

基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型*

张新¹ 赵燕东¹ 郑力嘉² Martin Kraft³

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 德国联邦农业、林业和渔业研究所农业技术分所, 布伦瑞克 38116)

摘要: 采用基于激光斜射测距原理的三维扫描装置实时获取植株三维图像, 从中提取叶面卷曲统计指数、分形维数和二维傅里叶变换直流分量作为萎蔫指数来定量研究植物的萎蔫程度, 采用西葫芦、葫芦、南瓜及秋葵4种植物的嫩叶期体态变化检验了3种萎蔫指数与萎蔫程度的相关性, 结果表明: 3种萎蔫指数与萎蔫程度均具有较好的相关性, 相关系数都达到了0.82以上。在此基础上, 运用SPSS软件建立了3种萎蔫指数与环境饱和水气压差VPD及光合有效辐射的多元线性回归统计模型。

关键词: 植物叶片 萎蔫指数 三维图像 机器视觉

中图分类号: TP391.41; S314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0260-08

引言

机器视觉是用机器代替人眼来对物体进行测量与特征判断。基于二维图像的机器视觉主要辨识特征是颜色, 它在植物营养亏缺方面已经获得了较多的应用。然而, 对于植物水分亏缺的观测, 叶片颜色的改变表明植物生理上已经受到了一定程度的危害^[1-3]。因此, 植物水分亏缺症状的早期判别显得尤为必要^[4-7]。近年来随着三维图像获取技术日新月异的发展, 三维机器视觉在工业与农业上的应用已经成为一个新的技术生长点。与二维机器视觉不同的是, 三维视觉可以从植物形态的变化上做出判断。一旦植物生长过程中出现亏水胁迫, 必定首先在体态上做出快速响应^[8-10]。例如, 很多植物在体内不缺水时, 它们的叶片是自然舒展的, 当冠层蒸腾量大于根吸水时, 叶片开始出现萎蔫。因此应用机器视觉方法实现植物萎蔫信息的早期识别, 对于植物需水信息的诊断与精细节水灌溉均有重要价值^[11-13]。

本文采用三维扫描装置实时获取4种植株的三维图像, 定义叶面卷曲统计指数、分形维数和二维傅里叶变换直流分量作为萎蔫指数来定量研究植物的萎蔫程度, 检验3种萎蔫指数与萎蔫程度相关性, 并且建立萎蔫指数和环境参数的多元线性回归统计模型。

1 植物体态萎蔫指数

根据所得到的叶片三维数据的特点, 定义了叶面卷曲统计指数、分形维数、二维傅里叶变换直流分量3种萎蔫指数来定量研究植物的萎蔫程度。

1.1 叶面卷曲统计指数

将不同凹凸程度叶片卷曲样本视为一类具有某种随机分布特征的空间高度数据集合, 定义以标准方差作为描述叶面形态的萎蔫指数(Statistical index of wilt-induced leaf, SIWL)^[14]。

$$S_{IWL} = \sqrt{\frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Z_{ij} - \bar{Z})^2} \tag{1}$$

其中
$$\bar{Z} = \frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Z_{ij} \tag{2}$$

式中 S_{IWL} ——萎蔫指数
 m, n —— x 轴、 y 轴方向上的步进测量点数
 Z_{ij} ——叶面任意采样点(x_i, y_j)的地面相对高度

1.2 分形维数

运用三维盒计数法计算分形维数, 首先根据植物叶片占据的三维空间范围构建出一个三维立方体。当一个立方体在规定的坐标系内被建立之后, 该立方体的8个角点就被赋予了坐标值。而后, 按照不同的尺度对该立方体进行三维等尺度的网格划

收稿日期: 2013-07-03 修回日期: 2013-08-22
* 国家自然科学基金资助项目(31371537)、农业科技成果转化资金资助项目(2012GB23600634)和国际科技合作专项资助项目(2010DFA34670)
作者简介: 张新, 博士生, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: qababab@126.com
通讯作者: 赵燕东, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

分,若将每边等分成若干份,则将立方体分为若干个小立方体。这时,每一个小立方体的8个角点上也赋予了坐标值。然后计算被测植物叶片占据的小立方体数目。由于植物叶片的三维坐标已经由三维激光扫描仪系统测得,把植物叶片和植物叶片到X-Y平面的投影看作一个封闭的三维区域。叶片的X轴范围为0~56 mm,Y轴为0~54 mm,高度(即Z轴)范围为0~30 mm。首先选择一个边长为64 mm的正立方体,那么植物的叶片和投影构成的封闭区域就在这个立方体内。边长缩小1/2变为32 mm,此时有8个小立方体,同时可以获得每个小立方体8个角点的坐标。分别判断每个小立方体的下表面的4个顶点的坐标是否小于相对应的植物叶片的高度,如果4个顶点的坐标中有任意一个小于植物叶片的高度,则认为叶片所形成的三维立体空间包含这个小立方体。统计小立方体边长从1~64 mm(其边长取值为2的*n*次幂,*n*=0,1,2…),对应被叶片所形成的三维立体空间包含的小立方体的数目。得到对应的小立方体个数*Q*和边长*r*的对应关系,并对其取对数,由三维盒计数法即可得叶面分形维数^[15-16]

$$D = \left| \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg Q}{\lg (1/r)} \right| = \left| \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\lg Q}{\lg r} \right| \tag{3}$$

1.3 二维傅里叶变换

傅里叶谱方法的数学意义是:当叶片出现萎蔫时,如果叶片的形态从舒展转向萎蔫,表明了三维曲面各点的斜率发生了不同程度的改变,从傅里叶谱看,其低频谱将减小,高频谱将增加。因此,通过谱分解可以得到一个叶片萎蔫指数^[17-18]。

利用傅里叶变换技术可将空间域的频率信息很方便地在傅里叶频谱图中提取出来。对于植物叶片的三维信息,在分析其结构特征时,可以用二维傅里叶变换将空间域转换为频率域,并加以分析,很方便地提取出所需要的特征信息。

二维离散傅里叶变换和反变换的数学表达式为

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)} \tag{4}$$

$$f(x,y) = \sum_u \sum_v F(u,v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)} \tag{5}$$

式中 *M*、*N*——*x*、*y* 轴方向的步进点数

二维傅里叶变换前后的图像如图1所示,图1c为二维傅里叶变换的频谱图,图像特点为大部分频率对应的幅值都很小,但是频率为零点处幅值突然出现一个最高点,即直流分量幅值最大,该点的值表征了频率为零点的个数,对于此研究的数据,当叶片发生萎蔫时叶片的曲率会增大,从而变化率也会变大,频率为零的点减少,直流分量的值会减小。因

此,可以用二维傅里叶变换后的直流分量的大小来考察叶片的萎蔫程度,看两者是否呈负相关性。

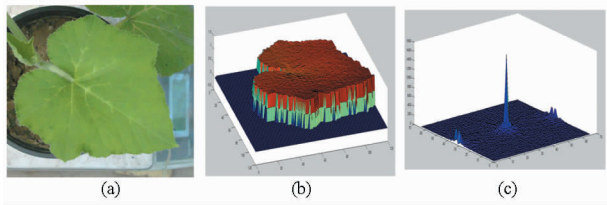


图1 二维傅里叶变换
Fig.1 2-D Fourier transform

(a) 二维图片 (b) 三维重构图 (c) 二维傅里叶变换后的图像

2 数据获取

实时三维叶片图像可以通过激光斜射方法获取。它除了测量精度高,对日光干扰不敏感之外,还可以不触及叶片,因此不扰动被测对象。对于三维图像的信息处理方法,是机器视觉方法的关键^[19]。

2.1 实验设备

激光扫描仪系统由德国波恩大学农业工程研究所和中国农业大学精细农业中心合作研制。它除了测量结果可支持三维数据分析之外,这种非接触式测量方法还具有扫描过程中不影响物体形态、不损伤测量表面、分辨力高与测量准确、快速等诸多优点。在农业领域已被应用于耕作农田土壤表面粗糙度测量与活立木生物质容积质量测量。

2.2 实验材料

选用西葫芦、葫芦、南瓜、秋葵作为实验对象,如图2所示(4种植物并不是同时种值的,图中只列出了3盆植物),这4种植株均属于藤蔓类植物,其叶片宽大,舒展,并且对土壤水分、光照与生长温度的变化较敏感,萎蔫变化程度明显。



图2 实验材料
Fig.2 Experiment materials

2.3 实验方法

2013年4月~6月期间,选取4种植物,种植在北京林业大学温室内,14 d出苗,14 d后在室温为25~40℃下,运用激光扫描仪第1次采集植物的三维数据,实验环境如图3所示(由于激光扫描仪长度有限,每次选3盆相同植物)。同时,运用数据采

集器连接多个传感器采集温室内的环境参数,运用美国 AVALON 公司生产的 AV-19Q 型光合有效辐射传感器采集室内光照,北京中西远大科技有限公司生产的 TH44-PHQS 型大气湿度传感器采集空气湿度、北京捷美创芯电子科技有限公司生产的 DS18B20 型温度传感器采集环境温度和土壤温度。在整个数据采集过程中将土壤含水率控制在田间持水量附近(体积含水率约 30%)。



图 3 实验环境
Fig. 3 Experiment environment

实验从每天早上 7:00 开始,选取每一植株最上层未被遮挡的一片完整嫩叶为实验对象,以植物叶片尚未萎蔫时为测量的开始点,每间隔 10 min 测量一次,至傍晚叶片完全恢复舒展状态时结束测量,可获得多组植物叶片形态测量值。

3 数据处理与分析

3.1 萎蔫指数与萎蔫程度的关系

以西葫芦、葫芦、南瓜及秋葵 4 种植株为研究对象,按照一天中不同时刻由叶面不萎蔫到最大萎蔫的顺序,定义萎蔫程度为 1~8。选取了多个不同萎蔫程度水平的 4 种植物叶片形态,依次求取卷曲统计指数、分形维数及二维傅里叶变换直流分量,并将 3 种萎蔫指数的取值进行归一化处理,得到一天中不同时刻、不同状态的萎蔫指数。以植物萎蔫程度为横坐标,萎蔫指数为纵坐标,得 4 种实验植物的 3 种萎蔫指数与萎蔫程度相关性如表 1 和图 4~6 所示。

表 1 4 种植物相关性对比
Tab. 1 Linear correlation of four plants

植物种类	萎蔫指数	拟合曲线	相关系数	植物种类	萎蔫指数	拟合曲线	相关系数
西葫芦	卷曲统计指数	$y = 0.1554x - 0.183$	0.979 3	南瓜	卷曲统计指数	$y = 0.1763x - 0.1731$	0.850 4
	分形维数	$y = 0.1246x - 0.0571$	0.863 3		分形维数	$y = 0.1531x - 0.1537$	0.920 9
	二维傅里叶变换直流分量	$y = -0.1851x + 1.1928$	0.973 3		二维傅里叶变换直流分量	$y = -0.1857x + 1.3744$	0.835 3
葫芦	卷曲统计指数	$y = 0.1351x - 0.1529$	0.828 5	秋葵	卷曲统计指数	$y = 0.124x - 0.0189$	0.883 2
	分形维数	$y = 0.1823x - 0.3056$	0.847 7		分形维数	$y = 0.1601x - 0.1971$	0.979 4
	二维傅里叶变换直流分量	$y = -0.1334x + 1.2541$	0.827 9		二维傅里叶变换直流分量	$y = -0.1542x + 1.0275$	0.942 5

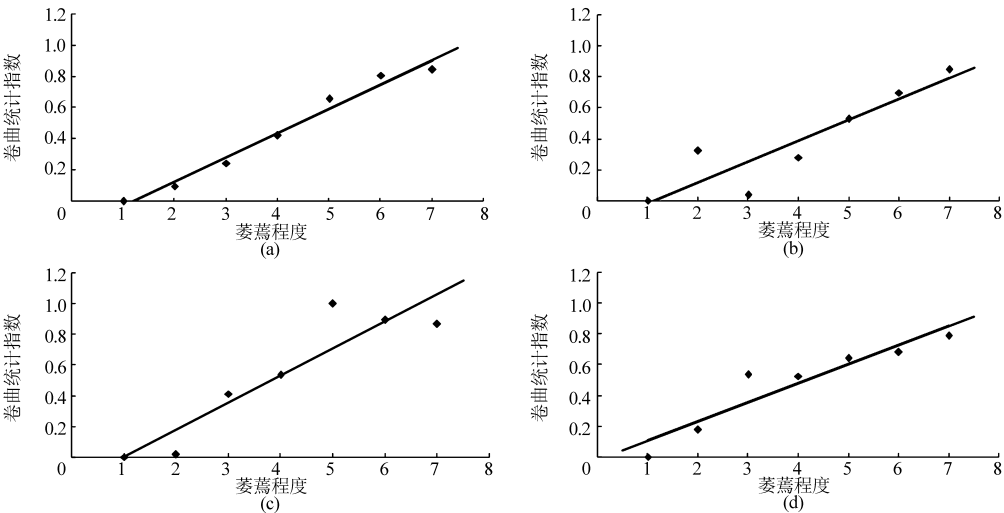


图 4 4 种植物的卷曲统计指数与萎蔫程度相关性

Fig. 4 Correlation of wilting index and wilting degree

(a) 西葫芦 (b) 葫芦 (c) 南瓜 (d) 秋葵

从表 1 可以看出:西葫芦、葫芦、南瓜、秋葵的 3 种萎蔫指数与萎蔫程度具有很好的相关性,相关系数均达到了 0.827 9 以上,由此可知:用卷曲统计指数、分形维数及二维傅里叶变换直流分量作为植物

萎蔫程度的量化评判指标是可行的。

3.2 基于萎蔫指数与环境因素的多元回归统计模型

植株的萎蔫与环境因素(环境温度、环境湿度、光合有效辐射及土壤含水率等)密切相关。在试验

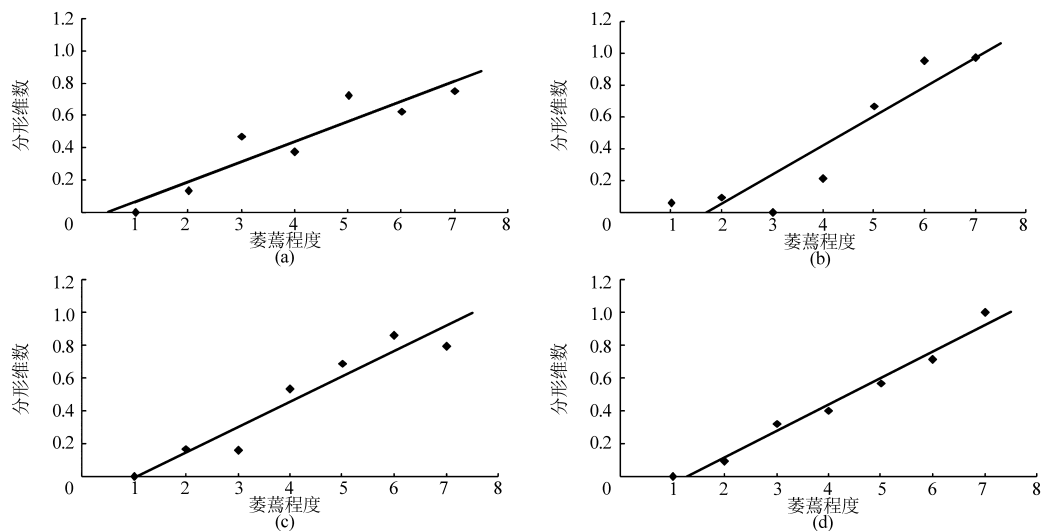


图5 4种植物的分形维数与萎蔫程度相关性
Fig.5 Correlation of wilting index and wilting degree
(a) 西葫芦 (b) 葫芦 (c) 南瓜 (d) 秋葵

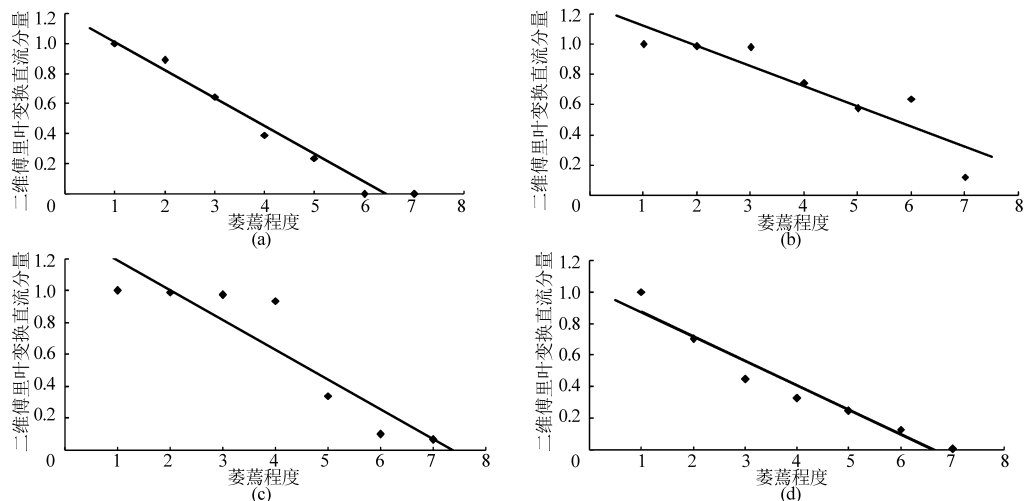


图6 4种植物的二维傅里叶变换直流分量与萎蔫程度相关性
Fig.6 Correlation of wilting index and wilting degree
(a) 西葫芦 (b) 葫芦 (c) 南瓜 (d) 秋葵

过程中,保持土壤含水率稳定,并用饱和水气压差 VPD 来表征环境温湿度,这样饱和水气压差 VPD 和光合有效辐射是对植物萎蔫程度起主要作用的 2 个因素。

饱和水气压差计算式为

$$V_{PD} = (1 - R_H/100)e_a \tag{6}$$

其中 $e_a = 0.6108e^{17.27T/(T+273.3)}$ (7)

式中 e_a ——饱和水气压,kPa
 R_H ——空气平均相对湿度,%
 T ——气温,℃

本文针对西葫芦、葫芦、南瓜及秋葵 4 种植株,在晴天和阴天情况下研究其 3 种萎蔫指数与环境因素的关系,实验结果如图 7~10 所示。

从图 7~10 的数据可以看出 3 种萎蔫指数一整天的变化趋势与环境因素的变化趋势基本一致,具

有很强的相关性。

由以上实验可以看出:在保证土壤含水率稳定的前提下,植物叶片萎蔫程度的变化主要受到 VPD 和光合有效辐射 2 个变量的影响。对 3 种萎蔫指数分别结合 VPD 和光合有效辐射使用 SPSS 软件对其进行多元线性回归统计相关性分析^[20],将 3 种萎蔫指数作为因变量,VPD 和光合有效辐射作为自变量和,得到模型的回归系数表,从回归系数表可以得到每种萎蔫指数的多元回归统计模型,其中, y 为植物的萎蔫指数, x_1 为 VPD, x_2 为光合有效辐射。

由表 2、3 可知,在饱和水气压和光合有效辐射已知的情况下,可通过多元回归统计模型计算出植物的萎蔫指数理论值,并与实际计算值进行对比,可以验证模型的准确性。此处以西葫芦(晴天)的多元回归模型为例进行说明。此模型是以 2013 年 5

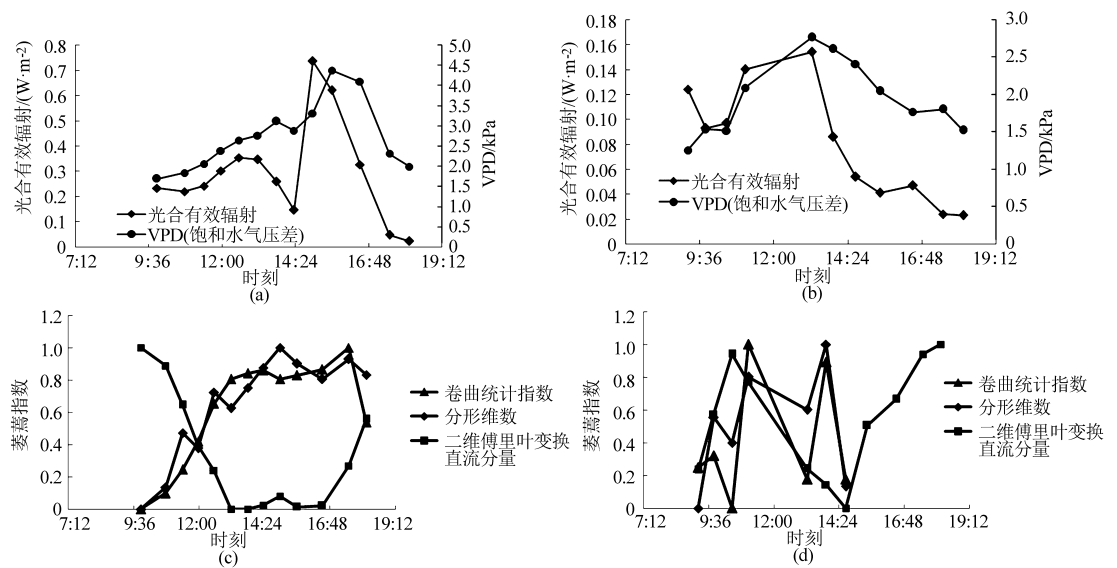


图7 环境因素与萎蔫指数一天的变化(西葫芦)
Fig. 7 Changes of environmental parameters and wilting indices (zucchini)
(a) 环境因素,晴天 (b) 环境因素,阴天 (c) 萎蔫指数,晴天 (d) 萎蔫指数,阴天

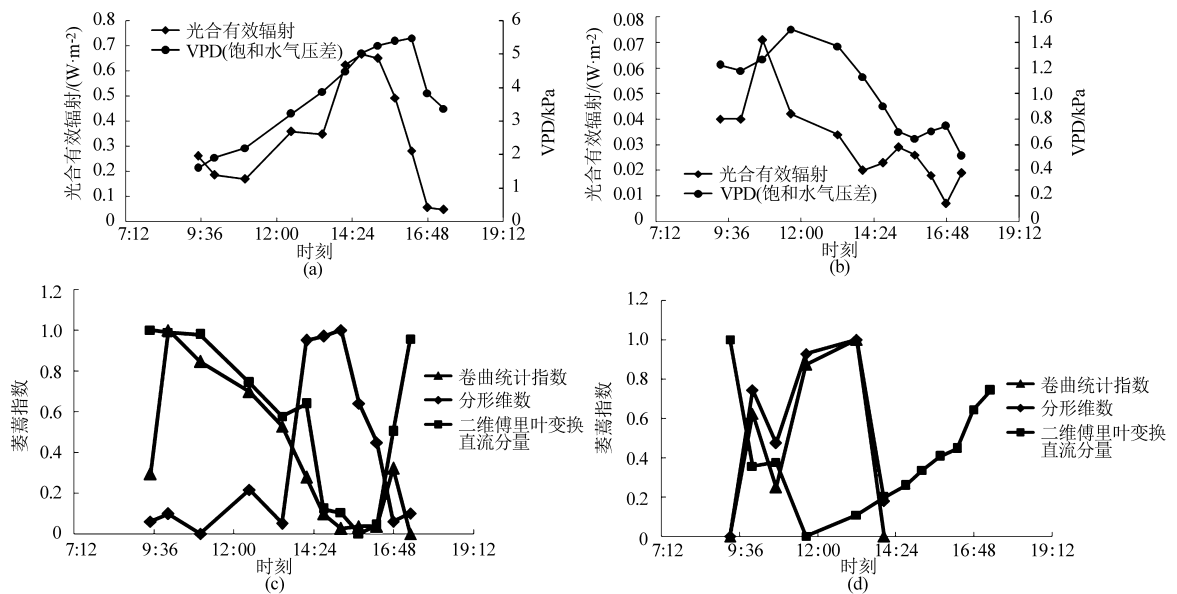


图8 环境因素与萎蔫指数一天的变化(葫芦)
Fig. 8 Changes of environmental parameters and wilting indices (gourd)
(a) 环境因素,晴天 (b) 环境因素,阴天 (c) 萎蔫指数,晴天 (d) 萎蔫指数,阴天

表 2 萎蔫指数与环境参数的多元回归模型(晴天)

Tab.2 Multiple linear regression models relating the wilting index to environmental parameters(sunny day)

植物种类	萎蔫指数	多元回归模型	植物种类	萎蔫指数	多元回归模型
西葫芦	叶面卷曲统计指数	$y = -0.018 + 0.010x_1 + 0.018x_2$	南瓜	叶面卷曲统计指数	$y = -0.021 + 0.008x_1 + 0.026x_2$
	分形维数	$y = 1.702 + 0.234x_1 + 0.001x_2$		分形维数	$y = 1.762 + 0.114x_1 - 0.095x_2$
	二维傅里叶变换直流分量	$y = 2500.167 - 557.652x_1 - 1158.150x_2$		二维傅里叶变换直流分量	$y = 2325.726 - 420.112x_1 + 1306.679x_2$
葫芦	叶面卷曲统计指数	$y = 0.341 + 0.047x_1 + 0.063x_2$	秋葵	叶面卷曲统计指数	$y = -0.034 + 0.017x_1 + 0.005x_2$
	分形维数	$y = 1.342 + 0.324x_1 + 1.232x_2$		分形维数	$y = 2.175 + 0.198x_1 - 1.292x_2$
	二维傅里叶变换直流分量	$y = 1828.067 - 218.107x_1 - 127.297x_2$		二维傅里叶变换直流分量	$y = 3096.06 - 599.142x_1 - 710.459x_2$

月18日实验数据为基准建立的,取2013年5月22日同一叶片实验数据代入模型计算,同时直接计算其3种萎蔫指数,结果如表4所示。其他3种植物以及天气状况为阴天的验证方法与之类似,此处不再赘述。

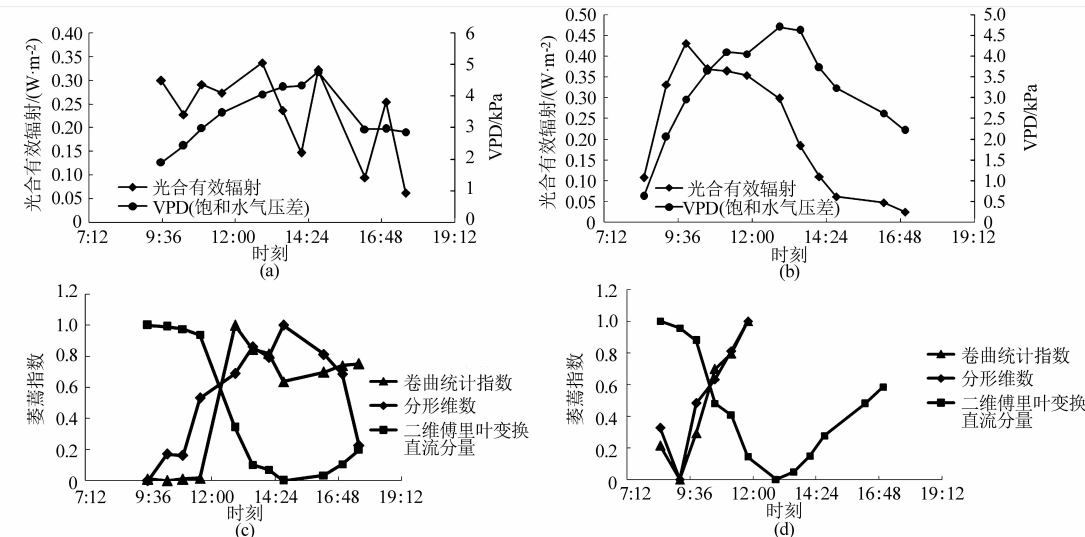


图9 环境因素与萎蔫指数一天的变化(南瓜)
Fig.9 Changes of environmental parameters and wilting indices(pumpkin)
(a) 环境因素,晴天 (b) 环境因素,阴天 (c) 萎蔫指数,晴天 (d) 萎蔫指数,阴天

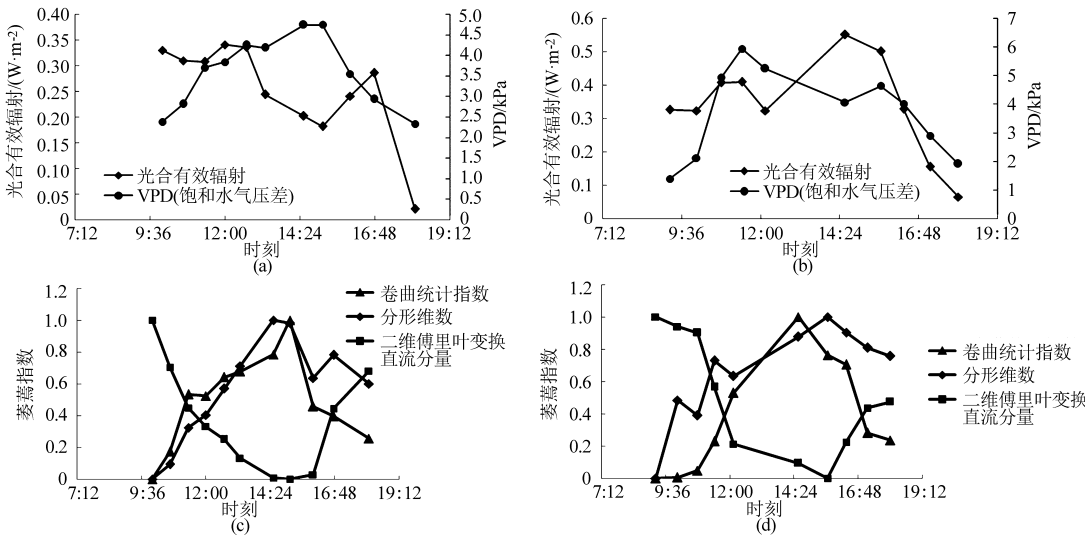


图10 环境因素与萎蔫指数一天的变化(秋葵)
Fig.10 Changes of environmental parameters and wilting indices(okra)
(a) 环境因素,晴天 (b) 环境因素,阴天 (c) 萎蔫指数,晴天 (d) 萎蔫指数,阴天

表3 萎蔫指数与环境参数的多元回归模型(阴天)

Tab.3 Multiple linear regression models relating the wilting index to environmental parameters (cloudy day)			
植物种类	萎蔫指数	多元回归模型	
西葫芦	叶面卷曲统计指数	$y=0.001+0.001x_1-0.004x_2$	
	分形维数	$y=2.216+0.105x_1-0.179x_2$	
	二维傅里叶变换直流分量	$y=391.667-14.271x_1-49.070x_2$	
葫芦	叶面卷曲统计指数	$y=0.007+0.001x_1-0.013x_2$	
	分形维数	$y=1.991+0.376x_1-1.678x_2$	
	二维傅里叶变换直流分量	$y=1\,661.026-164.344x_1+334.120x_2$	
南瓜	叶面卷曲统计指数	$y=0.006+0.008x_1-0.059x_2$	
	分形维数	$y=2.151+0.125x_1-0.634x_2$	
	二维傅里叶变换直流分量	$y=1\,223.449-375.117x_1+2\,969.009x_2$	
秋葵	叶面卷曲统计指数	$y=-0.029+0.001x_1+0.107x_2$	
	分形维数	$y=1.795+0.040x_1+0.956x_2$	
	二维傅里叶变换直流分量	$y=2\,348.840-78.937x_1-2\,323.160x_2$	

通过表4可以看出,由回归模型计算的理论与实验计算值的百分比误差都较小,事实上,在通过对4种植物在多个晴天和阴天的一系列值进行计算验证表明,除极少数点误差较大之外,平均误差低于4.8%,因此说明,本文建立的萎蔫指数与环境参数的多元回归模型是准确的。

表 4 多元回归模型的验证(西葫芦,晴天)

Tab.4 Verification of multiple linear regression models (Zucchini, sunny day)

VPD /kPa	光合有效辐射 /(W·m ⁻²)	叶面卷曲统计指数		分形维数		二维傅里叶变换直流分量	
		理论值	实际值	理论值	实际值	理论值	实际值
1.842 4	0.220	0.004 3	0.004 0	2.135	2.145	1 218.0	1 223.0
2.059 5	0.242	0.006 9	0.006 5	2.186	2.197	1 071.4	1 022.0
2.386 2	0.303	0.011 3	0.009 5	2.263	2.254	818.6	811.7
2.640 8	0.355	0.014 7	0.013 5	2.323	2.311	616.4	685.4
2.760 4	0.348	0.015 9	0.016 1	2.351	2.367	557.8	567.7
3.109 1	0.260	0.017 7	0.016 7	2.429	2.424	465.3	487.5

4 结束语

数据分析显示,针对所选取的具有不同叶片形态的西葫芦、葫芦、南瓜和秋葵 4 种植物样品,本文所定义的 3 种萎蔫指数:叶面卷曲统计指数、分形维数、二维傅里叶变换直流分量与植物的萎蔫程度均有较好的线性相关性。其中西葫芦叶面卷曲统计指数的决定系数为 0.979 3,秋葵分形维数的决定系数为 0.979 4,西葫芦二维傅里叶变换直流分量的决定

系数为 0.973 3,都具有很好的线性度,并且最低的决定系数也达到了 0.82。表明使用这 3 种萎蔫指数来评估植株的萎蔫程度的变换规律是可行的。此外,通过对 3 种萎蔫指数的变化趋势与各种环境因素的变化趋势进行定量分析,结果表明萎蔫指数与饱和水气压差 VPD、光合有效辐射有很强的相关性,在此基础上,根据多元回归统计模型建立的萎蔫预测模型,为将植物直接作为体现其自身亏水胁迫程度的生物传感器,提供了一个定量化指标。

参 考 文 献

1 谢小玉,张霞,张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485.
Xie Xiaoyu, Zhang Xia, Zhang Bing. Evaluation of drought resistance and analysis of variation of relevant parameters at seedling stage of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 476-485. (in Chinese)

2 段建丽. 干旱胁迫对桑树生理的影响[D]. 镇江:江苏科技大学, 2007.

3 徐雨晴,陆佩玲,于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展[J]. 资源科学, 2004, 26(1): 129-136.
Xu Yuqing, Lu Peiling, Yu Qiang. Review and prospect in the researches of influence of climate change on plant phenology[J]. Resources Science, 2004, 26(1): 129-136. (in Chinese)

4 陈雅君,冯淑华,陈桂芬. 植物抗旱性鉴定指标的研究现状与进展[J]. 中国林副特产, 2005(6): 62-63.

5 Jongdee B, Fukai S, Cooper M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice[J]. Field Crops Research, 2002, 76(2): 153-163.

6 Lilley J M, Ludlow M M. Expression of osmotic adjustment and dehydration tolerance in diverse rice lines[J]. Field Crops Research, 1996, 48(2): 185-197.

7 Turner N C, O'Toole J C, Cruz R T, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth[J]. Field Crops Research, 1986, 13: 257-271.

8 彭文,李庆武,霍冠英,等. 基于计算机视觉的植物水分胁迫状况监测方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(9): 2313-2317,2330.
Peng Wen, Li Qingwu, Huo Guanying, et al. Monitor method of plant water stress based on computer vision[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(9): 2313-2317,2330. (in Chinese)

9 马稚昱,清水浩,辜松. 基于机器视觉的菊花生长自动无损监测技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 203-209.
Ma Zhiyu, Hiroshi Shimizu, Gu Song. Non-destructive measurement system for plant growth information based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 203-209. (in Chinese)

10 谭峰,高艳萍. 基于图像的植物叶面积无损测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 170-173.
Tan Feng, Gao Yanping. Investigation of the method for non-destructive measurement of leaf area based on image [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 170-173. (in Chinese)

11 张启灿,苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 1-14.
Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. Laser & Optoelectronics Process, 2013, 50(1): 1-14. (in Chinese)

12 Omasa K, Hosoi F, Konishi A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 881-898.

13 Kacira M, Ling P P, Short T H. Machine vision extracted plant movement for early detection of plant water stress[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 1147-1153.

14 张慧娟,赵燕东,孙宇瑞,等. 基于 3-D 图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 154 – 158.
Zhang Huijuan, Zhao Yandong, Sun Yurui, et al. Identification of plant morphology wilt-induced by water stress with 3-D based image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 154 – 158. (in Chinese)

15 赵燕东,刘贺,刘卫平. 基于叶片分形维数的植物亏水胁迫萎蔫体态测量方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 191 – 195.
Zhao Yandong, Liu He, Liu Weiping. Measurement of plant leaf physical configuration under water deficit stress using fractal dimension[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 191 – 195. (in Chinese)

16 孙博文. 分形算法与程序设计 [M]. 北京:科学出版社, 2004.

17 陈莉,宋广礼. 二维傅里叶变换在针织物的密度测量中的应用[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2004, 30(5): 69 – 72.
Chen Li, Song Guangli. Measuring the density of knitted fabric with 2D Fourier transform techniques[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2004, 30(5): 69 – 72. (in Chinese)

18 林谦,周绍祥. 二维傅里叶变换法三维曲面检测[J]. 测试技术学报, 1999, 13(1): 13 – 16.
Lin Qian, Zhou Shaoxiang. 2-D Fourier-transform profilometry of fringe-pattern analysis[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1999, 13(1): 13 – 16. (in Chinese)

19 蔡祥,孙宇瑞,林剑辉,等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 68 – 71.
Cai Xiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 68 – 71. (in Chinese)

20 王力宾. 多元统计分析[M]. 北京:经济科学出版社, 2010.

Prediction Model of Plant Leaf Wilting Using 3-D Machine Vision

Zhang Xin¹ Zhao Yandong¹ Zheng Lijia² Martin Kraft³

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Thuenen Institute of Agricultural Technology, German Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Braunschweig 38116, Germany)

Abstract: Wilting of plants appears when the water supply of plants is insufficient. Quantitative identification of wilting phenomena of plant stems, leaves and other parts is of important practical significance to improve agricultural production and efficient water irrigation. A scanning device based on the principle of laser ranging oblique is used to obtain real-time 3-D plant images. Then leaf curl statistical index, fractal dimension and the DC component of two-dimensional Fourier spectrum were extracted as wilting index to quantify the degree of wilting plants. Three kinds of wilting indexes were tested on zucchini, gourds, pumpkins and okra leaves to find out the correlations with wilting extent. The experiments show that each wilting index had a good correlation with wilting extent (0.82 or more are reached). On this basis, a multiple linear regression model of three kinds of wilting indexes, vapor pressure deficit (VPD) and photosynthetically active radiation (PAR) was built.

Key words: Plant leaf Wilting index 3-D image Machine vision