文章编号:1000-7601(2018)03-0009-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2018.03.02

环境因子对负水头供液下温室番茄耗液量影响的通径分析

张 芳[1,2],张建丰[2],乔晓军[1],薛绪掌[1],王利春[1],陈晓丽[1],李友丽[1]
(1.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097;2.西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048)

摘 要:采用 Pearson 相关分析法研究负水头供液下不同淋洗时间和淋洗量处理下温室番茄日耗液量与空气相对湿度、气温和太阳辐射强度等环境因子的相关关系,采用通径分析原理分析各环境因子对番茄日耗液量的直接作用和间接作用,并建立了多元回归模型。结果表明:番茄日耗液量与各环境因子均呈显著线性相关($P<0.05$),其中与日平均太阳辐射强度和日最高太阳辐射强度的正相关性最强;与日最高相对湿度的负相关最强。日平均太阳辐射强度是番茄日耗液量的主要决策因子,决策系数为 45.7%,日有效积温是主要限制因子,决策系数为 -459.6%。番茄日耗液量模拟值与实测值的回归系数平方值为 0.965。建立的多元线性回归模型可较好地预测番茄日耗液量。

关键词:负水头灌溉技术;环境因子;温室;番茄;日耗液量;通径分析
中图分类号:S275.6;S641.2 **文献标志码**:A

Path analysis of the impact of environmental factors on daily consumption of tomato of supplying nutrient solution using negative pressure in greenhouse

ZHANG Fang[1,2], ZHANG Jian-feng[2], QIAO Xiao-jun[1], XUE Xu-zhang[1], WANG Li-chun[1], CHEN Xiao-li[1], LI You-li[1]
(1. *National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*;
2. *Department of Hydraulic and Hydropower Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: A experiment was conducted to explore the correlations between the daily consumption of tomato of supplying nutrient solution using negative pressure in greenhouse and the related environment factors such as air relative humidity, air temperature and solar radiation intensity under different leaching time and volume with supplying nutrient solution using negative pressure with Pearson correlational analysis method, and direct and indirect actions of environmental factors on tomato daily consumption with path analysis were also analyzed. A regression model for the daily consumption of tomato of supplying nutrient solution using negative pressure in greenhouse was established. The results showed that the daily consumption of tomato had significant linear correlation ($P<0.05$) with environment factors, including strongest positive correlation with daily average solar radiation intensity and daily maximum solar radiation intensity, and strongest negative correlation with daily maximum relative humidity. Daily average solar radiation intensity was the main decision factor of the daily consumption of tomato with the decision coefficient 45.7%, and daily effective accumulated temperature was the main limiting factor with the decision coefficient being -459.6%. The square value of the regression coefficient between the simulated and measured tomato daily consumption was 0.965. The regression model established by using the main environment factors could better simulate the daily consumption of the daily consumption of tomato of supplying nutrient solution using negative pressure in greenhouse.

Keywords: negative pressure irrigation technique; environmental factors; greenhouse; tomato; daily consumption; path analysis

收稿日期:2017-03-13 **修回日期**:2018-01-18
基金项目:北京市自然科学基金资助项目(6142008)
作者简介:张 芳(1984—),女,河南开封人,博士生,主要从事农业水土工程研究。E-mail:zf200612915@126.com。
通信作者:薛绪掌(1967—),男,陕西韩城人,博士,研究员,主要从事农业节水技术研究。E-mail:xuexz@nercita.org.cn。

全球 90%以上的无土栽培为基质栽培,温室营养液型基质栽培就是当温室基质中仅含有一定比例草炭(无其它有机肥)时,由营养液全程补充供给蔬菜生长所需的各种营养元素和水分的基质栽培[1-3],具有水肥利用效率高、高产优质、防止连作障碍和不易传染根系病害等优点。目前,我国基质栽培蔬菜生产中,仍采用根据土壤水分状况、气象环境和作物生理反应三种因素作单因素或综合判断的传统方式决策供给营养液,以达到供液“适时”和“适量”的目标和要求[4]。目前,在众多节水灌溉方式中,负水头灌溉技术[5]是较新颖的技术之一,其将供水压力控制为负水头进行灌溉,实现土壤含水量的精确和持续控制,有效减少土壤渗漏,还可根据植株长势和气温、地温、光强、空气湿度等多种环境因素的影响适时适量自动灌水[6]。若将此技术应用于基质栽培中,即可解决“适时、适量”对蔬菜根系供给营养液的问题。

温室蔬菜的耗液量不仅与品种遗传特性有关,在根系生长介质水分状况一定的情况下,很大程度上还受环境因子影响,主要影响因子包括温室太阳辐射强度、温度和空气相对湿度等。张瑞美等[7]和刘浩等[8]针对温室土壤栽培条件下番茄日需水量与环境因子的关系做了定性分析,姚勇哲等[9]研究了各环境因子对温室土壤栽培条件下番茄需水量的直接和间接作用。目前国内外有关基于负水头灌溉技术的温室营养液型基质栽培条件下,环境因子对番茄日耗液量影响的研究较少[10-13]。

通径分析是研究变量间相互关系、自变量对因变量的作用方式和程度的多元统计分析技术[4,14-15]。本研究采用 Pearson 相关分析法和通径分析方法探讨空气相对湿度、气温和太阳辐射强度等温室环境因子对负水头供液下温室基质栽培番茄日耗液量的影响程度及复杂关系,寻求并确定各环境因子对番茄日耗液量变化的直接和间接作用,并建立负水头供液下温室基质栽培番茄日耗液量的多元回归模型,以期为负水头供液下温室番茄营养液供给管理方法提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

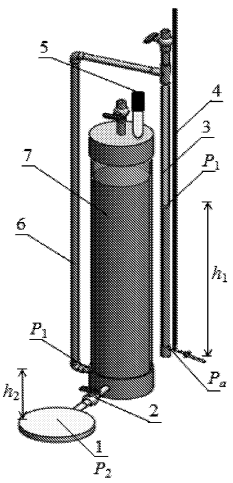
试验于 2014 年 4—8 月在北京小汤山国家精准农业研究示范基地日光温室内进行。4 月 26 日定植,5 月 5 日开始进行处理,留 4 穗果后去生长点,8 月 10 日结束试验。温室透光率为 75%左右。

供试品种为番茄,品名为仙客 8 号。基质配方为草炭、蛭石和珍珠岩,其体积比为 5∶3∶1,基质容重为 0.3 g·cm^{-3},总孔隙度为 80.5%,pH 值为 6.95,EC 值为 0.98 mS·cm^{-1},基质持水量为 0.62 cm^3·cm^{-3}。

负水头决策供液装置是根据负水头供水控水盆栽装置[16]改进的。该装置主要由负水头供液装置、淋洗装置、控制器和盆栽容器组成,其中负水头供液装置由供水盘、储液桶、控压管、导气管、液位管、压力传感器组成,如图 1 所示;淋洗装置由淋洗液桶、潜水泵、电磁阀和滴灌管组成,如图 2 所示。供水盘为多孔陶瓷材质,直径为 19 cm,厚 1.5 cm,内部为空腔,当空腔内储满水时,供水盘透水不透气。储液桶高 100 cm,内径为 15.5 cm。压力传感器测量范围为 0~-20 kPa,对应的电压输出为 1~5 V。

1.2 负水头供液原理

图 1 为负水头供液装置图。当作物根系从基质中吸收水分后,根系附近的供水盘周围基质水势减小,且小于供水盘内水势,则供水盘内的液量通过基质势作用缓慢渗入基质,用于补给作物消耗的液量,然后储液桶内液量在大气作用下进入供水盘,此时储液桶内部压强减小。如此不断循环,储液桶内的营养液在负压条件下连续渗入基质中,并被作物根系吸收。当基质水势等于供水盘内水势,系统达到平衡,供水盘内水分不再运动,则基质含水量维持稳定[10,17]。



1.供水盘; 2.出水口; 3.控压管; 4.导气管; 5.压力传感器; 6.连接管; 7.储液桶

1. Water supplying disc; 2. Water outlet; 3. Pipe of controlling pressure; 4. Airway pipe; 5. Pressure sensor; 6. Connecting pipe; 7. Nutrient solution storage barrel

图 1 负水头供液装置原理图

Fig.1 Principle diagram of nutrient solution supplying device with negative pressure

循环过程中,由于控压管底端与导气管相连,即与大气相通,则控压管底部的压强为 P_a。当控压管内水位高度为 h_1 时,控压管液面处和连接管与储液桶连接处的压强均为:

$$P_1 = P_a - \rho g h_1 \quad (1)$$

式中,ρ 为营养液密度,g 为重力常数。

供水盘中心处和连接管与储液桶连接处的高度差为 h_2,则供水盘中心处的压强为:

$$P_2 = P_1 + \rho g h_2 \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得出

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad (3)$$

式中,Δh 即为控制储液桶内营养液进入基质液量的负水头。通过调节不同负水头,则可控制不同的基质含水量。

1.3　试验设计

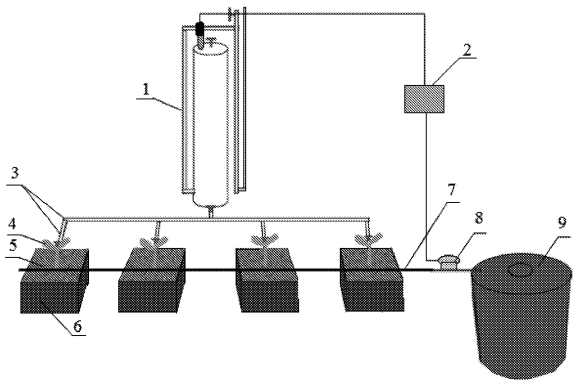
试验设淋洗时间(S)和淋洗量(V)2 个因素,淋洗时间设 3 个水平,分别为负水头储液桶内水位每下降 1 cm(S_1)、3 cm(S_2)和 5 cm(S_3)时,即单株番茄分别消耗储液桶内营养液 0.14 mm、0.41 mm 和 0.68 mm 时,需淋洗 1 次;淋洗量设 3 个水平,即淋洗系数 α 分别为 0.1(V_1)、0.3(V_2)和 0.5(V_3),淋洗量由式(4)计算,共 9 个处理。

$$W_L = \frac{[W_D \times \alpha + (\theta_{fc} - \theta_v) \times V] \times 10}{At} \quad (4)$$

式中,W_L 为负水头供液下单盆单株番茄相邻两次淋洗时段内的平均淋洗量($mm \cdot d^{-1}$);W_D 为负水头储液桶内水位每下降 1 cm、3 cm 和 5 cm 时减少的液量(cm^3);α 为淋洗系数,分别取 0.1、0.3 和 0.5;θ_{fc} 为基质持水量;θ_v 为基质含水量,本试验负水头盆栽装置采用的负压值为 0.5 kPa,其对应的基质含水量为 $0.59 cm^3 \cdot cm^{-3}$;V 为减去供水盘体积后单盆单株番茄的基质体积(cm^3);A 为单株栽培面积(cm^2);t 为定植后第 9 ~ 107d 内相邻两次淋洗历经的时间(d)。

9 个处理分两行相对摆放种植,番茄行距 80 cm,株距 50 cm。每个处理采用单盆单株栽培番茄,每株番茄为 1 个重复,共 4 个重复。每株番茄的盆底均安装 1 个供水盘,每个处理由 1 个负水头供液装置和淋洗装置进行供液和淋洗。淋洗装置中,每个淋洗液桶内放置 1 个潜水泵,潜水泵出水口与滴灌管的连接处安装电磁阀,滴灌管铺于盆栽容器上,滴头分别对准番茄茎基部。由于滴灌管长度较短,理想化认为 4 个滴头的流量相等。如图 2 所示。种植番茄的盆栽容器内长、宽和高分别为 29 cm、24 cm 和 19 cm,盆底中心设排液孔,孔径 2 cm,排液孔下放置排液收集容器,如图 3 所示。定植后各处理基质表面覆膜,防止基质蒸发。

建立储液桶内水位变化与压强变化的关系,压强由压力传感器监测,并由电压输出值表示。控制器每间隔 500 ms 收集一次各处理的电压输出值,根据输出值变化幅度决策是否开启电磁阀和潜水泵,若电压输出值的变化幅度分别大于等于储液桶内液位变化 1 cm、3 cm 和 5 cm 对应的电压变化幅度时,便开启电磁阀和潜水泵进行淋洗,完成后关闭电磁阀和潜水泵。

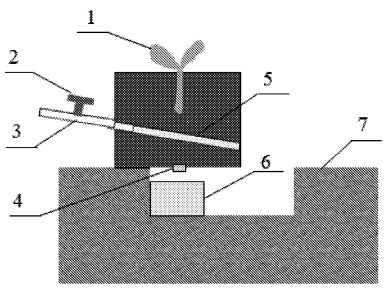


1.负水头供液装置; 2.控制器; 3.连接管; 4.番茄植株; 5.基质; 6.盆栽容器; 7.滴灌管; 8.电磁阀; 9.淋洗液桶

1. Nutrient solution supplying device with negative pressure water supplying disc; 2. Controller; 3. Connecting pipe; 4. Tomato plant; 5. Substrate; 6. Potted container; 7. Drip irrigation pipe; 8. Solenoid valve; 9. Nutrient solution storage barrel for leaching

图 2　负水头供液装置和淋洗装置示意图

Fig.2　The schematic diagram of the supplying device and leaching device with negative pressure



1.番茄植株; 2.手动阀门; 3.连接管; 4.排液孔; 5.供水盘; 6.收集容器; 7.地面

1. Tomato plant; 2. Hand valve; 3. Connecting pipe; 4. Discharge hole; 5. Water supplying disc; 6. Collection container; 7. Ground

图 3　盆栽容器及排液收集容器剖面示意图

Fig.3　The generalized schematic diagram of the potted container and collection of drainage

本文根据试验观测各处理植株生长状况和果实产量及其品质的结果,通过基于熵权的多层次多目标模糊评价模型对其综合效益分析得出,处理 S_1V_2 的综合效益较优。以其为例,分析温室环境因

子对负水头供液条件下番茄日耗液量影响的通径分析。

营养液采用日本山崎番茄配方配制,于番茄定植开花前,开花第一穗果坐果前和第一穗花坐果~采收结束 3 个生育期分别供给浓度为 1.5、2.0、2.5 $mS \cdot cm^{-1}$的营养液[18]。

1.4 测定项目与方法

单株番茄每天平均耗液强度分别按以下情况计算:

(1)一天内储液桶内下降液量未达到淋洗标准时,单株番茄每天的平均耗液量为单株番茄相邻两次淋洗时段内的平均耗液量,如式(5)计算:

$$ET = \frac{\left[W_D \times \left(\frac{1}{n} + \alpha\right) + (\theta_{fc} - \theta_v) \times V - D\right] \times 10}{At} \tag{5}$$

(2)一天内储液桶内下降液量达到多次淋洗标准时,单株番茄每天平均耗液量为每天相邻两次淋洗时段内的耗液量之和,如式(6)计算:

$$ET = \frac{\left[W_{D_1} \times \left(\frac{1}{n} + \alpha\right) + (\theta_{fc} - \theta_v) \times V - D_1\right] \times 10}{At_1} + \frac{\left[W_{D_2} \times \left(\frac{1}{n} + \alpha\right) + (\theta_{fc} - \theta_v) \times V - D_2\right] \times 10}{At_2} + \cdots + \frac{\left[W_{D_m} \times \left(\frac{1}{n} + \alpha\right) + (\theta_{fc} - \theta_v) \times V - D_m\right] \times 10}{At_m} \tag{6}$$

式中,ET 为基于负水头决策下单株番茄每天平均耗液量($mm \cdot d^{-1}$);$W_{D_1}, W_{D_2}, \cdots, W_{D_m}$ 中 W_D 为负水头储液桶内水位每下降 1 cm、3 cm 和 5 cm 时减少的液量(cm^3),其中下标 1,2,…,m 为每天淋洗次数;n 为每个处理的重复数;D 为单株番茄排液量(cm^3);α、θ_{fc}、θ_v、V、A 和 t 同式(4)。本试验是在覆膜条件下进行,则认为基质蒸发量较小,可忽略不计。

单株番茄排液量为单株番茄每次淋洗后基质栽培槽中的多余营养液由排液孔流入收集槽的液量。

采用国家农业信息化工程技术研究中心制作的绿云格微型气象站,将其悬挂于温室内番茄植株上方 1 m 处,每 0.5 h 监测和采集一次温室内相对湿度、气温和太阳辐射强度等环境因子,分别计算日平均相对湿度(RH_{mean},%)、日平均气温(T_{mean},℃)、日平均太阳辐射强度(I_{mean},$MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)、日平均饱和水汽压差($VPD_{mean}$,kPa)、日最高相对湿度($RH_{max}$,%)、日最高气温($T_{max}$,℃)、日最高太阳辐射强度($I_{max}$,$MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)、日最低相对湿度($RH_{min}$,%)、日有效积温($GDD$,℃)和日太阳辐射强度积累($I_a$,$MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。另外,再选取作物系数($K_c$),共 11 个影响负水头供液条件下番茄日耗液量(ET_N,mm)的温室环境因子。

1.5 数据处理与统计分析

首先对数据进行标准化处理[19],然后进行番茄日耗液量与各环境因子的 Pearson 相关性分析,再按照崔觉群[20]和袁志发等[21]的方法,分别求出各环境因子对番茄日耗液量的直接通径系数、间接通径系数、决策系数和剩余通径系数。

采用回归估计标准误差 $RMSE$ 和相对误差 RE 对环境影响因子与番茄日耗液量建立的多元回归模型模拟值和实测值的拟合程度进行分析,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \tag{7}$$

$$RE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} OBS_i} \times 100\% \tag{8}$$

式中,n 为样本个数;OBS_i 为实测值;SIM_i 为模型模拟值。

数据采用 Microsoft office excel 和 SPSS16.0 软件进行处理和分析,采用 OriginPro2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 番茄日耗液量与各环境因子的 Pearson 相关性分析

表 1 为负水头供液条件下番茄日耗液量与温室环境因子的 Pearson 相关性分析。由表 1 看出,在影响番茄日耗液量的 11 个因子中,日最低相对湿度(RH_{min})与日耗液量的相关程度达显著水平($P<0.05$),其余因子均与日耗液量(ET)的相关程度达极显著水平($P<0.01$),其中日平均气温(T_{mean})、日平均太阳辐射强度(I_{mean})、日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日最高气温(T_{max})、日最高太阳辐射强度(I_{max})、日有效积温(GDD)、日太阳辐射强度积累(I_a)和作物系数(K_c)与日耗液量呈显著正相关,而日平均相对湿度(RH_{mean})、日最高相对湿度(RH_{max})和日最低相对湿度(RH_{min})与日耗液量的相关性呈显著负相关。表明所选取的影响因子与日耗液量具有一定程度的线性相关关系。在温室基质栽培负水头供液下番茄的日耗液量与日平均太阳辐射

强度(I_{mean})、日最高太阳辐射强度(I_{max})和作物系数(K_c)的正相关性最强,说明太阳辐射强度对番茄日耗液量影响最大;其次是日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日平均气温(T_{mean})和作物系数(K_c)。日最高相对湿度(RH_{max})与番茄日耗液量呈最强的显著负相关。

表 1　负水头供液条件下番茄日耗液量与温室环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 1　Pearson correlation coefficient of tomato daily consumption based on supplying nutrient solution using negative pressure and environmental factors in greenhouse

项目 Item	*ET*	RH_{mean}	T_{mean}	I_{mean}	VPD_{mean}	RH_{max}	T_{max}	I_{max}	RH_{min}	*GDD*	I_a	K_c
ET	1	−0.400**	0.679**	0.874**	0.702**	−0.568**	0.452**	0.878**	−0.260*	0.575**	0.574	0.800**
RH_{mean}		1	−0.310**	−0.456**	−0.523**	0.478**	−0.445**	−0.459**	0.937**	−0.138	−0.156	−0.022
T_{mean}			1	0.506**	0.749**	−0.378**	0.732**	0.568**	−0.193	0.659**	0.655**	0.671**
I_{mean}				1	0.547**	−0.437**	0.465**	0.967**	−0.372**	0.478**	0.481**	0.517**
VPD_{mean}					1	−0.695**	0.450**	0.586**	−0.290*	0.437**	0.433**	0.541**
RH_{max}						1	−0.161	−0.453**	0.214	−0.165	−0.167	−0.362**
T_{max}							1	0.547**	−0.466**	0.470**	0.468**	0.287*
I_{max}								1	−0.371**	0.528**	0.529**	0.539**
RH_{min}									1	−0.090	−0.111	0.114
GDD										1	0.999**	0.667**
I_a											1	0.656**
K_c												1

注:* 表示 $P<0.05$;** 表示 $P<0.01$。*ET*:日耗液量;RH_{mean}:日平均相对湿度;T_{mean}:日平均气温;I_{mean}:日平均太阳辐射强度;VPD_{mean}:日平均饱和水汽压差;RH_{max}:日最高相对湿度;T_{max}:日最高气温;I_{max}:日最高太阳辐射强度;RH_{min}:日最低相对湿度;*GDD*:日有效积温;I_a:日太阳辐射强度积累;K_c:作物系数。

Note: * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$. *ET*: water consumption; RH_{mean}: average relative humidity; T_{mean}: average temperature; I_{mean}: average solar radiation intensity; VPD_{mean}: average vapor pressure deficit; RH_{max}: maximum relative humidity; T_{max}: maximum temperature; I_{max}: maximum solar radiation intensity; RH_{min}: minimum relative humidity; *GDD*: effective accumulated temperature; I_a: accumulated solar radiation intensity; K_c: crop coefficient.

2.2　番茄日耗液量与各环境因子的通径分析

通过上述番茄日耗液量与其影响因子的 Pearson 相关性分析可知,当其它环境因子不变时,番茄日耗液量与各环境因子间存在很强的相关性,但这不能准确说明各环境因子之间和对番茄日耗液量的直接影响和间接影响,以及对日耗液量影响效应的大小,所以在 Pearson 相关性分析的基础上采用通径分析做进一步分析。各环境因子的直接通径系数、间接通径系数、决定系数和决策系数如表 2 所示。直接通径系数表示各环境因子在本质上对番茄日耗液量的直接影响程度;间接通径系数表示某一环境因子通过其余因子对番茄日耗液量的影响程度;决策系数[20]是将各环境因子对番茄日耗液量的综合作用进行排序,用于确定主要决策变量和限制性变量。

将番茄日耗液量与各环境因子建立多元回归方程,予以检验通径分析的可行性,此方程为:

$$ET = 4.087 + 0.075RH_{mean} + 0.002T_{mean} + 0.111I_{mean} + 0.757VPD_{mean} - 0.059RH_{max} - 0.007T_{max} + 0.041I_{max} - 0.045RH_{min} - 0.008GDD + 0.009I_a + 4.353K_c \quad (9)$$

上式经方差分析,$F = 159.397$($P < 0.01$),方差分析极显著,则方差分析有意义,并且 $R^2 = 0.965$($P < 0.01$)($n = 89$),说明通径分析有意义。

剩余通径系数为 $\rho_e = \sqrt{1 - R^2} = 0.187$,说明还有对番茄日耗液量影响较重要的因素未被考虑,在选取影响因子时还需进一步试验。

由表 2 中直接通径系数可看出,在温室基质栽培负水头供液条件下,日平均太阳辐射强度(I_{mean})、日最高相对湿度(RH_{max})和作物系数(K_c)与番茄日耗液量的直接通径系数呈极显著水平($P<0.01$),日平均相对湿度(RH_{mean})、日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日最高太阳辐射强度(I_{max})、日最低相对湿度(RH_{min})、日有效积温(*GDD*)和日太阳辐射强度积累(I_a)与番茄日耗液量的直接通径系数呈显著水平($P<0.05$),这些因子可作为番茄日耗液量的重要指示指标;其中番茄日耗液量的最大直接正影响因子是日太阳辐射强度积累(I_a),其次是作物系数(K_c),最大直接负影响因子是日有效积温(*GDD*)。

由直接通径系数和间接通径系数数据看出,日太阳辐射强度积累(I_a)对日耗液量的直接影响为正向,与其通过日有效积温(*GDD*)对日耗液量的负向影响基本抵消,则由其通过作物系数(K_c)对日耗液量的正向影响起主导作用,所以此因子与日耗液量表现为极显著性正相关。

表 2 温室环境因子对负水头供液条件下番茄日耗液量的直接作用和间接作用影响分析

Table 2 Impact analysis of direct and indirect action of environmental factors on direct and indirect action of tomato daily consumption of supplying nutrient solution using negative pressure in greenhouse

因子 Factors	直接通径系数 Direct path-coefficient	间接通径系数 Indirect path-coefficient											因子对日耗液量的总作用 Total effect of factor to daily consumption	决策系数 Decision coefficient /%
		RH_{mean}	T_{mean}	I_{mean}	VPD_{mean}	RH_{max}	T_{max}	I_{max}	RH_{min}	GDD	I_a	K_c		
RH_{mean}	0.261 *	—	−0.001	−0.146	−0.076	−0.056	0.007	−0.107	−0.260	0.227	−0.238	−0.011	−0.400	−27.7
T_{mean}	0.004	−0.081	—	0.162	0.109	0.044	−0.012	0.132	0.054	−1.084	1.002	0.350	0.679	0.5
I_{mean}	0.320 * *	−0.119	0.002	—	0.079	0.051	−0.007	0.224	0.103	−0.786	0.737	0.269	0.874	45.7
VPD_{mean}	0.145 *	−0.137	0.003	0.175	—	0.081	−0.007	0.136	0.080	−0.719	0.663	0.282	0.702	18.2
RH_{max}	−0.116 * *	0.125	−0.001	−0.140	−0.101	—	0.003	−0.105	−0.059	0.272	−0.255	−0.189	−0.568	11.9
T_{max}	−0.016	−0.116	0.003	0.149	0.065	0.019	—	0.127	0.129	−0.773	0.716	0.150	0.452	−1.4
I_{max}	0.232 *	−0.120	0.002	0.310	0.085	0.053	−0.009	—	0.103	−0.868	0.810	0.281	0.878	35.4
RH_{min}	−0.277 *	0.245	−0.001	−0.119	−0.042	−0.025	0.007	−0.086	—	0.148	−0.170	0.059	−0.260	6.7
GDD	−1.645 *	−0.036	0.002	0.153	0.063	0.019	−0.007	0.122	0.025	—	1.530	0.348	0.575	−459.6
I_a	1.531 *	−0.041	0.002	0.154	0.063	0.019	−0.007	0.123	0.031	−1.643	—	0.342	0.574	−58.6
K_c	0.521 * *	−0.006	0.002	0.166	0.078	0.042	−0.005	0.125	−0.032	−1.097	1.004	—	0.800	56.2
ε	0.188												0.188	

注：* $P<0.05$，* * $P<0.01$；ε 表示剩余因子。 Note: * $P<0.05$, * * $P<0.01$; ε is surplus factor.

作物系数(K_c)通过日太阳辐射强度积累(I_a)和日有效积温(GDD)对日耗液量产生较大的正、负向影响互相抵消，并且此因子对日耗液量的直接作用为极显著水平，使得二者之间的相关性增强，则二者呈极显著性正相关。

日有效积温(GDD)对日耗液量的直接影响为负向，这与 Pearson 相关性分析结果中此因子与日耗液量为正相关不符，但这只是数字形式的表面关系，与实物的本质联系并不一致，因为此因子通过日太阳辐射强度积累(I_a)对日耗液量的正向影响可基本抵消这种反作用，则由其通过作物系数(K_c)对日耗液量的正向影响起主导作用，所以日有效积温(GDD)和日耗液量表现为极显著性正相关。

由表 2 还看出，在其余各因子的直接通径系数和各项间接通径系数数据中，由于正负数量的相互抵消，得到日平均相对湿度(RH_{mean})通过日平均太阳辐射强度(I_{mean})对日耗液量的负向影响起主导作用，则此因子与日耗液量呈负相关；日平均气温(T_{mean})通过作物系数(K_c)对日耗液量的正向影响是二者之间呈正相关的主要来源；日平均太阳辐射强度(I_{mean})对日耗液量的直接作用和其分别通过作物系数(K_c)和日最高太阳辐射强度(I_{max})对日耗液量的正向作用是影响其与日耗液量相关程度的主导因素，所以二者呈极显著相关水平；日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})通过作物系数(K_c)对日耗液量的正向作用，使其与日耗液量呈极显著相关水平；日最高相对湿度(RH_{max})分别通过作物系数(K_c)、日平均太阳辐射强度(I_{mean})和日最高太阳辐射强度(I_{max})对日耗液量的负向影响，使二者之间的相关性呈极显著负相关；日最高气温(T_{max})通过作物系数(K_c)、日平均太阳辐射强度(I_{mean})和日最低相对湿度(RH_{min})对日耗液量的正向影响，是其与日耗液量之间呈正相关的重要组成部分；日最高太阳辐射强度(I_{max})通过其直接作用和日平均太阳辐射强度(I_{mean})与和作物系数(K_c)对日耗液量的正向影响，使此因子与日耗液量之间呈极显著正相关；日最低相对湿度(RH_{min})通过日平均太阳辐射强度(I_{mean})对日耗液量产生负向影响，使二者之间的相关性降低。

为了看出单因子对日耗液量综合作用的大小，将决策系数由大到小排序。由决策系数看出，$R^2(K_c)>R^2(I_{mean})>R^2(I_{max})>R^2(VPD_{mean})>R^2(RH_{max})>R^2(RH_{min})>R^2(T_{mean})>R^2(\varepsilon)>R^2(T_{max})>R^2(RH_{mean})>R^2(I_a)>R^2(GDD)$，说明作物系数($K_c$)和日平均太阳辐射强度($I_{mean}$)分别为主要决策因子和次要决策因子；日有效积温($GDD$)和日太阳辐射强度积累($I_a$)分别为主要限制因子和次要限制因子。

2.3　日耗液量模型的建立与验证

所选取影响番茄日耗液量的 11 个因子彼此之间相关性极显著,从中再选取相关性较高(R^2 > 0.65)的 9 个影响因子,即日平均气温(T_{mean})、日平均太阳辐射强度(I_{mean})、日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日最高气温(T_{max})和作物系数(K_c);根据通径分析选取直接通径系数相关性强(P<0.05)和决策系数大($|R^2(x_i)|$>35%)的 9 个因子,即日平均相对湿度(RH_{mean})、日平均太阳辐射强度(I_{mean})、日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日最高相对湿度(RH_{max})、日最高太阳辐射强度(I_{max})、日最低相对湿度(RH_{min})、日有效积温(GDD)、日太阳辐射强度积累(I_a)和作物系数(K_c)。将两者综合考虑后选取日平均相对湿度(RH_{mean})、日平均太阳辐射强度(I_{mean})、日平均饱和水汽压差(VPD_{mean})、日最高相对湿度(RH_{max})、日最高太阳辐射强度(I_{max})、日最低相对湿度(RH_{min})、日有效积温(GDD)、日太阳辐射强度积累(I_a)和作物系数(K_c)共 9 个因子,通过最小二乘法建立各环境影响因子与 S_1V_2 的番茄日耗液量模型,如式(8)所示:

$$ET = 4.064 + 0.072RH_{mean} + 0.115I_{mean} + 0.740VPD_{mean} - 0.059RH_{max} + 0.038I_{max} - 0.042RH_{min} - 0.008GDD + 0.009I_a + 4.371K_c \quad (10)$$

上式 $R^2 = 0.965$($P < 0.01$)($n = 89$),经方差分析,$P < 0.01$,$F = 200.441 > F_{(0.01,9,79)} = 2.640$,并且 S_1V_2 的模拟数据与实测数据之间 1∶1 线的 R^2 为 0.97,说明线性相关密切,回归效果显著。

将处理 S_1V_1、S_1V_3、S_2V_1、S_2V_2、S_2V_3、S_3V_1、S_3V_2 和 S_3V_3 的实测数据代入式(8),计算得到模拟数据与实测数据之间 1∶1 线的 R^2 分别为 0.82、0.85、0.88、0.87、0.83、0.84、0.83 和 0.83;各处理回归估计标准误差和相对误差分别为 1.03 和 44.71%、0.87和 40.33%、1.06 和 43.79%、0.99 和 42.85%、0.99 和 42.85%、0.96 和 43.92%、1.19 和 47.03%及 1.21 和 49.83%;并将 S_1V_2 的模拟值与 9 个处理的实测值进行比较,如图 4 所示。结果表明,由处理 S_1V_2 建立的环境因子对负水头条件下温室番茄日耗液量影响的回归模型,其模拟值和实测值变化趋势一致;与其它处理相比,S_1V_2 的模拟值和实测值偏小,是因为各处理受到淋洗时间和淋洗量的不同,导致日耗液量有差异,但从整体趋势来看,模型具有较好的稳定性。

3　结论与讨论

本研究选取温室内空气相对湿度、气温和太阳辐射强度等因子作为影响负水头供液条件下温室基质栽培番茄日耗液量的主要环境因素,在不同淋洗时间和淋洗量处理中,以处理 S_1V_2 的耗液规律为例,分别采用 Pearson 相关性分析和通径分析方法,探讨了番茄日耗液量与 11 个影响因子间的关系,得出番茄日耗液量与日平均相对湿度、日平均气温、日平均太阳辐射强度、日平均饱和水汽压差、日最高相对湿度、日最高气温、日最高太阳辐射强度、日有效积温、日太阳辐射强度积累和作物系数 10 个影响因子呈极高的线性关系(P<0.01),与日最低相对湿度呈显著线性相关(P<0.05)。其中与日平均太阳辐射强度、日最高太阳辐射强度和作物系数的正相关性最强,说明太阳辐射强度对番茄日耗液量影响最大;与日最高相对湿度呈最强的显著负相关。

影响番茄日耗液量的环境因子之间存在多重相关性,使因子间产生相互增强或限制的复杂作用,从而综合影响番茄日耗液量。所选取的环境因子中,日太阳辐射强度积累和日有效积温分别是负水头供液条件下温室基质栽培番茄日耗液量的最大直接正影响因子(1.531)和最大直接负影响因子(-1.645)。从决策系数来看,作物系数和日平均太阳辐射强度分别是番茄日耗液量的主要决策因子,决策系数为 56.2%和 45.7%,日有效积温是主要限制因子,决策系数为-459.6%。由于作物系数本身包含的因素较多,所以可通过日平均太阳辐射强度和日有效积温调控负水头供液条件下温室基质栽培番茄日耗液量,进而决策其供液量。姚勇哲等(2012)[9]认为日最低空气相对湿度是温室番茄蒸腾量的主要限制因子,与本研究不一致,可能是因为本试验中对温室空气进行换气,相对来说空气最低相对湿度值并没有很低,所以此因子对本试验的番茄日蒸腾量没有起到最大限制作用。

在选取的 11 个环境因子中,再选择与番茄日耗液量相关性较高的 9 个主要因子与番茄日耗液量建立多元线性回归模型,并进行分析,可较好地预测番茄日耗液量,具有较高的相关性和稳定性。由于影响番茄日耗液量的因素有基质水分状况、环境状况和蔬菜生理生长状况,而本试验未考虑蔬菜生理生长状况,所以在影响因子选取中会对模型剩余通径系数产生一定影响,所以应用该模型受到一定限制,但对依据温室环境因素决策负水头供液下温室基质栽培番茄供液量的理论研究有一定的参考价值。

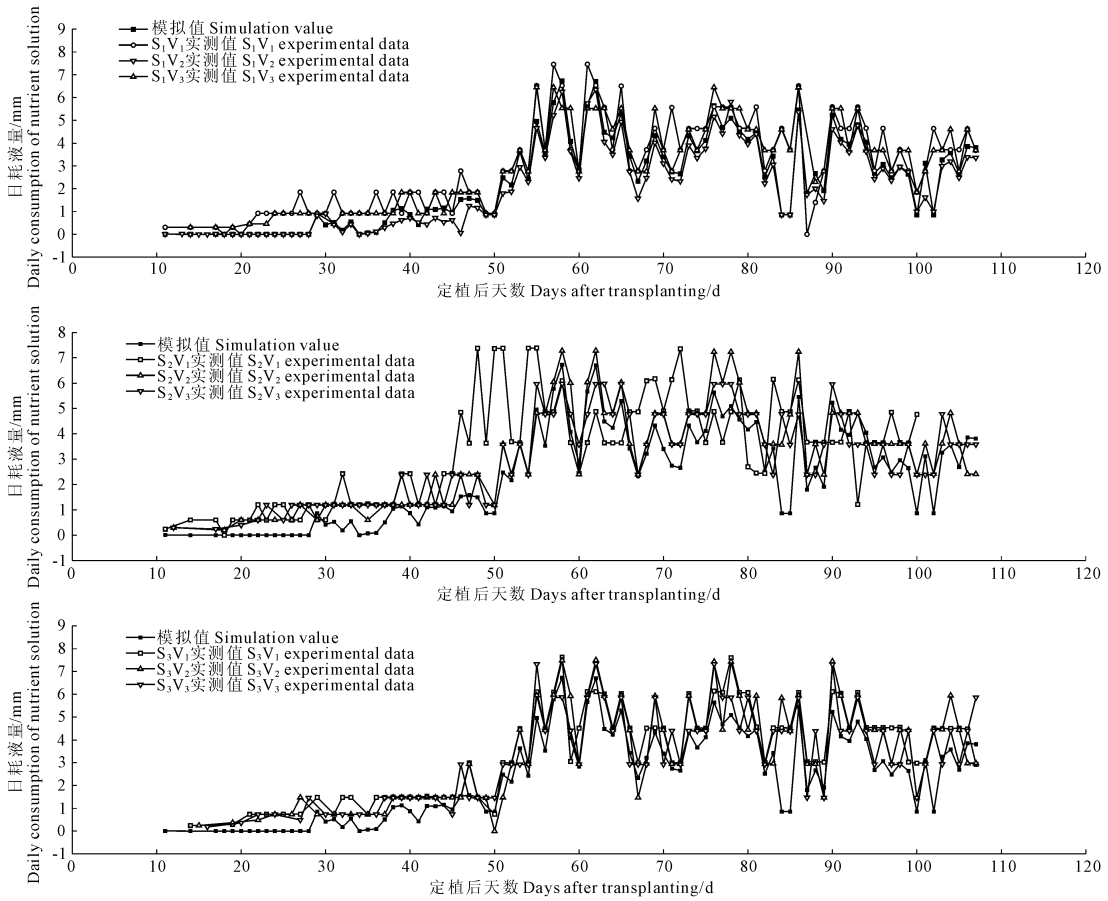


图4 负水头条件下温室番茄日耗液量观测值与模拟值与实测值的比较

Fig.4 Comparison between simulated values and measured values of daily consumption of tomato using negative pressure in greenhouse

参 考 文 献:

[1] Savvas D, Manos G. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999,73(1):29-33.

[2] Klaring H P. Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops[J]. Agronomie, 2001,21(4):311-321.

[3] Banedjschafie S, Bastani S, Widmoser P, et al. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2008,28(1):1-7.

[4] 蔡甲冰,刘 钰,许 迪,等.基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J].水利学报,2008,39(1):83-90.

[5] 解迎革.土壤含水量的精确控制及其应用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.

[6] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等.负水头灌溉系统供水规律研究[J].灌溉排水学报,2008,27(5):55-58.

[7] 张瑞美,彭世彰,叶澜涛.设施栽培番茄需水规律分析及其气象因子响应模型[J].灌溉排水学报,2007,26(2):25-28.

[8] 刘 浩,孙景生,王聪聪,等.温室番茄需水特性及影响因素分析[J].节水灌溉,2011,(4):11-14.

[9] 姚勇哲,李建明,张 荣,等.温室番茄蒸腾量与其影响因子的相关分析及模型模拟[J].应用生态学报,2012,23(7):1869-1874.

[10] 毛思帅,李豫宁,胡跃高,等.负水头供给营养液对不同番茄品种生长特性的影响[J].北方园艺,2012,(10):28-32.

[11] 张 芳,薛绪掌,张建丰,等.基于叶片数增长动态的营养液供给对番茄生长、产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1374-1383.

[12] 周继华,毛思帅,薛绪掌,等.负水头灌溉系统供营养液番茄生产及耗水研究[J].节水灌溉,2014,(11):1-5.

[13] 张 芳,薛绪掌,张建丰,等.基于负水头供液决策的温室作物自动灌溉施肥方法[J].农业机械学报,2014,45(S0):148-154.

[14] 郑 健,蔡焕杰,王 健,等.日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J].农业工程学报,2009,25(10):30-34.

[15] 邢文刚,陈立娜,邵光成,等.控制排水条件下水稻产量影响指标敏感性的通径分析[J].灌溉排水学报,2010,29(3):41-45.

[16] 薛绪掌,许高平,王 璞,等.一种改进的负水头供水盆栽装置[P].中外专利:[S]CN201320291701.6,2013-05-24.

[17] 邹朝望,薛绪掌,张仁铎,等.负水头灌溉原理与装置[J].农业工程学报,2007,23(11):17-21.

[18] 王振龙.无土栽培教程[M].北京:中国农业大学出版社,2008.

[19] 赵丽英,杨建伟,张二芹,等.环境因子对盆栽刺槐苗木生理生长变化影响的通径分析[J].林业科学,2010,46(4):140-145.

[20] 崔党群.通径分析的矩阵算法[J].生物数学学报,1994,(1):71-76.

[21] 袁志发,周静芋,郭满才,等.决策系数——通径分析中的决策指标[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(5):131-133.