

植物叶态萎蔫辨识方法研究

1. 研究意义

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。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。随着“sensor-to-plant”的概念被广泛接受，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，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^[1]。与 2D 机器视觉主要辨识被观测对象的颜色不同，基于 3D 图形的机器视觉可以从植物叶片的形态变化上做出判据，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，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。

2. 理论基础

2.1 基于离散时域傅里叶变换的植物叶态萎蔫指数

叶片曲面上的点云数据为非周期性离散信号，应用 2D 离散时域傅里叶变换进行运算得到频谱信息，频谱中的直流分量代表了曲面的平面成分，高次谐波分量代表曲面中不同弯曲程度的曲面成分，直流分量在频谱中所占的比重可以定量地表征植物叶片的萎蔫程度。依此定义了萎蔫指数 L_{2DFT} ：

$$L_{2DFT} = \frac{A_0}{A_0 + \sum_{i=1}^n A_i}$$

式中： A_0 —频域分解出的直流分量谱幅度

$A_i(i=1,2,..n)$ — r 次谐波下的幅度谱

显然，按照上式定义的频域萎蔫指数 $0 < L_{2DFT} < 1$ 。在叶片水分饱和的情况下，

L_{2DFT} 趋于 1；反之，在严重萎蔫情况下， L_{2DFT} 趋于 0。同时， L_{2DFT} 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。

2.2 基于分形理论双毯法的植物叶态萎蔫指数

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，本研究利用分形理论中“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），是针对三维空间中函数表面形成夹围体积而估计分形维数值的，并且是针对单波影像所作的分维估计。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，在曲面的上下 ε 距离处构成一个厚度为 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， b_ε 为下表面。初始情况下，令：

$$u_0(i, j) = b_0(i, j) = f_0(i, j)$$

上下两张曲面分别按照如下原则生长：

$$u_\varepsilon(i, j) = \max\{u_{\varepsilon-1}(i, j) + 1, \max[u_{\varepsilon-1}(m, n)]\}$$

$$b_\varepsilon(i, j) = \min\{b_{\varepsilon-1}(i, j) - 1, \min[b_{\varepsilon-1}(m, n)]\}$$

$$\varepsilon = 1, 2, 3 \dots$$

则“毯子”的体积为：

$$v_\varepsilon = \sum_{i,j} (u_\varepsilon(i, j) - b_\varepsilon(i, j))$$

表面积为：

$$A(\varepsilon) = \frac{v_\varepsilon}{2\varepsilon}$$

又因为分形表面积符合如下关系式：

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

则：

$$\log A(\varepsilon) = c_1 \log \varepsilon + c_0$$

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 ，而：

$$c_1 = 2 - D$$

即可计算出分形维数 D ，把 D 作为萎蔫指数：

$$L_{DBM} = D$$

即得到相应叶片的萎蔫指数，可知，叶片萎蔫程度越大， L_{DBM} 的值越大，叶片萎蔫程度越小， L_{DBM} 的值越小。与 L_{2DFT} 相同，此处使用“双毯法”分形维数定义的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。

3. 传感关键技术

植物叶态萎蔫信息的获取属于植物 3D 表型研究范畴，植物 3D 表型表征技术根据传感器是否需要有序扫描可以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；双目立体视觉技术的核心在于匹配算法，然后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；传统的 ToF 技术受背景光干扰严重，只适用于室内无光条件；光场相机最近首次被应用于生命科学，价格十分昂贵，技术还需进一步成熟。除此之外，照相机技术共有的问题在于外界光源对于采样干扰较大，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。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 1cm 左右，

边缘检测能力差，如采集的 3D 点云图的边缘器官（如叶片）会很模糊；而激光三角技术的分辨率很高，可以达到 1mm，传感器采用了一种特殊的过滤膜，在强的太阳光下也能正常使用，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。

随着背景光抑制技术的发展，新型的 ToF 摄像机能够有效的抑制外界光源的干扰，由于照相机技术具有扫描时间短等扫描仪技术无法比拟的特点，因此本研究同时尝试了基于 ToF 摄像机的萎蔫辨识研究，同样取得了较好的效果。

3.1 三维激光扫描仪

实验所用的关键技术是一台激光 3D 扫描装置如图 1 所示。它的测量过程基于激光三角测距原理，激光源发出的激光束为红色，与目标接触后形成的散射光通过透镜会聚在探测器上形成一个像点。经过光路成像的位置—角度的计算，最终获得与测量目标的相对距离。它的测量分辨力 1mm，测量高度调整范围 0—50cm，最大水平扫描范围 1.7m×0.5m。该装置由 MPC430 单片机控制，沿 x 与 y 方向的扫描步距与扫描范围均可预先参数设定调整。这种特殊的光学装置的主要技术优势是能够对物质世界中某些不可触摸的实体对象进行非接触 3D 测量。

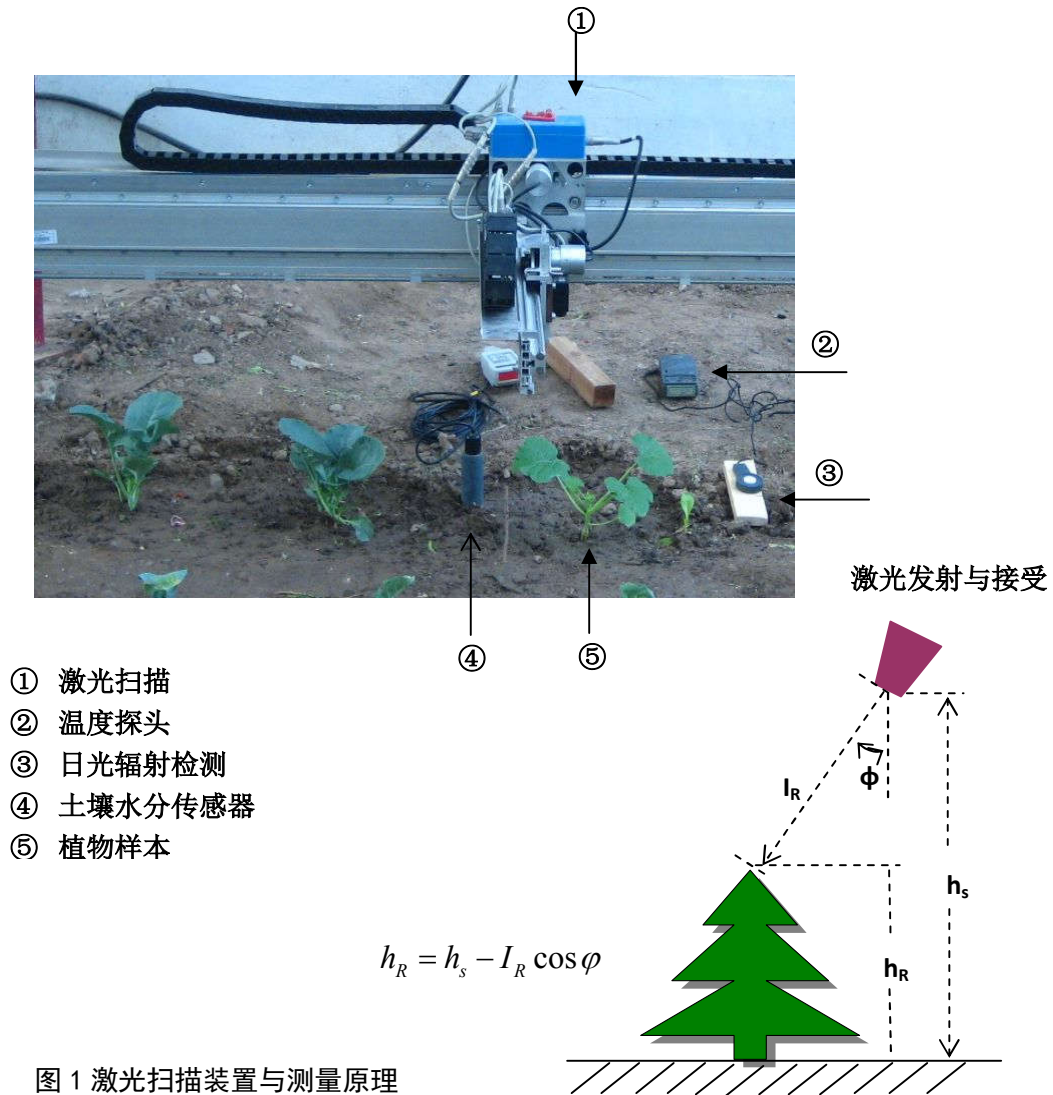


图 1 激光扫描装置与测量原理

3.2 ToF 摄像机

TOF 测量系统主要由射频调制发光管(LED)或者激光阵列、CMOS 或者 CCD 接收传感器组成, 如图 2 所示。TOF 摄像机采用间接测距技术, 其发射器向目标发出振幅经过余弦调制的光信号, 经探测器接受目标反射后的入射光, 获得发射与入射光信号的相位差, 由此计算出飞行时间, 再结合光速, 可以得到摄像机与目标的距离。摄像机上每个像素都可以接收信号, 因此, 每个像素都能测量到相应目标的距离。由 TOF 拍出的 3D 图像上的每个像素点所代表的测量距离 d 就是根据光速 c 在 t 时间内的飞行距离来计算的, 考虑到 d 为光飞行距离的一半, 计算公式可表达为

$$d = \frac{c}{4\pi f_m} \Delta\phi$$

式中： c —光速

f_m —连续调制光信号频率

$\Delta\phi$ —光在飞行过程中信号产生的相位延迟

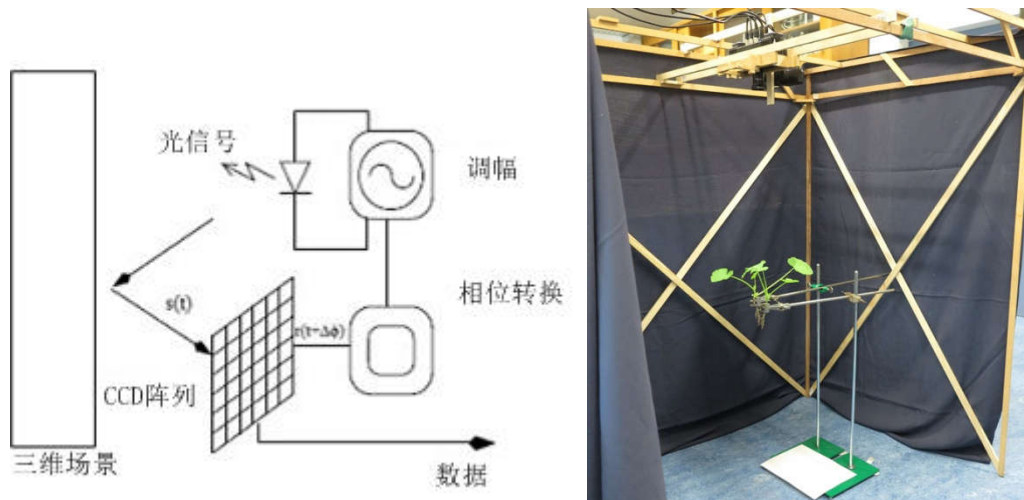


图 2 TOF 摄像机原理及工作现场示意图

4. 研究结果

4.1 基于三维激光扫描仪的萎蔫指数 L_{2DFT}

研究对象：西葫芦、葫芦、南瓜、秋葵

如图 3，表 1 所示：基于离散时域傅里叶变换的萎蔫指数 L_{2DFT} 能够准确地定量表征叶态萎蔫程度。

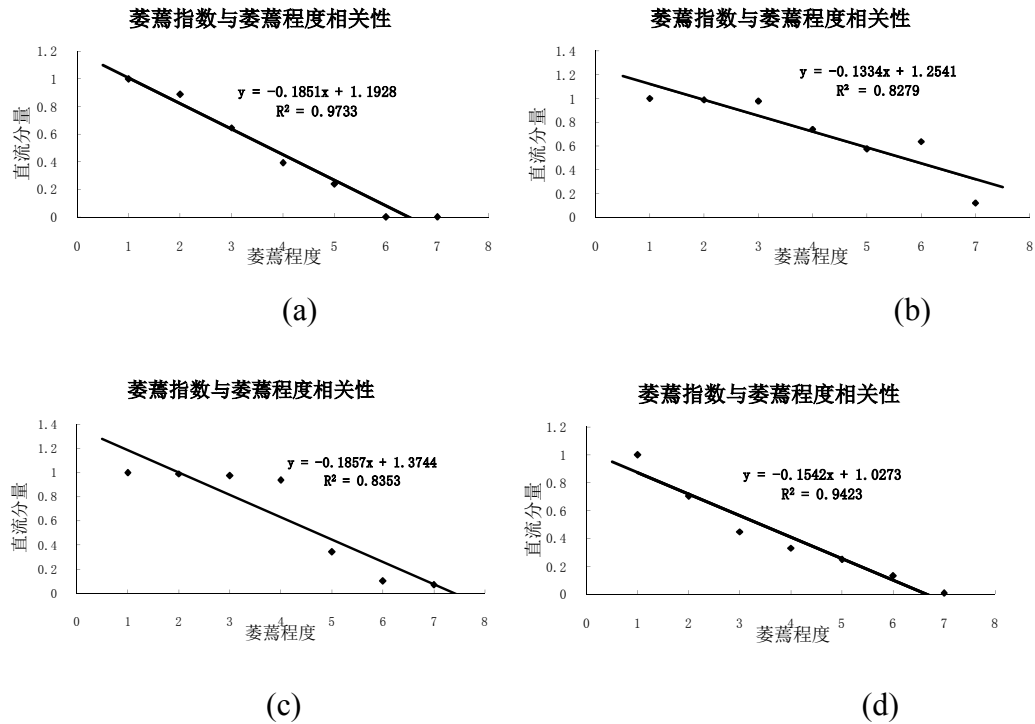


图3 四种植物萎蔫指数 L_{2DFT} 与萎蔫程度相关性

(a)西葫芦 (b)葫芦 (c)南瓜 (d)秋葵

表1 四种植物相关性对比

植物种类	拟合曲线	相关系数 R^2
西葫芦	$y = -0.1851x + 1.1928$	0.9733
葫芦	$y = -0.1334x + 1.2541$	0.8279
南瓜	$y = -0.1857x + 1.3744$	0.8353
秋葵	$y = -0.1542x + 1.0275$	0.9425

4.2 基于三维激光扫描仪的萎蔫指数 L_{DBM}

研究对象：西葫芦、秋葵、葫芦、南瓜

4.2.1 萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

如图4，图5所示：基于分形理论双毯法的萎蔫指数 L_{DBM} 能够准确地定量表征叶态萎蔫程度。

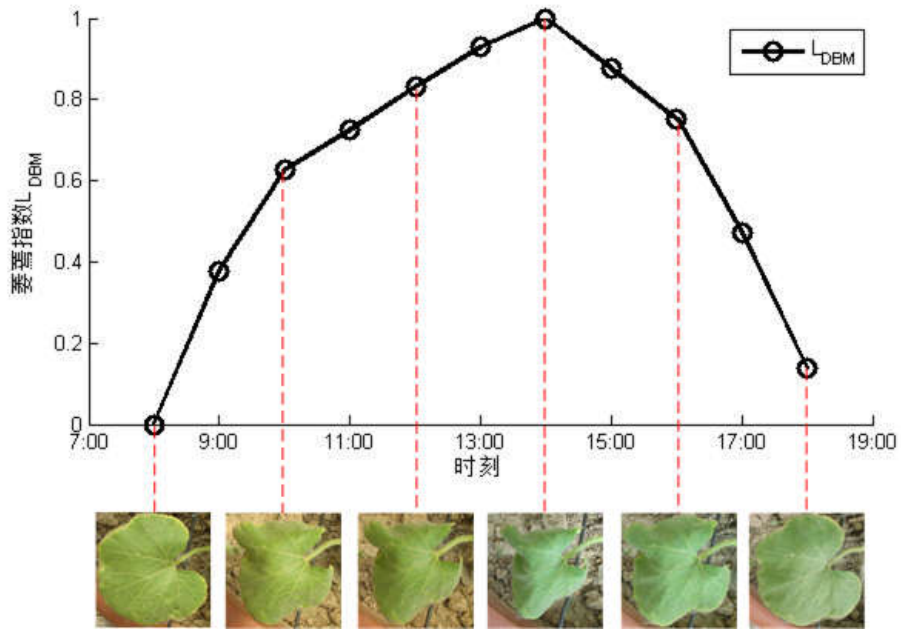


图4 西葫芦萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

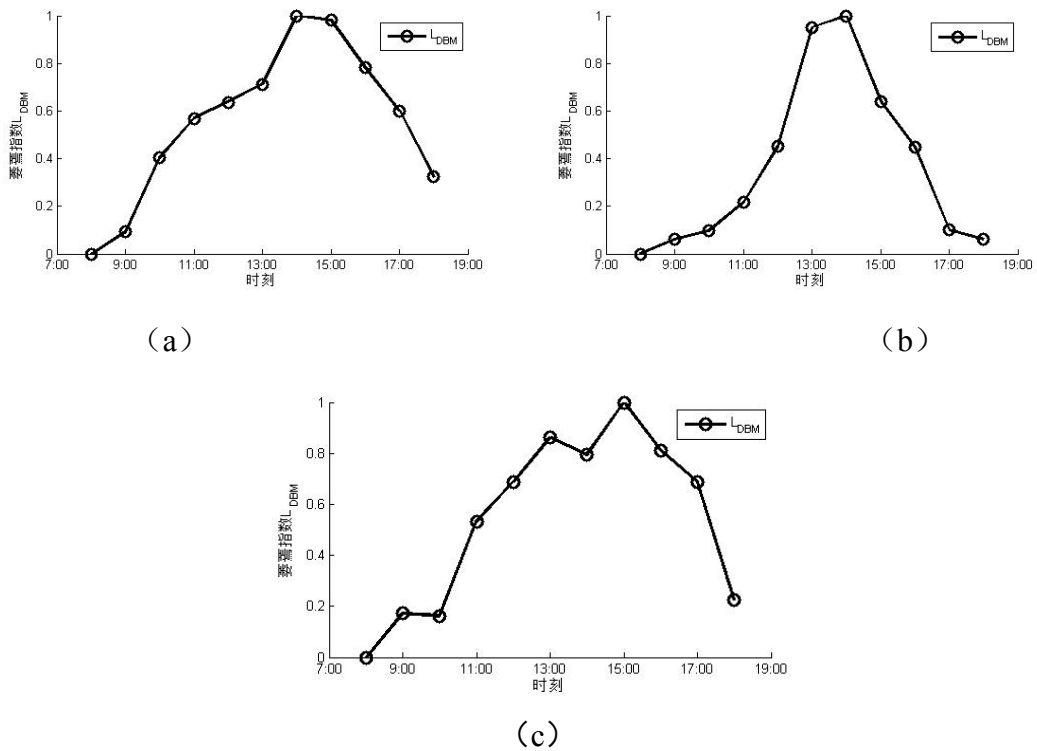
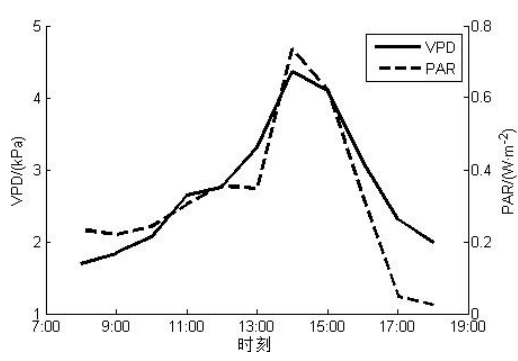


图5 萎蔫指数 L_{DBM} 日变化

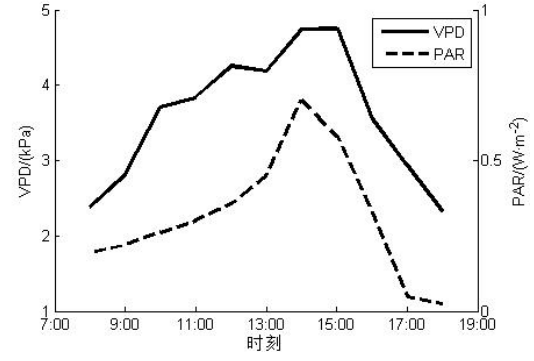
(a)秋葵 (b)葫芦 (c)南瓜

4.2.2 萎蔫指数 L_{DBM} 与微环境因素相关性

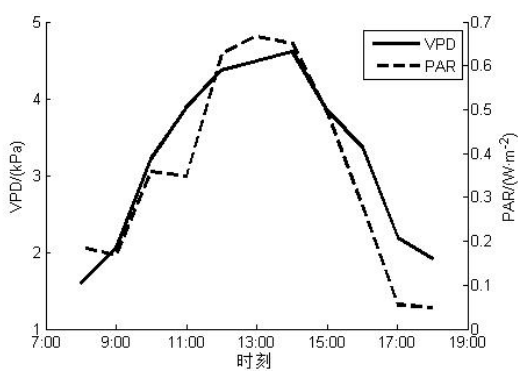
如图6, 图7所示: 基于分形理论双毯法的萎蔫指数 L_{DBM} 与微环境参数饱和水汽压 (VPD) 和光合有效辐射 (PAR) 都具有良好的相关性。



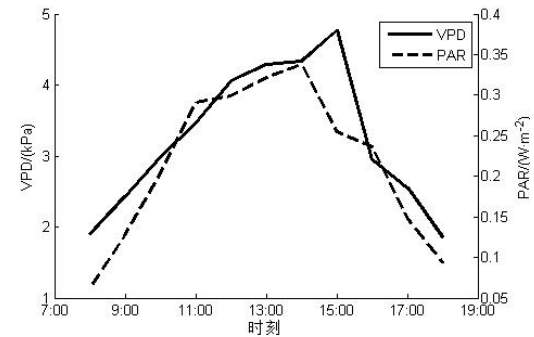
(a)



(b)



(c)



(d)

图 6 环境参数 VPD 和 PAR 日变化
 (a) 西葫芦 (b)秋葵 (c)葫芦 (d)南瓜

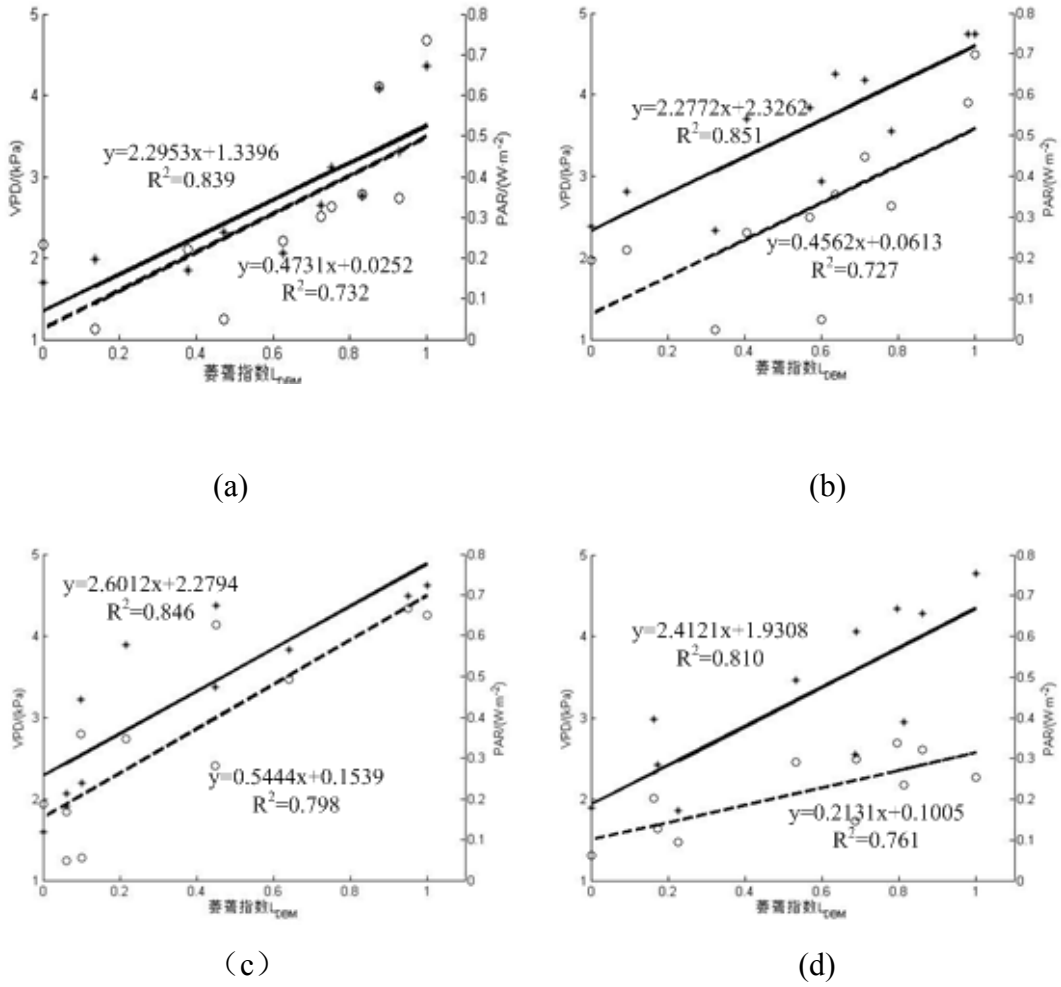


图 7 萎蔫指数 L_{DBM} 与环境参数相关性

(a)西葫芦 (b)秋葵 (c)葫芦 (d)南瓜

4.2.3 萎蔫指数 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 对比

如图 6，表 2 所示：基于分形理论双毯法的萎蔫指数 L_{DBM} 与 基于离散时域傅里叶变换的萎蔫指数 L_{2DFT} 具有很高的相关性，都可以准确地表征叶态萎蔫程度。

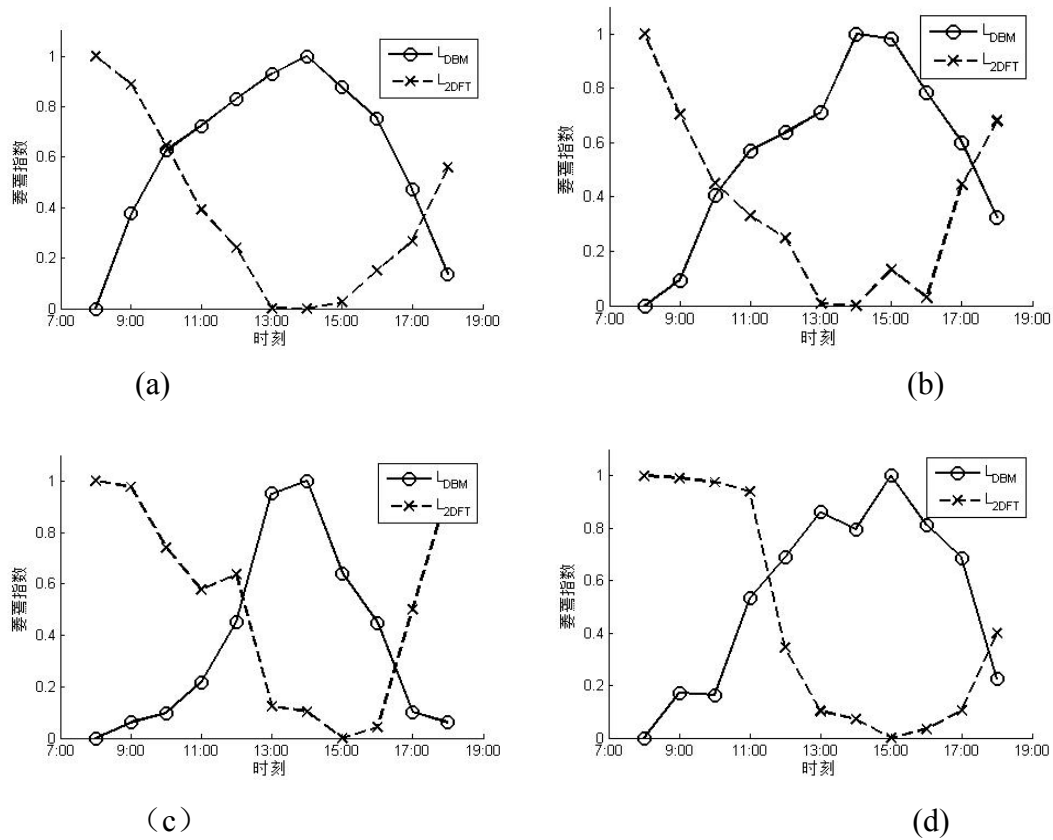


图 8 萎蔫指数 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 对比

(a)西葫芦 (b)秋葵 (c)葫芦 (d)南瓜

表 2 L_{DBM} 与 L_{2DFT} 相关性分析

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

4.3 基于 ToF 摄像机的萎蔫指数 L_{2DFT}

研究对象：黄瓜、绿皮西葫芦

根据图 9，图 10，表 3，表 4，表 5 可知，基于 ToF 摄像机的植物叶态萎蔫辨识研究能够准确地定量表征叶态萎蔫程度。

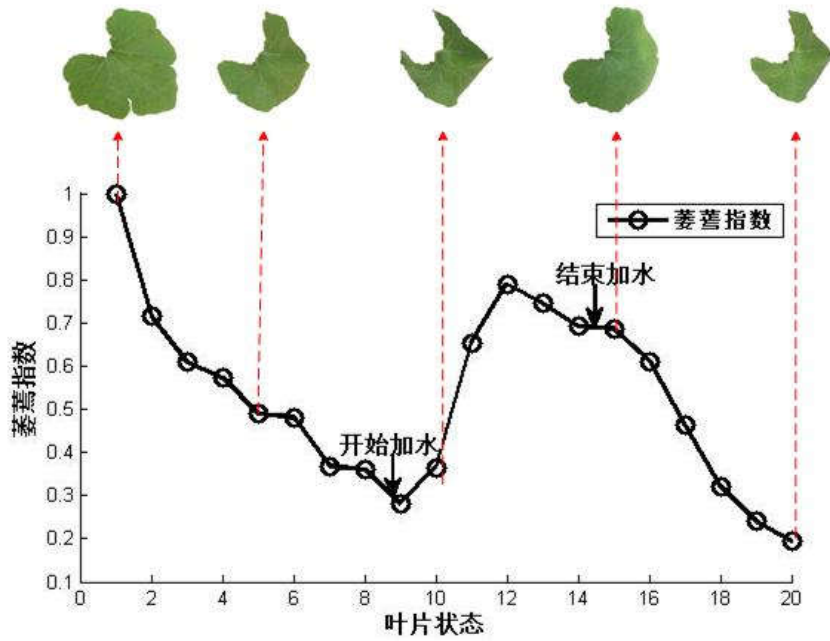


图9 单片叶萎蔫指数（黄瓜）

表3 萎蔫指数单因素方差分析结果

	平方和	<i>df</i>	均方	<i>F</i>	显著性
组间	0.00098	1	0.00098	0.02	0.8904
组内	0.79875	16	0.04992		
总数	0.79973	17			

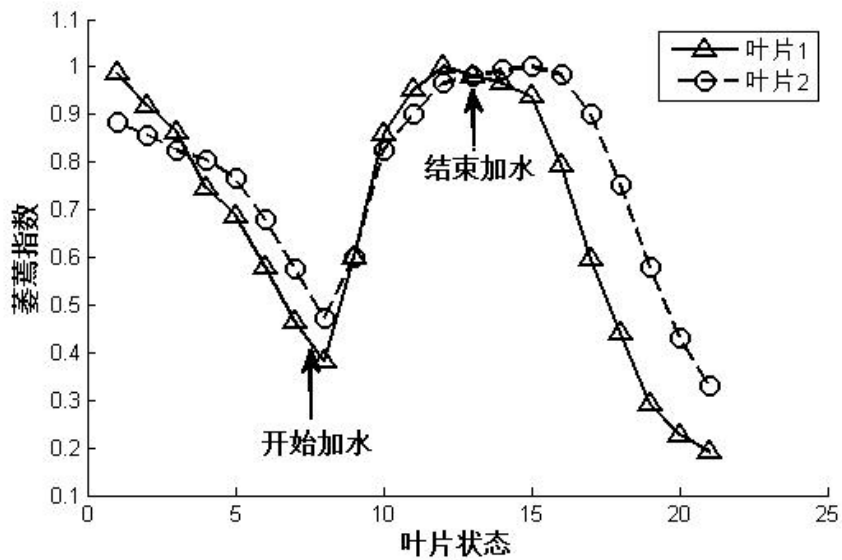


图10 多片叶萎蔫指数（绿皮西葫芦）

表4 叶片1 萎蔫指数单因素方差分析结果

	平方和	<i>df</i>	均方	<i>F</i>	显著性
组间	0.08793	1	0.08793	1.2	0.2922
组内	1.02746	14	0.07339		
总数	1.11539	15			

表 5 叶片 2 萎蔫指数单因素方差分析结果

	平方和	<i>df</i>	均方	<i>F</i>	显著性
组间	0.00071	1	0.00071	0.02	0.9036
组内	0.65399	14	0.04671		
总数	0.6547	15			

5.应用前景

从农耕时代到上个世纪末, 农林作物生命需水状况的判断都是通过叶片的颜色深浅变化、茎干的挺拔耷拉程度、果实的饱满干瘪状况等植株的外在表现, 结合多年的种植经验来进行人为的定性判断; 从 20 世纪九十年代在 21 世纪初, 植物生理学家逐步提出了多种植物生理指标, 如叶水势、蒸腾速率、茎流速率等, 同时研制了相应的检测仪器, 植物生命需水状况检测步入了量化阶段, 这些量化的生理指标从根基上表征了植物体的水分运营状况, 然后如何解读每项指标, 至今没有一种通用的标准, 并且这些指标的检测更多地适用于试验研究, 操作往往很复杂。

植物和动物一样, 具有自主的生命意识, 只是他们的表达方式不易被人类所识别, 植物叶片的萎蔫状态即是植物向外界传递的水分需求状况信息。如何采集这样的信息, 如何进一步的解读这些信息就是本研究的核心工作, 也是本课题组多年来的研究趋向。本文展示了关键传感技术的选取、叶态萎蔫程度量化指标的定义以及最终植物传达的需水信息的解读。此研究涉及了植物学、控制工程学、机械工程学、生物学、数学等多项学科, 是跨学科的综合性与应用, 同时推动了植物表型研究、三维数字图像处理等应用技术的发展, 在林木研究、农作物培育、精准灌溉和城市绿地化等领域都具有重要的现实意义。