

气象因子对负水头供液下番茄日耗液量的敏感性分析

张芳¹ 张建丰² 薛绪掌¹ 王利春¹ 陈晓丽¹ 李友丽¹

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 以番茄为试验材料, 测定其在温室内基质栽培负水头供液条件下的日耗液量、空气相对湿度、气温和太阳辐射强度等气象因子数据, 采用通径分析方法, 建立多元回归模型, 计算各气象因子对番茄日耗液量的直接通径系数、间接通径系数、决定系数和对回归方程估测可靠程度 R^2 的总贡献值。结果表明: 作物系数和日平均太阳辐射强度的直接通径系数达到极显著水平 ($P < 0.01$), 2 个因子的决定系数和对 R^2 总贡献值最大, 是影响番茄日耗液量的重要因子; 气象因子减少对番茄日耗液量影响的通径分析发现, 敏感性最强的气象因子是日平均太阳辐射强度, 其次分别是作物系数和日最高太阳辐射强度。

关键词: 番茄; 日耗液量; 负水头灌溉技术; 气象因子; 通径分析; 敏感性

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0229-10

Sensibility Analysis of Meteorological Factors on Daily Consumption of Nutrient Solution for Tomato Using Negative Pressure

ZHANG Fang¹ ZHANG Jianfeng² XUE Xuzhang¹ WANG Lichun¹ CHEN Xiaoli¹ LI Youli¹

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Negative pressure irrigation technique, which is one of the new irrigation technology for saving water, was applied to substrate culture in greenhouse. There were fewer researches on the relationship between the daily consumption of tomato and meteorological factors added to the leaching link in substrate culture. The daily consumption of plant was affected by the interaction with meteorological factors and by the sensitivity of the meteorological factors. It was beneficial to develop the system of supplying nutrient solution and the management methods with substrate culture using negative pressure in greenhouse based on mastering above relationships. Tomato was used as a material with substrate culture testing for the condition of negative pressure to supply nutrient solution. The daily consumption of nutrient solution and meteorological factors, e.g., air relative humidity, air temperature and solar radiation intensity, were measured. Based on these factors, a multivariate regression model was established and the direct path coefficient, indirect path coefficient, determination coefficient and total contributions for estimating the reliability degree of the regression model were calculated by path analysis method. The results showed that the direct path coefficients of crop coefficient and daily average solar radiation intensity reached a very significant level ($P < 0.01$). The determination coefficient of these two factors and the contributions to R^2 among the factors were the maximum, thus the two factors were the important meteorological factors on daily consumption of nutrient solution for tomato. From the effect of meteorological factors reduction on daily consumption value by path analysis, it was indicated that the daily average solar radiation intensity was the strongest sensitive factors, followed by the crop coefficient and daily maximum solar radiation intensity.

Key words: tomato; daily consumption of nutrient solution; negative pressure irrigation technique; meteorological factors; path analysis; sensitivity

收稿日期: 2016-12-10 修回日期: 2017-01-25

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6142008)

作者简介: 张芳(1984—), 女, 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, 研究员, 博士, 主要从事农业节水技术研究, E-mail: xuexz@nrcita.org.cn

引言

近 20 a 来,为了适应人民生活水平提高和广大城市居民对高品质和高产量蔬菜的需求,大力实施了温室营养液型基质栽培,即在温室内当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]。在此栽培方式下,由于蔬菜根系对营养液中氮、磷、钾的吸收量大于钙、镁、硫的吸收量,会在基质中出现钙、镁离子富集的盐分累积现象;还由于根系分泌物和脱落死亡的根表皮细胞会存留在基质中而改变基质的性质,所以对蔬菜供给营养液的同时还需要对基质进行淋洗,进而促进蔬菜生长、提高产量并改善蔬菜品质^[4]。

负水头灌溉技术是较新颖的节水灌溉技术之一^[5]。解迎革^[6]将负水头灌溉技术表述为将供水压力控制为负压进行灌溉,进而实现土壤含水量精确和持续控制的技术,可抑制土表无效蒸发和地下渗漏,达到节约水资源的目的。此技术根据设定的负水头使土壤含水量基本稳定地维持在目标含水量,可保证及时、精确和持续向作物根系供给水分。目前研究人员主要研究负水头灌溉技术在土壤栽培条件下的番茄耗水量^[6-10],或是有机基质栽培条件下的番茄耗液量^[11],但无淋洗环节,所以国内外有关营养液型基质栽培基于负水头灌溉技术的营养液淋洗条件下番茄日耗液量的研究较少^[12-13],尤其是淋洗条件下气象因子对温室番茄日耗液量的影响和影响因子敏感性的分析报道较少。为了建立温室基质栽培负水头供液下番茄供液量的决策管理体系,开展相关试验,研究气象因子间的关系和对番茄耗液量的影响,具有重要的研究意义。

影响植物耗液量的各个气象因子不是孤立的,它们共同作用于植物耗液,且相互影响,即各因子之间具有相关性,且各因子又均与植物耗液量相关,所以各因子与植物耗液量之间的相关系数既包含各因子对植物耗液量的直接贡献,也包含各因子通过其余因子对植物耗液量的间接贡献^[14]。通径分析在多元回归的基础上将相关系数分解为直接通径系数(某一自变量对因变量的直接作用)和间接通径系数(该自变量通过其它自变量对因变量的间接作用)^[15]。因此利用通径分析研究植物耗液量与气象因子之间的数量关系具有更大的优越性。本文采用通径分析方法探讨空气相对湿度、气温、太阳辐射强度等温室气象因子和作物系数对负水头供液下番茄日耗液量的影响程度及复杂关系,寻求并确定各影响因子对番茄日耗液量的直接和间接作用、决定系

数、对回归方程可靠程度 R^2 的总贡献值及各气象因子对番茄日耗液量的相对敏感性,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和理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2014 年 4—8 月份在北京市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 0.3 g/cm^3 ,总孔隙度 80.5%,pH 值 6.95,电导率(EC) 0.98 mS/cm ,基质持水量 $0.62 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

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、压力传感器等组成,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。供水盘为多孔陶瓷材质,直径 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 15.5 cm。压力传感器测量范围为 $-20 \sim 0 \text{ kPa}$,对应的电压输出范围为 $1 \sim 5 \text{ V}$ 。

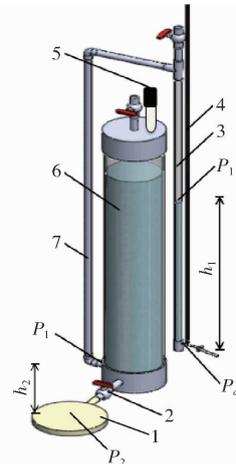


图 1 负水头供液装置原理图

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

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

1.2 负水头供液原理

图 1 为负水头供液装置。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^[11,17]。

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 ——营养液密度

g ——重力加速度

P_a ——大气压强

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

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

由式(1)和式(2)可得

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

式中 Δh ——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

当负水头储液桶内水位每下降 1 cm 时,即单株番茄分别消耗储液桶内营养液 0.14 mm,需淋洗 1 次,淋洗量计算式为

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

式中 W_L ——基于负水头装置决策供液下单盆单株番茄相邻 2 次淋洗时段内的平均淋洗量, mm/d

W_D ——负水头储液桶内水位每下降 1 cm 时减少的液量, cm^3

α ——淋洗系数,取 0.3

θ_{fc} ——基质持水量, cm^3/cm^3

θ_v ——基质含水量,本试验负水头盆栽装置采用的负压为 0.5 kPa,其对应的基质含水量为 $0.59 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

V ——减去供水盘体积后单盆单株番茄的基质体积, cm^3

A ——单株栽培面积, cm^2

t ——定植后 9~107 d 内相邻 2 次淋洗历经的时间, d

试验设 4 个重复,番茄株距 50 cm,每株番茄的盆底均安装 1 个供水盘,每个重复由 1 个负水头供

液装置和淋洗装置进行供液和淋洗。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,如图 2 所示。种植番茄的盆栽容器内长、宽、高分别为 29、24、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。

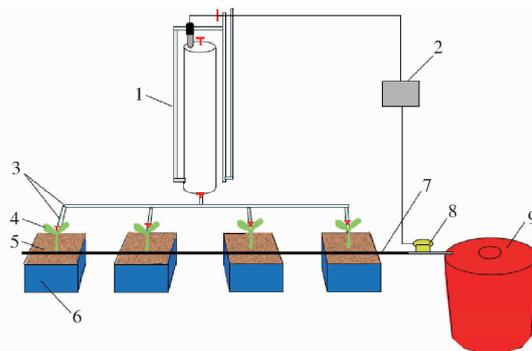


图 2 负水头供液装置和淋洗装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of supplying device and leaching device with negative pressure

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

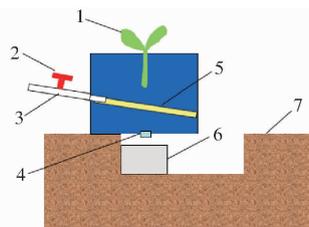


图 3 盆栽容器及排液收集容器剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of potted container and collection of drainage

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

储液桶内水位 (H) 与压强 (P) 的关系为 $P = 0.0205H + 1.1417, R^2 = 0.9901$ 。控制器根据压强变化幅度判断是否开启电磁阀和潜水泵,若大于等于储液桶内液位变化 1 cm 对应的压强变化幅度,则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。

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 1 穗果坐果前和第 1 穗花坐果-采收结束 3 个生育期分别供给 EC 为 1.5、2.0、2.5 mS/cm 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) 1 d 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

2次淋洗时段内的平均耗液量,计算式为

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

式中 ET_N ——基于负水头决策下单株番茄每天平均耗液量, mm/d

W_D ——负水头储液桶内水位下降 1 cm 时减少的液量, cm^3

n ——每个重复的盆栽数量

D ——单株番茄排液量, cm^3

(2) 1 d 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 2 次淋洗时段内的耗液量之和,计算式为

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

式中 m ——每天淋洗次数

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。

储液桶内压强变化由压力传感器监测。

单株番茄排液量为每次淋洗后单株番茄的基质栽培槽中多余营养液由排液孔流入收集槽的液量。

利用悬挂于温室内番茄植株上方 1 m 处的绿云格微型气象站,每间隔 0.5 h 监测和采集 1 次温室内环境气象数据,然后计算日平均相对湿度(%)、日平均气温($^{\circ}\text{C}$)、日平均太阳辐射强度($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)、日平均饱和水汽压差(kPa)、日最高相对湿度(%)、日最高气温($^{\circ}\text{C}$)、日最高太阳辐射强度($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)和日最低相对湿度(%),共 8 个气象因子,另外再选取作物系数共同作为负水头供液条件下番茄日耗液量(mm/d)的影响因子。

1.5 数据处理与统计分析

根据文献[19-22]的方法,对气象因子和日耗液量数据进行标准化处理后,将气象因子、按顺序减少某一气象因子的剩余因子和按重要性逐步减少某一气象因子的剩余因子分别与番茄日耗液量进行通径分析,求出各因子对番茄日耗液量的直接通径系数、间接通径系数、剩余通径系数、决定系数和对回归方程可靠程度 R^2 的总贡献值。

数据采用 Microsoft Office Excel 和 SPSS 16.0 软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 番茄日耗液量与各气象因子的通径分析

选取日平均相对湿度(x_1)、日平均气温(x_2)、日平均太阳辐射强度(x_3)、日平均饱和水汽压差(x_4)、日最高相对湿度(x_5)、日最高气温(x_6)、日最高太阳辐射强度(x_7)、日最低相对湿度(x_8)和作物系数(x_9)作为自变量,番茄日耗液量(y)作为因变量。由表 1 看出, x_8 对 y 的总作用为 -0.260,其相关程度达到显著水平($P < 0.05$),其余因子对 y 的总作用的绝对值均在 0.400~0.878 之间,且与 y 的相关程度均达到极显著水平($P < 0.01$)。这表明所选取的气象因子与日耗液量具有一定程度的线性相关关系。其中, x_3 、 x_5 、 x_9 与 y 的直接通径系数达极显著相关($P < 0.01$), x_8 与 y 的直接通径系数呈显著相关($P < 0.05$),其余因子虽与 y 的直接通径系数未达显著水平,但均通过其它因子对 y 产生极显著影响($P < 0.01$)。

经分析计算得出番茄日耗液量与各气象因子之间的线性回归方程为

$$y = 5.475 + 0.071x_1 + 0.005x_2 + 0.131x_3 + 0.599x_4 - 0.073x_5 - 0.026x_6 + 0.029x_7 - 0.049x_8 + 3.768x_9 \quad (7)$$

由方差分析知, $F = 167.399$ ($P < 0.01$),方差分析极显著,则方差分析有意义,并且 $R^2 = 0.958$ ($P < 0.01$) ($n = 89$),说明通径分析有意义。

通过计算得到剩余通径系数为 0.205,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要进一步试验研究。

表 2 中,将各气象因子对番茄日耗液量的决定系数和对回归方程可靠程度 R^2 的总贡献按照绝对值排序后,得到决定系数中最大的前 5 个分别是 d_{y_9} 、 $d_{y_{29}}$ 、 $d_{y_{39}}$ 、 $d_{y_{79}}$ 和 d_{y_3} ,其中 x_9 、 x_3 和 x_7 对 R^2 的总贡献值是排序最大的 3 项。由表 1 可知, x_9 和 x_3 的直接通径系数是极显著的($P < 0.01$),其中 x_3 的直接通径系数小于 x_9 的,可大致认为绝对值大于 d_{y_3} 的决定系数为显著,小于 d_{y_3} 的决定系数为不显著。

由上述 9 个因子对番茄日耗液量的通径分析结果得到 x_9 的直接通径系数、决定系数和对 R^2 的总贡献值分别为 0.451、0.361 和 0.204,均为 3 个评判因子中各因子之首,说明作物系数 x_9 是影响番茄日耗液量 y 的重要指标; x_2 和 x_9 共同对 y 的决定系数为 0.182,为决定系数的第 2 位,且两者的相关系数为 0.671,数值相对较高,表明日平均温度 x_2 可促进作物系数 x_9 的提高,从而增加番茄日耗液量 y ; x_3 和 x_9 共同对 y 的决定系数为 0.176,为决定系数的第 3

表 1 温室气象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

Tab. 1 Impact analysis of meteorological factors on direct and indirect actions of tomato daily consumption of nutrient solution using negative pressure in greenhouse

| 因子 | 直接途径 系数 | 间接途径系数 | | | | | | | | x_i 对 y 的 总作用 | |
|---------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------|
| | | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | | x_9 |
| x_1 | 0.247 | | -0.003 | -0.172 | -0.060 | -0.069 | 0.025 | -0.075 | -0.282 | -0.010 | -0.400** |
| x_2 | 0.011 | -0.076 | | 0.191 | 0.086 | 0.054 | -0.041 | 0.093 | 0.058 | 0.303 | 0.679** |
| x_3 | 0.376** | -0.113 | 0.006 | | 0.063 | 0.063 | -0.026 | 0.159 | 0.112 | 0.233 | 0.874** |
| x_4 | 0.115 | -0.129 | 0.008 | 0.206 | | 0.100 | -0.025 | 0.096 | 0.087 | 0.244 | 0.702** |
| x_5 | -0.144** | 0.118 | -0.004 | -0.165 | -0.080 | | 0.009 | -0.074 | -0.065 | -0.163 | -0.568** |
| x_6 | -0.056 | -0.110 | 0.008 | 0.175 | 0.052 | 0.023 | | 0.090 | 0.140 | 0.130 | 0.452** |
| x_7 | 0.164 | -0.113 | 0.006 | 0.364 | 0.067 | 0.065 | -0.030 | | 0.112 | 0.243 | 0.878** |
| x_8 | -0.301* | 0.231 | -0.002 | -0.140 | -0.033 | -0.031 | 0.026 | -0.061 | | 0.052 | -0.260* |
| x_9 | 0.451** | -0.006 | 0.007 | 0.195 | 0.062 | 0.052 | -0.016 | 0.089 | -0.034 | | 0.800** |
| ε | 0.205 | | | | | | | | | | 0.205 |

注：*表示 $P < 0.05$ 水平显著；**表示 $P < 0.01$ 水平显著； ε 表示剩余因子。

表 2 各因子对番茄日耗液量的决定系数和对 R^2 的总贡献值排序

Tab. 2 Determination coefficient of factors to daily consumption of tomato and total contribution rate to R^2

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|---------------------|
| d_{y_i} | d_{y_9} | $d_{y_{29}}$ | $d_{y_{39}}$ | $d_{y_{79}}$ | d_{y_3} | $d_{y_{18}}$ | $d_{y_{37}}$ | d_{y_8} | d_{y_ε} |
| 决定系数 | 0.204 | 0.182 | 0.176 | 0.147 | 0.142 | 0.139 | 0.120 | 0.091 | 0.042 |
| 因子 | x_9 | x_3 | x_7 | x_1 | x_5 | x_4 | x_8 | x_6 | x_2 |
| 总贡献 | 0.361 | 0.329 | 0.144 | -0.099 | 0.082 | 0.080 | 0.078 | -0.025 | 0.008 |

位,且两者对 R^2 的总贡献值排前 2 位,另外, x_3 的直接途径系数为 0.376,决定系数为 0.142,数值较大,说明提高日平均太阳辐射强度 x_3 的同时也可促进作物系数 x_9 的提高,进而增加番茄日耗液量 y ; x_7 和 x_9 共同对 y 的决定系数为 0.147,为决定系数的第 4 位,并且两者对 R^2 的总贡献值分别排第 3 位和第 1 位,说明提高日最高太阳辐射强度 x_7 可利于提高作物系数 x_9 ,从而增加番茄日耗液量; x_1 和 x_8 共同对 y 的决定系数为 0.139,其中 x_8 的决定系数为 0.091,并且两者对 R^2 的总贡献的绝对值分别排第 4 位和第 7 位,另外, x_1 和 x_8 对 y 的总作用分别为 -0.400 和 -0.260,说明降低日平均相对湿度 x_1 和日最低相对湿度 x_8 可利于增加番茄日耗液量 y ; 剩余项 ε 对番茄日耗液量的决定系数为 0.042,排第 13 位,但其直接途径系数为 0.205,表明存在较大的试验误差(仪器误差),或是在本试验中其它影响番茄日耗液量较大的因子未被考虑。

2.2 气象因子敏感性分析

2.2.1 8 个气象因子对番茄日耗液量的途径分析

表 3 和表 4 为 9 个气象因子减少为 8 个后各因子对番茄日耗液量的直接作用和间接作用影响及各因子对 R^2 的总贡献值的变化。由表 3 看出,将日平均相对湿度 x_1 、日最高相对湿度 x_5 和日最低相对湿

度 x_8 去掉任一因子,均会引起其余 2 个因子的直接和间接作用发生较大变化(去掉 x_1 引起 x_5 变化除外);同样,分别去掉日平均太阳辐射强度 x_3 和日最高太阳辐射强度 x_7 ,会引起 x_7 和 x_3 的变化;去掉日平均饱和水汽压差 x_4 ,引起日平均相对湿度 x_1 、日平均气温 x_2 和日最低相对湿度 x_8 的变化;去掉作物系数 x_9 ,引起日平均气温 x_2 、日最高气温 x_6 和日最高太阳辐射强度 x_7 的变化。说明日平均相对湿度、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、日最高太阳辐射强度、日最低相对湿度和作物系数的敏感性和重要性对番茄日耗液量的影响较大。同理,表 4 中,分别去掉作物系数 x_9 和日平均太阳辐射强度 x_3 时 R^2 由 0.958 分别降为 0.888 和 0.950,使剩余项 ε 对番茄日耗液量的决定系数 d_{y_ε} 由 0.042 分别增加到 0.112 和 0.050,说明所去掉的因子是引起番茄日耗液量变化较大的影响因子。去掉 x_2 和 x_6 时,二者的变化较小。由上述所知,作物系数和日平均太阳辐射强度对番茄日耗液量影响较大。

2.2.2 逐步减少气象因子对番茄日耗液量的途径分析

由表 3 和表 4 可看到, x_2 的直接途径系数和对 R^2 的总贡献值较小,在去掉 x_2 后其余 8 个因子的途径分析结果(表 5、表 6)显示, x_4 、 x_5 和 x_8 对 R^2 的总贡献

表3 气象因子减少对番茄日耗液量途径分析的直接和间接作用影响分析

Tab.3 Impact analysis of reduction of meteorological factors on direct and indirect actions of tomato daily consumption with path analysis

| 因子个数 | $x_1 (r_{y1} = -0.400)$ | | $x_2 (r_{y2} = -0.679)$ | | $x_3 (r_{y3} = -0.874)$ | | $x_4 (r_{y4} = -0.702)$ | | $x_5 (r_{y5} = -0.568)$ | |
|-------------|-------------------------|--------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 |
| 9 | 0.247 | -0.647 | 0.011 | 0.668 | 0.376 | 0.497 | 0.115 | 0.588 | -0.144 | -0.424 |
| 8(去 x_1) | | 0.015 | 0.664 | 0.375 | 0.498 | 0.065 | 0.637 | -0.100 | -0.468 | |
| 8(去 x_2) | 0.247 | -0.648 | | | 0.377 | 0.496 | 0.120 | 0.582 | -0.143 | -0.425 |
| 8(去 x_3) | 0.243 | -0.643 | 0.023 | 0.656 | | | 0.103 | 0.600 | -0.139 | -0.429 |
| 8(去 x_4) | 0.116 | -0.516 | 0.081 | 0.598 | 0.366 | 0.508 | | | -0.155 | -0.412 |
| 8(去 x_5) | -0.021 | -0.379 | -0.015 | 0.694 | 0.367 | 0.507 | 0.142 | 0.560 | | |
| 8(去 x_6) | 0.222 | -0.622 | -0.040 | 0.719 | 0.405 | 0.468 | 0.127 | 0.575 | -0.142 | -0.425 |
| 8(去 x_7) | 0.252 | -0.652 | 0.000 | 0.679 | 0.520 | 0.354 | 0.125 | 0.578 | -0.149 | -0.419 |
| 8(去 x_8) | -0.076 | -0.324 | 0.008 | 0.671 | 0.387 | 0.487 | 0.056 | 0.646 | -0.087 | -0.480 |
| 8(去 x_9) | 0.331 | -0.731 | 0.403 | 0.276 | 0.423 | 0.450 | 0.066 | 0.636 | -0.186 | -0.382 |

| 因子个数 | $x_6 (r_{y6} = -0.452)$ | | $x_7 (r_{y7} = -0.878)$ | | $x_8 (r_{y8} = -0.260)$ | | $x_9 (r_{y9} = -0.800)$ | |
|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|-------|
| | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 |
| 9 | -0.056 | 0.508 | 0.164 | 0.714 | -0.301 | 0.041 | 0.451 | 0.349 |
| 8(去 x_1) | -0.042 | 0.494 | 0.169 | 0.709 | -0.086 | -0.174 | 0.455 | 0.345 |
| 8(去 x_2) | -0.050 | 0.502 | 0.162 | 0.716 | -0.301 | 0.041 | 0.455 | 0.345 |
| 8(去 x_3) | -0.104 | 0.557 | 0.545 | 0.334 | -0.322 | 0.062 | 0.458 | 0.342 |
| 8(去 x_4) | -0.074 | 0.526 | 0.188 | 0.691 | -0.199 | -0.061 | 0.445 | 0.355 |
| 8(去 x_5) | -0.051 | 0.503 | 0.191 | 0.687 | -0.071 | -0.188 | 0.463 | 0.337 |
| 8(去 x_6) | | 0.122 | 0.757 | -0.265 | 0.006 | 0.467 | 0.333 | |
| 8(去 x_7) | -0.029 | 0.481 | | | -0.300 | 0.040 | 0.458 | 0.342 |
| 8(去 x_8) | -0.025 | 0.478 | 0.163 | 0.878 | | | 0.450 | 0.350 |
| 8(去 x_9) | -0.246 | 0.699 | 0.300 | 0.578 | -0.279 | 0.019 | | |

注: r_{yi} ($i=1,2,\dots,9$)表示各因子(i)与番茄日耗液量(y)之间的相关性,下同。

表4 气象因子减少对番茄日耗液量途径分析中的 R^2 的总贡献值影响分析Tab.4 Impact analysis of reduction of meteorological factors on total contribution rate to R^2 of tomato daily consumption with path analysis

| 因子个数 | d_{ye} | 各因子对回归方程 R^2 的总贡献值 | | | | | | | | | R^2 |
|-------------|----------|----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | |
| 9 | 0.042 | -0.099 | 0.008 | 0.329 | 0.080 | 0.082 | -0.025 | 0.144 | 0.078 | 0.361 | 0.958 |
| 8(去 x_1) | 0.044 | | 0.010 | 0.328 | 0.045 | 0.057 | -0.019 | 0.149 | 0.022 | 0.364 | 0.956 |
| 8(去 x_2) | 0.042 | -0.099 | | 0.329 | 0.084 | 0.081 | -0.022 | 0.142 | 0.078 | 0.364 | 0.958 |
| 8(去 x_3) | 0.050 | -0.097 | 0.015 | | 0.072 | 0.079 | -0.047 | 0.478 | 0.084 | 0.366 | 0.950 |
| 8(去 x_4) | 0.044 | -0.046 | 0.055 | 0.319 | | 0.088 | -0.033 | 0.165 | 0.052 | 0.356 | 0.956 |
| 8(去 x_5) | 0.048 | 0.008 | -0.010 | 0.320 | 0.100 | | -0.023 | 0.168 | 0.019 | 0.370 | 0.952 |
| 8(去 x_6) | 0.043 | -0.089 | -0.027 | 0.354 | 0.089 | 0.081 | | 0.107 | 0.069 | 0.373 | 0.957 |
| 8(去 x_7) | 0.043 | -0.101 | 0.000 | 0.454 | 0.087 | 0.084 | -0.013 | | 0.078 | 0.367 | 0.957 |
| 8(去 x_8) | 0.045 | 0.030 | 0.006 | 0.338 | 0.040 | 0.050 | -0.011 | 0.143 | | 0.360 | 0.955 |
| 8(去 x_9) | 0.112 | -0.133 | 0.274 | 0.370 | 0.047 | 0.106 | -0.111 | 0.264 | 0.072 | | 0.888 |

值均较小,其中 x_4 和 x_5 的直接途径系数最小,并且 x_4 对番茄日耗液量的间接作用比 x_5 大,所以去掉 x_5 ; 以此类推,依次去掉影响最不敏感的因子 x_5 、 x_8 、 x_1 、 x_6 、 x_4 和 x_7 再进行途径分析;最后剩下日平均太阳辐射强度 x_3 和作物系数 x_9 ,对比途径分析结果看出虽然 x_9 的间接作用(0.325)比 x_3 的间接作用(0.246)

大,但是 x_9 的直接作用(0.475)和对 R^2 的总贡献值(0.380)比 x_3 的直接作用(0.628)和对 R^2 的总贡献值(0.548)小,所以去掉 x_9 。结果显示,日平均太阳辐射强度 x_3 对番茄日耗液量的影响最大。综上所述,9个因子对番茄日耗液量影响的敏感性由大到小排序为 x_3 、 x_9 、 x_7 、 x_4 、 x_6 、 x_1 、 x_8 、 x_5 、 x_2 。

表5 逐步减少最不敏感气象因子对番茄日耗液量途径分析的直接和间接作用影响分析

Tab.5 Impact analysis of gradual reduction of the least sensitive meteorological factors on direct and indirect actions of tomato daily consumption with path analysis

| 因子个数 | $x_1 (r_{y1} = -0.400)$ | | $x_2 (r_{y2} = -0.679)$ | | $x_3 (r_{y3} = -0.874)$ | | $x_4 (r_{y4} = -0.702)$ | | $x_5 (r_{y5} = -0.568)$ | |
|-------------|-------------------------|--------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|--------|
| | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 |
| 9 | 0.247 | -0.647 | 0.011 | 0.668 | 0.376 | 0.497 | 0.115 | 0.588 | -0.144 | -0.424 |
| 8(去 x_2) | 0.247 | -0.648 | | | 0.377 | 0.496 | 0.120 | 0.582 | -0.143 | -0.425 |
| 7(去 x_5) | -0.024 | -0.376 | | | 0.365 | 0.508 | 0.134 | 0.568 | | |
| 6(去 x_8) | -0.096 | -0.304 | | | 0.370 | 0.503 | 0.113 | 0.590 | | |
| 5(去 x_1) | | | | | 0.422 | 0.452 | 0.163 | 0.539 | | |
| 4(去 x_6) | | | | | 0.447 | 0.426 | 0.158 | 0.545 | | |
| 3(去 x_7) | | | | | 0.402 | 0.472 | | | | |
| 2(去 x_9) | | | | | 0.628 | 0.246 | | | | |

| 因子个数 | $x_6 (r_{y6} = -0.452)$ | | $x_7 (r_{y7} = -0.878)$ | | $x_8 (r_{y8} = -0.260)$ | | $x_9 (r_{y9} = -0.800)$ | |
|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|--------|-------------------------|-------|
| | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 | 直接 | 间接和 |
| 9 | -0.056 | 0.508 | 0.164 | 0.714 | -0.301 | 0.041 | 0.451 | 0.349 |
| 8(去 x_2) | -0.050 | 0.502 | 0.162 | 0.878 | -0.301 | 0.041 | 0.455 | 0.345 |
| 7(去 x_5) | -0.059 | 0.512 | 0.195 | 0.684 | -0.070 | -0.190 | 0.458 | 0.342 |
| 6(去 x_8) | -0.049 | 0.501 | 0.190 | 0.688 | | | 0.457 | 0.343 |
| 5(去 x_1) | -0.027 | 0.479 | 0.168 | 0.710 | | | 0.411 | 0.389 |
| 4(去 x_6) | | | 0.131 | 0.748 | | | 0.413 | 0.387 |
| 3(去 x_7) | | | 0.240 | 0.638 | | | 0.463 | 0.338 |
| 2(去 x_9) | | | | | | | 0.475 | 0.325 |

表6 逐步减少最不敏感气象因子对番茄日耗液量途径分析中的 R^2 的总贡献值影响分析Tab.6 Impact analysis of gradual reduction of the least sensitive meteorological factors on total contribution rate to R^2 of tomato daily consumption with path analysis

| 因子个数 | $d_{y\epsilon}$ | 各因子对回归方程 R^2 的总贡献值 | | | | | | | | | R^2 |
|-------------|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | |
| 9 | 0.042 | -0.099 | 0.008 | 0.329 | 0.080 | 0.082 | -0.025 | 0.144 | 0.078 | 0.361 | 0.958 |
| 8(去 x_2) | 0.047 | -0.099 | | 0.329 | 0.084 | 0.081 | -0.022 | 0.142 | 0.078 | 0.364 | 0.953 |
| 7(去 x_5) | 0.048 | 0.010 | | 0.319 | 0.094 | | -0.027 | 0.171 | 0.018 | 0.366 | 0.952 |
| 6(去 x_8) | 0.048 | 0.038 | | 0.324 | 0.079 | | -0.022 | 0.167 | | 0.365 | 0.952 |
| 5(去 x_1) | 0.053 | | | 0.369 | 0.114 | | -0.012 | 0.148 | | 0.329 | 0.947 |
| 4(去 x_6) | 0.054 | | | 0.391 | 0.111 | | | 0.115 | | 0.330 | 0.946 |
| 3(去 x_7) | 0.068 | | | 0.351 | | | | 0.211 | | 0.370 | 0.932 |
| 2(去 x_9) | 0.072 | | | 0.548 | | | | | | 0.380 | 0.928 |

随着逐步减少最不敏感的影响因子,可看到剩余项 ϵ 的决定系数 $d_{y\epsilon}$ 逐渐增大,说明番茄日耗液量是多种影响因素综合作用的结果,并且各因子间存在相互联系和影响的关系。

3 讨论

3.1 负水头供液下水势与气象因子的关系

在负水头供液条件下,研究人员在北京地区温室内进行基质栽培番茄(春夏茬和夏秋茬)试验,李霞^[23]和周继华等^[12]先后将负水头分别设为1、3、5、7 kPa,发现不同负水头处理下的番茄日蒸腾量分别与气象因子的回归方程、日平均光照强度和温度(1 kPa下夏秋茬番茄除外)呈极显著正相关,其中

1 kPa下夏秋茬番茄和5 kPa下春夏茬番茄的日蒸腾量均与空气相对湿度呈极显著的负相关,其它夏秋茬番茄日蒸腾量与空气相对湿度的相关性不显著。本研究的种植区域和时间与春夏茬番茄试验相同,且结论一致;而与夏秋茬番茄的结论不尽相同,可能是受到种植时间的影响,但与影响番茄日蒸腾量的主要因素是日平均光照强度的结论相同,说明日平均光照强度在北京地区对番茄日蒸腾量的作用不受种植时间影响。

非负水头供液条件下,当气象因子和土壤含水量处于适宜植物生长范围内时,不同植物的蒸腾速率与气象因子的关系与上述结论基本一致^[24-26]。但当植物处于水分胁迫和过饱和情况下,其蒸腾量

与各气象因子的相关系数逐渐下降^[26]。根据李霞^[23]和周继华等^[12]的结果和本研究中的数据来看,在负水头为 0.5 ~ 7 kPa 范围内,番茄日蒸腾量与气象因子的回归方程相关性随负水头的升高而增大。

3.2 气象因子间和敏感性因子间的相互影响

本研究对影响负水头供液条件下番茄日耗液量的 9 个气象因子进行了通径分析,并得出影响因子的敏感性排序,由大到小依次为日平均太阳辐射强度、作物系数、日最高太阳辐射强度、日平均饱和水汽压差、日最高气温、日平均相对湿度、日最低相对湿度、日最高相对湿度、日平均气温。由此看出,气象指标对负水头供液条件下番茄日耗液量影响敏感性强度的排序依次是太阳辐射强度、饱和水汽压差、相对湿度和气温。

本研究中由于基质表面覆膜防止水分蒸发,排液量进行收集和测量,则番茄的日耗液量可近似看作是番茄植株的蒸腾量。蒸腾作用是复杂的植物生理过程,在此过程中植物根据变化着的气象和栽培介质环境进行调节体内水分平衡并适应,所以蒸腾与环境因子关系密切。MEINZER^[27]研究认为植物气孔导度和土壤植物系统总水力导度协同调控蒸腾作用,并通过对环境因子的响应共同维持光合能力最大化和水分传输安全性间的平衡。从物理学和植物生理学角度看,光辐射效应是蒸腾作用的能量来源,随着光辐射强度升高,温度升高,水分扩散加剧,空气相对湿度降低,空气饱和水汽压差和叶内外水汽压差增大^[28],此时植株木质部长距离水分传输的通畅性^[29]、水孔蛋白和酶的活性受到影响^[30],植物激素 ABA 含量增加,叶片气孔导度增大,则叶片水分传导度升高,当各气象因子和植物激素 ABA 含量达到一定限值时,叶片气孔导度减小,则叶片水分传导度降低,所以气孔导度与土壤植物系统总水力导度维持平衡时,通过对太阳光辐射、水汽压差、相对湿度和温度的响应,才会促进植物蒸腾^[31]。

从 9 个气象因子对负水头供液条件下番茄日耗液量影响敏感性的统计分析角度看,各气象因子间通过交互效应对番茄日耗液量有不同程度的决定作用,影响较大的因子是作物系数和日平均太阳辐射强度,其中敏感性最强的因子是日平均太阳辐射强度,其次分别是作物系数和日最高太阳辐射强度。由表 5 和表 6 可知,日平均太阳辐射强度的直接作用和对 R^2 的总贡献值均是 9 个因子中最大值,其次是作物系数和日最高太阳辐射强度,说明日平均太阳辐射强度对番茄日耗液量的影响敏感性和重要性最强,由表 1 看出,它不仅通过自身对番茄日耗液量

产生正影响,还通过对作物系数、日最高太阳辐射强度、日平均饱和水汽压差和日最高相对湿度的增强作用对番茄日耗液量产生间接正影响;作物系数反映了各种环境因素和作物对需水量的影响,包括空气动力学阻力、表面阻力、作物品种、作物长势和栽培技术等^[32],它不仅通过自身对番茄日耗液量产生正影响,还通过对日平均太阳辐射强度、日最高太阳辐射强度和日平均饱和水汽压差的增强作用对番茄日耗液量产生间接正影响;日最高太阳辐射强度通过对日平均太阳辐射强度、作物系数、日平均饱和水汽压差和日最高相对湿度的增强作用对番茄日耗液量产生间接正影响。虽然上述 3 个影响敏感性较强的因子均未通过气温对番茄日耗液量产生间接影响,但是日平均气温与番茄日耗液量的相关性呈极显著水平($P < 0.01$),因为日平均气温通过日最高相对湿度和日最低相对湿度对番茄日耗液量产生较大的增强作用与其通过日平均相对湿度和日最高气温对番茄日耗液量产生的限制作用基本相互抵消,则日平均气温通过作物系数、日平均太阳辐射强度、日最高太阳辐射强度和日平均饱和水汽压差对番茄日耗液量的增强作用是影响其与番茄日耗液量相关程度的主导因素。

由上述可知,在生产实践中,利用负水头供液装置进行决策供液时,需要优先控制温室内日平均太阳辐射强度的变化,使其处于适宜范围内,进而有效控制温室内饱和水汽压差、空气相对湿度和气温。研究表明^[18],温室番茄适宜生长的太阳辐射强度为 44 ~ 51 W/m²,空气相对湿度为 50% ~ 60%,适宜气温为 25 ~ 28℃(最高不超过 35℃,最低不低于 10℃),CO₂摩尔比浓度为 600 ~ 1 000 μmol/mol。另外,采用通径分析方法时需要尽可能多地考虑到所有影响因子,并且进行长期的数据观测,使样本尽量多且完善,才会取得更精确的分析结果。本研究还需要考虑温室 CO₂浓度和风速等气象影响因素、土壤水力因素和植物生理因素做进一步试验。

4 结论

(1)本试验所选因子中,作物系数和日平均太阳辐射强度的直接通径系数达到极显著水平($P < 0.01$),2 个因子的决定系数和对 R^2 总贡献值最大,是影响番茄日耗液量的重要因子。

(2)根据气象因子减少对番茄日耗液量影响的通径分析发现,敏感性最强的气象因子是日平均太阳辐射强度,其次分别是作物系数和日最高太阳辐射强度。

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 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.
ZHANG Fang, XUE Xuzhang, ZHANG Jianfeng, et al. Effects of nutrient solution supplying mode on growth, yield and quality of tomatoes using leaf number growth dynamic [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5):1374-1383. (in Chinese)
- 5 张芳,薛绪掌,张建丰,等.负水头供水盘埋设方式对番茄生长和水分利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2): 239-244.
ZHANG Fang, XUE Xuzhang, ZHANG Jianfeng, et al. Effects of embed methods on water supplying device with negative pressure toward the growth of tomatoes and their water use efficiency[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2):239-244. (in Chinese)
- 6 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.
- 7 万克江.水分精确控制下小麦、黄瓜和菠菜若干生理指标的变化[D].北京:中国农业大学,2005
- 8 李邵,薛绪掌,郭文善,等.供水吸力对温室黄瓜产量与水分利用率的影响[J].中国农业科学,2010,43(2):337-345.
LI Shao, XUE Xuzhang, GUO Wenshan, et al. Effects of water supply tension on yield and water use efficiency of greenhouse cucumber[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2):337-345. (in Chinese)
- 9 李霞,解迎革,薛绪掌,等.不同基质含水量下盆栽番茄蒸腾量、鲜物质积累量及果实产量的差异[J].园艺学报,2010, 37(5):805-810.
LI Xia, XIE Yingge, XUE Xuzhang, et al. Difference of transpiration, fresh matter accumulation and fruit yield for potted tomato under moisture content of medium[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(5):805-810. (in Chinese)
- 10 毛思帅, ISIAM M R, 薛绪掌,等.保水剂和负压供水对玉米生理生长及水分利用率的影响[J].农业工程学报,2011, 27(7):82-88.
MAO Sishuai, ISIAM M R, XUE Xuzhang, et al. Effects of water-retaining agent and water supply tension on physiology, growth and water use efficiency of corn [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):82-88. (in Chinese)
- 11 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.
MAO Sishuai, LI Yuning, HU Yuegao, et al. Study on growth, physiology and yield of different tomato varieties with supplying nutrient solution by negative pressure irrigation[J]. Northern Horticulture, 2012(10):28-32. (in Chinese)
- 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.
ZHOU Jihua, MAO Sishuai, XUE Xuzhang, et al. Research on tomato production and water consumption dynamics with negative pressure irrigation system supplying nutrient solution[J]. Water Saving Irrigation, 2014(11):1-5. (in Chinese)
- 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/OL].农业机械学报,2014,45(增刊): 148-154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s124&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.024.
ZHANG Fang, XUE Xuzhang, ZHANG Jianfeng, et al. Automatic irrigation method for greenhouse crops based on negative pressure decision-making[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):148-154. (in Chinese)
- 14 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其模型[J].应用生态学报,2012,23(7):1869-1874.
YAO Yongzhe, LI Jianming, ZHANG Rong, et al. Greenhouse tomato transpiration and its affecting factors: correlation analysis and model Simulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1869-1874. (in Chinese)
- 15 敬艳辉,邢留伟.通径分析及其应用[J].统计教育,2006,77(2):24-26.
JING Yanhui, XING Liuwei. Path analysis and its applications[J]. Statistical Education, 2006, 77(2): 24-26. (in Chinese)
- 16 薛绪掌,许高平,王璞,等.一种改进的负水头供水盆栽装置:中国,201320291701.6[P].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):17-22.
ZOU Chaowang, XUE Xuzhang, ZHANG Renduo, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 17-22. (in Chinese)
- 18 王振龙.无土栽培教程[M].北京:中国农业大学出版社,2008:23-314.
- 19 赵丽英,杨建伟,张二芹,等.气象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.
ZHAO Liying, YANG Jianwei, ZHANG Erqin, et al. Path analysis of the impact of meteorological factors on growth variation of potted *Robinia pseudocacia*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(4):140-145. (in Chinese)

- 20 杜家菊,陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报,2010,45(2):4-6.
DU Jiaju, CHEN Zhiwei. The method of using SPSS linear regression to realize path analysis [J]. Bulletin of Biology, 2010, 45(2): 4-6. (in Chinese)
- 21 崔党群. 通径分析的矩阵算法[J]. 生物数学学报,1994,9(1):71-76.
CUI Dangqun. The matrix solutions on path analysis [J]. Journal of Biomath,1994,9(1):71-76. (in Chinese)
- 22 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.
YUAN Zhifa, ZHOU Jingyu, GUO Mancai, et al. Decision coefficient—the decision index of path analysis [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2001, 29(5): 131-133. (in Chinese)
- 23 李霞. 设施蔬菜蒸腾调控机理与方法的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009:66.
LI Xia. Study of mechanism and methods of protected vegetable transpiration control [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009:66. (in Chinese)
- 24 刘玉华,史纪安,贾志宽,等. 旱作条件下紫花苜蓿光合蒸腾日变化与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1811-1814.
LIU Yuhua, SHI Ji'an, JIA Zhikuan, et al. Diurnal dynamics of photosynthetic and transpiration rates of alfalfa under dry farming and their relationships with meteorological factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1811-1814. (in Chinese)
- 25 张中典,张大龙,李建明,等. 黄瓜气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):139-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160618&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.018
ZHANG Zhongdian, ZHANG Dalong, LI Jianming, et al. Environmental response of stomatal and hydraulic and their effects on regulating transpiration of cucumber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 139-147. (in Chinese)
- 26 张大龙,常毅博,李建明,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)
- 27 MEINZER F C. Co-ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2):265-274.
- 28 张志亮,刘国东,张富仓. 植物叶片导水率的研究进展[J]. 生态学杂志,2014,33(6):1663-1670.
ZHANG Zhiliang, LIU Guodong, ZHANG Fucang. Research progress of plant leaf hydraulic conductivity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1663-1670. (in Chinese)
- 29 AROCA R, PORCEL R. RUIZ-LOZANO J M. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63: 43-57.
- 30 BLUM A. Drought resistance—is it really a complex trait? [J]. Functional Plant Biology, 2011, 38: 753-757.
- 31 刘利民,齐华,罗新兰,等. 植物气孔气态失水与 SPAC 系统液态供水的相互调节作用研究进展[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2067-2073.
LIU Limin, QI Hua, LUO Xinlan, et al. Coordination effect between vapour water loss through plant stomata and liquid water supply in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC): a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2067-2073. (in Chinese)
- 32 葛建坤,李佳,罗金耀. 日光温室膜下滴灌番茄作物系数试验研究[J]. 中国农村水利水电,2014(7):21-26.
GE Jiankun, LI Jia, LUO Jinyao. Experimental research on tomato crop coefficient with drip irrigation under mulch in sunlight greenhouse [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(7): 21-26. (in Chinese)