

基于主成分回归的茎直径动态变化预测方法^{*}

员玉良^{1,2} 盛文溢¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 影响植物茎直径变化的因素有很多,除了植物的自然生长外,气象因子和土壤含水率也是十分重要的因素。以空气温度、相对湿度、气压和光合有效辐射4个温室内的主要气象因子和土壤含水率为观测对象,对处于生长末期的4株温室向日葵样本和2株西红柿样本进行监测试验。以其中一株向日葵样本为对象,对其茎直径变化的影响因素作主成分分析并建立回归模型。将试验样本上的监测数据输入模型,对向日葵样本和西红柿样本的茎直径变化量进行预测,并分别与其各自实测值比较。结果显示,该回归模型对处于生长末期的温室向日葵和西红柿茎直径动态变化有较好的预测,预测值与实测值相关分析的决定系数为0.649~0.782,均方根误差为0.029~0.143。

关键词: 茎直径 动态变化 预测 主成分分析 回归

中图分类号: S24; S161.2⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)01-0306-09

Prediction of Stem Diameter Variations Based on Principal Component Regression

Yun Yuliang^{1,2} Sheng Wenyi¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Among the various factors affecting the variation of plant stem diameter, meteorological conditions and soil water content are very important ones, besides natural growth. Soil water content together with four main meteorological parameters in greenhouse, including air temperature, relative humidity, pressure and photosynthetically active radiation, were selected for observing with four sunflower samples and two tomato samples at late stage of growth. Using part of the data measured from one sunflower sample, the principal component analysis was performed to set up a regression model. Data from sunflower samples and tomato samples were input to the model to predict the stem diameter variations of the sunflower samples and tomato samples and compared with the observed stem diameter variations. Comparison results showed that the regression model had a good prediction for the dynamics of stem diameter variations in sunflowers and tomatoes at late growth stage. The coefficients of determination in correlation analysis were above 0.6 and reached 0.649~0.782, while the root mean square errors were 0.029~0.143.

Key words: Stem diameter Dynamics Prediction Principal component analysis Regression

引言

灌溉决策需要作物水分信息的支持,而叶水势是常用表征作物水分状况的指标之一,但叶水势的

测量费时费力,而且难以实现在线监测^[1-2]。茎直径变化可以很好地反映植物的水分状态,并且测量方便、可在线测量,因此国内外许多学者都尝试通过茎直径变化量来评估植物水分状况,并且在多种植

收稿日期: 2014-03-03 修回日期: 2014-04-07

^{*} 国家科技部国际合作资助项目(2010DFA34670)、中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(2013YJ008)和中德联合研究小组资助项目(GZ494)

作者简介: 员玉良, 博士生, 青岛农业大学讲师, 主要从事土壤水分及植物生理信息采集研究, E-mail: yunyuiliang@cau.edu.cn

物上获得了成功^[3-18]。实际上,茎直径变化是由植物自然生长和茎秆储水分状况变化引起的,但在相对较短时间内茎直径变化主要是因为植物蒸腾作用水分的消耗和土壤吸收水分的不平衡^[19-22],所以茎直径变化与气象条件和土壤水分情况密切相关^[23-26]。

与茎直径变化相比,气象条件和土壤含水率更容易测量,所以构建数学模型来预测茎直径变化成为当前研究热点^[7,27-28]。很多学者通过多元线性回归进行数值预测,但采用多元线性回归自变量要求相互独立,由于气象因子之间的相关性,因此这种方法显然存在问题;李晓彬等^[11]和王晓森等^[15]采用通径分析模型取得了良好的预测效果,不过,通径分析因为需要明确变量间的相互关系以及自变量对因变量的作用程度,所以过程相对复杂。本文在以上研究基础上,提出一种基于主成分回归的茎直径动态变化预测方法。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验共分 2 个阶段。

阶段 1:2012 年 9 月 11—26 日,在德国波恩大学作物科学与资源保护研究所日光温室(6°43'33" E, 50°43'9" N)进行,试验对象为 2 株播种时间相同且处于生长末期的盆栽向日葵样本。向日葵所用花盆容量为 8 L,盆中土壤质地为:沙粒(0.42 mg/mg)、粉粒(0.43 mg/mg)和粘粒(0.15 mg/mg)。图 1 为试验现场。

阶段 2:2013 年 1 月 9 日—3 月 26 日在北京市某温室(116°20'58"E, 40°0'17"N)进行,试验对象分别为 2 株播种时间相同且处于生长末期的盆栽西红

柿样本和 2 株向日葵样本,所用花盆容量为 8 L,土壤质地为沙粒(0.33 mg/mg)、粉粒(0.53 mg/mg)和粘粒(0.14 mg/mg)。

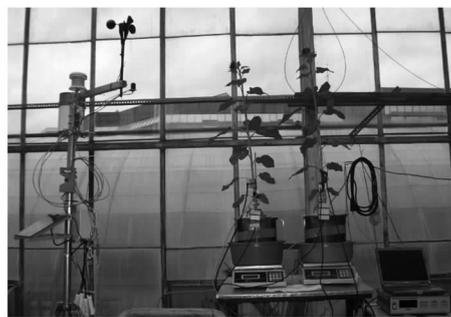


图 1 试验现场

Fig. 1 Experiment site

1.2 观测项目与方法

茎直径变化量:将 LVDT (Linear variable differential transformer) 传感器装在向日葵茎秆离土壤表层 10 cm 左右处,对向日葵茎直径变化进行连续自动采集,采集时间间隔 5 min。

气象因子:由安装于温室内、距离试验向日葵样本 1.5 m 左右的微气象站连续自动采集完成,采集时间间隔 5 min。主要包括空气温度、空气相对湿度、气压、光合有效辐射(PAR)等指标,其中饱和和水汽压差(VPD)可由空气温度和相对湿度计算得到^[16]。

土壤含水率:将土壤水分传感器探针直接插入土壤中,对土壤含水率(SWC)进行连续采集,采集时间间隔 5 min。

茎流:将茎流传感器装于西红柿样本和向日葵样本茎秆的基部、LVDT 传感器下面,采集时间间隔 5 min。

所用传感器的具体信息如表 1 所示。

表 1 传感器信息

Tab. 1 Sensors information

传感器名称	型号	量程	精度	生产厂商
LVDT	GA09	0 ~ 5 mm	0.01 mm	上海极典电子公司
温湿度智能传感器	S-THB-M00x	-40 ~ 75℃; 0 ~ 100%	±0.21℃; ±2.5%	美国 Onset 公司
大气压传感器	S-BPB	660 ~ 1070 mb	±3.0 mb	美国 Onset 公司
光照强度传感器	S-LIB-M003	0 ~ 1 280 W/m ²	±10 W/m ²	美国 Onset 公司
土壤水分传感器	S-SMC-M005	0 ~ 0.55 m ³ /m ³	±0.031 m ³ /m ³	美国 Decagon Devices 公司
茎流传感器	SGB9-WS	-2.5 ~ 2.5 V	±0.33 μV	美国 Dynamax 公司

1.3 试验步骤

试验包括两个步骤:

(1)建模:选取第 1 阶段试验的一株向日葵样本的部分监测数据作主成分分析,并建立以茎直径变化量为目标函数的主成分回归模型。

(2)验模:将所测的 4 株向日葵样本和 2 株西红柿样本所处温室的气象因子和土壤含水率代入所

建立的主成分回归模型,求出茎直径变化量的预测值,并与实测值比较,进行模型验证。

1.4 主成分回归分析原理及方法

主成分分析(Principal component analysis, PCA),又称主分量分析,是将多个变量通过线性变换选出几个重要变量的一种多元统计方法。其基本方法就是通过降维技术,将原来具有一定相关性的

变量,根据贡献大小,重新组合成一组新的、且相互独立的、少数几个能充分反映母体信息的综合指标以替代原来的指标,进而在保证主要信息的前提下,避开变量之间线性相关,便于进一步分析^[29-30]。数学模型为:

假设有 n 个样本,每个样本有 p 个数据,则构成 $n \times p$ 维矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (1)$$

为消除量纲影响,首先对变量进行标准化处理,将矩阵 \mathbf{X} 标准化为 \mathbf{Z} ,其中

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (2)$$

式中 \bar{x}_j ——第 j 个变量的算术平均值

σ_j ——第 j 个变量的标准差

根据以上得到的标准化矩阵 \mathbf{Z} ,求 \mathbf{Z}^T 的相关系数矩阵 \mathbf{R}

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix} \quad (3)$$

计算矩阵 \mathbf{R} 的特征根 λ_i 及其特征向量 \mathbf{a}_i ,并将特征根由大到小排列。 λ_i 越大,方差贡献率越大,对应的主成分反映的信息就越大。第 k 个主成分 F_k 可表示为

$$F_k = a_{1k}Z_1 + a_{2k}Z_2 + \cdots + a_{pk}Z_p \quad (4)$$

求解贡献率并确定主成分个数 m :

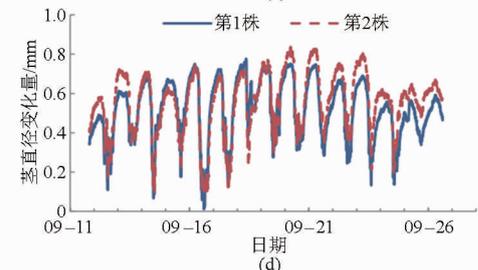
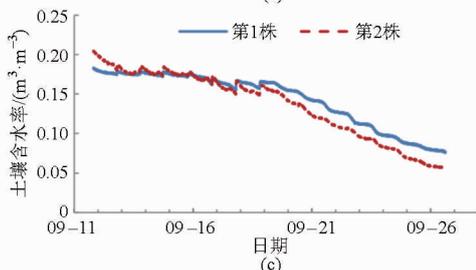
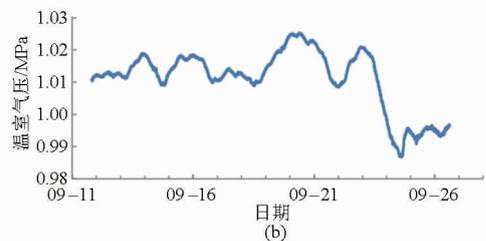
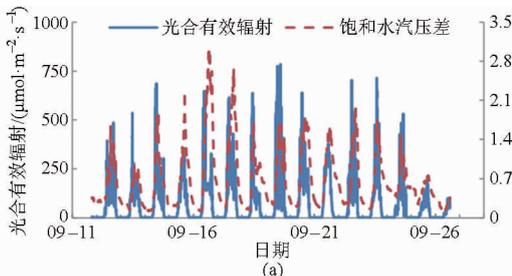


图2 气象因子、土壤含水率及茎直径动态变化

Fig. 2 Dynamics of meteorological factors, soil water contents and stem diameters

第 i 个主成分的贡献率为 $\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100\%$, m 个

主成分的累积贡献率 $\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100\%$ 。

如果累积贡献率大于 80%,则可以选取 m 个因子作主成分。

选取 m 个主成分建立标准化主成分回归方程

$$F = \sum_{i=1}^m B_i F_i \quad (5)$$

B_i 为第 i 个主成分 F_i 的标准化偏回归系数。

根据 $F = \frac{y - \bar{y}}{\sqrt{Dy}}$ 和 $Z_x = \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{Dx}}$,将标准化的主成分

回归方程还原为原始变量的主成分回归模型

$$y = \sum_{i=1}^m B_i x_i \quad (6)$$

式中 \bar{x} 、 \bar{y} ——样本均值

\sqrt{Dx} 、 \sqrt{Dy} ——样本标准方差

2 结果与分析

2.1 阶段 1 试验结果与分析

2.1.1 气象因子、土壤含水率及茎直径动态变化

如图 2 所示,温室内的光合有效辐射 PAR 和饱和水汽压差 VPD 每天都会发生周期性变化:中午前后,PAR 和 VPD 达到峰值,夜间趋近于零,二者呈现相同的变化趋势。PAR 和 VPD 的幅值与天气情况和空气温度密切相关,一般情况下,天气晴朗、空气温度越高,PAR 和 VPD 的幅值就越大;试验期间温室内的空气压强基本维持在 1 个标准大气压左右,

没有明显的日变化规律, 试验后期随着气温的下降, 气压出现小幅度减小。

图 2c 可以看出建模数据样本采集区间和向日葵样本所处的水分状态区间。2 株向日葵样本的土壤含水率虽然不同, 但每天都随着植物蒸腾作用和土壤水分的蒸散呈逐渐下降趋势。中午期间, 因为向日葵蒸腾作用强烈, 所以这阶段的土壤含水率下降最快。显然, 9 月 11—19 日, 每天对向日葵均进行了一次补水灌溉, 9 月 19 日以后停止补水。

2 株向日葵样本的茎直径呈周期性日变化规律。每天凌晨左右, 茎直径变化量 (SDV) 达到最大值, 中午左右出现最小值, 与 PAR 和 VPD 具有相似的变化趋势, 但方向恰好相反。因为上午随着太阳辐射的增强, 温度逐渐升高, 温室内饱和水汽压差增大, 向日葵蒸腾作用加强, 叶片水势下降, 细胞膨压降低。在水势差的驱动下, 根部从土壤中吸收水分, 由于水分蒸腾和根吸水之间存在时间滞后, 根部吸收的水分来不及供给叶片蒸腾时, 向日葵就会吸收周围组织的水分以满足蒸腾作用需要, 进而造成茎直径收缩; 之后, 随着太阳辐射强度和饱和水汽压差的降低, 蒸腾速率逐渐减小, 叶片水势恢复, 周围组织再次充水分, 茎直径又逐渐增大, 这种周围组织的失水、复水引起了向日葵茎直径的变化^[31-33]。

显然, 中午前后, PAR 和 VPD 达到峰值, 向日葵蒸腾作用最强, 茎秆失水最多, 茎直径收缩最大。从图 2d 可以看出, 由于所处环境和灌溉条件基本一致, 所以 2 株向日葵茎直径动态变化趋势较为相似, 这说明茎直径变化与气象因子和土壤含水率关系密切^[1]。9 月 20 日前, 2 株向日葵样本均有小幅度生长, 试验后期, 茎直径变化量呈小幅度下降, 此时表明, 向日葵样本已经不能从土壤中得到足够的水分来维持正常的蒸腾作用, 出现了水分胁迫, 这是利用茎直径变化量作为灌溉指示的重要依据。

2.1.2 主成分分析及回归模型建立

温室内气象因子主要涉及空气温度 T、空气相对湿度 RH、气压 P、光合有效辐射 PAR 等, 选取其中任一株向日葵样本的观测数据为研究对象, 它们之间的相关分析如表 2 所示。

显然, 光合有效辐射、空气温度和相对湿度之间显著相关。因此, 本文选择主成分分析作为数据分析的主要手段。又因为土壤含水率也是影响茎直径变化的重要因素, 所以选取的向日葵样本 9 月 11—15 日观测到的空气温度、相对湿度、气压、光合有效辐射以及土壤含水率作为研究对象, 进行主成分提取, 表 3 为解释的总方差。

表 2 气象因子相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of meteorological factors

因子	PAR	T	RH	P
PAR	1	0.622	-0.622	0.137
T	0.622	1	-0.835	-0.112
RH	-0.622	-0.835	1	-0.134
P	0.137	-0.112	-0.134	1

表 3 主成分提取分析

Tab. 3 Principal component extraction and analysis

主成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差百分比/%	累积贡献率/%	合计	方差百分比/%	累积贡献率/%
1	2.700	53.997	53.997	2.700	53.997	53.997
2	1.271	25.415	79.412	1.271	25.415	79.412
3	0.611	12.228	91.640	0.611	12.228	91.640
4	0.286	5.719	97.359			
5	0.132	2.564	100.000			

由表 3 可见, 前 3 个主成分因子的特征值均大于 0.5, 方差百分比都高于 10%, 累积贡献率达到 91.640%; 而其他因子的特征值均小于 0.5, 方差百分比都低于 10%, 且逐渐降低, 因此取 $m = 3$ 。提取前 3 个主成分向量进行载荷分析, 结果如表 3 所示。

从表 4 可以看出, 光合有效辐射、空气温度和相对湿度在第 1 主成分上有较高的载荷, 说明第 1 主

表 4 初始因子载荷矩阵

Tab. 4 Initial component matrix

因子	主成分		
	1	2	3
SWC	-0.309	-0.621	0.590
P	0.013	0.885	0.456
PAR	0.890	0.069	0.078
T	0.904	-0.162	0.220
RH	-0.912	0.266	-0.028

成分 F_1 基本上包含了这 3 个指标的信息; 而土壤含水率和气压在第 2、3 主成分上有较高载荷, 说明第 2、3 主成分 F_2 、 F_3 反映了这 2 个指标的主要信息。显然, 选取这 3 个主成分基本上可以完全反映这 5 个因素的指标信息。所以, 根据初始因子载荷矩阵及其特征值计算出对应的单位特征向量, 并结合式 (4), 可以得到

$$F_1 = -0.3095Z_1 + 0.0081Z_2 + 0.5415Z_3 + 0.5503Z_4 - 0.555Z_5 \quad (7)$$

$$F_2 = -0.5506Z_1 + 0.7853Z_2 + 0.0613Z_3 - 0.1438Z_4 + 0.2357Z_5 \quad (8)$$

$$F_3 = -0.7941Z_1 + 1.1326Z_2 + 0.0884Z_3 - 0.2074Z_4 + 0.3399Z_5 \quad (9)$$

以 F_1 、 F_2 和 F_3 为自变量,以 F 为因变量进行线性回归分析,建立回归方程

$$F = 0.0022Z_1 + 0.2176Z_2 - 0.2585Z_3 - 0.3209Z_4 + 0.3492Z_5 \quad (10)$$

联立式(6)和式(10)可以得到主成分回归模型

$$y_{SDV} = 0.1560x_{SWC} + 15.0067x_P - 0.0003x_{PAR} - 0.0117x_T + 0.0034x_{RH} - 14.6793 \quad (11)$$

2.1.3 模型初步验证

将2株向日葵样本所处温室的气象因子以及土壤含水率代入式(11),得到它们直径变化量的预测值。图3为2株向日葵样本茎直径变化量预测值与实测值的比较。

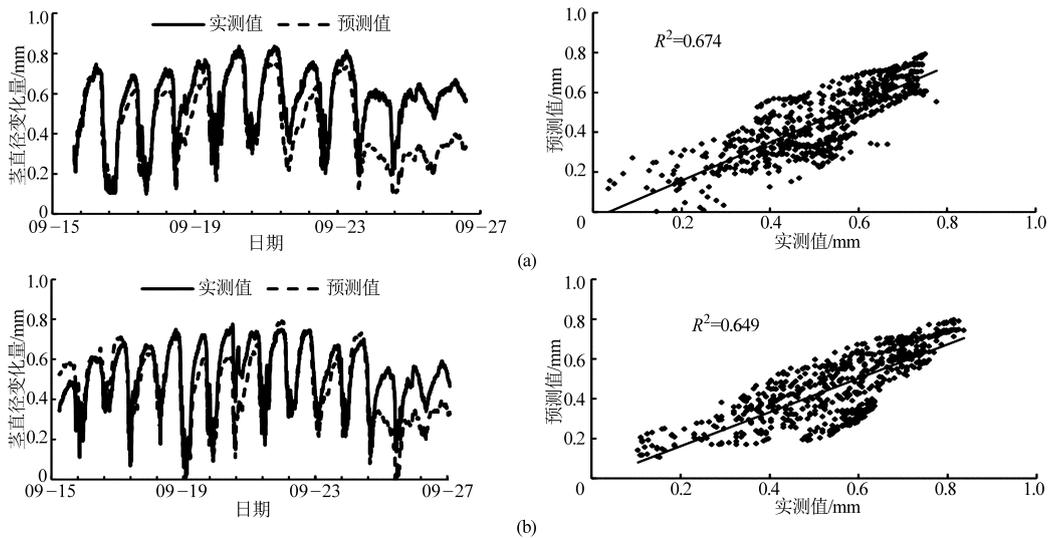


图3 向日葵样本茎直径变化预测值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between predicted and measured SDV values for sunflower samples

(a) 第1株向日葵 (b) 第2株向日葵

将2株向日葵样本茎直径变化量的预测值与实测值进行相关分析(图3)。尽管2株向日葵样本相继经过了充分灌溉、自然干旱2个不同的阶段,但茎直径变化量的预测值与实测值均显示了显著的相关性,决定系数 R^2 都在0.6以上,分别达到0.674和0.649,预测效果良好。这表明基于主成分回归的茎直径动态变化预测方法与向日葵所处土壤的水分状态关系不大,通过该回归模型可以较好地预测处于生长末期的温室向日葵的茎直径动态变化趋势。

2.2 阶段2试验结果与分析

为进一步验证模型的准确性和适应性,另选取2株西红柿样本和2株向日葵样本作为监测对象,并增加了茎流测量。图4和图5分别为西红柿样本和向日葵样本所处温室的PAR、VPD以及茎流和茎直径变化量曲线。

图4a呈现的是2株西红柿样本所处温室的PAR和VPD的日变化规律,与试验阶段1的结果类

似。从图3a可以看出,9月15—26日期间,第1株向日葵样本的茎直径变化量预测值与实测值呈相同的变化趋势,尤其是充分灌溉阶段与自然干旱的前半阶段,预测值和实际值非常接近。而试验的最后几天向日葵样本出现了水分胁迫,虽然预测值比实际值要小,但是预测值与实测值变化趋势一致,与之前的数据相比均出现小幅下降。显然,这对于通过预测茎直径变化量以指示作物缺水状态指导科学灌溉影响不大。

图3b是第2株向日葵样本9月11—26日间,茎直径变化量预测值与实际值的对比,结果与图3a类似,不同的是第1株向日葵样本9月11—15日期间的数据用于主成分分析与回归建模了。

图4b和图4c为2株西红柿茎流与茎直径变化量曲线。图中显示茎流和茎直径变化量呈相反趋势的日变化规律,这与Swafef等的结论一致^[13]。但1月11日22:00时左右温室内的VPD发生突变,造成茎流突然增加,使茎直径产生了一次短暂减小。茎流是由植物蒸腾作用引起植物体内的上升液流,它的日变化规律与气象因子,如空气温度、太阳辐射、空气相对湿度等因素密切相关,与茎直径变化量呈负相关^[33-34]。

图5呈现的规律与图4基本一致。从图中可以看出,不同试验时期温室内的PAR和茎流均不相同。由于向日葵样本试验开展的时间靠后,因此其PAR和茎流比西红柿样本试验阶段更大,这说明该模型在不同蒸腾速率条件下也可以取得较好的预测效果。

将所测的气象因子及土壤含水率输入到主成分回归模型式(11)中,得到相应的预测值。图6、7分

别为 2 株西红柿样本和 2 株向日葵样本茎直径变化量预测值与实测值的比较。

图 6 和图 7 显示,西红柿样本和向日葵样本茎直径变化量的预测值和实测值有较好的拟合。但 1 月 11 日夜間,由于 VPD 短暂突变引起的茎流增

加,使得 2 株西红柿样本茎直径变化量的预测值与实际值产生了一定的偏差。类似的情况在图 7 中也可以看到,3 月 23 日下午,温室内的 VPD 和 PAR 发生短暂突变造成了向日葵样本茎直径变化量的预测值与实测值产生了相对较大的偏差。

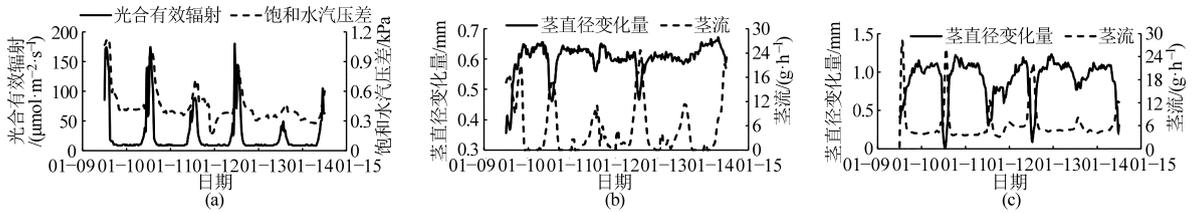


图 4 西红柿样本主要参数的变化曲线

Fig. 4 Curves of main parameters for tomato samples

(a) PAR 和 VPD (b) 第 1 株西红柿 (c) 第 2 株西红柿

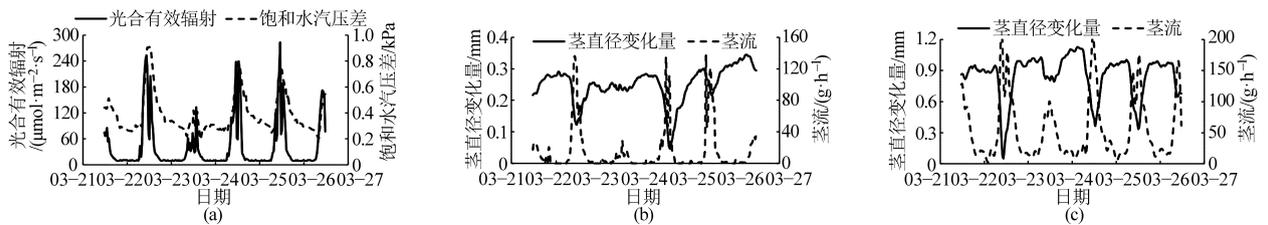


图 5 向日葵样本主要参数的变化曲线

Fig. 5 Curves of main parameters for sunflower samples

(a) PAR 和 VPD (b) 第 3 株向日葵 (c) 第 4 株向日葵

表 5 为 6 株试验样本茎直径变化量预测值与实测值的误差分析。从表中可以看出基于主成分回归的茎直径动态变化预测模型,对 6 株试验样本的茎直径变化量具有较高的预测精度。特别指出的是第 1 阶段试验周期相对第 2 阶段较长,而且试验后期样本出现了水分胁迫,所以预测效果相对较差。另外,由于试验样本种类及个体的差异,预测效果稍有不同,而在西红柿样本上取得了良好的预测效果,表明模型具有较好的适应性。

表 5 预测值与实测值的误差

Tab. 5 Error between predicted and real values

样本	R^2	RMSE
向日葵样本 1	0.674	0.143
向日葵样本 2	0.649	0.090
西红柿样本 1	0.731	0.141
西红柿样本 2	0.744	0.029
向日葵样本 3	0.717	0.032
向日葵样本 4	0.782	0.132

3 讨论

(1) 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秆储水状态的变化。而茎秆储水的变化则主要受所处的环境因素的影响,包括气象因子和土壤含水率,短期内观测,生长因素可以忽

略。但植物的生长发育既与环境因素有关,又受内在的遗传因素所控制,过程相对复杂,所以本文选择处于植物生长末期或者生长缓慢的植物为观测对象。

(2) 由于植物茎秆直径每天的变化量微小,极易受外界环境干扰,尤其是草本植物,比如刮风、下雨、振动等都会影响茎直径测量的精度,测量相对困难,所以选择环境条件相对较为稳定的温室内进行试验。通过建立数学模型,将测量的气象因子和土壤含水率输入模型,来预测植物茎直径变化,进而替代茎直径变化量的测量。

(3) 当植物出现水分胁迫或者气象条件发生短暂突变时,通过主成分回归模型得到的茎直径变化量的预测值和实测值有一定差距,但总体变化趋势一致。

4 结束语

基于主成分回归的茎直径动态预测方法,以温室向日葵样本上获得的数据建立了主成分回归模型,前 3 个主成分能反映气象因子和土壤含水率的变化情况,特征值均在 0.5 以上。虽然 2 个试验阶段的时间、地点以及土壤组分均不相同,并且建模样本为随机选取的 1 株向日葵样本 5 d 的数据,但回归模型对 4 株向日葵样本和 2 株西红柿样本的茎直

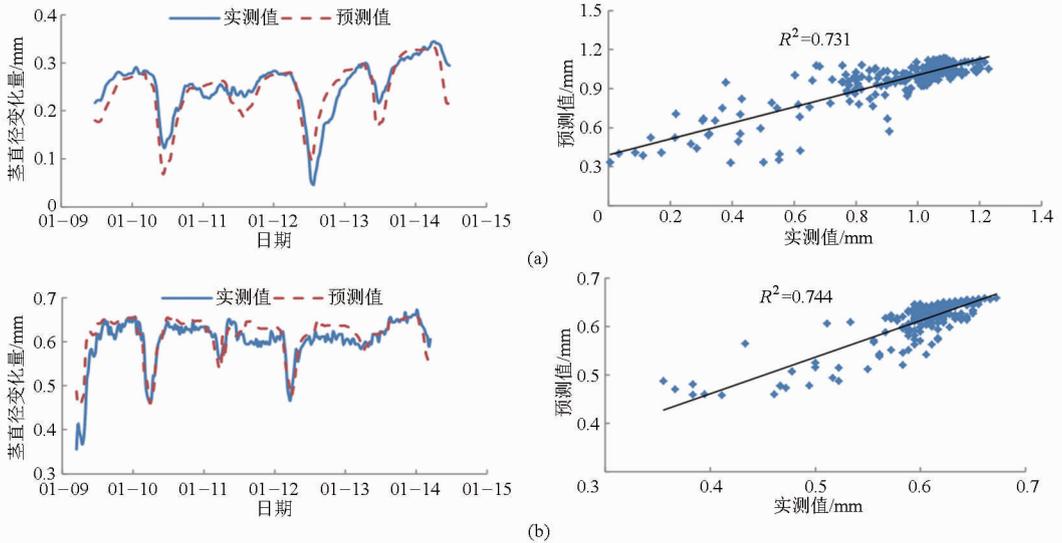


图6 西红柿样本茎直径变化量预测值与实测值比较

Fig. 6 Comparison between predicted and measured SDV values for tomato samples

(a) 第1株西红柿 (b) 第2株西红柿

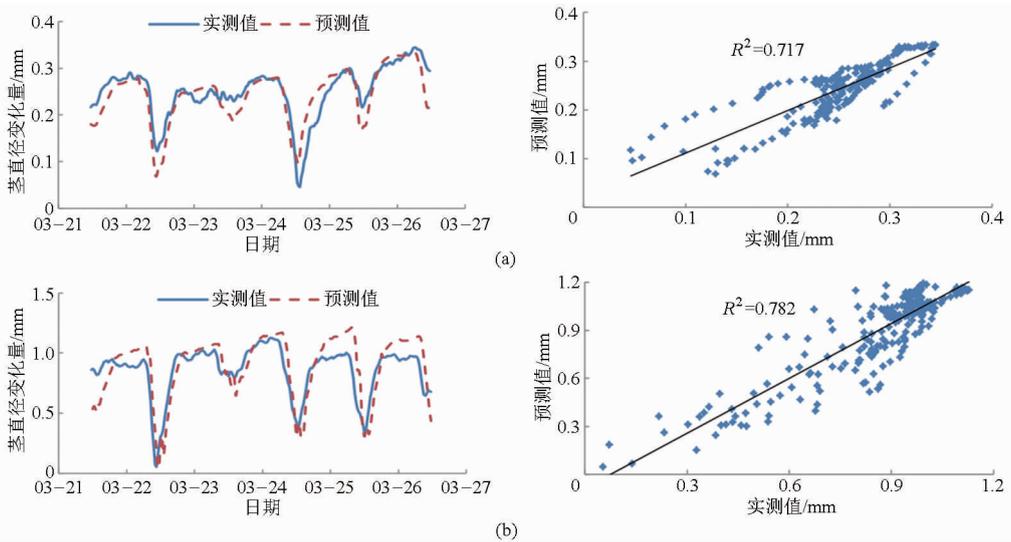


图7 向日葵样本茎直径变化预测值与实测值比较

Fig. 7 Comparison between predicted and measured SDV values for sunflower samples

(a) 第3株向日葵 (b) 第4株向日葵

径变化量均取得了良好预测效果:在温室向日葵和西红柿样本上进行验模,预测值与实测值之间的 R^2 在 0.649 ~ 0.782 范围内, RMSE 在 0.029 ~ 0.143 范围内,结果表明所建模型对茎直径变化量取得了良

好的预测效果,且具有较好的适应性和可靠性。因此通过测量气象因子及土壤含水率可以预测植物的茎直径的动态变化,进而有效地避免了直接测量茎直径时极易受外界环境干扰、测量相对困难等问题。

参 考 文 献

- 1 Zweifel R, Zimmermann L, Newbery D M. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress [J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(2): 147 - 156.
- 2 Bouriaud O, Leban J M, Bert D, et al. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce [J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(6): 651 - 660.
- 3 Galindo A, Rodríguez P, Mellisho C D, et al. Assessment of discretely measured indicators and maximum daily trunk shrinkage for detecting water stress in pomegranate trees [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180: 58 - 65.
- 4 Rosa J M, Conesa M R, Domingo R, et al. Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 126(8): 133 - 141.
- 5 Moriana A, Corell M, Girón I F, et al. Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation

- indicators in table olive trees [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164(12): 102 – 111.
- 6 Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements [J]. *Irrigation Science*, 2001, 20(3): 115 – 125.
- 7 Gallardo M, Thompson R B, Valdez L C, et al. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato [J]. *Irrigation Science*, 2006, 24(4): 241 – 255.
- 8 Fernández J E, Cuevas M V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 135 – 151.
- 9 Fernández J E, Torres-Ruiz J M, Diaz-Espejo A, et al. Use of maximum trunk diameter measurements to detect water stress in mature ‘Arbequina’ olive trees under deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(12): 1813 – 1821.
- 10 Schepper V D, Dusschoten D V, Copini P, et al. MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(7): 2645 – 2653.
- 11 李晓彬,汪有科,张平,等. 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, et al. 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)
- 12 Zhang J Y, Duan A W, Meng Z J, et al. Suitability of stem diameter variations as an indicator of water stress of cotton [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(5): 356 – 362.
- 13 Swaef D, Steppe K. Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato [J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(5): 429 – 438.
- 14 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)
- 15 王晓森,刘祖贵,刘浩,等. 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 Xiaosen, Liu Zugui, Liu Hao, et al. 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)
- 16 孟兆江,段爱旺,刘祖贵,等. 温室茄子茎直径微变化与作物水分状况的关系[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2516 – 2522.
Meng Zhaojiang, Duan Aiwang, Liu Zugui, et al. The relationship between the change of stem diameter and plant water content of eggplants: an experimental study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2516 – 2522. (in Chinese)
- 17 李会,刘钰,蔡甲冰,等. 夏玉米茎流速率和茎直径变化规律及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 187 – 191.
Li Hui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Change of sap flow rate and stem diameter microvariation of summer maize and influence factors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10): 187 – 191. (in Chinese)
- 18 员玉良,盛文溢,孙宇瑞. 基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 247 – 252.
Yun Yuliang, Sheng Wenyi, Sun Yurui. Method for observing stem water storage dynamics based on sap flow rate sensor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 247 – 252. (in Chinese)
- 19 Steppe K, Pauw D J, Lemeur R, et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth [J]. *Tree Physiology*, 2005, 26(3): 257 – 273.
- 20 Steppe K, Cochard H, Lacoite A, et al. Could rapid diameter changes be facilitated by a variable hydraulic conductance [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2012, 35(1): 150 – 157.
- 21 Devine W D, Harrington C A. Factors affecting diurnal stem contraction in young Douglas-fir [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(3): 414 – 419.
- 22 Matimati I, Musila C F, Raitt L, et al. Diurnal stem diameter variations show CAM and C3 photosynthetic modes and CAM – C3 switches in arid South African succulent shrubs [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 161(8): 72 – 79.
- 23 Gregory K, Patrick F, Daniel N, et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168(1): 36 – 46.
- 24 Maaten E, Bouriaud O, Maaten-Theunissen M, et al. Meteorological forcing of day-to-day stem radius variations of beech is highly synchronic on opposing aspects of a valley [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 181(11): 85 – 93.
- 25 Coccozza C, Giovannelli A, Lasserre B, et al. A novel mathematical procedure to interpret the stem radius variation in olive trees [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 161(8): 80 – 93.
- 26 Zajičková L, Nádraská M, Matoušek P. The effect of drought on stem volume changes of Norway spruce [J]. *Scientia Horticulturae Bohemica*, 2011, 42(3): 119 – 126.
- 27 Duchesne L, Houle D. Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (*Abies balsamea* L. Mill.) from daily climate [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(5): 863 – 872.
- 28 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.
- 29 李顺峰,张丽华,刘兴华,等. 基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 158 – 161.

- Li Shunfeng, Zhang Lihua, Liu Xinghua, et al. Discriminant analysis of apple moldy core using near infrared diffuse reflectance spectroscopy based on principal component analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 158 - 161. (in Chinese)
- 30 周淼,田富强,胡和平. 基于联合主成分分析的宜昌站径流中长期预报[J]. 水力发电学报,2013,32(1):37-43.
Zhou Miao, Tian Fuqiang, Hu Heping. Medium and long-term prediction of river runoff at Yichang with joint principal component analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 37 - 43. (in Chinese)
- 31 马灿. 半干旱区玉米茎流特征及能量平衡研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
Ma Can. Research on characteristics and energy balance of maize sap flow in semi-arid area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- 32 Swaef D, Hanssens J, Cornelis S, et al. Non-destructive estimation of root pressure using sap flow, stem diameter measurements and mechanistic modelling [J]. Annals of Botany, 2012, 111(2): 271 - 282.
- 33 赵永玲,刘钰,蔡甲冰. 夏玉米茎流和茎直径变化规律及其关系分析[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):24-28.
Zhao Yongling, Liu Yu, Cai Jiabing. The movements and relationships between the stem diameter variation and sap flow for summer maize [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 24 - 28. (in Chinese)
- 34 郭文忠. 日光温室黄瓜结果期植株信息与环境相关性研究及灌溉软件开发[D]. 北京:中国农业大学,2008.
Guo Wenzhong. The study on correlation between the plant information of cucumber in the fruit stage and environment in solar greenhouse and development of irrigation software [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
-

(上接第 291 页)

- 16 林广发,冯学智,王雷,等. 以事件为核心的面向对象时空数据模型[J]. 测绘学报,2002,31(1):71-76.
Lin Guangfa, Feng Xuezhi, Wang Lei, et al. Object-oriented spatio-temporal data model of event as the core [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2002, 31(1): 71 - 76. (in Chinese)
- 17 Edward A Lee. Cyber-physical systems-are computing foundations adequate? [C]//Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, 2006:1-9.
- 18 陈志辉. 基于时间自动机的信息物理融合系统建模与验证[J]. 计算机与现代化,2012(10):125-130.
Chen Zhihui. Cyber-physical systems modeling and validation based on timed automata [J]. Computer and Modernization, 2012(10):125-130. (in Chinese)
- 19 高峰,俞立,张文安,等. 基于无线传感器网络的作物水分状况监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报,2009,25(2):107-112.
Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor network [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 107 - 112. (in Chinese)
- 20 李仁发,谢勇,李蕊,等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展,2012,49(6):1149-1161.
Li Renfa, Xie Yong, Li Rui, et al. A summary of some cyber-physical systems key issues [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(6): 1149 - 1161. (in Chinese)