

# 基于蒸腾模型决策的灌溉量对甜瓜产量及品质的影响

李建明<sup>1,2</sup>, 樊翔宇<sup>1,2</sup>, 闫芳芳<sup>1</sup>, 李惠<sup>1,2</sup>, 蔡东升<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:**为研究蒸腾模型决策下不同灌溉量对甜瓜干物质、产量及品质的影响,以甜瓜品种‘绿翠宝’为试材,利用2015年温室环境数据和叶面积指数,建立甜瓜日蒸腾量模型。2016年依据蒸腾模型以不同灌溉量(80%ET、100%ET、120%ET、140%ET, ET为日蒸腾量)对模型进行验证,并对甜瓜的干物质、产量和品质做综合评价。结果表明,各因子对甜瓜蒸腾作用大小表现为叶面积指数>日平均气温>日平均空气相对湿度>日太阳辐射强度,所建立的甜瓜日蒸腾量模型拟合较好,回归标准误差41.83 g,相对误差11.4%。蒸腾模型决策的不同灌溉量对甜瓜干物质影响显著,从伸蔓期到结果期,各处理植株的干物质总量以140%ET和120%ET最大,80%ET最小。结果期各处理果实的干物质积累表现为120%ET最大,80%ET最小。植株各器官干物质分配在伸蔓期呈现出叶>茎>根,开花坐果期呈现出叶>果>茎>根,结果期呈现出果>叶>茎>根。蒸腾模型决策的灌溉量过高或过低均使产量下降,120%ET处理产量最高为1.23 kg/株。水分利用效率随单株灌溉量的升高而降低。果实综合品质的隶属函数值排序为120%ET(4.69)>100%ET(3.45)>80%ET(3.34)>140%ET(2.27)。综合考虑甜瓜干物质积累与分配、产量及品质因素,蒸腾模型决策的灌溉量120%ET处理效果最好,可作为最优的灌溉水平。研究可为温室甜瓜高效生产和智能化灌溉提供科学依据和决策参考。

**关键词:**蒸腾; 温室; 灌溉; 通径分析; 干物质积累与分配; 水分利用效率; 隶属函数值

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.018

中图分类号: S652;S161.4;S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-21-0156-07

李建明, 樊翔宇, 闫芳芳, 李惠, 蔡东升. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.018 http://www.tcsae.org

Li Jianming, Fan Xiangyu, Yan Fangfang, Li Hui, Cai Dongsheng. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 156-162. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.018 http://www.tcsae.org

## 0 引言

近些年无土栽培技术发展迅速,规模越来越大,作物在不同灌溉条件下对蔬菜的产量与品质影响显著。在设施无土栽培生产过程中,水分对作物、土壤、环境空气的影响更为直接。灌溉量过小,容易造成减产;灌溉量过大,会使无效蒸腾增加,造成水分浪费,同时积水过多,根系受害,温室内空气湿度增加,导致病虫害发生和果实品质的下降<sup>[1]</sup>。甜瓜是温室中经常种植的作物,其生长对水分更为敏感,因此,进一步研究温室甜瓜的蒸腾耗水规律和合理的灌溉水平,对提高甜瓜的产量和品质、提升经济效益具有重要的意义。

大量研究表明,适宜的灌溉量可增加甜瓜产量,改善果实品质<sup>[2-3]</sup>。水分因子对于甜瓜生长发育作用十分明显,如Fabeiro等<sup>[4-5]</sup>研究表明,灌溉量的多少显著影响甜瓜的形态指标、产量和品质。李建明等<sup>[6-7]</sup>通过试验研究,建立甜瓜幼苗受有效积温、日温差积累、光辐射积累等多因子驱动的干物质分配模型,以及建成以温度与水分驱动的甜瓜幼苗生长形态模型。

目前的作物蒸腾研究主要集中在Penman-Monteith (PM)公式的应用<sup>[8]</sup>和特定环境因素对蒸腾的影响<sup>[9]</sup>,PM公式中需要诸多的气象观测资料,且各参数存在着相互影响,而有关蒸腾模型对甜瓜产量及综合品质的研究尚未见到相关报道。本试验以甜瓜品种‘绿翠宝’为试材,先建立蒸腾模型,再基于蒸腾模型进行灌水处理。目的是建立测量指标相对较少,预测精度能满足生产需要的蒸腾模型,利用叶面积指数和温室环境因子驱动来建立甜瓜的日蒸腾耗水模型。然后,基于蒸腾模型探究不同灌溉量对甜瓜干物质、产量及品质的影响,以期为温室甜瓜的智能灌溉与高产优质提供参考和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地

试验在西北农林科技大学园艺场内进行。试验所用的自制的大跨度非对称酿热温室(国家专利号201420836431.7)跨度17~19 m,脊高5.1~5.4 m,东西走向,南屋面投影10~12 m,北屋面投影7~8 m。温室内部的温度、湿度及光照条件较为一致。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 用于建立蒸腾模型的试验

2015年3—6月采用称质量法,依照甜瓜单株日蒸腾量的100%进行补充灌溉。依据各影响因子和日蒸腾量的趋势类型,进行多因素非线性回归分析,采用麦夸特法

收稿日期: 2017-01-16 修订日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471916); 陕西省科技统筹项目(2015KTTSNY03-03); 陕西省农业科技创新与攻关项目(2015NY089)

作者简介: 李建明, 陕西洛川人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施作物生理生态研究。Email: lijianming66@163.com

参数估计, 最终拟合得到温室甜瓜单株日蒸腾耗水量模型。2015 年设置 1 个处理 100%ET, 3 次重复, 按照实际蒸腾量的 100%补充灌溉, 采用盆栽方式种植, 测定的指标有单株日蒸腾量、叶面积和温室内环境数据(温度、光照、湿度)。

### 1.2.2 基于蒸腾模型决策的灌溉试验

为了检验 2015 年试验建立的模型的可靠性, 2016 年设置 4 个不同的灌溉水平: ET1 为 80%ET、ET2 为 100%ET、ET3 为 120%ET、ET4 为 140%ET。基于 2015 年所建立模型估算的 ET 值为参考, 2016 年 3—6 月进行不同水平的灌溉, 各处理 3 次重复, 共定植 480 株甜瓜。

### 1.3 试验过程

采用盆栽方式种植薄皮甜瓜(绿翠宝), 盆直径为 25 cm, 表面不覆膜。无土栽培供试的基质为前期育苗试验所筛选的优势配方(菇渣: 牛粪: 蛭石: 珍珠岩=3: 3: 2: 2)。经测定, 2a 试验基质理化性质相近, 其基本理化性质如下: 容重 0.34 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度 54.8%, pH 值为 6.77, 电导率(electricity conductivity, EC) 2.43 dS/cm, 速效氮 1 792.85 mg/kg, 速效磷 297.63 mg/kg, 速效钾 3 047.18 mg/kg。

甜瓜幼苗 4 叶 1 心时, 选取生长健壮且长势一致的幼苗定植。每盆 1 株, 行距和株距分别为 70 和 40 cm, 单蔓整枝立式栽培, 人工授粉, 侧蔓结瓜, 每株预留 4 个瓜, 分别在 6~8 节、10~12 节、14~16 节和 18~20 节, 根据瓜的生长情况优选留 3 个果型端正的幼瓜, 主蔓第 25 节摘心。营养液施肥参考霍格兰(Hoagland)和阿农(Arnon)配方<sup>[10]</sup>, 每升营养液中各元素的含量如表 1 所示。

表 1 营养液通用配方  
Table 1 Formula of nutrient solution

元素 Element	化合物名称 Compound	质量浓度 Content/(mg·L <sup>-1</sup> )
大量元素 Macronutrient	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	945
	KNO <sub>3</sub>	607
	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	493
	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	115
	Na <sub>2</sub> Fe-EDTA	20
微量元素 Microelement	MnSO <sub>4</sub> ·1H <sub>2</sub> O	2.13
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22
	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.08
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.02

试验根据甜瓜的生育特点, 将整个生育期阶段划分为伸蔓期(3 月 20 日—4 月 14 日), 开花坐果期(4 月 15 日—5 月 4 日), 结果期(5 月 5 日—5 月 30 日)。伸蔓期不浇营养液, 甜瓜主要依靠复合基质里的养分。开花坐果期按 1/2 倍 Hoagland 营养液施入; 果实成熟期按 1 倍 Hoagland 营养液施入; 微量元素施入量相同。施肥管理视天气状况做适当调整, 其余均按常规生产要求进行管理。采用智能化施肥灌溉系统(HortiMax Growing Solution)进行滴灌, 滴管的滴头流量约为 0.7 mL/s。2a 试验都采用滴灌, 滴灌时间为每天 09:00 左右。

## 1.4 测定项目及方法

### 1.4.1 单株日蒸腾量

2a 试验中, 盆放在自动连续作物耗水记录仪上, 实时监测盆质量, 每天记录甜瓜单株日蒸腾量<sup>[11]</sup>(ET, g)。

### 1.4.2 甜瓜叶面积指数

2a 试验都进行叶面积指数测定, 每 2~3 d 测量植株单叶叶长  $L$  (cm) 和叶片数, 根据公式  $LA=0.728L^{2.024}$  ( $R^2=0.989$ )<sup>[12]</sup> 计算单叶叶面积  $LA$  (cm<sup>2</sup>), 单株所有叶片叶面积之和, 即单株总叶面积  $L_1$ 。然后, 根据种植密度  $d$  (株/m<sup>2</sup>), 换算为甜瓜叶面积指数  $LAI=d \cdot L_1/10\ 000$ 。

### 1.4.3 温室内环境因子

采用荷兰 HortiMax Growing Solution 环境监测仪记录温室内的日平均空气温度 ( $T$ , °C)、日平均空气相对湿度 (RH, %)、日平均太阳辐射强度 ( $M$ , W/m<sup>2</sup>), 仪器放置于试验区中部地面上方 1 m 处。

### 1.4.4 干物质的测定

2016 年分别于伸蔓期、开花坐果期和果实成熟期对每个处理各取甜瓜植株 3 棵, 分别将根、茎、叶、果剪下, 分装于纸袋中, 在 105 °C 下杀青 20 min, 然后 80 °C 继续烘 3~7 d 至干质量变化在误差允许范围内, 干燥冷却后称取各处理样品的干质量<sup>[13]</sup>。

### 1.4.5 产量与水分利用效率

2016 年称量成熟果实的单果质量, 直至采摘后拉秧结束, 对各处理产量进行统计。参考王鹏勃等<sup>[14]</sup>方法计算水分利用效率  $WUE=Y/I$  (kg/m<sup>3</sup>), 式中  $Y$  代表甜瓜的平均单株产量 (kg/株),  $I$  代表全生育期的植株灌溉量 (m<sup>3</sup>/株)。

### 1.4.6 果实品质的测定

2016 年根据文献<sup>[15]</sup>测定果实的可溶性固形物(数显糖量计 TD-45)、可溶性酸(酸度计)、可溶性蛋白(考马斯亮蓝 G-250 染色法)、可溶性糖(蒽酮比色法)、维生素 C(钼蓝比色法)和硝酸盐(水杨酸-硫酸法), 糖酸比=可溶性固形物/可溶性酸。

综合品质计算采用隶属函数法<sup>[16]</sup>, 正相关指标(可溶性固形物、糖酸比、维生素 C、可溶性蛋白、可溶性糖):

$$X(\mu)=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$$

负相关指标(可溶性酸、硝酸盐):

$$X(\mu)=1-(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$$

式中  $X_{\max}$  为所有处理该指标的最大值;  $X_{\min}$  为所有处理该指标的最小值;  $X(\mu)$  为该指标的隶属函数值, 值越大代表果实品质越优, 值越小果实品质越劣。

## 1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 软件对数据进行统计和作图, 用 DPS 软件建立蒸腾模型。不同处理间的多重比较选择 Duncan 新复极差法, 采用 SPSS 软件进行数据处理与分析。根据回归估计标准误差 (root mean square error, RMSE) 和相对误差 (relative error, RE) 对模型的准确性进行验证<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 甜瓜日蒸腾模型的建立

#### 2.1.1 甜瓜蒸腾影响因子的相关分析和通径分析

甜瓜日蒸腾及其影响因子的相关及通径分析表明

(表2), RH与ET呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 而其他因子与ET呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。LAI相关性最强, 其次是T和RH。

表2 甜瓜日蒸腾量与影响因子的相关和通径分析

Table 2 Correlation and path analysis (PA) of muskmelon daily transpiration with impact factors

变量 Variables	直接通径系数 Direct PA	间接通径系数 Indirect PA					相关系数 Correlation coefficient
		$\Sigma$	LAI	T	RH	M	
LAI	0.68	0.24		0.27	-0.04	0.01	0.91**
T	0.47	0.34	0.38		-0.07	0.03	0.82**
RH	0.08	-0.80	-0.36	-0.40		-0.03	-0.72**
M	0.05	0.41	0.16	0.30	-0.06		0.46**

注: LAI, 叶面积指数; T 为日平均气温; RH 为日平均空气相对湿度; M 为日平均太阳辐射强度。\*\*,  $P < 0.01$ 。

Note: LAI, leaf area index; T, daily average temperature; RH, daily average relative humidity; M, daily mean photo synthetically active radiation. \*\*,  $P < 0.01$ .

直接通径系数(表3)表明各因子对温室甜瓜蒸腾直接影响大小排序为  $LAI > T > RH > M$ 。对比直接与间接通径系数可知, LAI是连接气象环境与作物蒸腾的重要因子, 对温室甜瓜日蒸腾量的影响主要是直接影响。其次, T对温室甜瓜日蒸腾量的影响主要也是直接作用的, 还间接地通过对LAI的促进作用, 进而对蒸腾作用产生正向的影响。RH主要是间接作用影响甜瓜日蒸腾量, 通过对T以及LAI的抑制作用, 进而对蒸腾产生负向的影响。最后, M主要是间接作用影响甜瓜日蒸腾量, 间接地通过T的促进作用, 对蒸腾产生正向的影响。

### 2.1.2 温室甜瓜日蒸腾模型的建立与验证

在上述相关分析和通径分析的基础上, 对甜瓜日蒸腾量ET与其影响因子做回归分析, 得到各因子和甜瓜耗水量之间的关系, 如图1所示。各回归模型  $P < 0.01$ , 说明选取LAI、T、RH、M作为蒸腾影响因子对温室甜瓜日耗水量进行模拟的合理性。然而各因子与ET模拟模型精度较低  $R^2$  在0.56与0.86之间, 仍有提升空间。依据得到的各因子和耗水量之间的相关趋势, 进行多因素非线性回归分析, 在DPS软件中采用麦夸特法参数估计, 最终拟合得到的温室甜瓜单株日蒸腾耗水量模型为

$$ET = 117.7LAI^{1.116} + 0.0006T^{3.9} + 420.4816e^{-0.291RH} + 1.22 \times 10^{-5}M^3 - 0.007M^2 + 1.2M - 5.7$$

$(R^2 = 0.984, P = 0.0001)$

式中ET为日蒸腾量, g; LAI为叶面积指数; T为日平均气温,  $^{\circ}C$ ; RH为日平均空气相对湿度, %; M为日太阳辐射强度,  $W/m^2$ 。拟合结果  $R^2 = 0.984$  即甜瓜日蒸腾量变异的98.4%是由上述因子的变化所引起的。

利用2016年的数据资料, 选取甜瓜100%ET处理组的实测值对蒸腾模型进行检验。检验表明, 蒸腾模型的RMSE和相对误差RE分别为41.83g和11.4%,  $R^2 = 0.937$  ( $n = 45$ ), 如图2所示。从总的趋势来看, 模拟的蒸腾模型具有较好的稳定性和较高的精度。说明本研究中各参数计算方法选择适当, 能够较为准确地模拟出温室甜瓜单株的日蒸腾量。

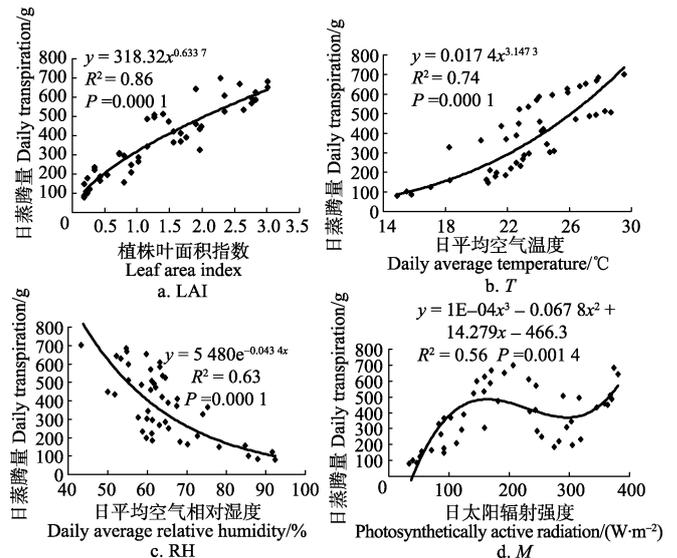


图1 甜瓜日蒸腾量与其影响因子的关系

Fig.1 Relationship between daily transpiration and its influential factors

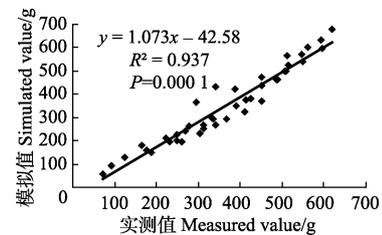


图2 温室甜瓜日蒸腾量模拟值与实测值的比较

Fig.2 Comparison between simulated and measured value of transpiration for muskmelon

## 2.2 蒸腾模型决策的灌溉量对甜瓜的影响

### 2.2.1 灌溉量对甜瓜干物质积累与分配的影响

不同处理干物质总量变化趋势基本相同, 从伸蔓期到结果期, 平均单株干物质总量大小均表现为ET4和ET3较高, ET1最低(表3)。结果表明, 基于蒸腾模型确定的灌溉量进行实际操作, 随着灌溉量增加, 甜瓜干物质总量呈上升趋势, 但从120%ET到140%ET处理, 干物质增长量已经很少, 两者无显著性差异。

各个时期看, 伸蔓期各器官干物质含量呈现出叶 > 茎 > 根。这个时期干物质主要贮存在叶片中, 占干物质总量的比例为68%~71%, ET1处理与ET4处理干物质含量差异显著。茎所占的比例为19%~22%, 根的干物质分配比例最小, 为8%~10%。干物质总量ET1处理和ET4处理有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

开花坐果期的干物质总量较伸蔓期快速增长, 约为伸蔓期的4倍。各器官的干物质含量呈现出叶 > 果 > 茎 > 根, 其中果实的干物质质量占干物质总量的比例为18%~22%, ET1处理和ET3、ET4处理干物质含量有显著性差异。叶片干物质质量较伸蔓期有明显增加, 但分配比例有一定的下降, 除ET3处理外, 各处理与ET4均差异显著。茎和根的分配比例为分别为16%~19%和7%~8%, 各处理变化规律与干物质总量变化相近。茎的干物质质量ET1、ET2处理和ET3、ET4处理有显著性差异; 根的干物质质量ET4处理和ET1、ET2处理有显著性差异。

表 3 基于蒸腾模型决策的不同灌溉量对甜瓜干物质的影响  
Table 3 Effect of different irrigation on dry matter based on transpiration model

时期 Period	处理 Treatment	各器官干物质质量 Dry matter content in organs/(g·株 <sup>-1</sup> )				干物质总量 Total dry matter	干物质在不同器官中的分配率 Distribution in organs of dry matter/%			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit
伸蔓期 Stretching stage	ET1	0.31a	0.65a	2.28b	—	3.24b	9.48a	19.98a	70.55a	—
	ET2	0.34a	0.85a	2.63ab	—	3.82ab	8.89a	22.32a	68.79a	—
	ET3	0.39a	0.99a	3.07ab	—	4.46ab	8.83a	22.21a	68.96a	—
	ET4	0.43a	1.03a	3.3a	—	4.76a	9.03a	21.57a	69.4a	—
开花坐果期 Flowering stage	ET1	0.9b	2.11b	6.57c	2.2b	11.79c	7.66a	17.93ab	55.71a	18.69b
	ET2	1.14b	2.61b	8.55b	3.14ab	15.43bc	7.39a	16.89b	55.4a	20.32ab
	ET3	1.3ab	3.44a	9.54ab	4.2a	18.47ab	7.02a	18.6a	51.64b	22.74a
	ET4	1.66a	3.48a	11.06a	4.28a	20.48a	8.09a	16.98b	54.01ab	20.92ab
结果期 Fruiting stage	ET1	3.52b	9.19b	15.42c	38.94c	67.06b	5.25bc	13.7a	22.99a	58.06a
	ET2	3.68b	9.21b	17.11bc	44.09bc	74.1b	4.97c	12.43ab	23.09a	59.5a
	ET3	5.37a	10.45a	20.98ab	58.06a	94.87a	5.66ab	11.02b	22.12a	61.2a
	ET4	5.94a	10.41a	23.07a	56.32ab	95.74a	6.21a	10.88b	24.1a	58.82a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )，ET1~ET4 分别表示 80%ET、100%ET、120%ET、140%ET。下同。  
Note: Different letters in same column indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ); ET1-ET4 are 80%ET, 100%ET, 120%ET and 140%ET, respectively. Same as below.

结果期果实不断膨大并逐渐成熟，干物质总量大幅上升，约为开花坐果期的 5~6 倍。结果期各器官干物质含量呈现出果>叶>茎>根。结果期干物质不断向果实转运，果实干物质占总量的比例上升到 58%~61%，各处理果实的干物质质量表现为 ET3 最大，ET1 最小，ET1 处理与 ET3、ET4 处理差异显著。叶片分配比例明显降低，下降为 22%~24%，ET1、ET2 处理与 ET4 处理有显著性差异。茎和根的分配比例也都有所降低，分别为 10%~14% 和 5%~6%。

2.2.2 灌溉量对甜瓜产量和水分利用效率的影响

灌溉量的增加提高甜瓜平均单株产量，当增大到一定水平产量不再增加，各处理产量大小顺序为 ET3≈ET4>ET2>ET1 (图 3)。ET3 平均单株产量 1.23 kg/株，分别比 ET1、ET2 处理高 24.2%、10.8%。在相同生产管理条件下，甜瓜的水分利用效率随单株灌溉量的升高而降低。其中 ET1 处理水分利用效率最高，ET4 处理水分利用效率最低；除 ET2 和 ET3 处理外，各处理均有显著性差异。

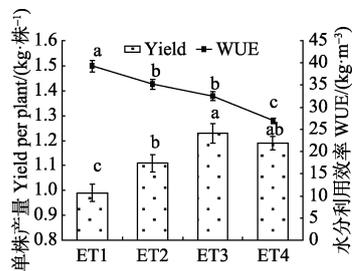


图 3 不同处理的产量和水分利用效率比较

Fig.3 Comparison of yield and water use efficiency (WUE) among different treatments

2.2.3 不同灌溉处理对甜瓜果实品质的影响

从表 4 中可以看出，基于蒸腾模型的不同灌溉量对果实品质有一定的差异。可溶性固形物 ET1 处理较低，ET3 和 ET4 处理居中，以 ET2 处理最高，质量分数为 13.13%，可溶性蛋白 ET1 处理较低，ET2 和 ET4 处理居

中，以 ET3 处理最高，为 5.82 mg/g。可溶性糖差异不显著 ( $P>0.05$ )，可溶性酸 ET1 处理最低，质量分数为 0.74%。糖酸比值 ET1 处理最高，为 16.28；其次是 ET3 处理，为 14.79。不同处理对维生素 C 含量的影响较小，除 ET4 处理外，各处理无显著性差异。硝酸盐含量各处理差异不显著。

表 4 灌溉量对甜瓜果实品质的影响

Table 4 Effect of irrigation on quality of muskmelon

处理 Treatment	可溶性固形物 Soluble solid/%	可溶性酸 Soluble acid/%	糖酸比 Sugar acid ratio	维生素 C Vitamin C/(mg·g <sup>-1</sup> )	可溶性蛋白 Soluble protein/(mg·g <sup>-1</sup> )	可溶性糖 Soluble sugar/%	硝酸盐 Nitrate nitrogen/(μg·g <sup>-1</sup> )	隶属函数值 Attaching functional value
ET1	12.1b	0.74b	16.28a	12.23b	4.61b	7.09a	384.91a	3.34
ET2	13.13a	1.05a	12.51c	13.05ab	5.39ab	7.62a	415.4a	3.45
ET3	12.87ab	0.87ab	14.79b	12.87ab	5.82a	7.33a	397.61a	4.69
ET4	12.43ab	0.93ab	13.29c	13.96a	4.98ab	6.81a	430.64a	2.27

注：隶属函数值为各项品质指标隶属函数值之和。  
Note: Attaching functional value of integrated quality is sum of attaching functional value of each quality indicator

比较各处理甜瓜果实隶属函数值表明，随着蒸腾灌溉量增加，综合品质呈现先升高后降低的趋势，4 个灌溉量处理的综合品质总得分为 ET3(4.69)>ET2(3.45)>ET1(3.34)>ET4(2.27)，ET3 处理果实的综合品质最好。

3 讨论

作物蒸腾量的大小受到环境条件和作物本身生理过程的综合作用，此外还受到作物生长发育状况、农业栽培技术及灌溉排水措施等因素的影响<sup>[8]</sup>。影响作物蒸腾的各个因子不是孤立存在的，它们共同作用于蒸腾过程，并且互相影响<sup>[18]</sup>。本研究选取叶面积指数和温室内环境因素（空气温度、空气相对湿度、太阳辐射）作为甜瓜蒸腾的影响因子，采用 Pearson 相关性分析和通径分析探讨温室甜瓜日蒸腾量与其影响因子的关系。结果表明，选取的影响因子都具有极显著相关性，各因子对温室甜

瓜蒸腾作用影响大小为  $LAI > T > RH > M$ 。LAI 和  $T$  对温室甜瓜日蒸腾量的影响主要是直接影响, RH 和  $M$  主要是间接影响, 试验结果与张大龙等<sup>[12]</sup>、姚勇哲<sup>[17]</sup>研究较为一致。

试验基于温室环境因子驱动作用, 根据 2015 年春茬的试验数据建立甜瓜日蒸腾模型, 并用 2016 年试验数据进行模型的验证<sup>[19]</sup>。回归估计标准误差 RMSE 和相对误差 RE 分别为 41.83 g 和 11.4%, 蒸腾模型具有较好的拟合度。虽然本文所建立的温室甜瓜日蒸腾量模型能够得到较理想的模拟结果, 但考察模型建立数据时段(2015 年 4 月 2 日 - 2015 年 5 月 27 日)和模型验证数据时段(2016 年 3 月 24 日 - 2015 年 5 月 21 日)温室内环境资料发现, 模型建立数据时段有 14 d 日平均空气相对湿度小于 65% 和 8 d 日平均气温高于 27 °C, 而模型检验数据时段没有日平均空气相对湿度小于 65% 和日平均气温超过 27 °C 的天数。说明还缺乏足够的实测资料对该模型在日平均空气相对湿度小于 65% 或日平均气温超过 27 °C 环境条件下的验证。而且, 模型建立和验证均基于春季甜瓜生产数据, 适用于春夏茬, 对越冬栽培甜瓜的适用性有待于进一步研究。不过, 本试验建立的甜瓜日蒸腾模型中各参数计算简便、易于获取, 是一种方便有效的模拟温室甜瓜日蒸腾量的方法。

作物的生长条件和生长发育阶段等都会影响到干物质量的积累与分配<sup>[20]</sup>, 已有研究表明水分是影响作物不同器官干物质量积累与分配的主要因素<sup>[21]</sup>。植物通过光合作用积累干物质, 从本试验结果看, 基于蒸腾模型随着灌溉量的增加, 甜瓜干物质总量呈上升趋势。但从 120%ET 到 140%ET 处理, 干物质增长量已经很少, 并且果实的干物质含量降低。原因可能是灌水量少的情况下, 植株养分吸收受阻, 进而出现植株弱小、营养生长受阻、光合作用干物质积累量少, 从而影响其生殖生长<sup>[22]</sup>; 然而, 水分过多造成一定涝害, 植株根系受损, 同时叶面积指数过大, 导致净光合产值较低<sup>[22]</sup>。此外, 后期叶片分配比例明显降低, 也有甜瓜栽培过程中部分老叶被摘除的原因。

设施种植投入较大, 所以高产、优质一直都是种植者的追求<sup>[23]</sup>。其中产量是最直接的体现, 合理调控灌溉量是实现此目标的必要条件。Al-Mefleh 等<sup>[24]</sup>研究表明, 灌溉量过高、过低都会导致甜瓜产量降低。本试验研究发现, 灌溉量过低条件下甜瓜产量显著降低, 原因可能是低水造成甜瓜生长发育较弱、光合作用整体水平降低, 从而影响甜瓜的产量<sup>[25]</sup>。灌溉量过高条件下甜瓜也有一定减产, 表明并灌溉量越多越利于甜瓜高产。这可能是由于供水过剩状态下植株长势较旺, 引起一定程度徒长, 对下一阶段的生殖生长造成不利影响。因此, 合理的灌溉量是甜瓜获得高产、高效的保障, 依据模型 120%ET 灌溉量最利于甜瓜的高产。WUE 是作物经济产量与灌溉量的比值, 所以其不仅与灌溉量相关, 也与作物产量有关, 而灌溉量与产量之间又紧密联系。试验结果表明, 甜瓜的水分利用效率随植株灌溉量的升高而降低, 这与 Sensoy 等<sup>[26-27]</sup>研究相一致。

甜瓜果实中含有较多的可溶性固形物、可溶性蛋白质和维生素 C 等营养物质, 这些营养物质的含量是评价果实营养价值和品质的重要指标<sup>[28]</sup>。所有处理的硝酸盐含量均小于 432  $\mu\text{g/g}$ , 达到了国家所指定的标准<sup>[29]</sup>。此外, 每个品质指标的变化规律不同, 很难从一个指标全面反映出不同处理对甜瓜综合品质的效应, 无法抉择出哪个灌溉处理甜瓜的果实品质最好。本试验采用隶属函数法<sup>[30]</sup>计算各处理的所有品质指标的综合得分, 通过总得分比较得出各处理甜瓜果实的综合品质, 排序为  $ET3(4.69) > ET2(3.45) > ET1(3.34) > ET4(2.27)$ 。随着灌溉量的增加, 综合品质呈先升高后降低的趋势。由此说明, 适宜的灌溉量有利于提高果实的品质, 水分过高或过低都会导致综合品质的降低, 合理调控植株灌溉才能保证甜瓜果实的优质。

## 4 结 论

1) 对温室甜瓜日蒸腾量的影响因子做相关分析和通径分析, 叶面积指数 LAI、日平均气温  $T$ 、日平均空气相对湿度 RH、太阳辐射强度  $M$  与日蒸腾量 ET 的相关性均达极显著水平, 各因子对温室甜瓜蒸腾作用影响大小为  $LAI > T > RH > M$ 。采用麦夸特法参数估计, 多因素非线性回归分析所建立了温室甜瓜日蒸腾模型, 标准误差 RMSE 为 41.83 g, 相对误差 RE 为 11.4%, 模型验证表明蒸腾模型具有较好的稳定性。

2) 基于蒸腾模型的决策作用, 研究不同灌溉量对甜瓜干物质、产量及品质的影响。结果表明, 随着灌溉量的增加, 甜瓜干物质总量呈上升趋势, 果实干物质质量呈先升高后降低趋势。灌溉量过高或过低均使产量下降, 蒸腾模型决策 120%ET 处理产量最高为 1.23 kg/株。水分利用效率随单株灌溉量的增加而降低。果实综合品质的隶属函数值排序为  $ET3(4.69) > ET2(3.45) > ET1(3.34) > ET4(2.27)$ 。综合考虑甜瓜干物质、产量及品质因素, 依据甜瓜日蒸腾模型决策 120%ET 灌溉量可作为最优的灌溉水平, 可以为温室甜瓜的智能化灌溉与高产优质提供参考和理论依据。

## [参 考 文 献]

- 李毅杰, 原保忠, 别之龙, 等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 132-138.  
Li Yijie, Yuan Baozhong, Bie Zhilong, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- Suat Sensoy, Ahmet Ertek, Ibrahim Gedik, et al. Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88: 269-274.
- 王军, 黄冠华, 郑建华. 西北内陆旱区不同沟灌水肥对甜瓜水分利用效率和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3168-3175.  
Wang Jun, Huang Guanhua, Zheng Jianhua. Effect of water and fertilizer application on melon water use efficiency and

- quality with different furrow irrigation in the oasis arid region of Northwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3168—3175. (in Chinese with English abstract)
- [4] Fabeiro C, F Martin de Santa Olalla, J A de Juan. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54: 93—105.
- [5] Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2009(96): 866—874.
- [6] 李健明, 邹志荣. 温度光辐射及水分对温室甜瓜幼苗干物质积累与分配的影响及其模拟模型[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2715—2721.  
Li Jianming, Zou Zhirong. Effects of air temperature, solar radiation and soil water on dry matter accumulation and allocation of greenhouse muskmelon seedlings and related simulation model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2715—2721. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李健明, 邹志荣, 刘迎春, 等. 温度与水分驱动的甜瓜幼苗生长形态模拟模型研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 203—208.  
Li Jianming, Zou Zhirong, Liu Yingchun, et al. Temperature and water driven growth shape simulation and model of muskmelon seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(11): 203—208. (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 Aiwang, Sun Jingsheng, et al. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato 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] 李霞, 王国栋, 薛绪掌. 温室内不同风速对盆栽辣椒生长季蒸腾的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(增刊 2): 214—218  
Li Xia, Wang Guodong, Xue Xuzhang. Effects of different wind speeds in greenhouse on growth and transpiration of potted sweet pepper[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(Supp.2): 214—218. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 77—132, 423—425.
- [11] 李健明, 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 Jianming, Wang Ping, Li Jiang. 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 (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(2): 129—134. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张大龙, 常毅博, 李健明, 等. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子[J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 953—962.  
Zhang Dalong, Chang Yibo, Li Jianming, et al. The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 953—962. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李健明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82—90.  
Li Jianming, Pan Tonghua, Wang Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(10): 82—90. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王鹏勃, 李健明, 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 Pengbo, Li Jianming, Ding Juanjuan, 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. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 杜清洁, 李健明, 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 Jiangming, Pan Tonghua, et al. The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Validation of Tomato Water Consumption Model in Greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [18] 辛小桂, 吴普特, 汪有科, 等. 山地梨枣树耗水特征及模型[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7473—7482.  
Xin Xiaogui, Wu Pute, Wang Youke, et al. A model for water consumption by mountain jujube pear-like[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7473—7482.
- [19] 达会广. 温室甜瓜耗水模型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.  
Da Hui Guang. Prediction of Greenhouse Muskmelon Evapotranspiration[D]. Yang Ling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [20] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 811—816.  
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of greenhouse tomato dry matter partitioning and yield prediction[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 811—816. (in Chinese with English abstract)
- [21] 徐菲, 李健明, 吴普特, 等. 亚低温下水分对番茄幼苗干物质积累与养分吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3293—3304.  
Xu Fei, Li Jianming, Wu Pute, et al. Effects of water on dry matter accumulation and nutrition absorption of tomato seedling under sub-low temperature[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3293—3304. (in Chinese with English abstract)
- [22] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 220—224.  
Yu Yajun, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Research progress of water and fertilizer coupling on dry land[J]. *Agricultural*

- Research in the Arid Areas, 2005, 23(3): 220—224. (in Chinese with English abstract)
- [23] 孙华银, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替灌溉对温室甜椒不同灌溉下限的响应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 78—84.  
Sun Huayin, Kang Shaozhong, Hu Xiaotao, et al. Response of greenhouse sweet pepper under alternate partial root-zone irrigation to different irrigation low limits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 78—84. (in Chinese with English abstract)
- [24] Al-Mefleh N K, Samarah N, Zaitoun S, et al. Effect of irrigation levels on fruit characteristics total fruit yield and water use efficiency of melon water drip irrigation system[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012, 10: 540—545.
- [25] 谢伟, 黄璜, 沈建凯. 植物水肥耦合研究进展[J]. 作物研究, 2007(S1): 541—546.  
Xie Wei, Huang Huang, Shen Jiankai. The research progress of plant fertilizer[J]. Crop Research, 2007 (S1): 541—546. (in Chinese with English abstract)
- [26] Sensoy S, Ertek A, Ibrahim Gedik, et al. Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88: 269—274.
- [27] 王峰, 杜太生, 邱让建, 等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水  
分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 46—52.  
Wang Feng, Du Taisheng, Qiu Rangjian, et al. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李立昆, 李玉红, 司立征, 等. 不同施氮水平对厚皮甜瓜生长发育和产量品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 150—153.  
Li Likun, Li Yuhong, Si Lizheng, et al. Effects of different nitrogen levels on growth and development, yield and quality of muskmelon[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(3): 150—153. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李凤巧, 杨丽娟. 温室番茄产量和硝酸盐含量的氮磷钾效应模式构建[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1178—1183.  
Li Fengqiao, Yang Lijuan. Definition of reaction model for N, P and K to tomato yield and nitrate content in greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1178—1183. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张军. 基质袋培番茄营养液配比的优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
Zhang Jun. Optimization Research on Nutrient Solution Formula of Tomato Cultivated by Organic Substrate in Bag[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)

## Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon

Li Jianming<sup>1,2</sup>, Fan Xiangyu<sup>1,2</sup>, Yan Fangfang<sup>1</sup>, Li Hui<sup>1,2</sup>, Cai Dongsheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Transpiration models are important for determining crop water demand and irrigation amount. In this study, a simple transpiration model was proposed by investigating the relationship between daily transpiration and its influencing factors and the model was tested by experimental values and used for study the influence of irrigation determined by the model on growth, yield and quality of muskmelon. The experiment was carried out in greenhouse located in Yangling, Shannxi. In 2015, the irrigation was based on the measured transpiration. The leaf area index, temperature, relative humidity and photosynthetically active radiation were measured. Their relationships with transpiration were studied. Based on the relationships, the model was established. In 2016, 4 irrigation levels (80%ET, 100%ET, 120%ET and 140%ET) were designed. The results of the irrigation level of 100%ET were used for model validation. Then the fruit biomass, yield and quality were determined. The results showed that the effect of influencing factors on the transpiration was ordered by leaf area index > daily average temperature > daily average relative humidity > intensity of solar radiation. A model was built for transpiration simulation. The determination coefficient was 0.984. The validation of model showed that the root mean square error was 41.83 g, the relative error was 11.4% and the determination coefficient was 0.937. It suggested that the model could well fit the transpiration. The irrigation experiment based on the proposed model showed that the different levels of irrigation had significant effects on dry matter accumulation and distribution. From stretching stage to fruiting stage, dry matter accumulation in different treatments was highest in the 120%ET and 140ET and lowest in the 80%ET. The dry matter accumulation of fruit in fruiting stage was the highest in the 120%ET and the lowest in the 80%ET. The dry matter distribution in the stretching stage showed leaf > stem > root, the dry matter distribution in flowering stage showed that leaf > fruit > stem > root, and the dry matter distribution in fruiting stage showed that fruit > leaf > stem > root. The yield of muskmelon declined in the low or high level of irrigation based on transpiration model and the yield of 120%ET was the highest with 1.23 kg/plant. The water use efficiency of muskmelon increased with decreasing irrigation level. The content of soluble solid, soluble protein and soluble sugar showed a rising then declined trend with the irrigation levels. The subordinate function value of fruit quality was 4.69 (120%ET) > 3.45 (100%ET) > 3.34 (80%ET) > 2.27 (140%ET). Thus, the treatment of 120%ET was the best for muskmelon growth, quality and yield.

**Keywords:** transpiration; greenhouse; irrigation; path analysis; dry matter accumulation and distribution; water use efficiency; subordinate function value