开花结果期进行,果实在处理前已经坐果,考虑到果实产量的形成受到了试验前因素的影响,故试验没有对果实的干物质质量进行统计,今后可通过全生育期试验来对干物质积累分配的规律进行分析。

4 结 论

晴天时光辐射与番茄蒸腾存在 1 h 的时滞关系,阴天时无时滞关系;考虑时滞效应可提升晴天时蒸腾模型的精度。灌水量为 1.4 ET(蒸腾量)时番茄的干物质积累量显著高于灌水量为 ET 时,但与灌水量为 1.2 ET 间差异不显著,考虑水分利用效率因素,认为灌水量为 1.2 ET 处理综合最优。

[参考文献]

- [1] 任瑞丹,范兵华,王归鹏,等. 称重法决策灌溉量对袋式栽培甜瓜茎流与养分吸收及产量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(12):81-89.
- Ren R D, Fan B H, Wang G P, et al. Effects of irrigation amounts by weighting method on stem flow and nutrient absorption of melon in substrate bag culture [J]. Journal of

- Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2020, 48(12): 81-89.
- [2] Chen R Q, Kang S Z, Hao X M, et al. Variations in tomato yield and quality in relation to soil properties and evapotranspiration under greenhouse condition [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197(2): 318-328.
- [3] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314-323.
- Wang P B, Li J M, Ding J J, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 314-323.
- [4] 李君明, 项朝阳, 王孝宣, 等. “十三五”我国番茄产业现状及展望 [J]. 中国蔬菜, 2021(2): 13-20.
- Li J M, Xiang C Y, Wang X X, et al. Current situation of tomato industry in China during ‘The Thirteenth Five-year Plan’ period and future prospect [J]. China Vegetables, 2021(2): 13-20.
- [5] Liu H, Li H H, Ning H F, et al. Optimizing irrigation frequency and amount to balance yield, fruit quality and water use efficiency of greenhouse tomato [J]. Agricultural Water Management, 2019, 226(12): 105787.
- [6] Malherbe S, Marais D. Economics, yield and ecology: a case study from the South African tomato industry [J]. Outlook on Agriculture, 2015, 44(1): 37-47.
- [7] Constantz J, Murphy F. The temperature dependence of ponded infiltration under isothermal conditions [J]. Journal of Hydrology, 1991, 122(1/2/3/4): 119-128.
- [8] 许艺, 李新旭, 杨哲, 等. 我国连栋玻璃温室番茄长季节栽培产量与荷兰存在差距的原因分析 [J]. 中国蔬菜, 2020(10): 1-8.
- Xu Y, Li X X, Yang Z, et al. Analysis of the gap of the long-season cultivation yield of tomato in multi-span greenhouse between Holland and China [J]. China Vegetables, 2020(10): 1-8.
- [9] 李建明, 任瑞丹, 范兵华, 等. 灌溉量对温室全有机营养液栽培甜瓜根际环境和茎流的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 217-224.
- Li J M, Ren R D, Fan B H, et al. Effects of irrigation amount on the rhizospheric environment and stem flow of melon cultivated with full organic nutrition in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(7): 217-224.
- [10] 李建明, 樊翔宇, 闫芳芳, 等. 基于蒸腾模型决策的灌溉量对甜瓜产量及品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 156-162.
- Li J M, Fan X Y, Yan F F, et al. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 156-162.
- [11] 徐军亮, 章异平, 马履一. 油松和侧柏边材液流相对于空气温度的滞后效应 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 7-8, 61-64.
- Xu J L, Zhang Y P, Ma L Y. Time lag effect of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* sap flow compared to air temperature [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 33(4): 7-8, 61-64.
- [12] 赵春彦, 司建华, 冯一起, 等. 荒漠河岸胡杨(*Populus euphratica*)树干液流的时滞效应 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1254-1260.
- Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. Time lag characteristics of stem sap flow of *Populus euphratica* in desert riparian forest [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1254-1260.
- [13] Schulze E, Cermik J, Matyssek R, et al. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of Larix and Piceu trees: a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements [J]. Oecologia, 1985, 66(4): 475-483.
- [14] 郑思宇. 东北寒区温室葡萄蒸腾规律及其影响因素研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- Zheng S Y. Study on the transpiration of greenhouse grapes in cold regions of Northeast China and its response to influencing factors [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [15] 夏银华, 章新平, 戴军杰, 等. 亚热带季风区樟树蒸腾与气象因子之间的时滞效应 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 194-203.
- Xia Y H, Zhang X P, Dai J J, et al. Time-lag effects between meteorological factors and transpiration of *Cinnamomum camphora* in the subtropical monsoon region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 194-203.
- [16] Richard G, William O, James L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method [J]. Agricultural Water Management, 2006(81): 1-22.
- [17] Gong X W, Liu H, Sun J S, et al. A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(4): 530-546.
- [18] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室内作物腾发量计算与验证 [J]. 水科学进展, 2007(6): 812-815.
- Chen X M, Cai H J, Li H X, et al. Calculation and verification of crop evapotranspiration in greenhouse [J]. Advances in Water Science, 2007(6): 812-815.
- [19] 张大龙, 李建明, 吴普特, 等. 温室甜瓜营养生长期日蒸腾量估算模型 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1938-1944.
- Zhang D L, Li J M, Wu P T, et al. Estimation model for daily transpiration of greenhouse muskmelon in its vegetative growth period [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1938-1944.
- [20] 李芬. 细胞生物学实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 15-20.
- Li F. Experimental techniques in cell biology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 15-20.
- [21] 睦晓蕾, 毛胜利, 王立浩, 等. 辣椒幼苗叶片解剖特征及光合特

- 性对弱光的响应 [J]. 园艺学报, 2009, 36(2): 195-208.
- Sui X L, Mao S L, Wang L H, et al. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light in leaves of capsicum seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(2): 195-208.
- [22] 柏 萍. 调控空气相对湿度对温室甜瓜和番茄生长、水分状态及产量的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Bai P. Effect of regulating air relative humidity on growth, water status and yield of muskmelon and tomato in greenhouse [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [23] 范志霞, 陈越悦, 付荷玲. 成都地区 10 种园林灌木叶片结构与抗旱性关系研究 [J]. 植物科学学报, 2019, 37(1): 70-78.
- Fan Z X, Chen Y Y, Fu H L. Study on drought resistance and leaf structure in 10 species of garden shrubs in Chengdu [J]. Plant Science Journal, 2019, 37(1): 70-78.
- [24] Xie H X, Zhang Z H, Yang R Y, et al. Analysis on trunk sap flow time lag effect of *Sophora japonica* f. *pendula* compared to meteorological factors [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 106-110.
- [25] 白云飞, 赵建贵, 韦玉翡, 等. 温室番茄茎流速率与环境参数间相关性研究 [J]. 江西农业学报, 2021, 33(7): 19-25.
- Bai Y F, Zhao J G, Wei Y F, et al. Research on correlation between stem flow rate and environmental parameters of tomato in greenhouse [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(7): 19-25.
- [26] Jo W J, Shin J H. Development of a transpiration model for precise tomato (*Solanum lycopersicum* L.) irrigation control under various environmental conditions in greenhouse [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021(162): 388-394.
- [27] Pereira L S, Paredes P, Jovanovic N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach [J]. Agricultural Water Management, 2020(241): 106357.
- [28] 张中典, 张大龙, 李建明, 等. 辐射积驱动的温室甜瓜作物系数模型 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 128-134, 142.
- Zhang Z D, Zhang D L, Li J M, et al. Modeling crop coefficient for muskmelon in greenhouse using photo-thermal product [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2017, 45(2): 128-134, 142.
- [29] 刘 钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证 [J]. 农业工程学报, 2000(5): 26-30.
- Liu Y, Pereira L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000(5): 26-30.
- [30] 李建明, 王 平, 李 江. 灌溉量对亚低温下温室番茄生理生化与品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 129-134.
- Li J M, Wang P, Li J. Effect of irrigation amount on physiology, biochemistry and fruit quality of greenhouse tomato under sub-low temperatures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 129-134.
- [31] 张效星, 樊 毅, 贾 悦, 等. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 143-150.
- Zhang X X, Fan Y, Jia Y, et al. Effect of water deficit on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in *Shiranui citrus* under drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3): 143-150.
- [32] 李建明, 于雪梅, 王雪威, 等. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 75-83.
- Li J M, Yu X M, Wang X W, et al. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield, quality and fertilizer and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 75-83.
- [33] 刘凯杰, 方海猛, 何 雪, 等. 软熟期不同水分处理对阳光玫瑰葡萄叶片光合特性和果实品质性状的影响 [J]. 果树学报, 2022, 39(5): 764-772.
- Liu K J, Fang H M, He X, et al. Effects of different water treatments at veraison to ripening period on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality traits of Shine Muscat grapes [J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(5): 764-772.