

基于“双毯法”的植物叶态萎蔫辨识研究

张新¹ 高超¹ Martin Kraft² 赵燕东¹

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 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: 为实现植物生命需水状况的无损检测, 通过定量辨识植物叶态萎蔫特征反映植物亏水胁迫状况, 基于分形理论“双毯法”定义了萎蔫指数 L_{DBM} , 利用基于激光三角原理的三维激光扫描仪获取植物叶片表型点云数据, 以西葫芦、秋葵、葫芦、南瓜 4 种植物为研究对象, 结合饱和水汽压差与光合有效辐射 2 种微环境参数, 进行了植物叶态萎蔫定量辨识研究。试验分析了 4 种植物萎蔫指数 L_{DBM} 的日变化曲线, 证明 L_{DBM} 用于表征叶态萎蔫状况是合理和可行的; 分析了萎蔫指数 L_{DBM} 与微环境参数的相关性, 4 种植物 L_{DBM} 与饱和水汽压差相关系数均大于 0.81, 与光合有效辐射相关系数均大于 0.71, 与 2 种参数都有很强的正相关性; 并且与基于离散时域傅里叶变换定义的萎蔫指数 L_{2DFT} 进行了对比, L_{DBM} 与 L_{2DFT} 呈负相关性, 4 种植物的相关系数均大于 0.82, 表明 L_{DBM} 能够准确地定量表征叶态萎蔫。

关键词: 叶态萎蔫; 双毯法; 植物表型; 三维激光扫描

中图分类号: S24; Q945.17⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0322-07

Identification of Plant Leaf Wilting Based on Double Blanket Method

Zhang Xin¹ Gao Chao¹ Martin Kraft² Zhao Yandong¹

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

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

Abstract: Plant leaf wilting is a frequent symptom responding to drought stress. To realize non-destructive testing of leaf wilting, wilting index L_{DBM} was customized based on double blanket method from fractal theory. A laser scanner was used to acquire three-dimensional point cloud data of plant leaf. In the experiment, zucchini, okra, gourd and pumpkin were chosen as research objects to test the index. Meanwhile, the vapor pressure deficit and photo synthetically active radiation were collected as the microenvironment parameters. The seeds were individually sown in the same pots. After the young plant grew, they were placed in a plastic-covered tunnel. The soil water content for these plants was maintained at about 30%. The point cloud data was gathered at 1 h interval between 08:00 and 18:00. The results showed that the index L_{DBM} was capable of sensing various leaf wilting levels. Regression results showed that L_{DBM} had a linear relationship with vapor pressure deficit and photo synthetically active radiation. And the correlation coefficients of four plants were [0.810, 0.879] and [0.712, 0.825], respectively. Furthermore, L_{DBM} had a negative linear relationship with L_{2DFT} , which was tested to be a reasonable wilting index in previous studies. The correlation coefficients of four plants were [0.826, 0.944]. This paper suggested a non-destructive, real-time and in situ method for monitoring plant water deficit stress.

Key words: leaf wilting; double blanket method; plant phenotypes; three-dimensional laser scanning

收稿日期: 2016-03-09 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)和北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建项目(BLCXY201520)

作者简介: 张新(1989—), 男, 博士生, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: qababab@126.com

通信作者: 赵燕东(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事生态检测与智能控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

引言

精准灌溉是 21 世纪农林业领域的重要研究方向,灌溉指标的量化一直是研究的核心问题^[1]。土壤墒情作为灌溉指标反映的是植物水分的供给情况,不能真正反映植物的需水状况;叶水势、蒸腾速率等植物生理参数能够从生理上反映植物的水分情况,但由于其测量原理的限制,难以对这些指标进行无损、自动、在线监测^[2]。随着“Sensor-to-plant”概念被广泛地接受,植物叶态萎蔫作为一种可视化现象,直接反映了植物的含水量状况,叶片舒展则水分充足,叶片萎蔫则水分亏缺,因此可以把植株本身视为一种特殊的活体传感器,根据其叶态萎蔫信息量化地判断植株的生命需水状况,从而达到指导精准灌溉的目的^[3]。

植物叶态萎蔫信息的获取属于植物表型研究范畴^[4],早期的研究大多借助 2D 图像技术,主要从叶片的物理形状、颜色等特征进行研究,从空间几何角度来看,2D 图像是叶片真实体态信息的一种压缩映射,这种映射必然伴随部分关键信息的缺失;近年来,利用 3D 图像表征技术进行了植物叶态萎蔫表征的研究,取得了一定的成果^[2-3]。

植物 3D 表型表征技术根据传感器是否需要有序扫描分为照相机技术和扫描仪技术。照相机技术主要包括结构光 3D 技术、双目立体视觉、飞行时间法(Time of flight, ToF)技术、光场相机技术,它们的共同特点是传感器在单次聚焦中获取一张三维图像,采样时间短,但都存在一定的缺点,例如结构光 3D 技术对表面光滑易反光物体(如叶片)会产生较大的畸变误差^[5-6];双目立体视觉技术的核心在于匹配算法,然而目前还没有一种可靠的通用匹配方法能够克服匹配准确性与恢复视差全面性之间的矛盾^[7-8];ToF 技术受背景光干扰严重,目前只适用于室内无光条件^[9-10];光场相机最近被应用于生命科学,价格十分昂贵,技术还需进一步成熟^[11]。除此之外,照相机技术共有的问题在于外界光源对采样干扰较大,尤其在太阳光等强光条件下采样结果会出现失真甚至错误。植物叶态萎蔫辨识的研究需要在植物生长的自然条件下进行,太阳光是影响叶片萎蔫的重要因素,因此照相机技术在此研究中具有局限性。扫描仪技术主要包括激光雷达技术和激光三角测量技术,这两种技术的共同特点是传感器需要通过特定的位移路径有序采样来获取目标的三维点云数据,需要一定的采样时间^[12]。它们的优势在于对背景光不敏感,可以应用于自然光环境条件。相比之下,激光雷达的分辨率较低,一般为 1 cm 左

右,边缘检测能力差^[13],如采集的 3D 点云图边缘器官(如叶片)会很模糊;而激光三角技术的分辨率很高,可以达到 1 mm,传感器采用了一种特殊的过滤膜,在强太阳光下也能正常使用^[14],虽然其采样时间较长,但综合来看,激光三角技术最适用于植物叶态萎蔫辨识的研究。

团队在之前的研究中,将叶态 3D 图像信息作为 Euclid 空间不同曲率的曲面集,基于离散时域傅里叶变换定义了萎蔫指数 L_{2DFT} ,结果表明自定义的萎蔫指数可以有效地定量表征叶态萎蔫状况^[15]。围绕此思路,本文使用基于激光三角原理的三维激光扫描仪获取植物叶片 3D 点云数据,通过基于“双毯法”理论自定义的萎蔫指数,结合微环境参数,对植物叶态萎蔫状况进行定量辨识研究,并与萎蔫指数 L_{2DFT} 进行对比分析。

1 植物叶态萎蔫指数

随着植物萎蔫程度的变化,叶态的三维点云数据可以视为 Euclid 空间不同曲率的曲面集。三维激光扫描仪获取的叶片点云数据是一张由 $x-y$ 有序点集组成的深度图像,图像中每一个 $x-y$ 点都对应一个距离值,因此可以等价于一个曲面函数,本文利用分形理论中“双毯法”定义了萎蔫指数 L_{DBM} 。双毯法又称双层地毯法(Double blanket method, DBM),是根据三维空间中函数表面形成夹围体积来估计分形数值,并且是针对单波影像所作的分形估计^[16-18]。其定义过程如下:

三维激光扫描仪获取的叶态点云数据形成一个三维曲面,在距离曲面上下表面 ε 处构成一个厚度为 2ε 的“毯子”,毯子的表面积为毯子的体积除以 2ε 。对于不同的 ε ,可计算出其分形表面积。

令 $f(i, j)$ 为曲面函数, u_ε 为上表面曲面函数, b_ε 为下表面曲面函数。初始情况下,令

$$u_0(i, j) = b_0(i, j) = f_0(i, j) \quad (1)$$

上、下表面曲面分别按照如下原则生长

$$\begin{aligned} u_\varepsilon(i, j) &= \max\{u_{\varepsilon-1}(i, j) + 1, \max(u_{\varepsilon-1}(m, n))\} \\ b_\varepsilon(i, j) &= \min\{b_{\varepsilon-1}(i, j) - 1, \min(b_{\varepsilon-1}(m, n))\} \\ &(\varepsilon = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

则“毯子”的体积为

$$V_\varepsilon = \sum (u_\varepsilon(i, j) - b_\varepsilon(i, j)) \quad (3)$$

表面积为

$$A(\varepsilon) = \frac{V_\varepsilon}{2\varepsilon} \quad (4)$$

又因为分形表面积符合关系式

$$A(\varepsilon) = F\varepsilon^{2-D} \quad (5)$$

则 $\lg A(\varepsilon) = c_1 \lg \varepsilon + c_0$ (6)

对于不同的 ε , 可以计算出不同的 $\log A(\varepsilon)$, 通过线性回归, 可以计算出 c_1 , 由

$$c_1 = 2 - D \quad (7)$$

即可计算出分形维数 D , 把 D 作为萎蔫指数, 即

$$L_{DBM} = D \quad (8)$$

得到相应叶片的萎蔫指数, 可知, 叶片萎蔫程度越大, L_{DBM} 值越大, 叶片萎蔫程度越小, L_{DBM} 值越小。此处使用“双毯法”分形维数定义萎蔫指数理论上有一个特别的优势, 即它是基于全局几何特征的参数, 不需要考虑叶片局部形心位置, 对不同类型的植物叶片具有普适性^[19]。

2 试验设计

2.1 试验材料

本研究使用西葫芦、秋葵、葫芦、南瓜为试验对象, 4种植物同属于双子叶藤蔓类植物, 单株叶片数量较多, 叶片形态在亏水胁迫下有较为明显的视觉变化; 并且4种植物对微环境因素反应敏感, 符合试验要求。

2.2 数据采集设备

本研究中数据采集主要分为两部分:

第1部分是植物叶态三维点云数据的采集, 使用自行研制的三维激光扫描仪, 由激光测距传感器、导轨、直流电动机、相对位置传感器、滑块、控制器等组成。核心部件为 Melsensor 公司的 M5L/200 型激光测距传感器, 其激光光源为二级冷光源, 发光功率小于 1 mW, 因此被测叶片局部区域不会因光斑直射而发生温度变化, 同时保证了光斑不会对测量人员眼睛造成损伤; M5L/200 型的测量范围为 240 ~ 440 mm, 测距分辨率可达到 0.01 mm, 对应的线性输出模拟信号为 0 ~ 10 V。

第2部分为微环境参数采集装置, 主要由数据采集器、传感器、上位机软件等组成。本试验配备了光合有效辐射传感器(型号: AV-19Q, 量程: 0 ~ 3 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 精度: $\pm 3\%$), 温度传感器(型号: DS18B20, 量程: $-55 \sim 125^\circ\text{C}$, 精度: 0.5°C), 相对湿度传感器(型号: PHQS, 量程: 0 ~ 100% RH, 精度: 3% RH)。

2.3 试验方法

试验于 2015 年 7—8 月进行, 位于北京林业大学温室(东经 116.341 856°, 北纬 40.009 215°), 为自行搭建的小型日光温室, 其主要用途有: ①三维激光扫描仪每次采样需要一定的时间, 在此过程中, 风对支撑叶片茎干的扰动会造成一定的误差, 温室可以保证试验环境气流的稳定性, 消除风的影响。

②由于温室内部的密闭性和保温性, 可以获得相对于自然条件下萎蔫程度更大的叶片状态, 从而得到更加充分的试验数据。

4种植物种植在相同规格(直径 32 cm, 高度 25 cm)花盆内, 土壤质地成分为沙土 0.15 mg/mg、黏土 0.18 mg/mg、粉土 0.67 mg/mg(USDA 标准), 控制土壤水分保持在体积含水率 30% 左右。每种植物选取俯视方向不被遮挡的新生叶片为扫描对象, 试验在每天 8:00 左右开始, 每隔 60 min 采集一次数据, 一般到 18:00 左右结束。

3 结果与分析

试验以 1 种植物 1 d 的叶态数据为 1 组, 除去叶片未发生萎蔫现象的阴雨天气, 共获取有效数据 28 组, 每种植物各 7 组数据。

3.1 萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

以 7 月 16 日西葫芦萎蔫指数 L_{DBM} 日变化为例, 如图 1 所示。图中横轴为叶片萎蔫状态采样时刻, 纵轴为归一化后的萎蔫指数 L_{DBM} , 从 8:00—18:00 共采集 11 个状态, 从图 1 可以看出, 8:00 与 18:00 萎蔫指数最小, 叶片形态舒展, 水分充足; 13:00、14:00、15:00 时刻萎蔫指数处于较大值, 叶片形态萎缩, 水分亏缺, 并且萎蔫指数在 14:00 达到最大值, 从对应的彩色图像中可以看出, 此时叶片在视觉上同样处于萎蔫程度最大的状态; 9:00、10:00、11:00、12:00、16:00、17:00 共 6 个状态的萎蔫指数大小处于中间值, 从彩色图像中可以看出叶片有一定程度的萎蔫。

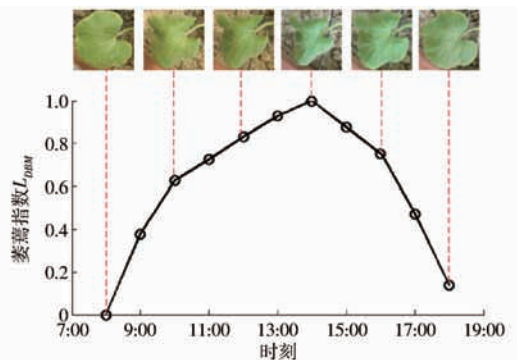


图 1 西葫芦萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

Fig. 1 Diurnal variation of L_{DBM} (zucchini)

与此同时, 分别选取与 7 月 16 日天气状况相似的秋葵、葫芦、南瓜一天的萎蔫指数 L_{DBM} 日变化为例, 如图 2 所示。从图 2a、2b、2c 中可以看出, 与西葫芦相似, 3 种植物的萎蔫指数 L_{DBM} 较小值在 8:00 和 18:00 时刻左右, 较大值集中在 13:00—15:00 时间段内, 和相应的叶片萎蔫状况相匹配。因此, 使用自定义的萎蔫指数 L_{DBM} 定量地辨识植

物叶态的萎蔫程度在实际应用中是合理和可行的。

另外,对比 4 种植物的 L_{DBM} 日变化曲线可以发现,西葫芦、秋葵、南瓜的萎蔫指数曲线在增大与减小过程中都是凸的,而葫芦的萎蔫指数曲线在此过

程中是凹的,说明葫芦叶片由水分充足到欠缺的过程中形态变化是“一步到位”的,中间过渡性的萎蔫形态不明显,如果不通过定量的分析方法,利用传统的定性辨别方法,这种由植物体自身传达的水分胁迫信息是很难辨识出来的。

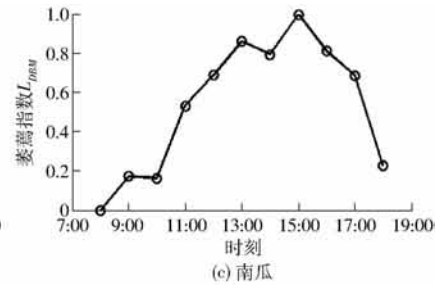
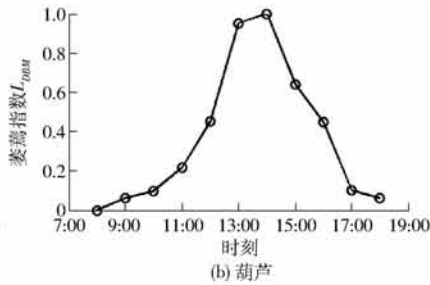
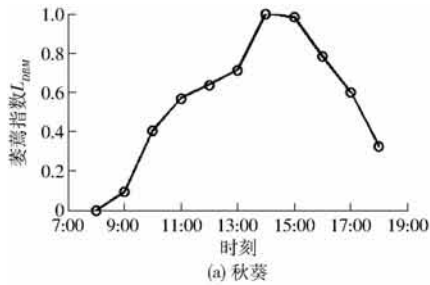


图 2 萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

Fig. 2 Diurnal variations of L_{DBM}

3.2 萎蔫指数 L_{DBM} 与微环境因素相关性

在土壤水分供给足够的情况下,植物叶态的萎蔫程度变化主要受微环境因素影响,其中,饱和水汽压差 (Vapor pressure deficit, VPD) 由空气温度与相对湿度估算得出,表示实际空气状态距离水汽饱和状态的程度,影响植物叶片的气孔导度、蒸腾作用和光合作用^[20]; 光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, PAR) 是植物生命活动的能量来源,是叶片形态表征的内在动力^[21]。因此,选取饱和水汽压差与光合有效辐射作为微环境因素的重要参数,与萎蔫指数进行相关性分析。

图 3 为 4 种植物 VPD 和 PAR 的日变化曲线,从图中可以看出,VPD 和 PAR 变化趋势基本一致,并且与萎蔫指数 L_{DBM} 日变化曲线对比发现,有一定的正相关性。因此,分别对 4 种植物的 L_{DBM} 与 VPD、PAR 作了相关性分析,结果如图 4 所示,4 种植物 L_{DBM} 与 VPD 的相关系数依次是 0.839、0.851、0.846、0.810,均大于 0.8; L_{DBM} 与 PAR 的相关系数依次是 0.732、0.727、0.798、0.761,均大于 0.7。因此可知,萎蔫指数 L_{DBM} 与影响叶态变化的 2 种微环境参数均有较强的相关性,说明本文定义的萎蔫指数 L_{DBM} 能够准确地表征叶态的萎蔫程度。

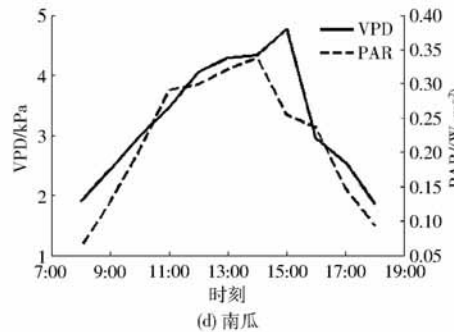
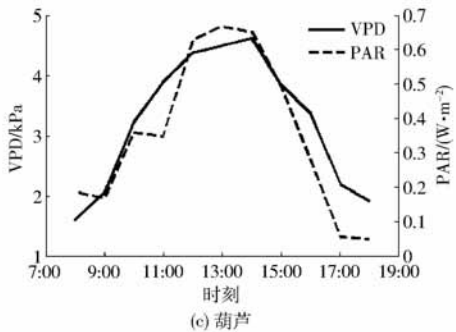
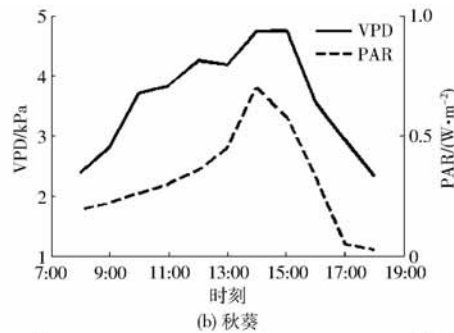
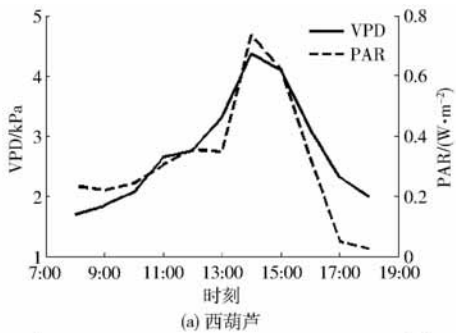
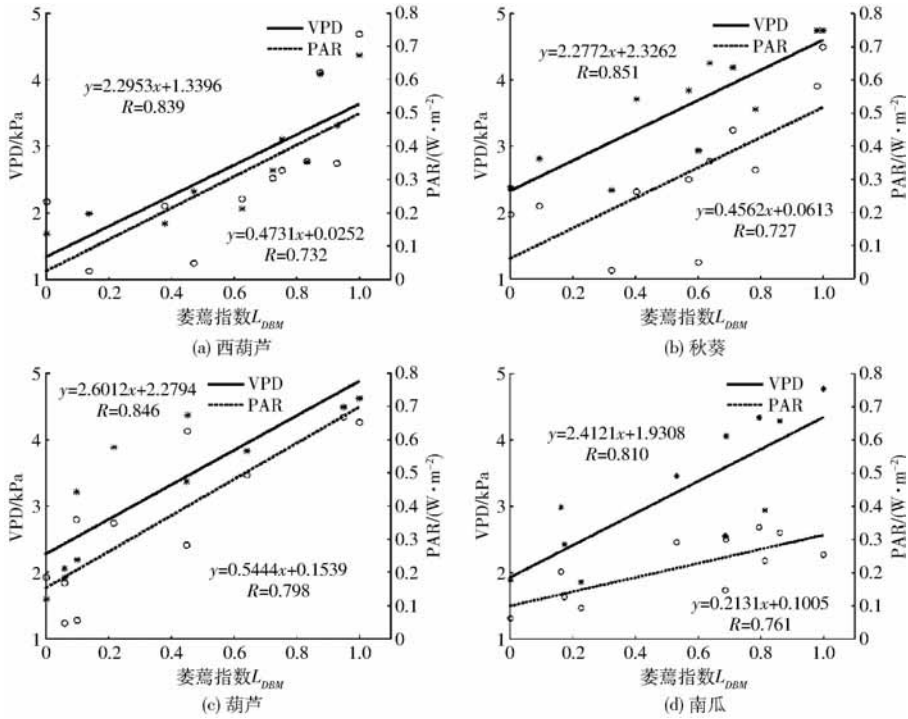


图 3 环境参数 VPD 和 PAR 日变化

Fig. 3 Diurnal variations of VPD and PAR

通过对比可以看出,4 种植物 L_{DBM} 与 VPD 的相关性整体比 L_{DBM} 与 PAR 的相关性大,这是因为植物受到环境因素的影响后,在形态上做出表征

具有一定的时滞,而叶态对 PAR 的响应时间要大于对 VPD 的响应时间,表现为相关性较差一些。葫芦 L_{DBM} 与 PAR 的相关系数为 0.798,大于其他 3

图4 萎蔫指数 L_{DBM} 与环境参数相关性Fig. 4 Regressions associating L_{DBM} with VPD and PAR

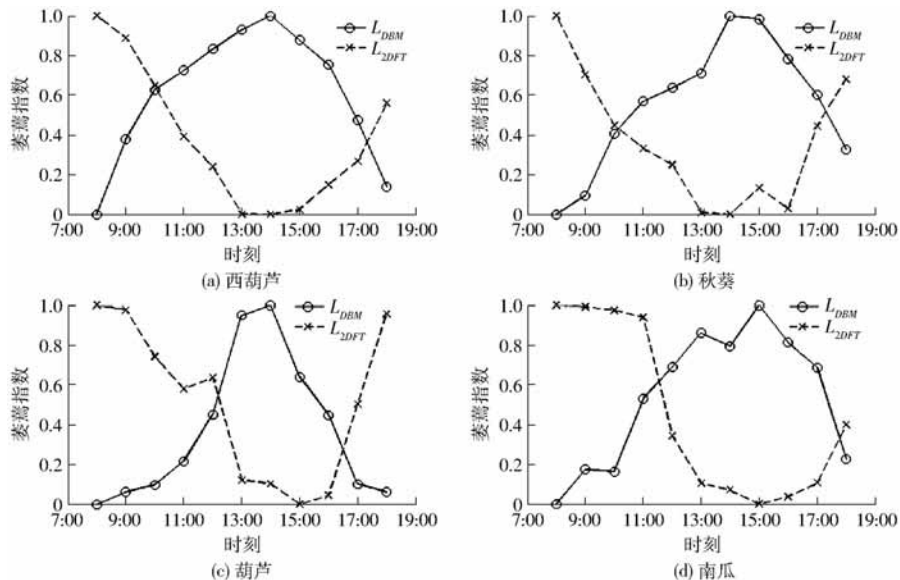
种植物,这可能同样是因为3.1节提到的葫芦叶态过渡性状态较少,对微环境因素的变化响应速度较快。

3.3 萎蔫指数 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 对比

之前的研究中基于离散时域傅里叶变换定义了萎蔫指数 L_{2DFT} ,与 L_{DBM} 相同,是基于全局几何特征的参数^[15]。根据两者定义可知,当叶片萎蔫程度增

大, L_{2DFT} 值减小, L_{DBM} 值增大;当叶片萎蔫程度减小, L_{2DFT} 值增大, L_{DBM} 值减小。理论上分析可知, L_{2DFT} 和 L_{DBM} 呈负相关性。

图5为4种植物的 L_{DBM} 和 L_{2DFT} 日变化曲线,可以看出,两者具有较强的负相关性。分析结果如表1所示,4种植物的相关系数均大于0.83,具有很强的相关性。

图5 萎蔫指数 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 对比Fig. 5 Comparisons of L_{DBM} and L_{2DFT}

3.4 多天试验结果分析

分别选取4种植物7d数据进行萎蔫指数 L_{DBM}

计算,对 L_{DBM} 与 VPD、PAR 进行相关性分析,并与萎蔫指数 L_{2DFT} 进行对比分析,结果如表2所示。

从表 2 可知, 4 种植物的 L_{DBM} 与 VPD 相关系数处于区间 $[0.810, 0.879]$, 均大于 0.81, 与 PAR 相关系数处于区间 $[0.712, 0.825]$, 均大于 0.71; 与萎蔫指数 L_{2DFT} 的相关系数处于区间 $[0.826, 0.944]$, 均大于 0.82。表明试验结果具有较好的鲁棒性。

表 1 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 相关性分析

Tab. 1 Regressions associating L_{DBM} with L_{2DFT}

植物	拟合公式	相关系数
西葫芦	$y = -0.9171x + 0.9397$	0.853
秋葵	$y = -0.9361x + 0.8855$	0.931
葫芦	$y = -0.8961x + 0.8426$	0.832
南瓜	$y = -1.0962x + 1.0424$	0.862

4 结论

(1) 基于分形理论“双毯法”定义了萎蔫指数 L_{DBM} , 利用三维激光扫描仪采集了西葫芦、秋葵、葫芦、南瓜 4 种植物的叶态数据, 对萎蔫指数日变化曲线进行了定量分析; 同时结合微环境因素 VPD 和 PAR 进行了相关性分析, 4 种植物的 L_{DBM} 与饱和水汽压差相关系数处于区间 $[0.810, 0.879]$, 均大于 0.81, 与光合有效辐射相关系数处于区间 $[0.712, 0.825]$, 均大于 0.71, 表明利用萎蔫指数 L_{DBM} 定量地表征叶态萎蔫是可行的。

(2) 与萎蔫指数 L_{2DFT} 进行了对比, 萎蔫指数 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 呈负相关性, 4 种植物的相关系数处于

表 2 L_{DBM} 与微环境参数及 L_{2DFT} 相关性分析

Tab. 2 Regressions associating L_{DBM} with VPD, PAR and L_{2DFT}

植物	编号	VPD	PAR	L_{2DFT}
西葫芦	zucchini-1	0.839	0.732	0.853
	zucchini-2	0.863	0.724	0.863
	zucchini-3	0.873	0.787	0.897
	zucchini-4	0.828	0.820	0.918
	zucchini-5	0.853	0.804	0.839
	zucchini-6	0.842	0.782	0.894
	zucchini-7	0.820	0.749	0.929
秋葵	okra-1	0.851	0.727	0.931
	okra-2	0.827	0.743	0.907
	okra-3	0.850	0.761	0.855
	okra-4	0.821	0.751	0.944
	okra-5	0.862	0.811	0.890
	okra-6	0.822	0.713	0.874
	okra-7	0.818	0.712	0.854
葫芦	gourd-1	0.846	0.798	0.832
	gourd-2	0.873	0.791	0.887
	gourd-3	0.879	0.750	0.871
	gourd-4	0.842	0.825	0.887
	gourd-5	0.835	0.746	0.903
	gourd-6	0.867	0.785	0.915
	gourd-7	0.834	0.816	0.881
南瓜	pumpkin-1	0.810	0.761	0.862
	pumpkin-2	0.840	0.720	0.870
	pumpkin-3	0.853	0.726	0.851
	pumpkin-4	0.821	0.722	0.826
	pumpkin-5	0.840	0.789	0.836
	pumpkin-6	0.815	0.728	0.879
	pumpkin-7	0.837	0.750	0.875

区间 $[0.826, 0.944]$, 均大于 0.82, 为植物生命需水状况定量无损、实时、在线检测提供了一种可行方法。

参 考 文 献

- 赵燕东, 马扬飞, 王勇志. 绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 46-50.
ZHAO Yandong, MA Yangfei, WANG Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation amount[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 46-50. (in Chinese)
- 郑力嘉, 孙宇瑞, 蔡祥. 基于激光扫描 3D 图像的植物亏水体态辨识与萎蔫指数比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 79-86.
ZHENG Lijia, SUN Yurui, CAI Xiang. Identification of plant morphology induced by water stress and comparison of indices using laser scan 3D image[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 79-86. (in Chinese)
- 赵燕东, 荣斐, 刘圣波, 等. 基于 2DFT 的植物叶片萎蔫程度与微环境因素相关性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 253-258.
ZHAO Yandong, RONG Fei, LIU Shengbo, et al. Correlation between wilting index of plant morphology defined by 2DFT spectrum and micro-environmental factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 253-258. (in Chinese)
- 潘映红. 论植物表型组和植物表型组学的概念与范畴[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 175-186.
PAN Yinghong. Analysis of concepts and categories of plant phenome and phenomics[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(2): 175-186. (in Chinese)
- PAULUS S, BEHMANN J, MAHLEIN A K, et al. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(2): 3001-3018.
- AZZARI G, GOULDEN M L, RUSU R B. Rapid characterization of vegetation structure with a microsoft kinect sensor[J]. Sensors, 2013, 13(2): 2384-2398.
- BISKUP B, SCHARR H, SCHURR U, et al. A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies[J]. Plant, Cell & Environment, 2007, 30(10): 1299-1308.
- JIN J, TANG L. Corn plant sensing using real-time stereo vision[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 591-608.
- KRAFT M, SALOMÃO DE FREITAS N, MUNACK A. Test of a 3D time of flight camera for shape measurements of plants[C]//

CIGR Workshop on Image Analysis in Agriculture, 2010: 108 – 115.

- 10 KLOSE R, PENLINGTON J, RUCKELSHAUSEN A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping [J]. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, 2009, 69: 93 – 105.
- 11 BISHOP T E, FAVARO P. The light field camera: extended depth of field, aliasing, and super resolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5): 972 – 986.
- 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 HOSOI F, OMASA K. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(2): 151 – 158.
- 14 LICHTI D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM – CW terrestrial laser scanner system [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 61(5): 307 – 324.
- 15 张新, 赵燕东, 郑力嘉, 等. 基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 260 – 267.
ZHANG Xin, ZHAO Yandong, ZHENG Lijia, et al. Prediction model of plant leaf wilting using 3-D machine vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 260 – 267. (in Chinese)
- 16 董士伟, 李宪海, 李红, 等. 基于多尺度分形特征的 ETM + 影像耕地提取 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 213 – 218.
DONG Shiwei, LI Xianhai, LI Hong, et al. Extraction of cultivated land using ETM + image based on multiscale fractal signature [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 213 – 218. (in Chinese)
- 17 郭建明. 分形理论在遥感影像空间尺度转换中的应用研究 [D]. 西安: 西北大学, 2008.
GUO Jianming. An analysis on scale transformation in remote sensing-Based on fractal theory [D]. Xi'an: Northwest University, 2008. (in Chinese)
- 18 SERGEYEV Y D. Using blinking fractals for mathematical modeling of processes of growth in biological systems [J]. *Informatica*, 2011, 22(4): 559 – 576.
- 19 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)
- 20 张红梅, 吴炳方, 闫娜娜. 饱和水汽压差的卫星遥感研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 559 – 568.
ZHANG Hongmei, WU Bingfang, YAN Nana. Remote sensing estimates of vapor pressure deficit: An overview [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 559 – 568. (in Chinese)
- 21 WANG X, GUO Y, LI B, et al. Evaluating a three dimensional model of diffuse photosynthetically active radiation in maize canopies [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 50(6): 349 – 357.

(上接第 321 页)

- 16 靳志光. 图像全站仪系统若干技术问题研究及应用 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2008.
JIN Zhiguang. Some technique questions and application about the image total station system [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2008. (in Chinese)
- 17 SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [C] // *Proceedings of IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*, 2001: 131 – 140.
- 18 陈念, 李进, 王海晖. 双目立体视觉测量系统的研究与实现 [J]. *武汉工程大学学报*, 2011, 33(5): 101 – 104.
CHEN Nian, LI Jin, WANG Haihui. Research and implementation of measurement system based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2011, 33(5): 101 – 104. (in Chinese)
- 19 张丽娟, 杨进华, 姜雨彤, 等. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 091002 – 1 – 091002 – 8.
ZHANG Lijuan, YANG Jinhua, JIANG Yutong, et al. Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 091002 – 1 – 091002 – 8. (in Chinese)
- 20 冯文灏. 近景摄影测量——物体外形与运动状态的摄影法测定 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 11 – 14.
- 21 袁修孝, 明洋. POS 辅助航带间航摄影像的自动转点 [J]. *测绘学报*. 2010, 39(2): 156 – 161.
YUAN Xiuxiao, MING Yang. POS-supported matching method for aerial images between neighboring strips [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 156 – 161. (in Chinese)
- 22 雷相东, 洪玲霞, 陆元昌, 等. 国家级森林资源清查地面样地设计 [J]. *世界林业研究*, 2008, 21(4): 35 – 40.
LEI Xiangdong, HONG Lingxia, LU Yuanchang, et al. A review on ground plot design for national forest inventory in the world [J]. *World Forestry Research*, 2008, 21(4): 35 – 40. (in Chinese)