

基于2DFT的植物叶片萎蔫程度与微环境因素相关性研究*

赵燕东¹ 荣斐¹ 刘圣波¹ Martin Kraft³ 齐建东²

(1.北京林业大学工学院,北京100083;2.北京林业大学信息学院,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:在基于激光斜射测距原理的3D扫描装置实时获取的植株3D图像中,提取二维傅里叶(2DFT)谱中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二维傅里叶萎蔫指数与萎蔫程度的相关性,结果表明:二维傅里叶谱的直流分量(萎蔫指数)与萎蔫程度具有较好的相关性, R^2 达到0.82以上。在此基础上,运用SPSS软件建立了二维傅里叶谱叶片萎蔫指数与环境饱和和水气压差及光合有效辐射系数的多元线性回归统计模型,可作为亏水胁迫程度的定量化指标。

关键词:植物 萎蔫 二维傅里叶变换 微环境

中图分类号: S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0253-06

引言

萎蔫现象是植物亏水胁迫环境下表现出的一种生命特征,定量辨识植株的萎蔫体态对于判断植株生理状态及提高农业生产水资源的高效利用具有重要现实意义^[1]。由于植物体内水势下降,植株叶片会发生不同程度的萎蔫下垂或卷曲,造成受光面积和气孔开度的减小,光合潜能与叶面蒸腾强度随之减小。从植物本身自我保护的角度看,它是基于根系汲取水分不足而采取的一种适应性避旱机制^[2-5]。植物体态萎蔫程度除了受到植物根系附近土壤水分动态的影响,还与所生长的温度与日照变化密切相关。由此可知,植物体态萎蔫反应程度是茎和叶片内部水势状况与复杂生长环境综合平衡调节的外部表现形式,其本身可视为一种有潜在应用价值的活立植物传感器。作为植物的早期萎蔫表现特征形态之一,叶片舒展性与卷曲程度尤其值得研究^[6]。为了定量分析叶片的卷曲程度,传统方法是在定义叶片卷曲度基础上借助于手工测量实现的。该方法不仅对样本造成物理性扰动,有可能导致叶片接触性硬伤甚至完全脱落,而且无法获得叶片的真实3D图像与早期萎蔫特征。尽管借助数码相机可以方便地得到植物体态的2D图像,但从数学意义上看,它属于一种函数空间的压缩映射,难以满足估计植物实际的3D体态特征的完备条件。总的看

来,应用先进图像传感技术与相应的信息处理方法实现植物叶片形态的3D测量与萎蔫形态特征刻画,这类探索研究鲜有报道^[7-9]。本文运用基于激光斜射测距原理的3D扫描装置,获取三维图像,同时通过数据采集器采集环境参数,通过对三维图像进行图像处理和算法分析,得出可行性结论。

1 实验

1.1 实验设备

本研究所使用的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3D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植物生物质容积质量测量^[10-13]。

1.2 实验材料

选用喜湿润,不耐旱,对土壤水分、光照与生长温度的变化敏感的葫芦科(Cucurbitaceae)植物西葫芦、葫芦、南瓜及锦葵科(Malvaceae)植物秋葵4种植物的嫩叶期植株作为实验对象。

1.3 实验方法

2012年3月,选取西葫芦、葫芦、南瓜及秋葵4种植物种子,种植在北京林业大学温室内,10d出

收稿日期:2013-01-20 修回日期:2013-03-15

*国家自然科学基金资助项目(31371537)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目和北京市教育委员会共建项目(2008BJKY01)

作者简介: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

通讯作者:齐建东,副教授,主要从事无线传感器网络与智能信息处理研究,E-mail: qijd@bjfu.edu.cn

苗,14 d 后在室温为 25 ~ 40℃ 下,运用激光扫描仪,开始第 1 次采集植物 3D 数据,实验环境如图 1 所示。同时,运用数据采集器连接多个传感器采集温室内环境参数,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的 DS18B20 型温度传感器采集环境温度和北京林业大学研制的 BD-II 型土壤水分传感器采集土壤含水率。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(约为体积含水率 30%)。



图 1 实验环境

Fig. 1 Experimental environment

实验从 8:00 开始,以植株未出现萎蔫时为测量的起始点,以 10 min 间隔获取一组植株体态及环境参数(空气湿度、光合有效辐射系数、土壤温度和环境温度),直至傍晚叶片完全恢复舒展状态时结束测量。整个实验过程持续约 3 个月。

2 植物体态萎蔫指数

利用傅里叶变换技术可将空间域的频率信息在

傅里叶频谱图中提取出来。对于植物叶片的三维信息,在分析它的结构特征时,可以用二维傅里叶变换(2DFT)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^[14-15]。

二维离散傅里叶变换和反变换的数学表达式为

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

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (2)$$

针对一张平面图,二维傅里叶谱后的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,该点值表征了频率为零的点的个数,当植株没有萎蔫时,其叶面可以近似看成一张平面,这时频率为零的点最多,二维傅里叶谱的直流分流最大。当叶片发生萎蔫时,叶片的曲率会增大,频率为零的点减少,直流分量的值会减小。因此,可以用二维傅里叶谱后直流分量的大小来考察叶片的萎蔫程度。

2.1 萎蔫指数(二维傅里叶变换的直流分量)与萎蔫程度的关系

在一天中的不同时刻,由叶面不萎蔫到最大萎蔫顺序,选取了多个不同萎蔫程度水平的 4 种植物叶片形态,依次求取傅里叶变换直流分量,并将直流分量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。以秋葵为例,如表 1 所示,萎蔫程度用 1 ~ 7 表示。

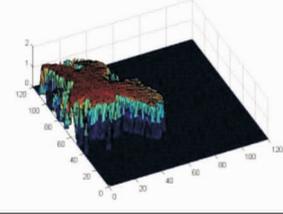
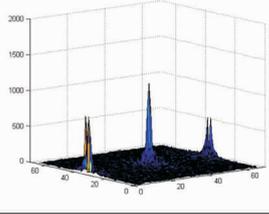
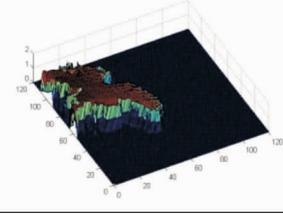
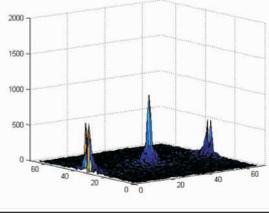
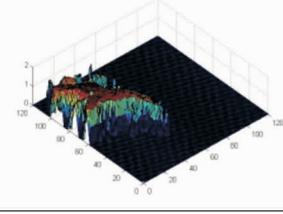
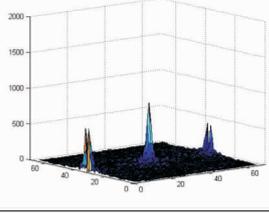
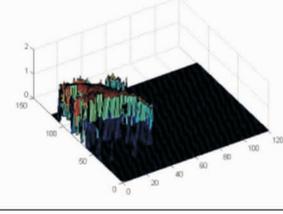
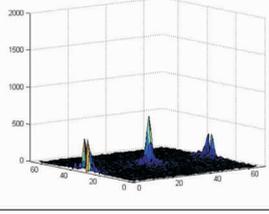
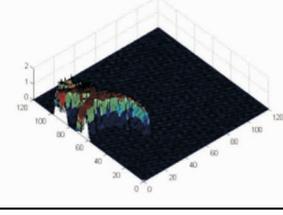
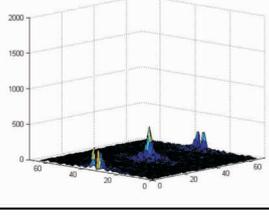
由表 1 中数值变化可以看出萎蔫指数与萎蔫程度变化有一定的相关性,以植物萎蔫程度为横坐标,萎蔫指数为纵坐标,得 4 种试验植物的萎蔫指数与萎蔫程度相关性如图 2 所示。

表 1 不同萎蔫程度的萎蔫指数值

Tab. 1 Wilting indices of different degrees

萎蔫程度	二维图片	三维重构图	傅里叶谱图	归一化直流分量(萎蔫指数)
1				1.000 0
2				0.703 8

续表 1

萎蔫程度	二维图片	三维重构图	傅里叶谱图	归一化直流分量(萎蔫指数)
3				0.448 5
4				0.331 1
5				0.249 4
6				0.132 5
7				0.008 1

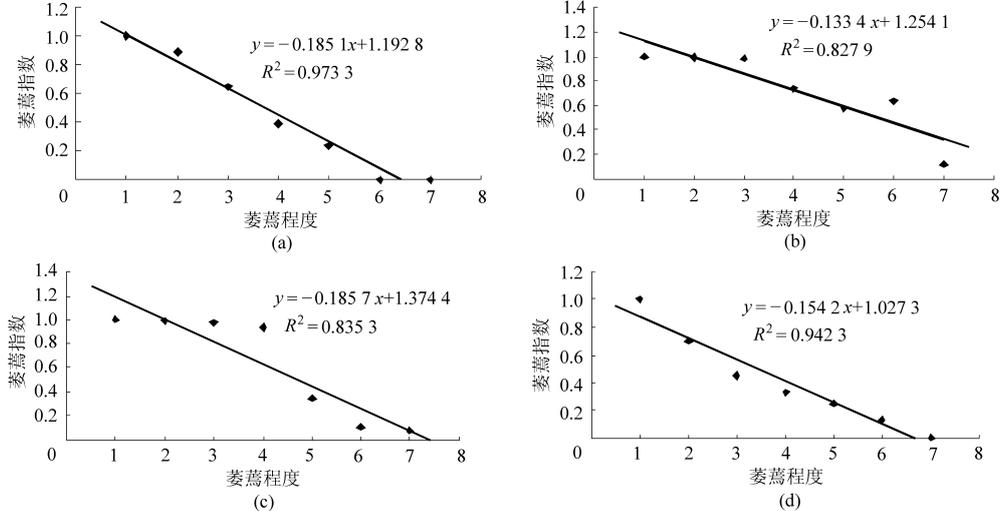


图 2 4 种植物的萎蔫指数与萎蔫程度相关性图

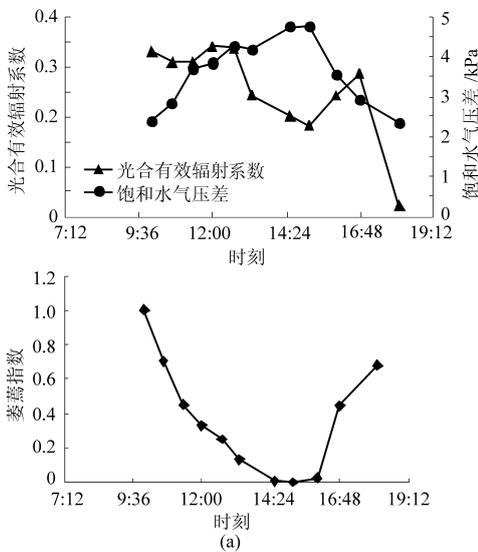
Fig.2 Correlation of wilting index and wilting degree

(a) 西葫芦 (b) 葫芦 (c) 南瓜 (d) 秋葵

从萎蔫指数与萎蔫程度的相关性图可以看出：西葫芦和秋葵的萎蔫指数与萎蔫程度具有很好的相关性， R^2 达到 0.94 以上，葫芦和南瓜的萎蔫指数与萎蔫程度的 R^2 也达到了 0.82 以上，由此可知：用二维傅里叶谱的直流分量作为植物萎蔫程度的一个量化评判指标是可行的。

2.2 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、光合有效辐射系数及土壤含水率等）密切相关。在实验过程中，保持土壤含水率稳定，并用饱和水气压差 D_{VPD} 来表征环境温湿度，这样饱和水气压差 D_{VPD} 和光合有效辐射系数是对植物萎蔫程度起主要作用的 2 个因素。



饱和水气压差公式为

$$D_{VPD} = (1 - H_{RH}) e_a \quad (3)$$

其中 $e_a = 0.6108 \exp(17.27T / (T + 273.3))$ (4)

式中 e_a ——饱和水气压, kPa

H_{RH} ——空气平均相对湿度, %

T ——气温, $^{\circ}\text{C}$

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萎蔫指数与环境因素的关系，实验结果如图 3~6 所示。

从图 3~6 数据可以看出，随着光合有效辐射系数和 VPD 的变化，叶片萎蔫程度随之变化，萎蔫指数的变化与萎蔫程度的变化呈负相关，因此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

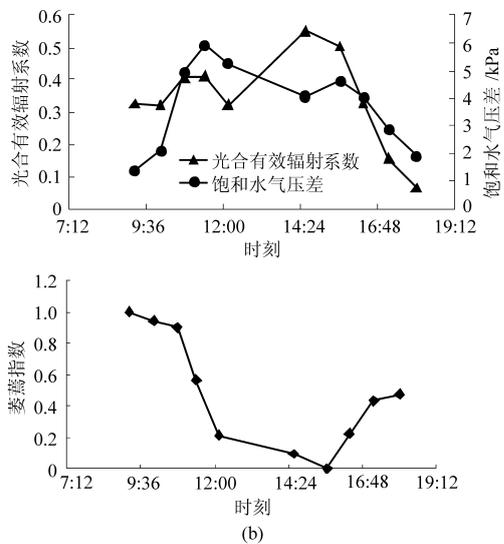


图 3 环境因素与萎蔫指数一天的变化(秋葵)

Fig. 3 Changes of environmental parameters and wilting indices (Okra)

(a) 晴天 (b) 阴天

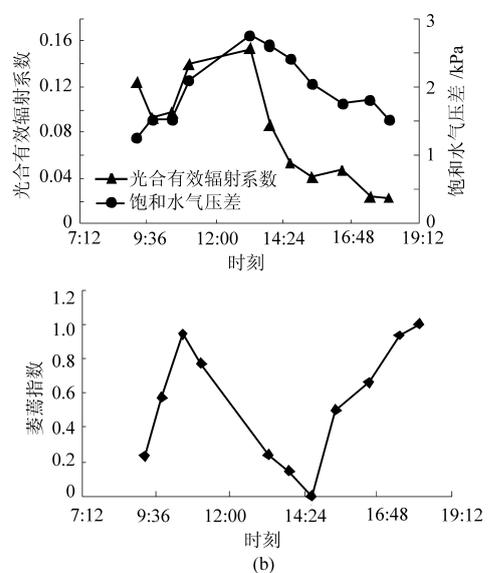
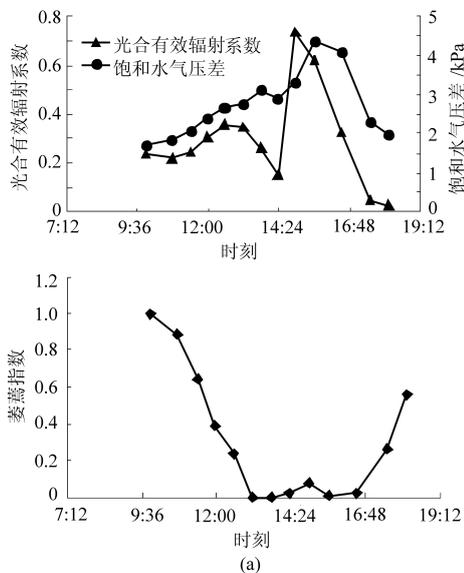


图 4 环境因素与萎蔫指数一天的变化(西葫芦)

Fig. 4 Changes of environmental parameters and wilting indices (Zucchini)

(a) 晴天 (b) 阴天

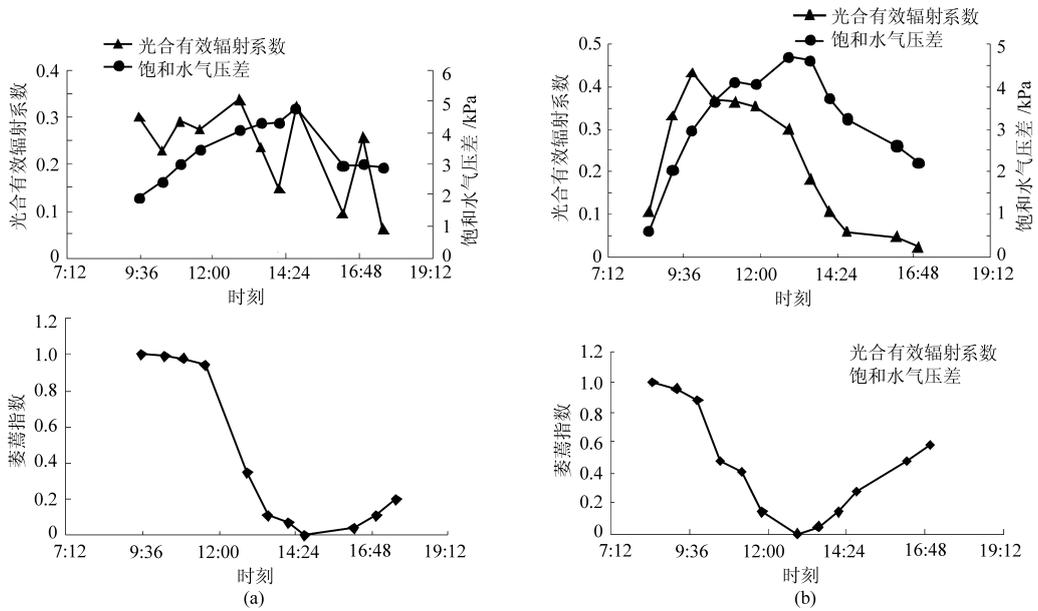


图 5 环境因素与萎蔫指数一天的变化(南瓜)

Fig. 5 Changes of environmental parameters and wilting indices (Pumpkin)

(a) 晴天 (b) 阴天

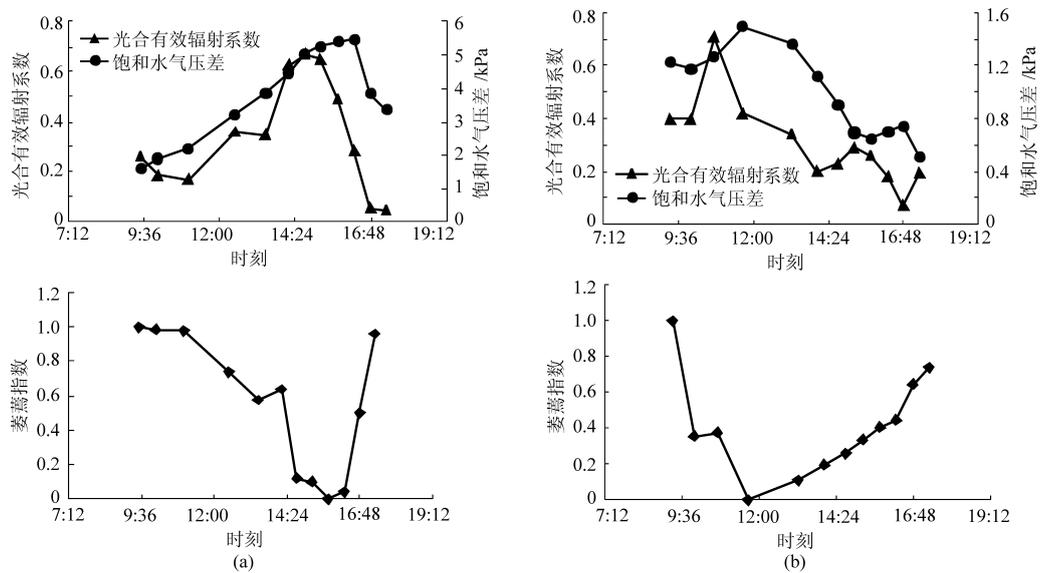


图 6 环境因素与萎蔫指数一天的变化(葫芦)

Fig. 6 Changes of environmental parameters and wilting indices (Gourd)

(a) 晴天 (b) 阴天

致,具有很强的负相关性。

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水气压差和光合有效辐射系数 2 个变量的影响。对二维傅里叶谱的直流分量分别结合水气压差和光合有效辐射系数使用 SPSS 软件对其进行多元线性回归统计相关性分析,将二维傅里叶谱的直流分量作为因变量,水气压差和光合有效辐射系数作为自变量,得到模型的回归系数表,从回归系数表可以得到二维傅里叶谱的多元回归统计模型如表 2、3 所示。其中, y 为植物的萎蔫指数, x_1 为饱和水气压差, x_2 为光合有效辐射系数^[16]。

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	多元回归模型
西葫芦	$y = 2\ 500.167 - 557.652x_1 - 1\ 158.150x_2$
葫芦	$y = 1\ 828.067 - 218.107x_1 - 127.297x_2$
南瓜	$y = 2\ 325.726 - 420.112x_1 + 1\ 306.679x_2$
秋葵	$y = 3\ 096.06 - 599.142x_1 + 710.459x_2$

3 结束语

实验结果表明,尽管 4 种植物的叶片形态不同,但是基于 2DFT 的叶片萎蔫指数与萎蔫程度均有较

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	多元回归模型
西葫芦	$y = 391.667 - 14.271x_1 - 49.070x_2$
葫芦	$y = 1661.026 - 164.344x_1 + 334.120x_2$
南瓜	$y = 1223.449 - 375.117x_1 + 2969.009x_2$
秋葵	$y = 2348.840 - 78.937x_1 - 2323.160x_2$

好的线性相关性(决定系数 $R^2 > 0.82$),萎蔫指数与萎蔫程度呈现出负相关性,依然可以满意地反映出植株萎蔫程度。借助该指数实现植物早期萎蔫特征的辨识,对于精细灌溉控制有潜在的工程应用前景。此外,基于多元回归建立的萎蔫预测模型,对于研究这些植物对生长微环境变化的生理反应与植物亏水胁迫信息的准确解析,在生态与植物保护领域也具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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]. Filed Crops Research, 1986, 13: 257 ~ 271.
- 3 Jongdee B, Fukai S, Cooper M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice [J]. Filed Crops Research, 2002, 76(2 ~ 3): 153 ~ 163.
- 4 Lilley J M, Ludlow M M. Expression of osmotic adjustment and dehydration in diverse rice lines [J]. Filed Crops Research, 1996, 48(2 ~ 3): 185 ~ 197.
- 5 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗, 等. 土壤干旱胁迫对不同水稻品种叶片卷曲的影响 [J]. 中国水稻科学, 2003, 17(4): 349 ~ 354. Jin Qianyu, Ouyang Younan, Yu Shengmao, et al. Influence of soil drought stress on leaf rolling index in different rice varieties [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 349 ~ 354. (in Chinese)
- 6 张慧娟, 赵燕东, 孙宇瑞, 等. 基于3D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)
- 7 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, 20(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)
- 8 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)
- 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 Foucherl P, Revollonl P, Vigouroux B, et al. Morphological image analysis for the detection of water stress in potted forsythia [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 131 ~ 138.
- 11 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.
- 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 蔡祥, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 基于激光反射的土壤粗糙度测量装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 68 ~ 71, 91. 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, 91. (in Chinese)
- 14 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, 16(1): 13 ~ 16. Lin Qian, Zhou Shaoxiang. 2-D fourier-transform profilometry of fringe-pattern analysis [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1999, 16(1): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 王力宾. 多元统计分析: 模型、案例及 SPSS 应用 [M]. 北京: 经济科学出版社, 2010.

variational method and simple land surface model, which is mainly used to improve the estimation of the turbulent heat fluxes by assimilating geostationary operational environmental satellite (GOES) retrieved land surface temperature (LST). A variational data assimilation scheme was developed based on the weak-constraint concept. It can estimate both state variables and model unspecified parameters together, which is depend on the building of the cost function. The objective of the variational method is to minimize the cost function to seek the most optimal control variables and accurately estimate sensible heat and latent heat. The GOES LST is compared with the ground measured LST, and the root mean square error (RMSE) was taken as the observation error. The scheme was tested and validated based on measurements in two mainly observation sites of Ameriflux. Results indicate that data assimilation method improves the estimation of surface temperature, sensible heat flux and latent heat flux. The RMSE of estimated LST is around to 1K in both sites. Meantime, the average RMSE of estimated sensible heat and latent heat dropped to 22 W/m² and 26 W/m² respectively. It is a promising way to improve the estimation of turbulent heat fluxes by assimilating GOES LST into land surface model.

Key words: Sensible and latent heat Weak-constraint variational method GOES Land surface temperature retrieval Simple land surface model Data assimilation

(上接第 258 页)

Correlation between Wilting Index of Plant Morphology Defined by 2DFT Spectrum and Micro-environmental Factors

Zhao Yandong¹ Rong Fei¹ Liu Shengbo¹ Martin Kraft³ Qi Jiandong²

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

2. School of Information, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Thuenen Institute of Agricultural Technology, Braunschweig 38116, Germany)

Abstract: Wilting is one of life features of plants responding to drought stress. Early identification of plant wilting is of importance for effective use of water in crop production. For this purpose, a laser scanner based on the principle of triangulation project was used to obtain 3D images of plants and the DC component of 2DFT was extracted as a wilting index. Four species, including zucchini, gourd, pumpkin and okra, were tested. The experimental results demonstrated that this index could identify the early wilting for each species and has a good linear correlation with the wilting degrees ($R^2 > 0.82$). In addition, the statistical models of multiple linear regression, which relates the wilting index to D_{VPD} and the solar effective radiation, was proposed; and it can be used as the qualitative index of plant water deficit stress degree.

Key words: Plants Wilting Two-dimensional Fourier-transform Micro environment