



基于微波热声成像的植物叶片水分含量分布无损检测技术研究*

谢实梦 汤永辉 黄 林**

(电子科技大学电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘要 目的 植物叶片水分含量分布是衡量植物生理生化的重要指标, 该指标也是农业科学领域中制定抗旱策略的重要依据。微波成像对水分含量分布和变化具有高对比度, 超声成像对水分含量分布具有高分辨率。据此, 本文提出兼具微波和超声成像优势的无损微波热声成像 (thermoacoustic imaging, TAI) 技术, 并用此技术开展了植物叶片水分含量分布的无损检测研究, 进行植物叶片水分含量分布的检测, 对于实现精准灌溉、发展节水农业、提高水资源利用率有重要意义。
方法 本文构建了激发频率 3.0 GHz、横向分辨率 406 μm 的二维透射式 TAI 系统。基于主动加热技术 (150°C 热风, 90 s), 模拟 3 组曼陀罗叶片水分流失过程, 对其 TAI 图像进行定量分析。**结果** 加热导致叶片局部水分流失, 微波热声信号降低 (信号最大变化量为 10%), 验证了基于 TAI 技术实现植物叶片水分含量变化无损检测的可行性。实现了曼陀罗、野苘蒿和紫苏叶片水分含量分布的无损检测, 检测结果与核磁共振成像吻合。**结论** 本研究有助于实现精准灌溉, 为植物在正常和胁迫环境下对环境的响应特性研究提供技术支撑。尤其是与非接触超声检测技术相结合, 可以实现植物叶片水分含量的遥感成像, 更具实用价值。

关键词 微波, 热声成像, 植物叶片, 水分含量分布

中图分类号 Q6

DOI: 10.16476/j.pibb.2024.0055

进行植物叶片水分含量分布的检测, 对于实现精准灌溉、发展节水农业、提高水资源利用率有重要意义。目前, 针对植物叶片水分含量分布的检测包括有损和无损检测两种。有损检测方法主要有: 烘干法^[1]、电测法^[2]、蒸馏法^[3]、卡尔费休法^[4]等, 此类方法设备成本低, 但操作复杂, 会对植物叶片造成不可逆损伤, 测试结果时效性也较差, 难以反映整个叶片的水分含量分布。无损检测方法主要有: 太赫兹成像^[5]、光谱成像^[6]、核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)^[7] 等, 但此类方法在成像穿透性、不同叶片的适用性以及设备的性价比方面都存在一些不足。因此, 本文利用微波热声成像 (thermoacoustic imaging, TAI) 技术, 提出了一种设备性价比高、检测对象通用性强、对比度高且操作便捷的无损检测方法, 用于植物叶片水分含量分布的长期动态监测。

微波热声效应是光声效应的一种形式, 依靠脉冲微波激励待测样品产生热致伸缩, 进而产生超声波 (热致声/热声) 信号用于成像^[8]。TAI 兼具微

波成像的高对比度和超声成像高分辨率的优势, 且使用微波剂量较低, 产生温升为 mK 量级。TAI 对比度主要源自于目标对微波的吸收强弱差异 (如水等极性分子), 目前已开展了诸如乳腺癌检测^[9-12]、脑卒中鉴别^[13]、关节炎检测^[14]、血管显像^[15]、肾脏^[16] 和前列腺^[17] 成像等方面的应用研究, 但尚未见有关于 TAI 用于植物叶片水分含量无损检测的研究报道。TAI 图像反映目标水分含量和离子浓度相关的介电特性, 其信号强弱可由坡印廷公式反应^[10]:

$$P_{\text{loss}} = \sigma_d(\vec{r})E \cdot E^* + \sigma_e(\vec{r})E \cdot E^* + \epsilon\mu_0(\vec{r})\mu_r''(\vec{r})H \cdot H^* \quad (1)$$

公式 (1) 中 P_{loss} 为电磁波单位体积功率损耗, $\sigma_d(\vec{r})$ 为直流电导率, $\sigma_e(\vec{r})$ 为极化电导率, E 和 H

* 国家自然科学基金 (82071940, 62001075, 82371977) 资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 17780665334, E-mail: lhuang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2024-02-18, 接受日期: 2024-04-07

分别为电场和磁场强度。由于本文所研究植物叶片为非磁性，故第三项关于介电常数 ϵ 和磁导率 μ 的部分可以忽略不计。正常情况下，植物叶片含水量较高，极化电导率较大；因此对微波具有较强的极化损耗。

目标吸收微波能量产生超声波的过程可以由热声波动方程进行描述^[8]：

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H(t)}{\partial t} \quad (2)$$

C_p 为比热； β 为媒质体膨胀系数； p 表示吸热产生的热声压强信号； c 为光速， $H(t)$ 表示单位面积和时间内吸收的微波能量，主要由 P_{loss} 决定。 P_{loss} 越大，产生的微波热声信号强度越大。

已有研究表明，小麦叶介电常数会随着水分含量的变化而变化（通常表现为正相关性）^[18]，其微波吸收特性也会相应发生改变，进而产生不同强弱的微波热声信号。因此，推测植物叶片水含量分布发生变化时，TAI具有成像检测的能力。基于TAI的植物叶片水分含量分布检测研究，本文构建了中心频率为3.0 GHz，横向分辨率为406 μm 的透射式TAI系统，分别实现了曼陀罗、野苘蒿和紫苏叶片水分TAI成像，并与MRI成像结果进行了对比分析，同时，利用局部加热模拟叶片水分流失和分布改变，通过对3组曼陀罗植物叶片水分流失前后的TAI图像进行定量分析，验证了植物叶片水分变化可由TAI图像变化进行表征。实验结果表明，本文所提TAI技术可用于评估植物叶片水分含量分布，具有安全、无损、操作便捷的优点，有助于实现农业生产的精准灌溉，以及为植物在正常和胁迫环境下对环境的响应特性研究提供一种全新的技术

支撑。

1 实验系统

本文所搭建的透射式TAI成像系统框图（图1），主要包括脉冲微波源、信号收集和放大、数据采集以及机械扫描4部分。小型化高功率脉冲微波源（70 ns 脉宽，<60 kw 峰值功率，3.0 GHz $\pm$ 25 MHz 中心频率，1~200 Hz 重复频率；HWK-3050FA，成都国睿电子科技有限公司，成都）用于TAI信号激发。脉冲微波经由同轴线缆（1.5 m，1.2 dB 插损，Micable 迈可博电子，福州）输出至偶极子天线（60 $\times$ 60 $\times$ 45 mm³，增益7.8 dB）用于样品热声信号激发^[19]，实验中所用微波功率密度低于电气与电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）规定^[20]的20 mW/cm²。热声信号接收采用点聚焦超声换能器（10 MHz 中心频率，带宽80%，焦距25.4 mm，晶圆直径13 mm；V311-SU，奥林巴斯，美国），接收的热声信号首先经由前置放大器（带宽0.3~500 MHz，增益62 dB，AU-1291，MITEQ，美国）放大，然后经由4路加法电路合成降噪^[21]，最后被数据采集卡（100 MPs 采样率，14 bit 精度，PCI-5122，National Instruments，美国）采集并存储于计算机中，利用最大值投影进行图像重建^[22]。光栅式机械扫描由两个二维步进电机完成（最大行程50 mm，精度2.5 μm ，最大速度10 mm/s，TSA 50-C，北京卓立汉光有限公司，北京）。为保证超声和微波信号的有效耦合，以及保护植物叶片不受损害，本文采用护肤橄榄甘油（江西平康实业有限公司）作为耦合剂。

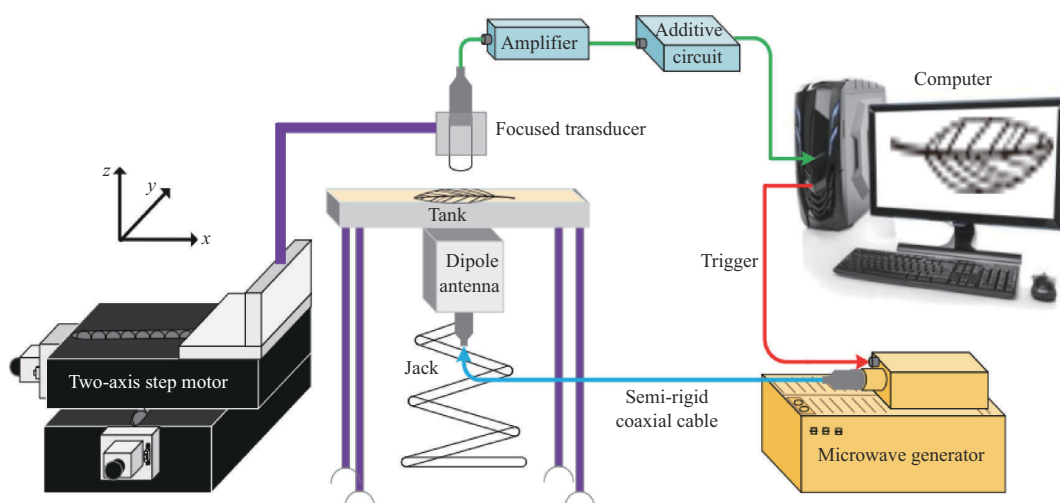


Fig. 1 Schematic of the TAI system

2 结果与讨论

本文首先对直径 0.3 mm 铜丝进行 TAI 成像, 以对系统横向空间分辨率进行测试。实验过程中设置微波源脉宽为 70 ns, 重复频率为 50 Hz, 图像扫描范围为 2 mm×2 mm, 扫描间隔步长为 0.1 mm,

信号平均次数为 10 次, 完成扫描所需时间为 140 s。图像处理时对信号先进行 3~15 MHz 带通滤波, 得到铜丝的最大值投影 TAI 图像 (图 2a), 在图像中可以清晰观察到铜丝轮廓, 验证了该成像系统可以稳定工作。测量图 2a 中白色虚线的一维信号轮廓分布, 得到图 2b, 并根据所得半高宽结果计算出系统横向分辨率为 406 μm 。

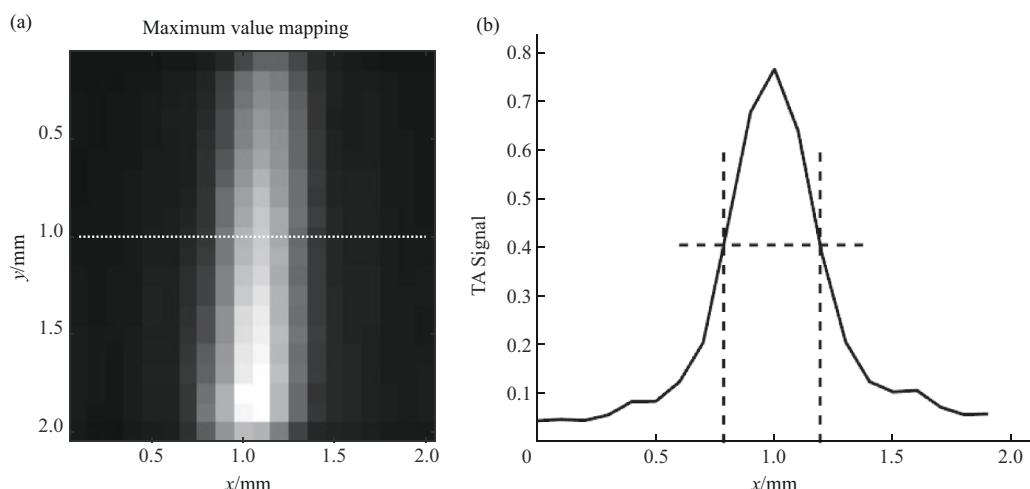


Fig. 2 Spatial resolution of the TAI system

(a) Recovered TA image. (b) Recovered microwave absorption profile along the white dashed line shown in (a).

为验证本文所提 TAI 技术具有对植物叶片成像的能力, 分别对曼陀罗 (图 3a)、野苘蒿 (图 3d) 和紫苏 (图 3g) 植物叶片进行 MRI (图 3b, e, h) 和 TAI (图 3c, f, i) 成像。选取上述 3 种植物叶片用于实验研究的原因是样品易于获取, 样品收集时间为白天, 每组数据重复 3 次以上, 具有统计意义。MRI 因其对水分含量和分布具有高分辨率、无损成像的优势, 已在植物科学领域有所应用。本文所用 MRI 为 GE 公司 3.0 T 磁共振扫描仪 (Discovery MRI 750), 所用序列为 OAx T2 FSE, 扫描层厚 1.5 mm。TAI 扫描成像范围均为 10 mm×10 mm, x 、 y 轴的扫描步长均为 0.2 mm。为保证成像结果具有一定统计性, 每种植物叶片至少选取 3 片进行成像, TAI 结果为图中红色虚框所示区域。

曼陀罗植物叶片成像结果表明, MRI 图像 (图 3b) 与叶片实物图 3a 轮廓一致, V1 亮度 > V2 亮度 (V1 和 V2 分别代表植物叶片的叶脉所在的区域和编号), 含水量更丰富; 但网状脉对比度不

够, 细微叶脉结构亮度不够, 整个图像较模糊。TAI 图像 (图 3c) 与叶片实物图 3a 轮廓一致, V1 亮度 > V2 亮度, 与 MRI 图像 (图 3b) 结果一致。TAI 图像 V3 区域显像效果好于 MRI 图像, 且 TAI 对于植物叶片细微结构分布具有较好的成像能力, 其成像结果与 MRI 水分分布成像结果具有一致性。

野苘蒿植物叶片成像结果表明, MRI 图像 (图 3e) 和 TAI 图像 (图 3f) 与叶片实物图 3d 轮廓一致。图像中可以看出, 野苘蒿植物叶片由于不具有很网状脉的自然形态特征, 其他主要叶脉的含水量充足, 因此在图 3e 中主要的叶脉与叶肉的对比度很高, 可以清晰地看到一些主要叶脉的水分分布。TAI 图像 (图 3f) 也发现了相同的现象, 即野苘蒿叶脉的 TAI 信号强度强于叶肉信号强度。通过对比 MRI 图像 (图 3e) 与 TAI 图像 (图 3f) 发现, MRI 以及 TAI 图像标记的 S1 叶脉均表现出信号强度低, 表明 TAI 结果与 MRI 结果具有一致性, 均对水分分布较敏感。

紫苏叶片成像结果表明，MRI 图像（图 3h）和 TAI 图像（图 3i）与叶片实物（图 3g）轮廓一致。相比于曼陀罗和野苘蒿植物叶片，紫苏叶片较为干燥，含水量较少且紫苏叶片细微结构较多，因此 MRI 图像较模糊、对比度较低，特别是主叶脉

T1 与周围叶肉难以区分。TAI 成像中 T1 主叶脉区域及 T2 分支叶脉清晰可见，同时也能观察到 T3 小叶脉。通过与 MRI 结果对比，进一步表明 TAI 能对植物叶片水分分布进行成像。

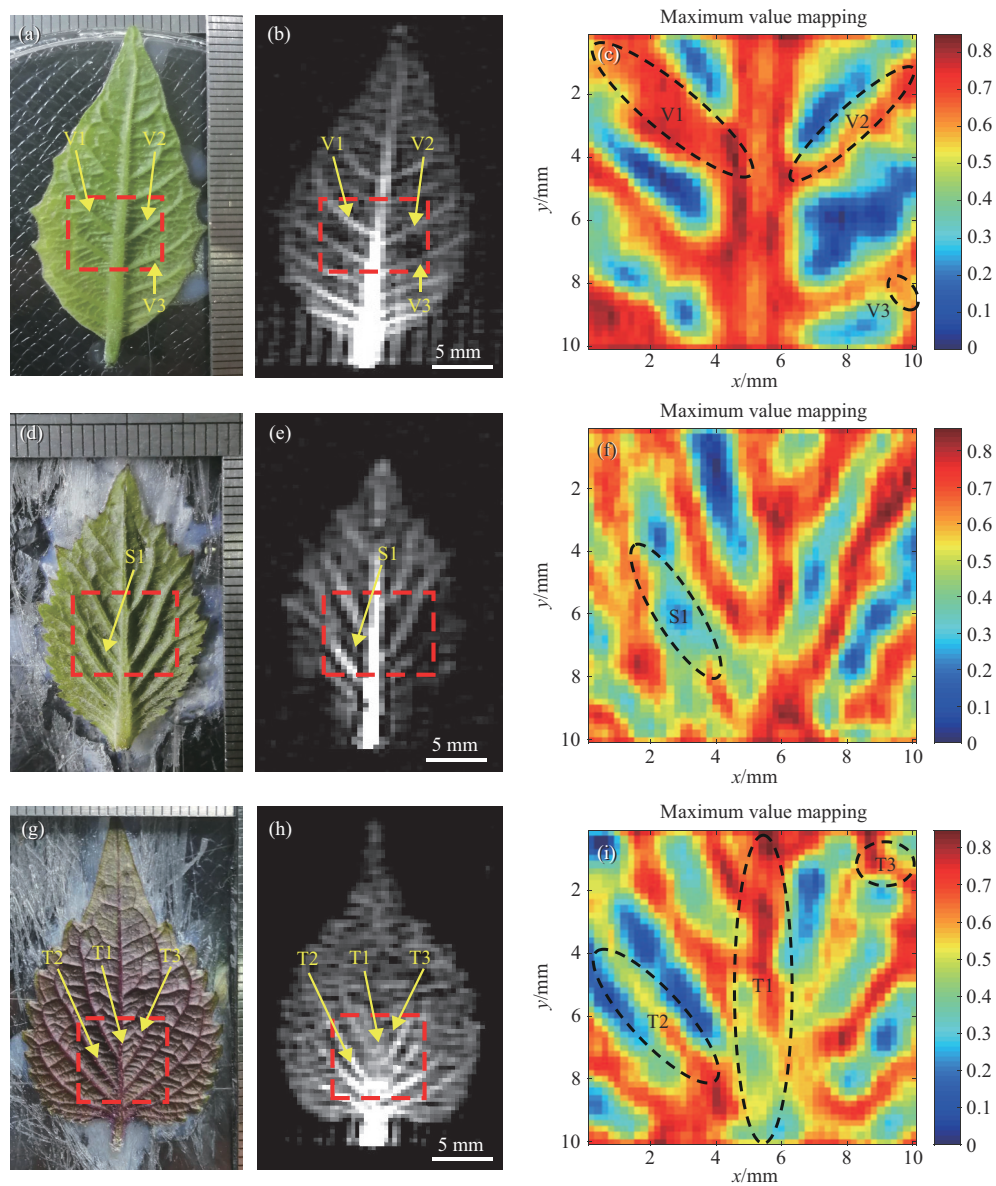


Fig. 3 TAI results of the leaf

(a, d, g) Pictures of the *Datura*, *Crassocephalum crepidioides* and *Perilla* leaves. (b, e, h) MRI images of the *Datura*, *Crassocephalum crepidioides* and *Perilla* leaves. (c, f, i) TAI images of the *Datura*, *Crassocephalum crepidioides* and *Perilla* leaves.

为进一步验证本文所提 TAI 技术能对植物叶片水分含量变化进行成像，选取 3 片曼陀罗植物叶

片，模拟植物叶片水分流失前后的 TAI 成像；实验过程中采用热风枪固定于植物叶片正上方 5 cm 处，

设定温度为 150°C , 正对植物叶片加热 90 s, 造成植物叶片水分流失及非均匀分布。图 4a 和 4e 分别为加热前后同一片植物叶片的实物图, 观察发现: 红色虚线框的扫描区域内, 加热后局部水分流失, 植物叶片呈现出干枯, 特别是植物叶片的主叶脉, 已经呈现萎缩状态。图 4b~d 和图 4f~h 分别为 3 片

植物叶片加热前、后的 TAI 图像, 结果表明: TAI 图像能较好反映植物叶片水分分布变化, 可用于其水分变化监测。为进一步验证 TAI 对于植物叶片水分变化的定量检测能力, 本文对 3 组曼陀罗植物叶片水分流失前后的 TAI 图像进行了定量分析, 结果如图 5 所示。

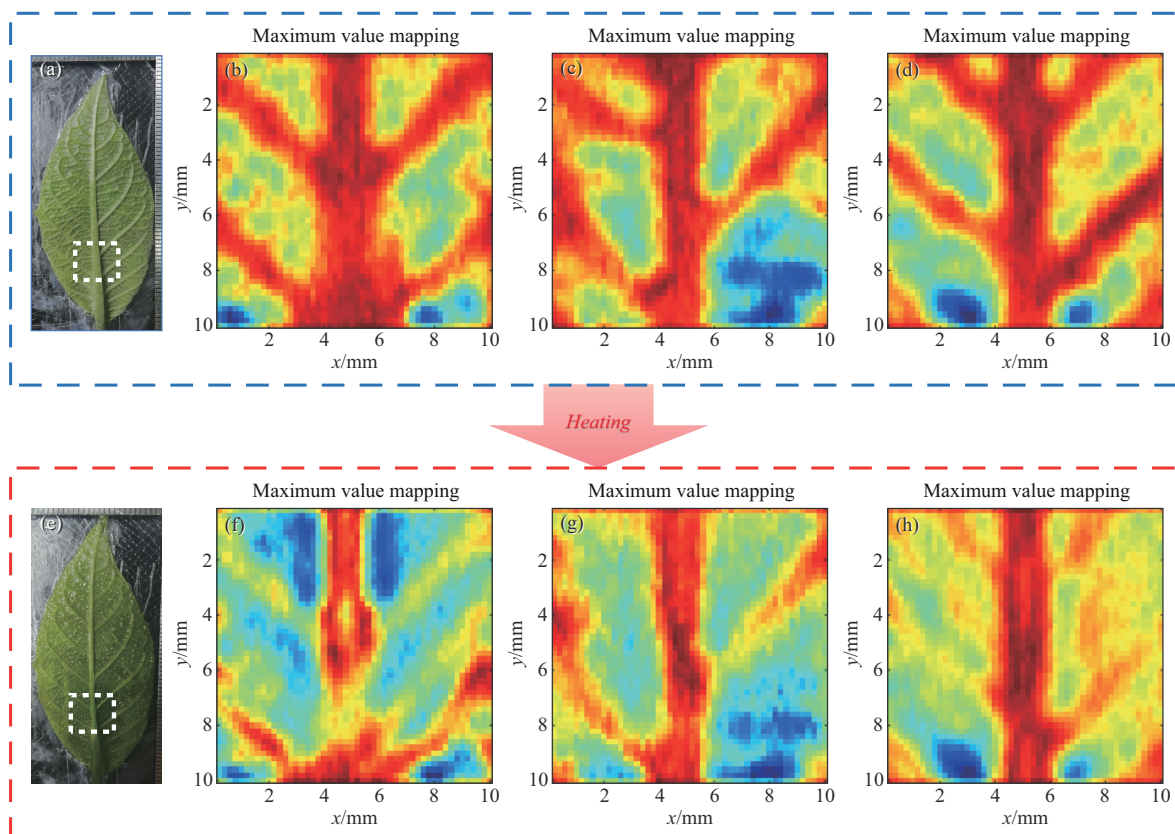


Fig. 4 TAI results of the *Datura* leaves before and after heating

(a, e) Pictures of the first leaf before (a) and after (e) heating. (b~d, f~h) TAI images before (b~d) and after (f~h) heating at the white imaginary frame position in the first, second and third *Datura* leaves, respectively.

图 5 中分别取出图 4b~d 和图 4f~h 中沿 $y=2$ mm、5 mm 和 8 mm 的一维轮廓信号分布图。图 5a 结果表明, 第一组曼陀罗植物叶片 TAI 图像 (图 4b, f) 在 $y=2$ mm 位置处, 水分流失前的 TAI 图像信号 (图 5a 中蓝色曲线) 高于水分流失后 (图 5a 中红色曲线)。分析发现, 图 5b 和 5c 所示 TAI 图像

位置 $y=5$ mm 和 $y=8$ mm 处, 均表现出水分流失后 TAI 信号减小。图 5d~i 所示为第二和第三组曼陀罗植物叶片 TAI 成像结果, 也表明加热导致水分流失后 TAI 信号减小, 信号最大变化量为 10% (图 5a, b, d, f), 表明 TAI 具有可视化监测水分变化的潜力。

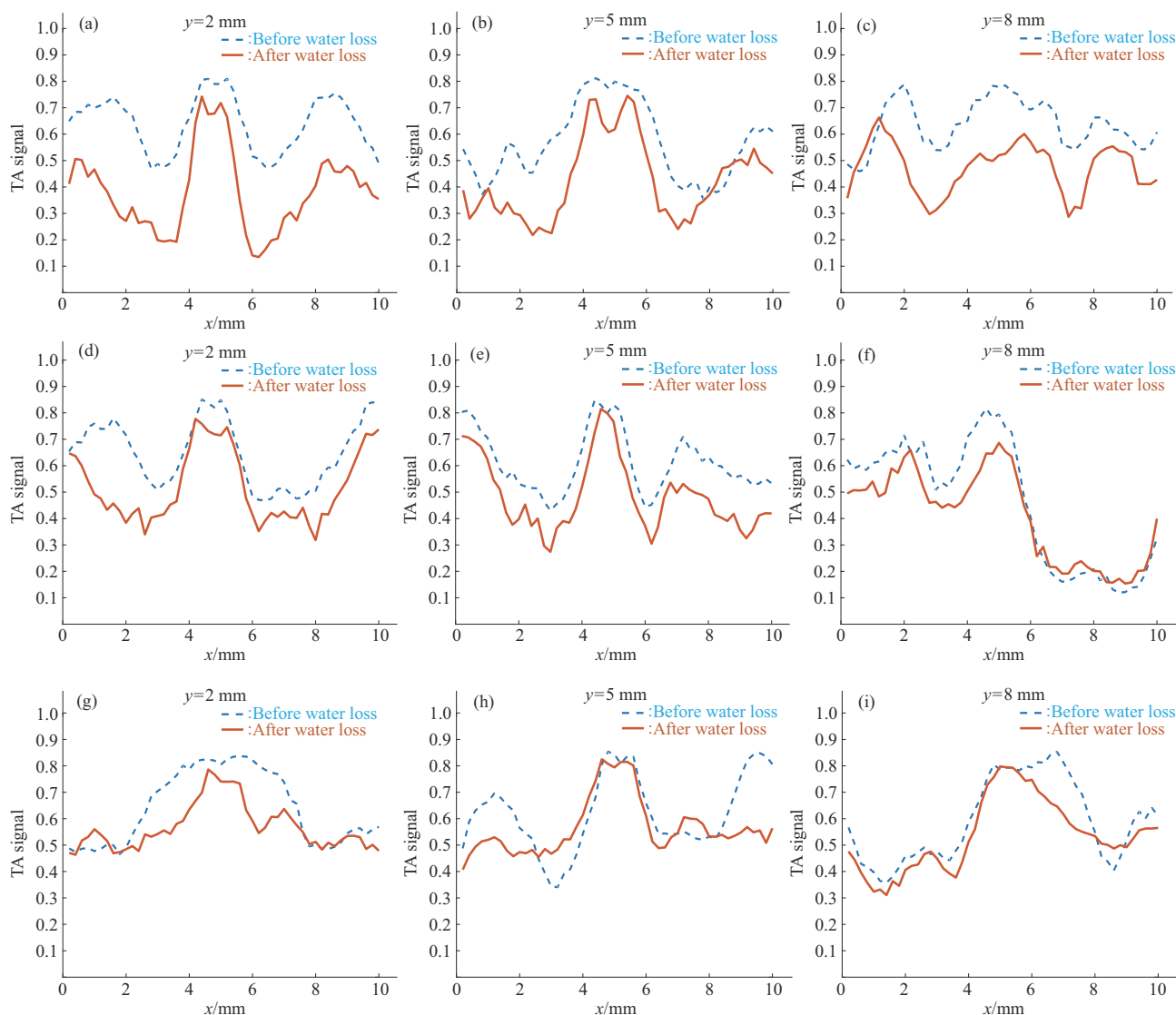


Fig. 5 Quantitative analysis of the *Datura* leaf's TAI images before and after being heating

Comparison of TAI signals before and after water loss along. (a) The first leaf at $y=2$ mm. (b) The first leaf at $y=5$ mm. (c) The first leaf at $y=8$ mm. (d) The second leaf at $y=2$ mm. (e) The second leaf at $y=5$ mm. (f) The second leaf at $y=8$ mm. (g) The third leaf at $y=2$ mm. (h) The third leaf at $y=5$ mm. (i) The third leaf at $y=8$ mm.

3 结 论

本文基于TAI技术,提出了植物叶片水分分布和含量变化的无损检测方法。基于本文构建的横向分辨率为 $406\ \mu\text{m}$ 的透射式TAI成像系统,实现了曼陀罗、野苘蒿和紫苏3种植物叶片的TAI成像,并与MRI成像结果进行了对比,验证了TAI技术用于植物叶片水分含量分布成像的可行性。同时,基于主动加热曼陀罗植物叶片的局部水分流失和非均匀分布模拟,完成了曼陀罗植物叶片水分流失前后TAI图像以及信号的定量对比,验证了TAI用于动

态可视化监测植物叶片水分变化的可行性。实验结果表明,本文所提TAI技术能够实现植物叶片水分含量分布的无损检测,有助于实现精准灌溉,以及为深入阐释植物在正常和胁迫环境下对环境的变化响应特性提供重要的技术支撑,具有较大的学术价值和科学意义。

然而,在未来实际应用中,本文所提TAI技术还存在一些技术问题有待改进。首先,目前的TAI系统采用的透射式成像模式实用性较差,需配合天线设计改为反射式成像模式^[23],以满足户外场景使用需求。其次,本文所用TAI系统分辨率有待提

高, 可以通过聚焦微波和选取更优的超声换能器参数提高系统对比度和分辨率。再则, 目前所用TAI机械扫描速度有限, 导致时间分辨率较低, 未来可通过阵列式超声换能器或者基于声学扫描振镜^[24-26]的扫描机制提高TAI成像的时间分辨率, 以满足未来研究和应用所需。此外, 还应开展不同植物叶片和不同水含量的介电特性测试研究, 针对不同植物以及不同含水量变化灵敏度需求, 结合脉冲微波源现有技术水平, 寻求最佳微波激发频率, 以实现较高性价比的植物叶片水分含量无损检测。最后, 针对野外长时程动态、大范围监测的需求, 可以通过微波以及激光测振技术实现非接触式微波热声信号探测, 并利用微波远距离传输的特性, 实现植物叶片水分含量和分布的非接触式高分辨率无损遥感监测。

参 考 文 献

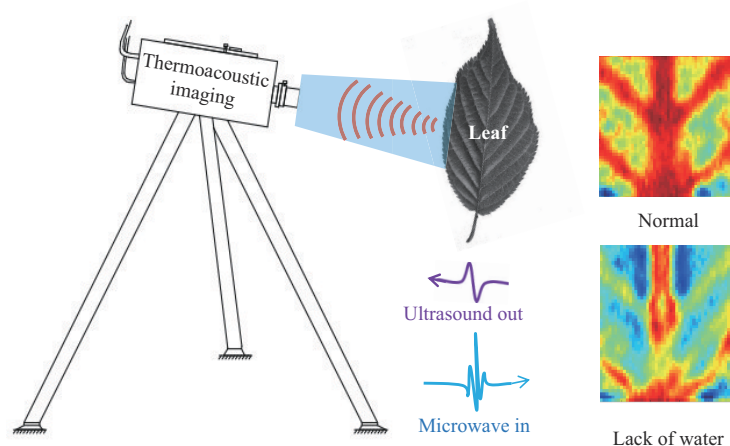
- [1] 顾洪彪, 李淑娟. 减压烘干法测定种子含水量的研究进展. 种子, 2012, **31**(4): 54-56
Gu HB, Li S X. Seed, 2012, **31**(4): 54-56
- [2] Afzal A, Duiker S W, Watson J E, *et al.* Leaf thickness and electrical capacitance as measures of plant water status. Trans ASABE, 2017, **60**(4): 1063-1074
- [3] 范涯, 骆华星. 蒸馏法测定蜂花粉中的水分. 中国卫生检验杂志, 2009, **19**(3): 688-689
Fan Y, Luo H X. Chin J Health Lab Technol, 2009, **19**(3): 688-689
- [4] 吴琼, 宗迎, 徐志, 等. 卡尔费休法测定胡椒水分含量的比较研究. 热带农业科学, 2013, **33**(1): 58-60, 66
Wu Q, Zong Y, Xu Z, *et al.* Chin J Trop Agric, 2013, **33**(1): 58-60, 66
- [5] Di Girolamo F V, Toncelli A, Tredicucci A, *et al.* Leaf water diffusion dynamics *in vivo* through a sub-terahertz portable imaging system. J Phys Conf Ser, 2020, **1548**(1): 012002
- [6] Wang L, Duan Y, Zhang L, *et al.* LeafScope: a portable high-resolution multispectral imager for *in vivo* imaging soybean leaf. Sensors (Basel), 2020, **20**(8): 2194
- [7] Musse M, De Franceschi L, Cambert M, *et al.* Structural changes in senescing oilseed rape leaves at tissue and subcellular levels monitored by nuclear magnetic resonance relaxometry through water status. Plant Physiol, 2013, **163**(1): 392-406
- [8] Jiang H. Photoacoustic Tomography. Boca Raton: CRC Press, 2018
- [9] Kruger R A, Kopecky K K, Aisen A M, *et al.* Thermoacoustic CT with radio waves: a medical imaging paradigm. Radiology, 1999, **211**(1): 275-278
- [10] Li J, Wang B, Zhang D, *et al.* A preclinical system prototype for focused microwave breast hyperthermia guided by compressive thermoacoustic tomography. IEEE Trans Biomed Eng, 2021, **68**(7): 2289-2300
- [11] Huang L, Yao L, Liu L, *et al.* Quantitative thermoacoustic tomography: recovery of conductivity maps of heterogeneous media. Appl Phys Lett, 2012, **101**(24): 244106
- [12] Ren M, Cheng Z, Wu L, *et al.* Portable microwave-acoustic coaxial thermoacoustic probe with miniaturized Vivaldi antennas for breast tumor screening. IEEE Trans Biomed Eng, 2023, **70**(1): 175-181
- [13] Huang L, Li T, Jiang H. Technical note: thermoacoustic imaging of hemorrhagic stroke: a feasibility study with a human skull. Med Phys, 2017, **44**(4): 1494-1499
- [14] Chi Z, Zhao Y, Yang J, *et al.* Thermoacoustic tomography of *in vivo* human finger joints. IEEE Trans Biomed Eng, 2019, **66**(6): 1598-1608
- [15] Zheng Z, Huang L, Jiang H. Label-free thermoacoustic imaging of human blood vessels *in vivo*. Appl Phys Lett, 2018, **113**(25): 253702
- [16] Eckhart A T, Balmer R T, See W A, *et al.* Ex vivo thermoacoustic imaging over large fields of view with 108 MHz irradiation. IEEE Trans Biomed Eng, 2011, **58**(8): 2238-2246
- [17] Patch S K, Hull D, See W A, *et al.* Toward quantitative whole organ thermoacoustics with a clinical array plus one very low-frequency channel applied to prostate cancer imaging. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2016, **63**(2): 245-255
- [18] Ulaby F T, Jedlicka R P. Microwave dielectric properties of plant materials. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1984, **GE-22**(4): 406-415
- [19] Huang L, Ge S, Zheng Z, *et al.* Technical note: design of a handheld dipole antenna for a compact thermoacoustic imaging system. Med Phys, 2019, **46**(2): 851-856
- [20] IEEE Std C95.1, 1999 Edition. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz[S]. New York, USA: IEEE-SA Standards Board. 1998-12-08
- [21] 汤永辉, 郑铸, 谢实梦, 等. 基于多路放大器加法电路噪声抑制的热声成像技术. 物理学报, 2020, **69**(24): 112-117
Tang Y H, Zheng Z, Xie S M, *et al.* Acta Physica Sinica, 2020, **69**(24): 112-117
- [22] Shi J, Wong T T W, He Y, *et al.* High-resolution, high-contrast mid-infrared imaging of fresh biological samples with ultraviolet-localized photoacoustic microscopy. Nat Photonics, 2019, **13**: 609-615
- [23] Xi L, Sun J, Zhu Y, *et al.* Photoacoustic imaging based on MEMS mirror scanning. Biomed Opt Express, 2010, **1**(5): 1278-1283
- [24] Huang C H, Yao J, Wang L V, *et al.* A water-immersible 2-axis scanning mirror microsystem for ultrasound and photoacoustic microscopic imaging applications. Microsyst Technol, 2013, **19**(4): 577-582
- [25] Yao J, Huang C H, Wang L, *et al.* Wide-field fast-scanning photoacoustic microscopy based on a water-immersible MEMS scanning mirror. J Biomed Opt, 2012, **17**(8): 080505-1
- [26] Choi S, Kim J Y, Lim H G, *et al.* Versatile single-element ultrasound imaging platform using a water-proofed MEMS scanner for animals and humans. Sci Rep, 2020, **10**(1): 6544

Detection of Water Distribution in Plant Leaves Using Thermoacoustic Imaging*

XIE Shi-Meng, TANG Yong-Hui, HUANG Lin**

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Graphical abstract



Abstract Objective The distribution of water content in plant leaves is an important indicator for measuring plant physiology and biochemistry, and it is also an important basis for formulating drought resistance strategies in the field of agricultural science. Microwave imaging has high contrast and sensitivity in the distribution and variation of water content, while ultrasound imaging has high resolution. Based on this, this paper proposes a non-destructive microwave thermoacoustic imaging (TAI) technology that combines the advantages of microwave and ultrasound imaging, and uses this technology to carry out non-destructive testing research on the distribution of plant leaf water content, which is of great significance for achieving precise irrigation, developing water-saving agriculture, and improving water resource utilization. **Methods** This study constructs a two-dimensional transmissive TAI system with an excitation frequency of 3.0 GHz and a lateral resolution of 0.406 μm . Based on active heating technology (150°C hot air, 90 s), 3 sets of mandarin leaf moisture loss processes were simulated, and their TAI images were quantitatively analyzed. **Results** The results showed that heating caused local moisture loss and reduced thermoacoustic signals, verifying the feasibility of non-destructive detection of plant leaf water content changes based on TAI, which achieves non-destructive detection of water content distribution in leaves of *Datura*, *Crassocephalum crepidioides* and *Perilla*. The results are consistent with magnetic resonance imaging (MRI). **Conclusion** This study contributes to achieve precise irrigation and provides technical support for studying the response characteristics of plants to the environment under normal and stress environments. Especially when combined with non-contact ultrasound detection technology, remote sensing of plant leaf water content can be achieved, which has more practical value.

Key words microwave, thermoacoustic imaging, plant leaves, water distribution

DOI: 10.16476/j.pibb.2024.0055

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (82071940, 62001075, 82371977).

** Corresponding author.

Tel: 86-17780665334, E-mail: lhuang@uestc.edu.cn

Received: February 18, 2024 Accepted: April 7, 2024