

基于蒸发皿蒸发量的椰糠盆栽番茄适宜灌溉量估算与试验

刘 聪¹, 官彬彬², 高洪波², 吕桂云², 吴晓蕾²,

赵 峰², 霍钊培¹, 张西平^{1*}

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 保定 071000; 2. 河北农业大学园艺学院, 保定 071000)

摘 要: 目前以实测蒸腾量、田间持水量或累计太阳辐射作为灌水依据建立的温室作物蒸腾模型中, 其灌水依据的确定所需监测参数项多, 且对监测仪器精度要求较高。基于此, 该研究以 20 cm 蒸发皿蒸发量为灌水依据, 设置日光温室椰糠盆栽番茄 3 个生育时期的不同蒸发皿系数灌水量水平 (苗期: 0.2 (ET1)、0.4 (ET2)、0.6 (ET3); 开花坐果期: 0.3 (ET1)、0.5 (ET2)、0.7 (ET3); 成熟采摘期: 0.7 (ET1)、0.9 (ET2)、1.1 (ET3)), 对番茄株产量、水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 及品质进行综合评价, 筛选出较优灌水量水平; 基于较优灌水量水平建立蒸腾模型, 并以其余两个处理实测值对模型进行验证。结果表明: ET2 处理株高、可溶性糖和可溶性蛋白质含量分别显著高于其他处理 8.54%~14.27%、28.61%~32.99% 和 38.70%~70.83%; 相较于 ET3 处理, ET2 处理可在仅降低株产量 2.50% 情况下提高 WUE 10.05% 和节约灌水量 22.23%。对株产量、WUE 及品质进行主成分分析, 综合得分最高处理为 ET2; 各因子对日蒸腾量的影响程度大小依次为日累积净辐射 (M)、日平均温度 (T)、叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 日蒸腾量与 M 、 T 和 LAI 均呈极显著正相关; 该研究基于 ET2 处理所建立的椰糠栽培番茄蒸腾模型拟合较好, 均方根误差为 49.88 g, 相对误差为 11.88%。研究结果可为日光温室椰糠栽培番茄高效生产和智能化灌溉提供科学依据和决策参考。

关键词: 灌溉; 蒸腾; 椰糠; 蒸发皿蒸发量; 通径分析; 主成分分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.013

中图分类号: S275.6; S274.1; S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0117-08

刘聪, 官彬彬, 高洪波, 等. 基于蒸发皿蒸发量的椰糠盆栽番茄适宜灌溉量估算与试验 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 117-124. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.013 http://www.tcsae.org

Liu Cong, Gong Binbin, Gao Hongbo, et al. Estimation and experiment of the suitable irrigation amount of potted tomatoes with coconut bran using pan evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 117-124. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.013 http://www.tcsae.org

0 引 言

番茄是需水量较大的茄果类蔬菜之一, 灌水量不足会造成株高和叶面积减小及果实硬度增大, 并容易造成减产; 在一定范围内增加灌水量有利于提高产量, 而灌水量过多则会显著降低番茄维生素 C 和可溶性固形物含量^[1-3]。在保证产量和品质的同时, 合理选择灌溉策略, 最大限度地提高番茄产量、品质及水分利用效率, 一直是生产者所追求的目标。无土栽培具有克服土壤连作、降低病虫害发生概率及环境可控等优点, 因此近年来无土栽培番茄占设施农业番茄的比例越来越高; 椰糠基质具有取材天然、保水和透气性较好等特性, 逐渐成为首选的无土栽培基质^[4-5]。

目前温室番茄栽培一般采用基于累积辐射的灌溉策略, 但其对累积辐射的测量精度要求过高^[6]; 基于此有学者通过建立作物蒸腾模型将蒸腾速率进行量化, 从而预

测作物蒸腾量^[7-8]。已有以一定的实测蒸腾量、田间持水量或累积太阳辐射作为灌水依据建立的蒸腾模型^[8-10], 其选取的灌水依据具有对仪器精度要求高、成本高、操作不便和所需参数项较多等局限性。蒸发皿法是一种估算作物蒸发蒸腾量的经验公式法, 在可控环境的温室内蒸发皿是一种具有操作简单和实用等优点的估算作物蒸发蒸腾量设备, 故以蒸发皿作为灌水依据在国内外设施农业的种植中被广泛应用^[11-13]。

本试验通过对番茄生长指标、品质、产量及蒸腾量的测定, 探究日光温室椰糠盆栽番茄节水、高产及优质的蒸发皿系数灌水量水平, 建立此水平下的蒸腾模型, 以期为高产优质的日光温室椰糠栽培番茄提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2020 年 11 月—2021 年 3 月在河北农业大学创新驿站水润佳禾农庄的日光温室进行试验, 温室为大空间无土栽培专用日光温室, 南北跨度 10 m, 东西长度 40 m。试验所在区 (38°77'N、115°48'E, 海拔 18 m) 多年平均气温 13.4 °C, 日照时数 2 511.0 h, 蒸发量 1 785.3 mm, 降水量 451 mm 左右, 降雨主要集中在 7—8 月。供试番茄品种为京采 6 号, 采用聚苯乙烯泡沫塑料方形槽 (长×

收稿日期: 2022-02-24 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20326901D); 河北省农业科技成果转化资金项目 (21626901D); 河北农业大学智慧园艺双一流学科群项目 (1090061-2)

作者简介: 刘聪, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。Email: 1727900615@qq.com

*通信作者: 张西平, 博士, 副教授, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。

Email: xpzhang1@126.com

宽×高: 0.375 m×0.290 m×0.240 m, 2 株/槽)栽培模式, 共 54 盆; 椰糠(粗细椰糠体积比为 3:7, 体积密度为 0.075 4 g/cm³)栽培。

1.2 试验设计

根据预试验, 确定试验基地日光温室椰糠栽培番茄 3 个生育时期的日蒸腾量和 20 cm 蒸发皿日累积蒸发量, 建立日蒸腾量和日累积蒸发量的关系, 得出 3 个生育时期日蒸腾量对应的蒸发皿系数(苗期: 0.4、开花坐果期: 0.5、成熟采摘期: 0.9)。

试验以室内 20 cm 蒸发皿日累积蒸发量为灌水依据, 依据相关文献^[11-13]设置 3 个生育时期不同蒸发皿系数灌水水平(苗期: 0.2 (ET1)、0.4 (ET2)、0.6 (ET3); 开花坐果期: 0.3 (ET1)、0.5 (ET2)、0.7 (ET3); 成熟采摘期: 0.7 (ET1)、0.9 (ET2)、1.1 (ET3)), 各处理 3 次重复, 一次重复 12 株, 共定植 108 株。

1.3 试验过程

株距和行距分别为 0.25 和 1.50 m, 选取长势基本一致的 4 叶 1 心幼苗进行定植, 麻绳吊蔓, 3 穗果成熟试验结束; 选用 300 L 水肥桶配制不同营养液, 确保不同处理施肥量相同, 通过水泵增压进行灌水; 灌水方式为膜下滴灌, 滴头流量为 2.0 L/h; 每天灌水 3 次, 晴天灌水时间分别为 08:00、11:00 和 14:00, 其灌水量分别为单株日灌水量的 40%、30%和 30%, 阴天灌水时间分别为 08:30、11:30 和 14:30。整个生育期按照定植后天数分为 3 个阶段: 苗期(0~14 d); 开花坐果期(15~57 d); 成熟采摘期(58~129 d), 全生育期各处理灌水情况如表 1 所示。

表 1 全生育期各处理灌水情况

Table 1 Irrigation conditions of each treatment during the whole growth stages

生育期 Growth stages	ET1	ET2	ET3
苗期 Seedling stage	0.001	0.002	0.004
开花坐果期 Flowering stage	0.007	0.012	0.016
成熟采摘期 Fruit maturation stage	0.023	0.029	0.035
全生育期 Whole growth stage	0.031	0.043	0.055

注: 苗期、开花坐果期和成熟采摘期下不同处理的蒸发皿系数分别为: ET1 (0.2、0.3、0.7)、ET2 (0.4、0.5、0.9) 和 ET3 (0.6、0.7、1.1)。

Note: The evaporating pan coefficients of different treatments at seedling stage, flowering stage, and fruit maturation stage are: ET1 (0.2, 0.3, 0.7), ET2 (0.4, 0.5, 0.9), and ET3 (0.6, 0.7, 1.1).

营养液施肥采用霍格兰配方^[1]。生育期营养液电导率(Electric Conductivity, EC)调整方案如表 2。

表 2 生育期电导率(EC)值调整方案

Table 2 Electric Conductivity (EC) value adjustment plan during growth stages

生育期 Growth stages	ET1	ET2	ET3
苗期 Seedling stage	2.5	2.2	1.9
开花坐果期 Flowering stage	2.8	2.5	2.2
成熟采摘前期(一穗果)	3.3	3.0	2.7
Fruit maturation early stage (first ear fruit)			
成熟采摘后期(二、三穗果)	3.6	3.3	3.0
Fruit maturation late stage (second, third ear fruit)			

1.4 测定项目及方法

1.4.1 温室内外环境因子

室内冠层 20 cm 处温度(T , °C)、相对湿度(Relative Humidity, RH, %)和日累积净辐射(M , W/m²)用青联物联温湿度环境监测器(CGP22N, 青萍, 中国)和光合有效辐射仪(GLZ-C, 浙江托普云农科技股份有限公司, 中国)进行采集, 数据采集间隔 15 min。

1.4.2 番茄单株日蒸腾量

整个生育期方形槽置于电子秤(量程 30 kg, 精度 0.001 kg)上, 实时监测方形槽质量, 每天 08:00 对前一天回流液进行称量记录, 采用膜下滴灌因此忽略株间蒸发, 植株日蒸腾量计算式^[14]为

$$T_v = I_i + W_i - W_{i+1} - S_{i+1} \quad (1)$$

式中 T_v 为植株日蒸腾量, kg; I_i 为第 i 天灌水量, kg; W_i 为第 i 天 08:00 时植株连同方形槽的质量, kg; W_{i+1} 为第 $i+1$ 天 08:00 时植株连同方形槽的质量, kg; S_{i+1} 为第 $i+1$ 天 08:00 回流液的质量, kg。

1.4.3 番茄生长指标

1) 叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)

苗期至结果前期监测, 每 14 d 测量一次, 叶片选取原则为冠层完全展开不受遮挡的倒数第 3 片叶; 测量枝长 a (cm) 和枝宽 b (cm), 并记录单株枝数; 选取预试验的 130 枝叶片进行扫描和回归分析, 得出单枝叶面积 LA (cm²) 计算式(2)^[15]; 单株枝数与 LA 之积, 即单株总叶面积 L_1 ; 根据种植密度 d (株/m²), 换算为番茄叶面积指数 LAI=10⁻⁴ dL_1 。

$$LA = 52.54 - 2.61ab + 1.30a^2 + 1.55b^2 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.96, P < 0.000 1)$$

2) 株高、茎粗、叶绿素相对含量(Soil and Plant Analyzer Development, SPAD)

株高用卷尺测量, 为茎基部到顶端的垂直高度; 茎粗用数显游标卡尺测量, 在距茎基部 2 cm 处分 2 个方向(90°夹角)测量, 取其平均值; 叶绿素相对含量用叶绿素仪(SPAD 502 Plus, 柯尼卡美能达, 日本)对叶片进行测量, 叶片选取原则与叶面积指数一致。

1.4.4 番茄产量

2021 年 2 月开始采收, 果实采摘后每个小区采用电子秤分别称量计产, 最后折算为平均单株产量。水分利用效率计算式^[16]为

$$WUE = Y/T_{\text{总}} \quad (3)$$

式中 WUE 为水分利用效率, kg/m³; Y 为番茄的平均单株产量, kg/株; $T_{\text{总}}$ 为全生育期的植株总蒸腾量, m³/株。

1.4.5 番茄果实品质

外观品质: 硬度用 FHR-5 型果实硬度计测量; 横径和纵径用游标卡尺测量, 果形指数=纵径/横径^[17]。

营养品质: 维生素 C 采用 2, 6-二氯酚靛酚滴定法; 有机酸采用高效液相色谱法; 可溶性固形物采用数显糖量计法; 可溶性糖采用蒽酮-硫酸比色法; 可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝 G-250 染色法; 硝酸盐采用水杨酸-硫酸比色法; 番茄红素采用有机溶剂萃取法^[18-21]。

1.4.6 番茄蒸腾模型的建立与验证

选取定植后 58~98 d 实测数据, 对不同处理的产量、水分利用效率和番茄品质进行主成分分析, 选取较优灌水量水平; 依据较优灌水量下的蒸腾量与温室环境因子和叶面积指数的趋势类型, 采用麦夸特法参数估计, 建立日光温室椰糠栽培番茄日蒸腾量估算模型^[10]; 利用其余两个处理的实测值对本试验建立的模型进行验证。

1.5 数据处理与统计分析

利用 Microsoft Excel 2019 进行统计; SPSS 20.0 软件进行数据分析和处理, 主成分分析选取较优灌水量水平; DPS 软件的麦夸特法进行参数估计并建立多元非线性蒸腾模型。采用相对误差 (Mean Relative Error, MRE)、相关系数 (Coefficient of Determination, R^2) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 指标对模型的准确性进行验证^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量对番茄生长效应的影响

2.1.1 不同灌水量对番茄生长指标的影响

随着生育期推移, 不同处理的株高、茎粗和 LAI 均呈增加的趋势 (表 3)。随着灌水量增加, 株高和定植后 15~57 d 的 LAI 呈先增后减的趋势, ET2 处理在定植后 15~71 d 的株高和定植后 15 d 的 LAI 分别显著高于其他处理 8.54%~14.27%和 11.42%~22.26% ($P<0.05$); 茎粗除在定植后 43 d 呈先减后增的趋势外, 其余均呈递增趋势, ET3 处理在定植后 29、57 和 71 d 的茎粗显著高于其他处理 5.58%~36.56%; SPAD 除在定植后 43 d 呈递减趋势外均呈先增后减的趋势, ET2 处理在定植后 15 d 的 SPAD 显著高于其他处理 5.69%~10.28%。说明过高或过低的灌水量抑制番茄株高和 LAI 的增加。

表 3 不同灌水量对番茄生长指标的影响

Table 3 Effects of different irrigation amounts on tomato growth indices

生长指标 Growth indices	灌水处理 Irrigation treatments	定植后天数 Days after planting/d				
		15	29	43	57	71
株高 Plant height/cm	ET1	32.81±0.58c	58.55±1.02c	77.31±1.44c	113.49±1.88c	138.98±2.14b
	ET2	38.27±0.68a	68.07±1.05a	95.08±1.35a	131.54±1.66a	158.14±1.82a
	ET3	35.00±0.70b	63.74±1.19b	86.02±1.56b	120.76±2.89b	143.21±3.95b
茎粗 Stem thickness/mm	ET1	4.96±0.13a	6.03±0.14b	7.69±0.33a	7.76±0.15b	8.12±0.16b
	ET2	5.13±0.09a	6.30±0.12ab	7.33±0.13a	7.83±0.13b	8.56±0.23b
	ET3	5.23±0.09a	6.68±0.14a	7.53±0.12a	8.74±0.20a	9.24±0.25a
叶绿素相对含量 Soil and Plant Analyzer Development (SPAD)	ET1	40.74±0.37b	34.59±0.69a	38.28±0.95a	40.19±0.43a	40.99±1.02a
	ET2	45.41±1.32a	35.09±0.47a	36.1±0.58a	41.45±0.37a	42.33±0.88a
	ET3	42.83±0.23b	33.69±0.46a	35.73±1.03a	41.39±0.73a	39.65±1.17a
叶面积指数 Leaf Area Index (LAI)	ET1	0.26±0.014b	0.83±0.042a	1.41±0.039a	1.60±0.060a	1.93±0.083a
	ET2	0.33±0.016a	0.96±0.052a	1.48±0.055a	1.65±0.060a	1.67±0.075a
	ET3	0.29±0.012ab	0.85±0.034a	1.27±0.075a	1.49±0.065a	1.74±0.126a
株高 Plant height		**	**	**	**	**
茎粗 Stem thickness		ns	**	ns	**	**
SPAD		**	ns	ns	ns	ns
LAI		**	ns	ns	ns	ns

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); **表示极显著 ($P<0.01$); ns 表示不显著, 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$); * indicates significance ($P<0.05$); ** indicates extreme significance ($P<0.01$); ns indicates insignificance, the same below.

灌水量对株高的影响达到极显著水平 ($P<0.01$), 对茎粗除在定植后 15 和 43 d 影响不显著 ($P>0.05$) 外均达到极显著水平, 对 SPAD 和 LAI 的影响仅在定植后 15 d 表现出极显著差异。由差异显著性分析表明, 相比于茎粗、SPAD 和 LAI, 株高对灌水量更为敏感。

2.1.2 不同灌水量对番茄蒸腾量、产量和水分利用效率的影响

不同处理对番茄生育期蒸腾量 ($T_{v\text{生育期}}$) 和日平均蒸腾量的影响 ($T_{v\text{mean}}$) (表 4), $T_{v\text{生育期}}$ 和 $T_{v\text{mean}}$ 均表现为成熟采摘期最大, 苗期最小; 随着灌水量增加, 不同处理蒸腾量呈递增趋势。ET3 处理的 $T_{v\text{生育期}}$ 和 $T_{v\text{mean}}$ 较其他处理分别显著增加了 8.95%~43.49%和 15.08%~33.12% ($P<0.05$)。

随着灌水量增加番茄株产量 (Y) 和总蒸腾量 ($T_{\text{总}}$) 呈增加的趋势, WUE 呈先增后减的趋势 (表 5)。ET3 处理 Y 和 $T_{\text{总}}$ 最大, 为 0.82 kg/株和 0.037 m³, 显著高于

其他处理 2.50%~19.00%和 11.71%~18.02% ($P<0.05$); ET2 处理 WUE 最高, 为 24.48 kg/m³, 显著高于其他处理 10.49%~11.11%; 相较于 ET3 处理, ET2 处理可在 Y 仅降低 2.50%的情况下提高 10.05%的 WUE 和节约 22.23%的灌水量。灌水量对各处理 Y 、 $T_{\text{总}}$ 和 WUE 影响均显著 ($P<0.05$)。

表 4 不同灌水量对番茄生育期蒸腾量的影响

Table 4 Effects of different irrigation amounts on transpiration during tomato growth stages

生育期 Growth stages	$T_{v\text{生育期}}/(\text{kg}\cdot\text{株}^{-1})$			$T_{v\text{mean}}/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$		
	ET1	ET2	ET3	ET1	ET2	ET3
苗期 Seedling stage	1.43c	1.81b	2.15a	46.06c	51.57b	60.73a
开花坐果期 Flowering stage	3.59c	4.51b	5.32a	102.65c	128.93b	151.83a
成熟采摘期 Fruit maturation stage	24.54c	27.03b	29.69a	272.65c	340.38b	407.65a

注: $T_{v\text{生育期}}$ 为不同生育期的蒸腾量, $T_{v\text{mean}}$ 为平均单株日蒸腾量。

Note: $T_{v\text{生育期}}$ is transpiration in different growth stages, and $T_{v\text{mean}}$ is the average daily transpiration per plant.

表 5 不同灌水量对番茄产量及水分利用效率的影响
Table 5 Effects of different irrigation amounts on tomato yield and water use efficiency

处理 Treatments	株产量 Yield per plant $Y/(\text{kg}\cdot\text{株}^{-1})$	产量 Yield/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	总蒸腾量 Total transpiration T_{t}/m^3	水分利用效率 Water Use Efficiency (WUE)/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
ET1	0.66c	1.77c	0.030c	21.70b
ET2	0.80b	2.12b	0.033b	24.48a
ET3	0.82a	2.18a	0.037a	22.03b

2.1.3 不同灌水量对番茄品质的影响

由表 6 可得, 不同的灌水量对果实外观品质的影响不同。随着灌水量增加, 果形指数呈先增后减趋势, ET2 处理高于其他处理 2.63%~5.26%; 单果质量呈递增趋势, ET3 处理高于其他处理 25.39%~33.22%; ET1 处理番茄硬度高于其他处理 0.26%~13.88%。灌水量对番茄外观品质的影响均不显著 ($P>0.05$)。

由表 7 可得, 随着灌水量增加硝酸盐和番茄红素含量呈递减趋势, 维生素 C 呈先减后增的趋势, 可溶性糖、可溶性蛋白质和可溶性固形物含量呈先增后减的趋势;

表 7 不同灌水量对番茄营养品质的影响
Table 7 Effects of different irrigation amounts on tomato nutritional quality

处理 Treatments	硝酸盐 Nitrate/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	可溶性糖 Soluble sugar/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	可溶性蛋白质 Soluble protein/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	番茄红素 Lycopene/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	可溶性固形物 Soluble solids/%	维生素 C Vitamin C/ $(\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1})$
ET1	145.13±12.22a	35.96±1.08b	0.06±0.001c	529.88±11.35a	7.20±0.50ab	10.39±0.24b
ET2	117.56±6.69b	53.66±0.88a	0.19±0.010a	447.89±23.58b	7.93±0.38a	9.45±0.42b
ET3	59.23±1.92c	38.31±0.87b	0.12±0.010b	370.07±27.54c	6.40±0.32b	12.57±0.24a
灌水量 Irrigation amounts	**	**	**	**	ns	**

2.2 日光温室椰糠栽培番茄日蒸腾量估算模型的建立

2.2.1 采用主成分分析选取较优灌水量

对番茄产量、水分利用效率及品质等 11 个指标进行主成分分析。由表 8 可得, 前两个主成分的累积贡献率达到 89.734%, 即包含了原始变量的全部变异信息, 选择前两个主成分作为主要主成分, 可降低变量个数且保留大部分原始信息。其中, 第一主成分单独综合了原始变异信息的 69.330%, 主要包括株产量、水分利用效率、单果质量、硬度、硝酸盐、番茄红素和维生素 C, 其中第一主成分与株产量、水分利用效率、单果质量和维生素 C 呈负相关趋势; 第二主成分单独综合了原始变异信息的 20.404%, 主要包括可溶性糖和可溶性蛋白质等, 其中第二主成分与硝酸盐、番茄红素和维生素 C 呈负相关趋势。

表 8 主成分系数和贡献率
Table 8 Principal component coefficients and contribution rates

自变量 Independent variable	主成分 Principal components	
	X_1	X_2
株产量 Yield per plant	-0.314	0.268
WUE	-0.346	0.141
果形指数 Fruit shape index	0.304	0.293
单果质量 Single fruit mass	-0.349	0.120
硬度 Hardness	0.357	0.014
硝酸盐 Nitrate	0.342	-0.164
可溶性糖 Soluble sugar	0.131	0.524
可溶性蛋白质 Soluble protein	0.009	0.563
番茄红素 Lycopene	0.311	-0.277
可溶性固形物 Soluble solids	0.309	0.282
维生素 C Vitamin C	-0.338	-0.182
特征值 Eigenvalue	7.848	3.152
贡献率 Contribution rate/%	69.330	20.404

ET1 处理的硝酸盐和番茄红素含量均显著高于其他处理 18.99%~59.19%和 15.47%~30.16% ($P<0.05$); ET2 处理的可溶性糖和可溶性蛋白质含量显著高于其他处理 28.61%~32.99%和 38.70%~70.83%; ET3 处理的维生素 C 含量显著高于其他处理 17.31%~25.00%。灌水量对番茄的硝酸盐、可溶性糖、可溶性蛋白质、番茄红素和维生素 C 含量的影响呈现极显著水平 ($P<0.01$), 对可溶性固形物含量的影响不显著 ($P>0.05$)。

表 6 不同灌水量对番茄外观品质的影响
Table 6 Effects of different irrigation amounts on tomato appearance quality

处理 Treatments	果形指数 Fruit shape index	单果质量 Single fruit mass/g	硬度 Hardness/ $(\text{N}\cdot\text{cm}^{-2})$
ET1	0.74±0.014a	94.66±1.82b	11.20±0.27a
ET2	0.76±0.020a	105.77±5.64ab	11.20±0.58a
ET3	0.72±0.010a	141.756±20.45a	9.80±0.29a
灌水量 Irrigation amounts	ns	ns	ns

将筛选的主成分进行综合分析, 构建综合评价函数, 结果见表 9, 综合得分最高处理为 ET2, 最低处理为 ET3, 故兼顾高产、节水及优质的灌水量处理为 ET2。

表 9 不同处理主成分综合得分
Table 9 Comprehensive score of principal components of different treatments

处理 Treatments	主成分 1 得分 Principal component 1 score	主成分 2 得分 Principal component 2 score	综合得分 Synthesis score	位次 Order
ET1	0.602	-0.985	0.147	2
ET2	0.553	1.013	0.685	1
ET3	-1.155	-0.029	-0.832	3

2.2.2 番茄蒸腾影响因子的相关性分析和通径分析

有研究表明日平均温度 (T)、日平均湿度 (RH)、日累积净辐射 (M) 和 LAI 与温室无土栽培甜瓜日蒸腾量呈现极显著相关性^[10]; 本文对较优处理 ET2 的日蒸腾量 (T_v) 与 T 、RH、 M 和 LAI 作通径分析和相关分析, 结果表明, T_v 与 T 、 M 和 LAI 呈现极显著正相关性 ($P<0.01$), 相关性大小依次为 M 、 T 、LAI (表 10)。

由直接通径系数得出 T_v 受各因子直接影响大小依次为 M 、 T 、LAI。对比直接和间接通径系数可知, M 和 LAI 对 T_v 的影响主要是直接作用; T 对 T_v 的影响主要是间接作用, 通过对 M 的促进作用, 进而对 T_v 产生正向的影响。

2.2.3 日光温室椰糠栽培番茄蒸腾模型的建立与验证

由表 10 可得, 选取 M 、 T 和 LAI 作为蒸腾影响因子与 ET2 处理的蒸腾量建立模型具有合理性。依据 T_v 受影响因子的相关趋势, 采用麦夸特法参数估计^[10], 得到的

番茄日蒸腾模型为

$$T_v' = 147.78 \ln(M) + 68.17 e^{LAI} + 302.30 \ln(T) - 1\,816.37 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.896, P < 0.000\,1)$$

式中 T_v' 为模拟日蒸腾量, g ; M 为日累积净辐射, W/m^2 ; T 为日平均温度, $^{\circ}C$ 。拟合结果 $R^2 = 0.896$, 表明番茄日蒸腾量变化的 89.60% 由上述因子所引起。

表 10 番茄日蒸腾量与影响因子的相关分析和通径分析
Table 10 Correlation analysis and path analysis between tomato daily evapotranspiration and influencing factors

变量 Variables	直接通径 系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				相关系数 Correlation coefficient
		Σ	M	LAI	T	
M	0.61	0.28	/	-0.02	0.30	0.89**
LAI	0.25	-0.14	-0.04	/	-0.10	0.11**
T	0.38	0.40	0.47	-0.07	/	0.78**

注: M 为日累积净辐射; T 为日平均温度; Σ 为各变量间接通径系数之和。
Note: M is the daily cumulative net radiation; T is the daily average temperature; Σ is the sum of the indirect path coefficients of each variable.

利用 ET1 和 ET3 处理的实测值对所建蒸腾模型进行检验, 如图 1 所示; T_v' 模拟椰糠栽培番茄日蒸腾量与 T_v 的误差较小, 决定系数大于 0.85, 相对误差 (16.88%) 小于 20%。检验结果表明, 本试验建立的蒸腾模型具有较高的准确性。

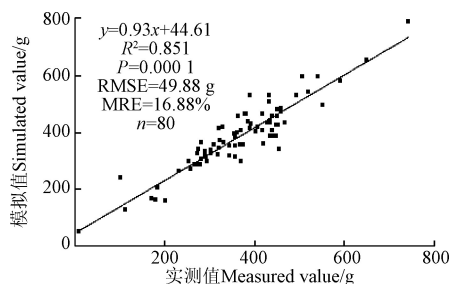


图 1 番茄蒸腾量实测值与模型模拟值的比较

Fig.1 Comparison between measured values of tomato transpiration and simulated values of the model

3 讨论

已有研究表明, 蒸腾量与灌水量呈正相关趋势, 番茄的产量与灌水量呈二次抛物线关系, 当灌水量超过一定的阈值时, 出现产量增长不明显或减产的现象^[23-27]; 株高、SPAD 和 LAI 随着灌水量增加呈先增后减的趋势^[28-29]; 果实可溶性固形物和可溶性糖含量随着灌水量的增加呈增加的趋势, 但超过一定值抑制其含量的累积^[30-33]。本试验研究发现, 随着灌水量增加日光温室椰糠盆栽番茄日蒸腾量、株产量和茎粗呈增加的趋势, 株高、SPAD、LAI、可溶性蛋白质和可溶性固形物呈先增后减的趋势, 这与人研究结果基本一致。

关于估算温室作物蒸腾量的研究, 大量学者依据实际温室环境对 P-M 公式中阻抗参数等进行合理修正, 得出适用于估算温室土培作物蒸腾量的模型^[3,7,14,21,24]; 但这些模型参数计算中未将土壤蒸发从蒸散中去除, Shin 等^[34]指出基质表面的蒸发很小甚至可以忽略不计; 因此估算

基质栽培蒸腾量时应不考虑土壤蒸发, 徐立鸿等^[9]忽略土壤蒸发, 以作物的叶面积和冠层气候变化修正 P-M 公式中的相关参数, 建立温室稻壳炭栽培番茄蒸腾量模型; 前人以实测蒸腾量、田间持水量或累积辐射积作为灌水依据建立的温室作物蒸腾模型, 其选取的灌水依据具有对所需参数项较多和监测仪器精度要求较高等局限性。本文选用简单操作且方便有效的蒸发皿日累积蒸发量作为灌水依据, 通过对椰糠盆栽番茄不同处理的产量、水分利用效率和果实品质进行主成分分析, 得出 ET2 处理 (3 个生育时期蒸发皿系数分别为 0.4、0.5、0.9) 的综合得分最高, 选用 ET2 处理的蒸腾量与 LAI 和环境因子进行相关分析和通径分析, 得出各因子对蒸腾量的影响大小依次为 M 、 T 、LAI, M 、 T 和 LAI 与日蒸腾量呈正相关, 这与 Jo 等^[1,10,22-23]的结果一致。选取的影响因子与较优灌水量水平的蒸腾量建立日光温室椰糠盆栽番茄日蒸腾量估算模型, 决定系数为 0.896, 说明蒸腾量变化的 89.60% 由 M 、 T 和 LAI 所引起; 利用 ET1 和 ET3 处理的实测蒸腾量对本试验所建立的模型进行检验, 得出本试验建立的日光温室椰糠盆栽番茄蒸腾量估算模型具有较高准确性。本试验仅对冬春茬番茄生产数据进行模型建立和验证, 对春夏茬基质栽培番茄的适用性有待于进一步研究。

4 结论

1) 在椰糠栽培番茄试验中, 相较于 ET3 (3 个生育时期蒸发皿系数分别为 0.6、0.7、1.1) 处理, ET2 (3 个生育时期蒸发皿系数分别为 0.4、0.5、0.9) 处理可在仅降低株产量 2.50% 的情况下提高水分利用效率 10.05% 和节约灌水量 22.23%, 可为日光温室椰糠栽培番茄高产优质与智能化灌溉提供参考。

2) 日累积净辐射 (M)、日平均温度 (T) 和叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 是 ET2 处理日蒸腾量的主要影响因子, 其相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 各因子对日蒸腾量的影响程度大小依次为 M 、 T 、LAI。

3) ET2 处理的日蒸腾量与 M 、 T 和 LAI 建立日光温室椰糠栽培番茄日蒸腾量估算模型; 其余两个处理处理实测值对模型进行验证, 决定系数大于 0.85, 相对误差为 16.88%, 表明日蒸腾量估算模型具有较好的稳定性。

[参 考 文 献]

- [1] 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: PPB, 2021, 162: 388-394.
- [2] 祁娟霞. 不同灌水量和灌水频率对番茄生长发育及品质的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
Qi Juanxia. The Effect of Different Irrigation Amount and Irrigation Frequency on the Growth and Quality of Tomato[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [3] Nangare D D, Singh Y, Kumar P S, et al. Growth, fruit yield

- and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis[J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 73-79.
- [4] 罗新兰, 王淼, 佟国红, 等. 北方寒区日光温室冬季基质袋培番茄蒸腾量模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 43-50, 65.
- Luo Xinlan, Wang Miao, Tong Guohong, et al. Simulation of transpiration of bag-grown tomato in solar greenhouse in northern cold region in winter[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 43-50, 65. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王艳芳, 徐进, 李新旭, 等. 不同椰糠栽培方式对番茄生长发育及水分利用率的影响[J]. 蔬菜, 2017(4): 72-75.
- Wang Yanfang, Xu Jin, Li Xinxu, et al. Effects of different coconut peat cultivation methods on tomato growth and water use efficiency[J]. Vegetables, 2017(4): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [6] Rodriguez-Ortega W M, Martinez V, Rivero R M, et al. Use of a smart irrigation system to study the effects of irrigation management on the agronomic and physiological responses of tomato plants grown under different temperatures regimes[J]. Agricultural Water Management, 2017, 183: 158-168.
- [7] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, 等. Venlo 型温室内参考作物蒸散量计算方法比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 61-66.
- Zhao Baoshan, Yan Haofang, Zhang Chuan, et al. Comparative study on calculation methods of reference crop evapotranspiration in Venlo greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 61-66. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 基于 Penman-Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 208-213.
- Liu Hao, Duan Aiwan, Sun Jingsheng, et al. Estimation model of tomato transpiration in solar greenhouse based on Penman-Monteith equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 208-213. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐立鸿, 肖康俊, 蔚瑞华. 基于温室环境和作物生长的番茄基质栽培灌溉模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 189-196.
- Xu Lihong, Xiao Kangjun, Wei Ruihua. Tomato substrate cultivation irrigation model based on greenhouse environment and crop growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 189-196. (in Chinese with English abstract)
- [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 Jianming, Fan Xiangyu, Yan Fangfang, et al. The effect of irrigation volume on the yield and quality of muskmelon based on transpiration model decision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 156-162. (in Chinese with English abstract)
- [11] 龚雪文, 孙景生, 刘浩, 等. 基于 20 cm 蒸发皿蒸发量制定的华北地区温室黄瓜滴灌灌水制度[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3381-3388.
- Gong Xuewen, Sun Jingsheng, Liu Hao, et al. Drip irrigation system for greenhouse cucumbers in North China based on 20 cm evaporation pan evaporation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3381-3388. (in Chinese with English abstract)
- [12] 姜展博, 王丽学, 李明阳, 等. 基于蒸发皿蒸发量的日光温室番茄适宜水-炭管理模式[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3521-3530.
- Jiang Zhanbo, Wang Lixue, Li Mingyang, et al. Appropriate water-carbon management model for tomato in solar greenhouse based on pan evaporation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3521-3530. (in Chinese with English abstract)
- [13] Liu H, Duan A W, Li F S, et al. Drip irrigation scheduling for tomato grown in solar greenhouse based on pan evaporation in north China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12: 520-531.
- [14] 卢晶晶, 刘广会, 赵义平, 等. 不同水肥处理对碱地番茄产量与品质的影响[J]. 园艺与种苗, 2020, 40(4): 28-30.
- Lu Jingjing, Liu Guanghui, Zhao Yiping, et al. Effects of different water and fertilizer treatments on the yield and quality of tomato in alkaline soil[J]. Horticulture & Seed, 2020, 40(4): 28-30. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吕薇薇, 罗新兰, 李霞, 等. 日光温室番茄不同生育期的蒸腾作用及模拟研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(10): 57-61.
- Lyu Weiwei, Luo Xinlan, Li Xia, et al. Transpiration and simulation study of tomato in different growth periods in solar greenhouse[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(10): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡晓辉, 高子星, 马永博, 等. 基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 81-89.
- Hu Xiaohui, Gao Zixing, Ma Yongbo, et al. Water and fertilizer coupling scheme for baggrown pepper based on yield, quality and water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17): 81-89. (in Chinese with English abstract)
- [17] 何诗行, 何堤, 许春林, 等. 岩棉短程栽培模式中营养液对番茄生长及果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 188-195.
- He Shihang, He Di, Xu Chunlin, et al. Effects of nutrient solution on growth and quality of short-term cultivation tomatoes grown in rockwool[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the

- CSAE), 2017, 33(18): 188-195. (in Chinese with English abstract)
- [18] 臧明, 雷宏军, 潘红卫, 等. 增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 109-118. Zang Ming, Lei Hongjun, Pan Hongwei, et al. Aerobic subsur-face drip irrigation improves soil aeration and promotes tomato growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23): 109-118. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杜清洁, 李建明, 潘铜华, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17. Du Qingjie, Li Jianming, Pan Tonghua, et al. Effects of water and fertilizer coupling on tomato yield and comprehensive quality under drip irrigation conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王飞, 王波, 郁继华, 等. 基于隶属函数法的油麦菜栽培基质综合评价[J]. 西北农业学报, 2020, 29(1): 117-126. Wang Fei, Wang Bo, Yu Jihua, et al. Comprehensive evaluation of lettuce cultivation substrate based on membership function method[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(1): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- [21] Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1): 1-34.
- [22] 姚勇哲. 温室番茄耗水模型的模拟与验证[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. Yao Yongzhe. Simulation and Verification of Greenhouse Tomato Water Consumption Model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [23] Song L, Zhu J, Zhang T, et al. Higher canopy transpiration rates induced dieback in poplar (*Populus×xiaozhuanica*) plantations in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106-118.
- [24] 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 117-125. Yan Haofang, Wu Haimei, Zhang Chuan, et al. Estimation of greenhouse cucumber evapotranspiration in different seasons based on modified dual crop coefficient model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 117-125. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘艳飞. 通风与水分调控对温室湿热环境及番茄耗水影响的研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020. Liu Yanfei. Research on the Influence of Ventilation and Moisture Regulation on the Hot and Humid Environment of Greenhouse and Tomato Water Consumption[D]. Zhengzhou: North China University of Water Conservancy and Hydropower, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [26] 尚超, 徐凡, 韩莹琰, 等. 岩棉营养液栽培条件下温室番茄耗水规律的研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(3): 109-117. Shang Chao, Xu Fan, Han Yingyan, et al. Study on the water consumption law of greenhouse tomatoes under rock wool nutrient solution cultivation[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(3): 109-117. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吕剑, 颀建明, 郁继华, 等. 灌水下限对基质栽培番茄生长水分利用效率及果实品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(1): 37-41. Lyu Jian, Jie Jianming, Yu Jihua, et al. The effect of irrigation water limit on the growth, water use efficiency and fruit quality of tomato grown in substrate[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(1): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郭琳. 灌水量对日光温室番茄产量及土壤营养变化的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014. Guo Lin. Effect of Irrigation Amount on Tomato Yield and Soil Nutrition Changes in Solar Greenhouse[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [29] 周啸尘. 灌水量与追肥量对番茄产量和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014. Zhou Xiaochen. The Effect of Irrigation Amount and Top Dressing Amount on Tomato Yield and Quality[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [30] 费良军, 汪爱科, 王龙飞, 等. 日光温室基质栽培樱桃西红柿滴灌试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(12): 1070-1076. Fei Liangjun, Wang Aike, Wang Longfei, et al. Experimental study on drip irrigation of cherry tomatoes grown on substrate in sunlight greenhouse[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1070-1076. (in Chinese with English abstract)
- [31] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110-121. Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of the appropriate amount of fertilizer for drip irrigation based on tomato yield and quality of water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 110-121. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王佼, 苏秀敏, 韩文清, 等. 基于隶属函数法对 15 种旱地番茄品质的综合评价[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(12): 2586-2589. Wang Jiao, Su Xiumin, Han Wenqing, et al. Comprehensive evaluation of the quality of 15 dryland tomatoes based on the membership function method[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(12): 2586-2589. (in Chinese with English abstract)
- [33] 吴宣毅, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 种植行距与灌水量对西北日光温室番茄生育和产量的影响[J]. 农业工程学报,

2018, 34(24): 81-89.

Wu Xuanyi, Cao Hongxia, Hao Shuxue, et al. Effects of planting row spacing and irrigation volume on tomato growth and yield in northwest solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(24): 81-89. (in Chinese

with English abstract)

[34] Shin J H, Park J S, Son J E. Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants[J]. Agricultural Water Management, 2014, 135(2): 9-18.

Estimation and experiment of the suitable irrigation amount of potted tomatoes with coconut bran using pan evaporation

Liu Cong¹, Gong Binbin², Gao Hongbo², Lyu Guiyun², Wu Xiaolei²,
Zhao Feng², Huo Zhaopei¹, Zhang Xiping^{1*}

(1. School of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;

2. School of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Current transpiration models have commonly used the greenhouse climate as a boundary condition. The measured transpiration, the water holding capacity or the accumulated solar radiation was normally taken as the baseline to determine the irrigation amount of greenhouse crops. But, the determination of the irrigation amount required many monitoring parameters, and the accuracy of the monitoring instrument was relatively high. In this study, the optimal irrigation level was determined for the potted tomatoes with coconut bran in a solar greenhouse using the evaporation of a 20 cm evaporation pan as the baseline. The evaporation pan coefficient and irrigation levels were set in the three growth periods (seedling stage: 0.2 (ET1), 0.4 (ET2), and 0.6 (ET3); flowering and fruit setting stage: 0.3 (ET1), 0.5 (ET2), and 0.7 (ET3); fruiting stage: 0.7 (ET1), 0.9 (ET2), and 1.1 (ET3)). A comprehensive evaluation was made to clarify the effects of the irrigation amount on the tomato yield per plant, Water Use Efficiency (WUE), and fruit quality. A transpiration model was established for the potted tomato grown in the coconut bran in a solar greenhouse using the optimal irrigation water level. Two field tests were conducted to verify the model. The results showed that the nitrate and lycopene contents of ET1 treatment were significantly higher than those of other treatments by 18.99%-59.19% and 15.47%-30.16%, respectively. The plant height, soluble sugar, and soluble protein contents of ET2 treatment were significantly higher than those of other treatments by 8.54%-14.27%, 28.61%-32.99%, and 38.70%-70.83%, respectively. The growth stage transpiration per plant, the average daily transpiration per plant, the tomato yield per plant, and the total water consumption of ET3 treatment were significantly higher than those of other treatments by 8.95%-43.49%, 15.08%-33.12%, 2.50%-19.00%, and 11.71%-18.02%, respectively. The ET2 treatment improved the WUE by 10.05% and saved the irrigation amount by 22.23% with only a 2.50% reduction in the yield per plant, compared with the ET3 treatment. A principal component analysis was carried out on the tomato yield per plant, WUE, and fruit quality. The highest comprehensive score of the two principal components was the ET2 treatment, indicating that the ET2 was treated as the optimal irrigation amount of tomato potted with coconut bran in the solar greenhouse. Path analysis and correlation analysis were performed on the indoor daily cumulative net radiation (M), daily average temperature (T), daily average relative humidity (RH), tomato Leaf Area Index (Leaf Area Index, LAI), and daily transpiration. According to the correlation analysis, the degree of influence of each factor on the daily transpiration was ranked in the descending order of M , T , and LAI, indicating the very significant positive correlation of daily transpiration with M , T , and LAI. According to the path analysis, there were direct effects of M and LAI on the daily transpiration. By contrast, there were the indirect effects of T on the daily transpiration, where the M promoted a positive effect on the daily transpiration. Mcquard method was also used to estimate the daily transpiration, M , T , and LAI in the ET2 treatment, according to the correlation trend of daily transpiration factors. The determination coefficient was 0.896, indicating a well fitted model. The daily transpiration and M , while the T and LAI of the other two treatments were selected to test the transpiration model. The determination coefficient was 0.851, while the Root Mean Square Error (RMSE) was 49.88 g, and the relative error was 11.88%. Consequently, the transpiration model of ET2 treatment can also provide the scientific basis and decision-making reference for the efficient production and intelligent irrigation of potted tomatoes with coconut bran in the solar greenhouse.

Keywords: irrigation; transpiration; coconut bran; pan evaporation; path analysis; principal component analysis