

日光温室主要环境参数对番茄本体长势的影响

张传帅¹ 徐岚俊^{1*} 李小龙¹ 陈华¹ 葛文章² 刘婷韬¹ 于晓宁² 孙梦遥¹

(1.北京市农业机械试验鉴定推广站,北京 100079;
2.中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100193)

摘要 针对日光温室环境调控缺乏理论支撑,环境信息监测利用难,作物长势难量化的问题,以北京市春夏季日光温室番茄为试验材料,采用农业物联网设备实时监测温室主要环境参数(空气温度、空气相对湿度、CO₂浓度、光照强度、土壤温度和土壤水分)和番茄本体长势参数(番茄茎直径微变化、果实直径微变化和叶面温度),借助 Matlab 2014a 平台建立模型,对温室中主要环境参数对番茄本体长势的影响进行研究。结果表明:1)建立的幼苗期各环境参数对番茄茎直径微变化的影响回归模型和结果期各环境参数对茎直径微变化、果实直径微变化、叶面温度的影响回归模型可以反映出不同环境参数对番茄茎直径微变化、果实直径微变化和叶面温度的影响程度;2)建立的番茄果实直径预测模型,训练集相关系数达到 0.92,测试集相关系数达到 0.88,满足预测需求;3)试验分析得到的幼苗期和结果期各主要环境参数的合理控制范围符合番茄实际生长环境要求。该研究可为春夏季日光温室番茄的生产环境调控提供参考,也为环境数据监测与环境调控机构的智能化关联提供了一种解决方案。

关键词 日光温室;番茄;茎直径微变化;果实直径微变化;环境参数

中图分类号 S24 文章编号 1007-4333(2019)10-0118-07 文献标志码 A

Effects of main environmental parameters on the growth of tomato in solar greenhouse

ZHANG Chuanshui¹, XU Lanjun^{1*}, LI Xiaolong¹, CHEN Hua¹,
GE Wenzhang², LIU Xingtao¹, YU Xiaoning², SUN Mengyao¹

(1. Beijing Agricultural Machinery Experiment Appraisal Popularize Station, Beijing 100079, China;
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In view of the lack of theoretical support for environmental regulation and control of solar greenhouse, the difficulty of monitoring and utilizing environmental information and quantifying crop growth, tomatoes planted in solar greenhouse in spring and summer of Beijing were used as experimental materials to study the effects of greenhouse environmental parameters on the growth of tomatoes. Devices of IOT in agricultural were used to monitor main environmental parameters (greenhouse air temperature, relative humidity of air, CO₂ concentration, intensity of illumination, soil temperature and soil moisture) and tomato growth indexes (stem diameter micro-variation, fruit diameter micro-variation and leaf surface temperature) in solar greenhouse. The models were built on the platform of Matlab 2014a. The results showed that: 1) A regression model of the effects of environmental parameters on stem diameter micro-variation, fruit diameter micro-variation and leaf surface temperature in fruit stage and a regression model of the effects of environmental parameters on stem diameter in seeding stage were established. The influence of different environmental parameters on the slight change of stem diameter, fruit diameter and leaf temperature of tomato were reflected through the model; 2) A prediction model of tomato fruit diameter was established. The correlation

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 北京市农业农村局项目(PXM2017_036231_000027;PXM2017_036231_000010)

第一作者: 张传帅, 中级工程师, 主要从事农机信息化技术研究, E-mail: zhangchuanshui@sina.cn

通讯作者: 徐岚俊, 高级工程师, 主要从事农机信息化技术研究, E-mail: 250980662@qq.com

coefficients of training set and testing set were respectively 0.92 and 0.88, which met the prediction requirements; 3) The reasonable control range suitable for growth of tomatoes of the main environmental parameters in the seedling and fruit stages obtained from the experiment analysis were proposed. A reference was provided for the environmental regulation of tomato production in solar greenhouse in spring and summer. Solutions were also provided for the intelligent association between environmental data monitoring and environmental regulatory agencies through the study.

Keywords solar greenhouse; tomato; stem diameter micro-variation; fruit diameter micro-variation; environmental factors

随着农业物联网技术的发展,设施农业环境监测和调控技术日渐成熟^[1-2],探索利用监测的环境信息指导设施农业环境调控和农业生产成为研究热点和难点^[3]。作物本体长势监测技术的引入,可实时监测获取作物茎秆、茎流、叶面温度、果实直径等参数,从而用数据量化出短时间内作物长势微小变化,为及时精准的环境调控提供了支撑。日光温室各环境参数对番茄本体长势的影响研究对探索不同生产阶段各环境参数对作物长势的影响作用程度有重要意义,是实现空气温湿度、光照、土壤温湿度等环境参数有效调控以及推测作物长势趋势的基础理论依据^[4-6]。

设施农业中环境调控自动化水平较高^[7],适宜番茄常年规模化生产且经济效益较高,番茄是设施农业中的重要蔬菜作物,因此设施番茄成为重点研究对象之一。目前,国内外对番茄作物长势与不同环境参数之间关系的研究取得了一些进展,特别是在茎秆直径监测和作物水分亏缺方面,已经应用到灌溉管理中^[8-12]。研究表明:温室中番茄长势受环境参数影响明显;番茄茎秆直径微变化与作物本体水分密切相关^[13],例如茎秆直径日最大收缩量(Maximum daily stem shrinkage, MDS)可以用来间接指导番茄的灌溉施肥^[14],并证明了 MDS 与日辐射峰值、日均空气饱和差等环境参数的有明显的线性回归关系^[15-16],建立了一定条件下的茎直径动态变化预测方法^[17],为 MDS 与环境参数的关联性研究提供了参考;作物根压是体现作物水分亏缺的直接指标,通过茎直径和茎流微变化也可以一定程度预测出作物根压^[18],从而用来指导灌溉;也有研究表明,番茄植株茎流在一定条件下,主要受太阳辐射和水气压差影响,同样可以反映作物长势情况^[19]。但以上研究均采用了温室较难监测的气象参数,在实际应用中难以操作,而且以上研究并未对各环境参数对作物长势的影响程度区别进行详细分析,目前各环境参数对果实直径微变化和叶面温度影响研究报道较少,仅有番茄果实生长模型建立的

独立研究,未涉及环境参数^[20]。

本研究拟选用北京市春夏季温室番茄为试验作物,利用农业物联网技术设备实时监测各环境参数和作物长势参数,研究各项环境参数对幼苗期茎直径微变化和番茄结果期茎直径微变化、叶面温度、果实直径微变化的影响程度,建立番茄果实直径预测模型,分析得出温室中环境参数合理控制范围,为进一步环境调控机构管理和优化作物生长环境提供参考。

1 材料及方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 04—08 月在北京市密云区河南寨镇盛达种植园日光温室进行。试验地位于 40°37'N, 116°85'E,年平均气温 10.8℃。试验温室东西走向,长 130 m,宽 13 m,下沉 1.2 m,种植作物为番茄,品种为京彩六号,种植模式为南北向垄上种植,种植密度为 52 500 株/hm²。催芽、育苗、定植按照当地常规生产方式进行,其中,试验番茄于 05-01 定植,05-01—06-25 为幼苗期;06-26—07-27 为番茄数据采集的第一个结果周期,试验时间包括番茄幼苗期至结果期。灌溉、施肥次数及用量按照常规园区常规管理方式,本试验不做特殊处理。

1.2 试验方法

为较客观地反映出番茄平均长势,减少温室内不同区域环境参数间的差别影响,本试验安装信息监测设备 4 套,分别编号 1~4 号,环境参数和长势参数均采用 4 套设备上各传感器的平均值。1~4 号设备间距 30 m,1 号、4 号设备距离温室侧墙 20 m,南北方向均位于温室中间位置。每套设备配套空气温度、空气相对湿度、光照强度、二氧化碳浓度、土壤温度、土壤水分、番茄茎直径微变化、果实直径微变化和叶面温度共 9 种信息参数监测传感器,采集间隔均设置为 30 min,采集终端与远程管理云平台实时通讯,数据保存在云平台数据库。

在每套信息监测设备旁边选择具代表性的试验

番茄植株 1 株,安装茎直径微变化传感器、叶面温度传感器和果实直径微变化传感器,空气温度传感器、空气相对湿度传感器、光照强度和二氧化碳浓度传感器安装高度为番茄株高的 2/3 处,随作物长势情况调整,且避免光照传感器被植株遮挡。土壤温度、土壤水分传感器埋入地表以下 10 cm 处。

1.3 试验设计

选用试验温室中标记的番茄植株作为试验对象,数据分析和建模分为幼苗期和结果期 2 部分进行,研究环境参数对不同生长期番茄植株的影响。

幼苗期番茄茎直径微变化与环境参数的关系研究通过空气温度传感器、空气相对湿度传感器、CO₂ 浓度传感器、光照强度传感器、土壤温度传感器、土壤水分传感器以及茎直径微变化传感器来获取相应的温室环境参数和番茄茎直径的变化情况。试验数据取自 2018-05-28—06-15 共 19 d,每次采集的数据包为 7 种传感器监测数据值,剔除上传异常后的有效数据总量为 858×7。需要说明的是,本试验设计初包括土壤盐分监测传感器,由于其工作原理需要土壤水分达到一定条件时才能够测量土壤盐分信息,此次试验实际采集到的数据具有不稳定性,经判定无分析价值,因此没有对土壤盐分参数进行分析,下同。

结果期番茄本体长势参数与环境参数的关系研究通过空气温度传感器、空气相对湿度传感器、光照强度传感器、CO₂ 浓度传感器、土壤温度传感器、土壤水分传感器以及茎直径微变化变化、叶面温度和果实直径微变化传感器来分析评价番茄结果到成熟的一个生长周期中不同环境参数的影响程度,并建立番茄果实直径微变化预测模型。试验分析数据取自 2018-06-28—07-23 共 26 d,每次采集的数据包为 9 种传感器监测数据值,其中 07-01—04、07-09、07-10 数据部分缺失,剔除上传异常后的有效数据总量为 893×9。

1.4 数据处理与建模检验方法

1.4.1 数据处理

为解决作物长势和环境信息采集传感器在采集过程中会产生的高斯噪声,采用数字滤波处理采集到的原始数据,减少噪声对参数数据的影响,本研究采用平滑降噪方法中的厢车平均法校正数据。

不同环境和作物长势参数具有不同的量纲和单位,例如光照强度以千位数量级的 lx 为单位,温度以十位数量级的摄氏度为单位,会影响到数据分析

结果的准确性,直接使用原始数据,会出现大数掩盖小数,影响数据分析结果准确性。各参数数据均通过线性函数归一化消除不同参数之间的量纲差异,各参数经过数据归一化处理后处于同一数量级,适合进行对比评价。

归一化参数数据采用式(1)计算:

$$X_{st} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X_{st} 为经过归一化的各参数数据; X 为采集的各参数数据; X_{\min} 、 X_{\max} 分别为各参数原始数据集的最小值和最大值。

本研究采用偏最小二乘回归方法进行建模。试验中采集的数据具有多重相关性,变量个数较多,采用偏最小二乘回归方法,可有效减轻危害参数估计,减小模型误差,保证模型的稳定性。假设本试验 n 次标准化观测矩阵的因变量组有 m 个,自变量组有 p 个。观测矩阵采用式(2)和式(3)转化为特征向量格式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP} + \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{UQ} + \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: \mathbf{T} 和 \mathbf{U} 为特征因子矩阵; \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 均为载荷阵; \mathbf{E} 和 \mathbf{F} 均为残差阵。

根据特征向量的相关性,依据 PLS 法,将观测矩阵分解 \mathbf{Y} 和 \mathbf{X} ,采用式(4)建立各参数回归模型:

$$\mathbf{U} = \mathbf{TD} + \mathbf{E}_d \quad (4)$$

式中: \mathbf{E}_d 为随机误差阵; \mathbf{D} 为角回归系数阵。

对于新样本,如果各环境参数向量为 x ,则番茄果实直径采用式(5)计算:

$$y = x(\mathbf{UX})' \mathbf{DQ} \quad (5)$$

在 Matlab 2014a 平台上,用所有样本训练模型时,训练集中部分不明显的异常数据,会影响模型预测效果。采取将每个训练样本带入模型并得出预测结果,计算其均方根误差(RMSE),异常样本的 RMSE 会与大多数样本有差异。RMSE 服从 $F(1, n-1)$ 分布,计算所有样本 F 值的累积概率,阈值设置为 98%,将累积概率 > 98% 的样本视为异常予以剔除。

1.4.2 回归模型预测效果检验方法

在番茄果实直径微变化预测模型验证中,需要利用相关系数来评估预测模型的精确性。假设有 m 个果实直径数据样本,则 m 个样本的真实数值和预测数值的相关系数计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (8)$$

式中： x_1, x_2, \dots, x_m 为实际测量值； y_1, y_2, \dots, y_m 为回归模型预测值； \bar{x} 为 x_1, x_2, \dots, x_m 的平均值； \bar{y} 为 y_1, y_2, \dots, y_m 的平均值。

2 结果与分析

2.1 幼苗期番茄茎直径微变化与环境参数的关系

本研究采用偏最小二乘回归分析法建立了环境参数对番茄茎直径微变的影响模型，环境参数对番茄幼苗期茎直径微变化的影响模型中，空气温度、空气相对湿度、CO₂ 浓度、光照强度、土壤温度和土壤

水分对应的回归系数分别为 1.085 7、1.167 3、0.065 7、0.008 5、0.214 7、-0.243 2。回归系数值越大，表明该环境参数的影响程度越大，对茎直径微变的作用效果越强，从数学角度上表示当其它影响参数保持不变时，该影响参数变化一个单位时茎直径的变化范围；回归系数为负值时，表明该因素与茎直径微变化的关系为负相关。试验中 6 种环境参数对茎直径微变化的影响程度为：空气相对湿度 > 空气温度 > 土壤水分 > 土壤温度 > CO₂ 浓度 > 光照强度。影响植物茎直径变化的主要因素是植物自身的自然生长和茎直径储水状态的变化，其主要受所处的环境因素的影响，包括气象参数和土壤水分。

2.2 结果期番茄本体长势参数与环境参数的关系

研究采用偏最小二乘回归分析法建立了番茄结果期环境参数对番茄茎直径微变化、番茄叶面温度以及果实直径微变化等本体参数的影响模型，回归系数见表 1。

表 1 环境参数对番茄结果期茎直径微变化、叶面温度、果实直径微变化影响模型的回归系数

Table 1 Regression coefficients of model for the effects of environmental factors on stem diameter micro-variation, fruit diameter micro-variation and leaf surface temperature during fruit-bearing period of Tomato

番茄长势参数 Growth indicators of tomatoes	空气温度 Air temperature	空气相对湿度 Relative humidity of air	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	光照强度 Intensity of illumination	土壤温度 Soil temperature	土壤水分 Soil moisture
茎直径微变化 Stem diameter micro-variation	0.305 8	0.862 6	0.182 4	0.409 5	0.562 8	0.380 6
叶面温度 Leaf surface temperature	0.919 6	-0.041 5	0.008 0	0.077 3	0.013 7	-0.039 2
果实直径微变化 Fruit diameter micro-variation	1.171 3	0.867 7	0.277 2	-0.155 6	0.273 4	-0.068 0

番茄结果期茎直径的变化相对于幼苗生长期较小，影响参数的作用相比前期明显减弱，环境参数的重要程度也发生改变。番茄结果期环境参数对茎直径微变化影响作用为：空气相对湿度 > 土壤温度 > 光照强度 > 土壤水分 > 空气温度 > CO₂ 浓度。通过对比得出，无论是幼苗期还是结果期，空气相对湿度对番茄茎直径的生长都起到了比较重要的作用。

番茄结果期叶面温度主要与空气温度、空气相对湿度和光照强度有关。叶温的变化主要取决于植株与周围环境的热量交换，因此空气温度的影响最为重要。空气相对湿度较高时空气中的水分直接接

触叶面也在一定程度上降低叶面温度，因此与空气相对湿度呈负相关。光照增强会导致叶面温度升高，当升高到一定程度后为避免灼伤植物会加快蒸腾作用，蒸腾会加快水分流动，因此增加土壤水分有利于降温，呈负相关状态。综上所述，叶面温度受到空气温度的影响最大，其他环境因素的影响相对较小。

番茄结果期果实直径微变化的环境参数影响程度为：空气温度 > 空气相对湿度 > CO₂ 浓度 > 土壤温度 > 光照强度 > 土壤水分，其中光照强度与土壤水分和果实直径微变化呈负相关关系。果实的生长

是通过光合作用存储有机物来实现的,光照直接影响到了光合作用的强弱,在一定的光照强度内,随着光照强度的增加,光合作用的强度也会相应的增加。本试验中番茄的结果期大多处于夏季时段,白天光照强度和光照时间超过了光的饱和点,破坏了原生质引起叶绿素分解,发生光抑制现象,对番茄生长起了负面作用。当灌溉量过大时,使得植物组织水分达到饱和,气孔被动关闭,CO₂的吸收减弱,光合作用会受到抑制,影响了有机物的存储和果实直径微变化。综上所述,为取得最大生产率,最为重要的是控制空气温度和湿度,其次尽量避免过度灌溉和光照强度过量。

2.3 番茄果实直径预测模型

本试验中环境参数等特征变量数目较少,样本记录数目相对过多。为防止模型出现欠拟合情况,随机选择出共 185 条记录进行模型建立以及测试。其中 143 条记录作为训练集建立预测模型,其余 42 条记录作为测试集进行预测测试。图 1 示出番茄果实直径预测模型训练集和测试集样本分布。其中,训练集的均方根误差(RMSE)为 0.30 左右,相关系数达到 0.92,说明拟合状况良好。测试集的 RMSE 在 0.45 左右,相关系数达到 0.88,说明模型能够有效完成果实直径情况的预测。

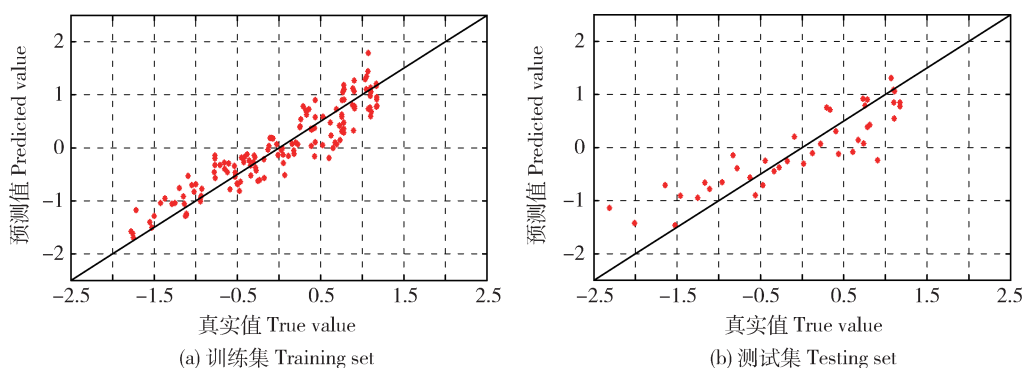


图 1 番茄果实直径预测模型训练集和测试集样本分布

Fig. 1 Sample distribution map of training set (a) and testing set (b) of tomato fruit diameter prediction model

2.4 温室环境参数合理控制范围

在本试验条件下根据采集到的各环境参数数据及模型回归系数的反馈结果能够综合得到一个合理的控制范围,当环境参数保持在此范围内时能够有效促进植株生长和果实发育,超出这个范围时会在一定程度上产生抑制作用。经过分析得到的番茄幼

苗期至结果期环境参数的合理控制范围如表 2 所示。在结果期番茄不同部位对温室中的环境参数的需求程度不同,为了同时满足茎秆生长、避免叶面温度过高和果实直径微变化共同的要求。在番茄的生长期中保持上述的控制范围,可使得番茄的整体生长处于一个较为理想的环境。

表 2 番茄幼苗期和结果期温室环境参数合理控制范围

Table 2 Reasonable control range of environmental parameters in greenhouse during seedling stage and fruiting stage of Tomato

生长阶段 Growth stage	空气温度 $T_a/^\circ\text{C}$ Air temperature	空气相对湿度 RH/% Relative humidity of air	$c(\text{CO}_2)/$ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) CO ₂ concentration	光照强度 I/klx Intensity of illumination	土壤温度 $T_s/^\circ\text{C}$ Soil temperature	土壤含水率 $w/\%$ Soil moisture
幼苗期 Seedling stage	$23 \leq T_a \leq 32$	$24 \leq \text{RH} \leq 38$	$750 \leq c(\text{CO}_2) \leq 880$	$21.6 \leq I \leq 69.7$	$23 \leq T_s \leq 27$	$7 \leq w \leq 12$
结果期 Fruiting stage	$25 \leq T_a \leq 35$	$42 \leq \text{RH} \leq 56$	$760 \leq c(\text{CO}_2) \leq 1\ 000$	$26.1 \leq I \leq 57.6$	$26 \leq T_s \leq 29$	$7 \leq w \leq 13$

3 讨论与结论

本研究以北京市春夏季温室番茄为试验作物,对日光温室中主要环境参数与番茄本体长势参数之间的相关性进行了研究,从应用角度看,本研究提出的分析方法具有较高的操作性。具体结论如下:

1) 番茄幼苗期茎直径微变化的最主要影响参数为空气相对湿度,结果期茎直径微变化、叶面温度、果实直径微变化最主要影响参数分别为空气相对湿度、空气温度和空气湿度,可以得出不同环境参数在不同时期对作物长势影响程度有大小。但是实际生产中环境变化较多,不同参数之间关系复杂,数据关联简单化有利于指导实际应用。

2) 番茄果实直径预测模型中,训练集 RMSE 为 0.30,相关系数达到 0.92,拟合良好。测试集 RMSE 为 0.45,相关系数为 0.88,说明模型在该试验条件下能够有效完成果实直径情况的预测。

3) 番茄幼苗期和结果期温室环境参数合理控制范围根据实际生产管理和监测数据分析得到,可为温室智能化调控技术应用提供参考。

采集容易监测的主要环境参数和作物长势参数并建立模型,可确定不同时期各环境参数对作物长势的影响程度,果实直径微变化预测模型可为预测产量和长势提供理论依据,温室中环境参数合理控制范围为环境调控提供了生产调控安全底线。本研究提出的数据分析方法,具有较好的实际操作意义,可为下一步环境调控设备由自动化走向智能化提供理论依据。

参考文献 References

- [1] 葛文杰,赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J]. 农业机械学报,2014,45(7):222-230,277
Ge W J,Zhao C J. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 222-230, 277 (in Chinese)
- [2] 阎晓军,王维瑞,梁建平. 北京市设施农业物联网应用模式构建[J]. 农业工程学报,2012,28(4):149-154
Yan X J,Wang W R,Liang J P. Application mode construction of internet of things (IOT) for facility agriculture in Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(4):149-154 (in Chinese)
- [3] 李瑾,郭美荣,高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报,2015,31(S2):200-209

- Li J,Guo M R,Gao L L. Application and innovation strategy of agricultural internet of things[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S2): 200-209 (in Chinese)
- [4] 李道亮,杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(1):1-20
Li D L,Yang H. State-of-the-art review for internet of things in agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(1):1-20 (in Chinese)
- [5] 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感器研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(10):216-226
He Y,Nie P C,Liu F. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10):216-226 (in Chinese)
- [6] 林禄,汤响,闫万丽,张纪涛,籍增顺. 基于茎直径变化的精准灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(5):1-13
Lin L,Tang Y,Yan W L,Zhang J T, Ji Z S. Overview of precise irrigation scheduling based on stem diameter variations [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(5):1-13 (in Chinese)
- [7] 齐飞,李恺,李邵,何芬,周新群. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报,2019,35(2):183-195
Qi F,Li K,Li S, He F,Zhou X Q. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019,35(2):183-195 (in Chinese)
- [8] Naor A. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards[M]. In: *Horticultural Reviews*. Oxford: John Wiley & Sons, Inc, 2010:111-165
- [9] Velez J E, Intrigliolo D S, Castel J R. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage [J]. *Agricultural Water Management*, 2007,90(3):197-204
- [10] 高峰,俞立,张文安,卢尚琼,于莉洁,徐青香. 基于茎直径变化的无线传感器网络作物精量灌溉系统[J]. 农业工程学报, 2008,24(11):7-12
Gao F, Yu L, Zhang W A, Lu S Q, Yu L J, Xu Q X. Preliminary study on crop precision irrigation system based on wireless sensor networks for stem diameter microvariation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008,24(11):7-12 (in Chinese)
- [11] 孟兆江,段爱旺,刘祖贵,张寄阳. 根据植株茎直径变化诊断作物水分状况研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(2):30-33
Meng Z J, Duan A W, Liu Z G, Zhang J Y. Advances on diagnosis of crop moisture content from changes in stem diameters of plants [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005,21(2):30-33 (in Chinese)
- [12] 张寄阳,段爱旺,孟兆江,刘祖贵. 茎直径微变化诊断作物水分技术的发展及应用[J]. 云南农业大学学报,2006,21(3):324-328
Zhang J Y, Duan A W, Meng Z J, Liu Z G. The development

- and application of diagnosis methods on crop water status based on stem diameter microvariation[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2006, 21(3): 324-328 (in Chinese)
- [13] 雷水玲, 孙忠富, 雷廷武. 温室内作物茎秆直径变化对基质含水率的响应[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 116-119
- Lei S L, Sun Z F, Lei T W. Response of stem diameter of vegetable crops to soil moisture in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 116-119 (in Chinese)
- [14] 胡笑涛, 王振昌, 马黎华. 番茄果实及茎秆微变化对分根区交替灌溉的响应[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 87-95
- Hu X T, Wang Z C, Ma L H. Effect of alternate partial root-zone irrigation on fruit and stem diameter of tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 87-95 (in Chinese)
- [15] 王晓森, 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵. 基于茎直径变化监测番茄水分状况的机理与方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 107-113
- Wang X S, Meng Z J, Duan A W, Liu Z G. Mechanism and methodology for monitoring tomato water content based on stem diameter variation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 107-113 (in Chinese)
- [16] 王晓森, 刘祖贵, 刘浩, 杨慎骄, 张笑培, 孟兆江. 番茄茎直径MDS的通径分析与数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(8): 187-192
- Wang X S, Liu Z G, Liu H, Yang S J, Zhang X P, Meng Z J. Path analysis and numerical simulation of MDS of tomato stem diameter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(8): 187-192 (in Chinese)
- [17] 员玉良, 盛文溢. 基于主成分回归的茎直径动态变化预测方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 306-314
- Yun Y L, Sheng W Y. Prediction of stem diameter variations based on principal component regression[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 306-314 (in Chinese)
- [18] 员玉良, 程强, Lutz Damerow, 孙宇瑞. 基于茎直径和茎流复合测量的植物根压无损观测方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 290-295
- Yun Y L, Cheng Q, Lutz D, Sun Y R. Non-destructive observation of plant root pressure based on combined measurement of stem diameter and sap flow[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 290-295 (in Chinese)
- [19] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 刘祖贵, 梁媛媛. 温室滴灌条件下番茄植株茎流变化规律试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 77-82
- Liu H, Sun J S, Duan A W, Liu Z G, Liang Y Y. Experiments on variation of tomato sap flow under drip irrigation conditions in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 77-82 (in Chinese)
- [20] 杨丽丽, 王一鸣, 董乔雪. 温室番茄果实生长模型的建立与实现[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(25): 197-202
- Yang L L, Wang Y M, Dong Q X. Fruit growth modeling and realization for greenhouse tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(25): 197-202 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春