

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.034

番茄茎直径 MDS 的通径分析与数值模拟^{*}

王晓森 刘祖贵 刘浩 杨慎骄 张笑培 孟兆江

(中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453003)

【摘要】 以春夏季温室番茄为实验材料, 研究充分灌溉条件下的茎直径变化指标日最大收缩量(MDS)与气象因子(水面蒸发量 E_w 、日最高气温 T_{max} 、日均气温 T_m 、日均空气饱和差 D_{VPDm} 、正午空气饱和差 D_{VPDmd} 、日总辐射 R_s 和日辐射峰值 R_{max})的相关性。结果表明, R_{max} 、 D_{VPDm} 和 E_w 与 MDS 的直接通径系数为正, R_{max} 的直接通径系数最高, 其次为 D_{VPDm} , 二者与 MDS 的相关性达显著水平, 但 E_w 与 MDS 的相关性未达显著水平, 表明 R_{max} 和 D_{VPDm} 为决策变量, 对温室番茄茎直径变化起直接作用。而 T_{max} 、 T_m 、 D_{VPDmd} 、 R_s 与 MDS 的直接通径系数为负, 但各自总作用又都为正, 表明它们主要通过 R_{max} 和 D_{VPDm} 对番茄茎直径变化起间接作用。据此建立了 MDS 与 R_{max} 和 D_{VPDm} 的模拟方程, 经检验此方程达显著水平, 预测值能够准确地反映出 MDS 实测数值的变化。

关键词: 番茄 茎直径变化 MDS 通径分析

中图分类号: S274.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)08-0187-06

Path Analysis and Numerical Simulation of MDS of Tomato Stem Diameter

Wang Xiaosen Liu Zugui Liu Hao Yang Shenjiao Zhang Xiaopei Meng Zhaojiang

(Key Laboratory for Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

Abstract

Taking tomato planted in plots in spring summer greenhouse as experiment material, the correlations between maximum daily shrinkage (MDS) in tomato stem diameter and meteorological factors such as water surface evaporation E_w , daily maximum temperature T_{max} , daily average temperature T_m , daily average vapor pressure deficit D_{VPDm} , midday vapor pressure deficit D_{VPDmd} , daily total radiation R_s and daily maximum radiation R_{max} were studied by using path analysis method. The results indicated that the direct path coefficients between R_{max} , D_{VPDm} , E_w and MDS were all positive. The R_{max} 's coefficient is the highest and the D_{VPDm} 's coefficient is the second. The correlations between MDS and R_{max} , D_{VPDm} were significant, but the correlation between MDS and E_w was not significant. Therefore, the R_{max} and D_{VPDm} were decision variables which controlled tomato stem diameter variation directly in greenhouse. In addition, the direct path coefficients between T_{max} , T_m , D_{VPDmd} , R_s and MDS were all negative, but their sum coefficients between direct and indirect path coefficients were all positive. T_{max} , T_m , D_{VPDmd} , R_s had indirect influence on tomato stem diameter variation through R_{max} and D_{VPDm} . Based on this conclusion, the simulating equation between MDS and R_{max} , D_{VPDm} was established which was significant through test, and the calculated values of MDS could reflect its observed values exactly.

Key words Tomato, Stem diameter variation, MDS, Path analysis

收稿日期: 2011-10-27 修回日期: 2011-11-05

^{*} 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(2012ZL064)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100509-06)

作者简介: 王晓森, 助理研究员, 主要从事作物节水灌溉理论与高效用水技术研究, E-mail: ngswxss@126.com

通讯作者: 孟兆江, 研究员, 主要从事作物水分生理与高效用水研究, E-mail: zjmeng5@tom.com

引言

作物茎直径微变化是指作物茎秆白天蒸腾失水收缩,夜晚根系吸水膨胀,由此导致的植株茎秆直径上的微小变化。作物茎直径微变化与作物体内的水分变化密切相关,同时它还能反映出外界蒸腾条件及土壤供水能力的变化^[1-9],因此,研究茎直径微变化对于综合研究气象因子、土壤含水率对作物水分状况的影响很有帮助。目前评价茎直径变化的指标有:日最大收缩量(maximum daily shrinkage,简称MDS)、日生长量(daily increase,简称DI)、恢复时间(recovering time,简称RT)等,其中以MDS的应用较为普遍。

以往研究成果表明,MDS虽然能够很好地表现出作物体内水分状况及土壤供水能力的变化,但其数值极易受气象因素的干扰。Gallardo等研究发现,对于春夏季温室番茄来讲,MDS对土壤水分胁迫的反应比叶水势要灵敏,但数值容易受到番茄生育期、气象因素的影响^[10]。王晓森等研究发现,温室番茄MDS能够反映出土壤水分变化,但同一土壤水分下番茄MDS在不同气象条件的作用下数值不同^[11]。此外,影响MDS数值的气象因素较多,它们之间存在很高的相关性,通径分析为选出主要成分提供了很好的方法。张平等用通径分析方法对充分灌溉下的桃树MDS与气象因子相关性进行了分析,找出了影响桃树MDS数值的最主要的气象因素并进行了数值拟合^[12]。李晓彬等也用通径分析方法对充分灌溉下梨枣树MDS与气象因子相关性进行了分析^[13]。但他们的研究主要是在室外果树上进行,针对温室内蔬菜的相关研究未见报道。

本文对温室内充分灌溉条件下的番茄MDS与气象因子相关性进行研究,找出影响温室番茄MDS变化的主要气象因子,并通过回归分析建立MDS与气象因子间的数值模拟方程,为基于茎直径变化监测作物水分状况的技术提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验地基本情况与实验设计

实验于2009年5月在中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点开放实验室日光温室中进行,实验地位于35°19'N,113°53'E,海拔73.2 m,多年平均气温14.1℃,无霜期210 d,日照时数2398.8 h。实验所用温室东西走向,长40 m、宽8.5 m,坐北朝南,覆盖无滴聚乙烯薄膜。实验地土质为砂壤土,耕层土壤体积质量为1.38 g/cm³,田间持水率为24%(质量含水率),地下水埋深大于5 m。

实验以小区方式进行。番茄品种为金顶一号,于3月中旬移栽,每小区种植双行,行距45 cm,株距30 cm,移栽前施干鸡粪、三元复合肥、尿素作为底肥,移栽后立即灌活苗水。小区供水方式为滴灌,灌水量用水表计量,计划湿润层40 cm。番茄充分灌溉,灌水下限为田间持水率的80%,即当土壤水分下降至田间持水率的80%时灌水至田间持水率,重复3次。选取番茄5月14~26日花果期实验数据进行分析,统计分析由专用的统计软件DPS完成。

1.2 观测方法

茎直径变化测定:以DD型茎直径变化传感器与DL2e型数据采集器相连测定番茄植株茎直径微变化,每10 min自动记录1次茎直径变化数据,探头安装高度距地面15 cm。探头安装松紧的初始值控制在1000 Ω,由于番茄茎直径的自然生长作用其值会增加,当所测探头电阻超过1500 Ω时将探头调松至1000 Ω以利于番茄茎秆的自然生长。

日最大收缩量测定:由一天中最大的茎直径减去最小茎直径获得,单位为mm。

土壤含水率测定:土壤水分控制以取土烘干法为主,辅以TDR进行。其中取土烘干法每隔20 cm取土1次,测定深度为1 m。

气象因子指标测定:由温室内安装的自动气象观测站获得,主要有气温、相对湿度、辐射3项。其中空气饱和差(VPD)由修正的彭曼公式计算取得,具体计算公式为

$$D_{\text{VPD}} = (1 - R_H/100)e_a \quad (1)$$

$$\text{其中 } e_a = 0.6108e^{17.27T/(T+273.3)} \quad (2)$$

式中 D_{VPD} ——空气饱和差,kPa

e_a ——饱和水汽压,kPa T ——气温,℃

R_H ——空气相对湿度,%

水面蒸发量测定:由口径20 cm蒸发皿及精度为0.1 mm的配套量筒量测。

2 通径分析原理

在多个变量的反应系统中,变量之间的相关关系复杂,任意2个变量之间可能都存在相关性,计算2个变量之间的简单相关系数往往不能正确地说明它们之间的关系。而通径分析是在相关分析与回归分析的基础上,将相关系数分解为直接作用系数和间接作用系数,以揭示各因素对因变量的相对重要性,比相关分析和回归分析更准确。

设在 p 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 中,每两个变量之间与因变量 y 之间的简单相关系数可以构成求解通径系数的标准化正规方程,即

$$\begin{cases} r_{11}\rho_1 + r_{12}\rho_2 + \dots + r_{1p}\rho_p = r_{1y} \\ r_{21}\rho_1 + r_{22}\rho_2 + \dots + r_{2p}\rho_p = r_{2y} \\ \vdots \\ r_{p1}\rho_1 + r_{p2}\rho_2 + \dots + r_{pp}\rho_p = r_{py} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_p$ 为直接通径系数。直接通径系数可以通过求上述相关阵的逆矩阵计算获得。假设 c 为相关矩阵 r 的逆矩阵, 那么直接通径系数 $\rho_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 为

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \dots & c_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & c_{p3} & \dots & c_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1y} \\ r_{2y} \\ \vdots \\ r_{py} \end{bmatrix} \quad (4)$$

间接通径系数可以通过相关系数和直接通径系数的乘积来计算^[14]。

3 结果与分析

3.1 气象因子对番茄茎直径 MDS 影响的通径分析

影响番茄茎直径微变化的外部因素主要有土壤供水水平和蒸腾条件, 而蒸腾条件主要与当时的气象因子有关。本实验在充分供水条件下进行, 目的是尽量减少因土壤供水能力下降而影响番茄茎直径

变化, 集中考察单一气象因素对番茄茎直径变化的影响, 以便找出主导温室番茄茎直径变化的气象因子。通过实验分析及参考以往有关文献, 现总结出 7 项气象指标作为原因变量: 水面蒸发量 E_w 、日最高气温 T_{max} 、日均气温 T_m 、日均空气饱和差 D_{VPDm} 、正午空气饱和差 D_{VPDmd} 、日总辐射 R_s 和日辐射峰值 R_{max} , 分别定义为 $X_1 \sim X_7$ 。其中 T_{max} 一般出现在 14:00 ~ 15:00, R_{max} 一般出现在 13:00, D_{VPDmd} 选用正午 12:00 温室内气象数据计算取得。将 MDS 作为效果变量, 定义为 Y 。依据通径分析原理求解各变量相关系数及直接通径系数如图 1 所示, 图中 E 为误差项。变量相关性检验如表 1 所示, 基于各变量相关系数及直接通径系数求解的间接通径系数、间接作用总和及总作用如表 2 所示。

从通径分析结果中可以得出: 对于春、夏季温室番茄, 因变量 X_7, X_4, X_1 对 MDS 的直接通径系数均为正, 且排名前三, 尤其是 X_7 的直接通径系数达到了 2.729 7, 表明了辐射作为植物蒸腾作用的主要动力对植物器官体积的微变化起主导作用。其次是 X_4 , 它所反映的是温室内水汽浓度梯度。 X_4 越大, 温室内空气湿度越低, 水汽梯度越大, 水汽扩散速率越高, 植物蒸腾量越多。三者与 MDS 的相关性分析表

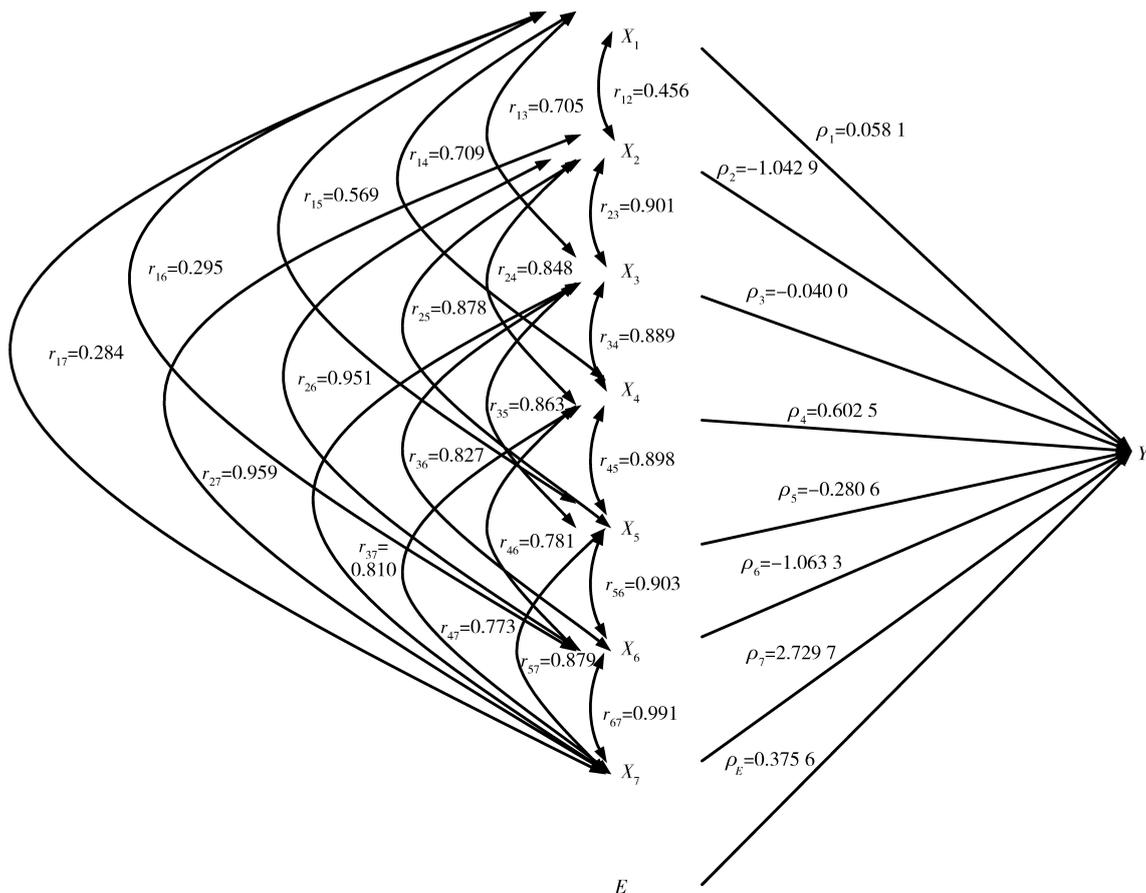


图 1 气象因子与 MDS 通径分析图

Fig. 1 Path analysis chart between meteorological factors and MDS

明, X_7 与 MDS 可以达到极显著正相关水平 ($P < 0.01$), X_4 与 MDS 亦可达到显著正相关水平 ($P < 0.05$), 而 X_1 与 MDS 的相关性未达显著水平。从统计学意义上讲, X_7 和 X_4 为春夏季温室番茄茎直径 MDS 的决策变量, 对其产生直接作用; 而其余变量 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 直接通径系数为负, 但它们的间接作用总和及总作用又都为正, 说明这些变量主要通过 X_7 和 X_4 对 MDS 产生作用, 对番茄茎直径 MDS 起间接作用。

表 1 气象因子各变量相关性 t 检验得到的 P 值

Tab.1 Correlation tests among meteorological factors

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	0	0.101 0	0.004 8	0.004 5	0.033 6	0.304 5	0.325 2
X_2		0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
X_3			0	0.000 1	0.000 1	0.000 3	0.000 4
X_4				0	0.000 1	0.001 0	0.001 2
X_5					0	0.000 1	0.000 1
X_6						0	0.000 1
X_7							0

此外, 剩余项直接通径系数为 0.375 6, 表明除上述已知原因变量之外, 还有一些未考虑进来的原因变量影响番茄茎直径 MDS 数值。如温室内光温条件变化所引起的番茄植株内部生理的变化、番茄茎秆自然生长作用、根区土壤供水能力变化、系统误差等。这些因素在今后的实验中也要充分考虑。

3.2 番茄茎直径 MDS 的数值模拟

经过上述通径分析可以得知, 原因变量 X_7 、 X_4 为主导温室番茄茎直径微变化的重要气象因子, 由此建立 X_7 、 X_4 与 MDS 的线性回归方程为

$$M_{MDS} = 0.000\ 257R_{max} + 0.030\ 240D_{VPDm} - 0.004\ 620 \quad (5)$$

式中 R_{max} ——日辐射峰值, W/m^2

D_{VPDm} ——日均空气饱和差, kPa

M_{MDS} ——日最大收缩量, mm

经检验此回归方程达极显著水平 ($P < 0.01$)。应用该方程对实验期间 MDS 数值进行模拟, 实测值与预测值比较如图 2 所示。实验期间 14 日雨, 21 日阴天转多云, 其余时间天气晴朗。从图中可以看出, 除 18 日灌水及 24 日土壤含水率低于灌水下限时误差较大外, 其余时间该模型还是能够准确地反映出 MDS 数值的变化, 预测值残差分析如图 3 所示。据实验室以往研究表明, 番茄 MDS 数值随水分胁迫的加剧逐渐变大, 在实际应用过程中可以将实测值与充分灌溉条件下的预测值进行比较来确定作物是否需要灌溉。

表 2 气象因素对 MDS 影响的通径分析

Tab.2 Path analysis result of effects of meteorological factors on MDS

通径	X_i 对 Y 直接作用值	X_i 通过 X_j 对 Y 的间接作用			间接作用值总和	X_i 对 Y 的总作用值
		i	j	作用值		
X_1 对 Y	0.058 1	1	2	-0.475 8	0.224 4	0.282 5
		1	3	-0.028 2		
		1	4	0.427 5		
		1	5	-0.159 7		
		1	6	-0.314 6		
		1	7	0.775 2		
		2	1	0.026 5		
X_2 对 Y	-1.042 9	2	3	-0.036 0	1.861 7	0.818 8
		2	4	0.511 3		
		2	5	-0.246 5		
		2	6	-1.012 0		
		2	7	2.618 4		
		3	1	0.040 9		
		3	2	-0.939 6		
X_3 对 Y	-0.040 0	3	4	0.536 0	0.728 6	0.688 6
		3	5	-0.242 4		
		3	6	-0.879 6		
		3	7	2.213 3		
		4	1	0.041 2		
		4	2	-0.885 0		
		4	3	-0.035 6		
X_4 对 Y	0.602 5	4	5	-0.252 1	0.149 7	0.752 2
		4	6	-0.830 7		
		4	7	2.111 9		
		5	1	0.033 0		
		5	2	-0.916 0		
		5	3	-0.034 5		
		5	4	0.541 4		
X_5 对 Y	-0.280 6	5	6	-0.960 4	1.064 1	0.783 5
		5	7	2.400 6		
		6	1	0.017 2		
		6	2	-0.992 6		
		6	3	-0.033 1		
		6	4	0.470 7		
		6	5	-0.253 5		
X_6 对 Y	-1.063 3	6	7	2.707 2	1.915 9	0.852 6
		7	1	0.016 5		
		7	2	-1.000 4		
		7	3	-0.302 4		
		7	4	0.466 2		
		7	5	-0.246 8		
		7	6	-1.054 5		
E	0.375 6				0.375 6	

注: X_j 是 $X_1 \sim X_7$ 中不同于 X_i 的变量。

4 讨论

依靠茎直径微变化监测作物水分状况虽然具有

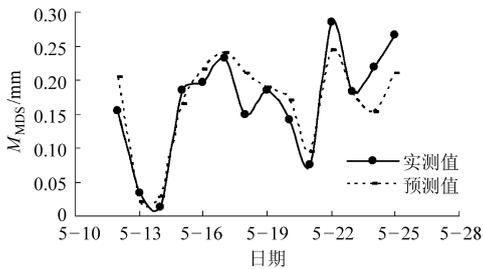


图 2 实测值与预测值分析

Fig. 2 Analysis between calculated values and observed values

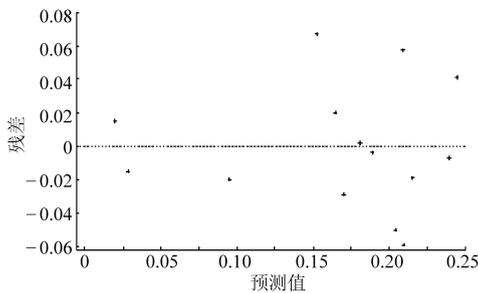


图 3 残差分析

Fig. 3 Residual analysis of calculated values

方法简单、对植株没有破坏性、可以连续监测记录所测结果等优点,但其指标容易受到气象因素的干扰。本实验用通径分析法对充分灌溉条件下番茄的 MDS 与气象因子相关性进行了研究,结果显示日辐射峰值 R_{\max} 和日均空气饱和差 D_{VPDm} 为温室番茄茎

直径 MDS 的决策变量。此结论与之前李晓彬等得出太阳净辐射 R_s 和 D_{VPDm} 为充分灌溉条件下梨枣树 MDS 的决策变量^[13]类似,但李晓彬等的研究未将 R_{\max} 列入因变量中。本研究显示, R_{\max} 对番茄茎直径 MDS 的直接作用最大,而 R_s 主要通过 R_{\max} 对番茄茎直径 MDS 产生间接作用。通过回归分析建立了包含 R_{\max} 和 D_{VPDm} 的 MDS 回归方程,经数值分析发现该方程可以准确地反映出番茄 MDS 的数值变化。国外有专家曾提出用 MDS 实测值与无水分亏缺条件下 MDS 预测值相比的办法来判断杏树是否受到水分胁迫,临界值为 1,即比值大于 1 的时候表明杏树正在遭受水分胁迫^[15]。此方法亦可用于番茄,但考虑到番茄植株 MDS 存在很大的变异性,在具体使用时可以通过测定土壤含水率的方法作一个标定,然后确定出适宜的临界数值。此外, Gallardo 等曾指出在番茄快速生长期日生长量比 MDS 更能灵敏地反映出土壤水分变化,而 MDS 指标适用于番茄茎秆成熟期^[10]。

5 结束语

本研究以温室番茄为实验材料,运用统计分析的方法探讨了 MDS 与气象因子的相关性,并得出了影响番茄茎直径变化的主要气象因子,对基于茎直径变化监测作物水分状况有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 孟兆江,段爱旺,刘祖贵,等. 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 Zhaojiang, Duan Aiwang, Liu Zugui, et al. Advances on diagnosis of crop moisture content from changes in stem diameters of plants[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(2):30~33. (in Chinese)
- Molz F J, Klepper B. On the mechanism of water-stress-induced stem deformation[J]. Agronomy Journal, 1973,65(2):304~306.
- So H B. An analysis of the relationship between stem diameter and leaf water potentials[J]. Agronomy Journal,1979,71(4):675~679.
- Namken L N, Bartholic J F, Runkles J R. Monitoring cotton plant stem radius as indication of water stress[J]. Agronomy Journal,1969,61(6):891~893.
- Klepper B, Douglas Browning V, Taylor H M. Stem diameter in relation to plant water status[J]. Plant Physical, 1971,48:683~685.
- 余克顺,李绍华,孟昭清,等. 水分胁迫条件下几种果树茎干直径微变化规律的研究[J]. 果树科学,1999,16(2):86~91.
Yu Keshun, Li Shaohua, Meng Zhaoqing, et al. Stem diameter microvariations of four different fruit trees under water stress [J]. Journal of Fruit Science, 1999,16(2):86~91. (in Chinese)
- 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 Shuiling, Sun Zhongfu, Lei Tingwu. Response of stem diameter of vegetable crops to soil moisture in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(7):116~119. (in Chinese)
- Sato N, Hasegawa K. A computer controlled irrigation system for muskmelon using stem diameter sensor [J]. Acta Horticultural 399: Greenhouse Environment Control and Automation, 1995, 399:161~166.
- Ortuno M F, García-Orellana Y, Conejero W, et al. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees[J]. Plant and Soil,2006,279(1~2):229~242.
- Gallardo M, Thompson R B, Valdez L C. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato [J]. Irrigation Science, 2006,24(4):241~255.
- 王晓森,孟兆江,段爱旺,等. 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 Xiaosen, Meng Zhaojiang, Duan Aiwang, et al. Mechanism and methodology for monitoring tomato water content based on stem diameter variation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 107 ~ 113. (in Chinese)

- 12 张平,汪有科,湛景武,等. 充分灌溉条件下桃树茎直径最大日收缩量模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 38 ~ 43.
Zhang Ping, Wang Youke, Zhan Jingwu, et al. Simulation of stem diameter maximum daily shrinkage for peach under full irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 38 ~ 43. (in Chinese)
- 13 李晓彬,汪有科,张平. 充分灌溉下梨枣树茎直径动态变化及 MDS 影响因子的通径分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 88 ~ 93.
Li Xiaobin, Wang Youke, Zhang Ping. Dynamic changes of pear jujube stem diameter and path analysis of MDS influencing factors with full irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 88 ~ 93. (in Chinese)
- 14 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 15 Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors[J]. Irrigation Science, 2004, 23(1): 11 ~ 19.

(上接第 163 页)

- 7 Emma C, Elena V, Claudio C. Physico chemical characterization and stability of inulin gels[J]. European Food Research and Technology, 2007, 225(1): 85 ~ 94.
- 8 彭桂兰,陈晓光,吴文福,等. 玉米淀粉水分吸附等温线的研究及模型建立[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 176 ~ 179.
Peng Guilun, Chen Xiaoguang, Wu Wenfu, et al. Water-sorption isotherms for corn starch and their model developments[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 176 ~ 179. (in Chinese)
- 9 霍树春,李锋,李建科,等. 不同比表面积山梨醇粉体的吸湿性实验研究[J]. 食品科学, 2007, 29(9): 83 ~ 85.
Huo Shuchun, Li Feng, Li Jianke, et al. Study on hygroscopicity of different specific surface area of sorbitol[J]. Food Science, 2007, 29(9): 83 ~ 85. (in Chinese)
- 10 封明艳,许晨,易瑞灶,等. 硫酸氨基葡萄糖吸湿性研究[J]. 中国海洋药物杂志, 2007, 26(6): 1 ~ 4.
Feng Mingyan, Xu Chen, Yi Ruizao, et al. Studies on the hygroscopicity of glucosamine sulfate powder[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2007, 26(6): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 11 丁志平,乔延江. 不同粒径黄连粉体的吸湿性实验研究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2004, 10(3): 5 ~ 7.
Ding Zhiping, Qiao Yanjiang. Study on hygroscopicity of different particle size of rhizome coptides[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2004, 10(3): 5 ~ 7. (in Chinese)
- 12 Sébastien N R, Michel P, Christian F, et al. Effect of water uptake on amorphous inulin properties[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 922 ~ 927.
- 13 Ronkart S, Blecker C, Fournies C, et al. Determination of physical changes of inulin related to sorption isotherms: an X-ray diffraction modulated differential scanning calorimetry and environmental scanning electron microscopy study [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 63(2): 210 ~ 217.
- 14 André I, Putaux J L, Chanzy H, et al. Single crystals of inulin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1996, 18(3): 195 ~ 204.
- 15 Ronkart S N, Paquot M, Blecker C S, et al. Impact of the crystallinity on the physical properties of inulin during water sorption[J]. Food Biophysics, 2009, 4(1): 49 ~ 58.
- 16 Glibowski P, Pikus S. Amorphous and crystal inulin behavior in a water environment[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 635 ~ 639.

(上接第 179 页)

- 12 Wu D, Wu H X, Cai J B, et al. Classifying the species of exopalaemon by using visible and near infrared spectra with uninformative variable elimination and successive projections algorithm[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(6): 423 ~ 427.
- 13 Dantas H A, Galvao R K H, Araujo M C U, et al. A strategy for selecting calibration samples for multivariate modeling[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2004, 72(1): 83 ~ 91.
- 14 罗一帆,郭振飞,朱振宇,等. 近红外光谱测定茶叶中茶多酚和茶多糖的人工神经网络模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1 230 ~ 1 233.
Luo Yifan, Guo Zhenfei, Zhu Zhenyu, et al. Studies on ANN models of determination of tea polyphenol and amylose in tea by near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(8): 1 230 ~ 1 233. (in Chinese)