

番茄声发射信号功率谱特征分析

余礼根^{1,2} 李长缨³ 陈立平^{1,2} 薛绪掌^{1,2} 卫如雪^{1,2} 郭文忠^{1,2}

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 佐治亚大学生物与农业工程系, 蒂夫顿 GA 31793)

摘要: 采用番茄品种“佳丽14”为试材,采集盆栽番茄声发射信号进行短时傅里叶变换与频谱分析,获取番茄在水分亏缺条件下声发射信号、土壤含水率及光合特征的连续变化规律及相互关系。依据土壤含水率变化将试验过程划分为 DAY1、DAY2、DAY3 和 DAY4 共 4 个阶段。试验结果表明,番茄声发射信号发生频次呈现出规律性,高峰期发生时间为每天 10:00—16:00,幅值分布在 40 ~ 60 dB;番茄声发射信号的主频和中心频率分布于 250 ~ 375 kHz,随着土壤含水率的降低,其主频与中心频率无显著变化;DAY1 的第 1 共振峰频率分布在 0 ~ 125 kHz,第 2 共振峰、第 3 共振峰位于 250 ~ 375 kHz, DAY2、DAY3 和 DAY4 的第 1、第 2、第 3 共振峰均分布在 250 ~ 375 kHz;从共振峰幅值上看, DAY1 的排列顺序为第 3、第 2、第 1 共振峰; DAY2 和 DAY4 的次序与之相反。番茄叶片净光合速率变化呈现单峰曲线,在中午 12:00 出现峰值,番茄的胞间 CO₂ 浓度呈现先增后减的变化趋势。综合分析番茄声发射信号、土壤含水率和光合特征参数变化可知,番茄灌溉初期与灌水后期的声发射信号共振峰频率、幅值的变化规律不同,其与水分亏缺程度密切相关,与番茄净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和光合作用具有相关性。通过番茄声发射信号功率谱特征分析可为番茄声发射特性研究提供一种分析方法。

关键词: 番茄; 声发射; 功率谱; 土壤含水率; 共振峰

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0189-06

Power Spectrum Characteristics Analysis for Acoustic Emissions Signal of Tomato

YU Ligen^{1,2} LI Changying³ CHEN Liping^{1,2} XUE Xuzhang^{1,2} WEI Ruxue^{1,2} GUO Wenzhong^{1,2}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of Georgia, Tifton GA 31793, USA)

Abstract: Taking tomato variety of ‘Jiali14’ as experimental materials, the relationship among the acoustic emissions signal, soil water contents and photosynthetic characteristic parameters of tomato under water deficit was analyzed. The short-time Fourier transform and power spectrum analysis computed by LabVIEW 2014 were employed to examine the spectrum characteristics of the collected AE signals. The whole process of water deficit was approximately divided into four stages: DAY1, DAY2, DAY3 and DAY4 according to the soil water contents. The results showed that characteristics for AEs during the water deficit period were presented by a regular change pattern, while the peak time was 10:00—16:00 and the amplitude was 40 ~ 60 dB. Power spectrum for acoustic emissions of tomato was a phenomenon observed in characteristic parameters with dominant frequency (f_p), central frequency (f_a) and formants. The frequencies of f_p , f_a and the second, third resonance peaks of DAY1 were distributed at 250 ~ 375 kHz, where the first resonance peak of DAY1 was distributed mainly at 0 ~ 125 kHz. The first, second and third resonance peaks of DAY2, DAY3 and DAY4 were all centralized at 250 ~ 375 kHz. From the amplitude of resonance peaks, the arrangement of DAY1 was the third, second, and first formant, but the order of formants for DAY2 and DAY4 were opposite of DAY1. A single peak curve was existed with net photosynthetic rate of tomato, and the peak value P_n occurred at 12:00, whereas the intercellular CO₂ concentrations were increased firstly and then decreased with the decrease of soil water

收稿日期: 2017-06-22 修回日期: 2017-08-03

基金项目: 科技部星火计划重点项目(2015GA600005)和北京市农林科学院设施园艺科技创新团队项目(JNKST201615)

作者简介: 余礼根(1985—),男,助理研究员,博士,主要从事动植物声信息感知技术研究, E-mail: yulg@nercita.org.cn

通信作者: 郭文忠(1970—),男,研究员,主要从事设施蔬菜高产高效栽培技术研究, E-mail: guowz@nercita.org.cn

contents. Although the changes of amplitude and frequencies of resonance peaks for acoustic emissions of tomato in initial irrigation stage and late irrigation stage were different, a good correspondence between AE outcomes and experimental observations of the net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentrations and photosynthetic performances was obtained and discussed. This result may provide a new monitoring method for acoustic emissions characteristics of water deficit through power spectrum analysis.

Key words: tomato; acoustic emission; power spectrum; soil water contents; resonance peak

引言

植物水分亏缺程度不仅是表征植物生长状况的一个重要生命指标,而且是调控植物生长过程的关键反馈因子。因此,对于不同尺度下植物水分亏缺程度的识别与表征以及植物生命健康需水信息的监测和调节,对植物水分状态快速准确的测量显得尤为重要^[1-2]。

近年来对植物水分生理的研究表明,植物一直以自己的“语言”在传达着缺水信号。植物的“语言”是指发生在植物水流通路上由于缺水而造成水流断裂时发出的爆裂声,或称为“尖叫声”,即植物声发射(Acoustic emission, AE)现象。学者们研究声发射时,一方面将声发射速率或数量与木质部突变过程进行关联,如冻融过程^[3-4]、干旱胁迫过程^[5-8]、干湿交替应变过程^[9]和病虫害胁迫过程^[10-12];另一方面将植物不同部位作为研究对象,如植物枝干^[13-14]、叶片^[15]或茎秆切片^[16]均可采集到AE信号,并作为一种机体信息的应力表达。已有的研究表明,AE信号可作为一个特殊的植物响应用于作物生长状态评估与病虫害胁迫监测。但在其广泛应用之前,需要进一步研究植物在水分亏缺状态下的频谱规律与响应机理。

功率谱分析是一种可以把AE信号从时域转换到频域,在频域中研究AE信号的特征分析方法^[17-20]。功率谱反映的是随机信号能量随频率的分布情况,通过功率谱分析获得番茄植株AE信号随土壤含水率变化的频谱特征,获得各个频段谱分量性能、功率谱和能量谱数据,提炼能够反映不同含水率条件下番茄AE信号的代表性功率谱特征参数。

本文通过番茄盆栽试验,测定分析灌溉饱和和水后的土壤含水率、光合特征参数、声发射信号的连续变化,寻求番茄在水分充足和水分亏缺下的声发射差异,并通过声发射信号功率谱分析,以期番茄灌溉策略的制定提供理论数据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与设计

试验于2016年8月—2017年1月在北京市农林

科学院试验温室内进行(39°56'32" N, 116°16'53" E)。供试作物为番茄,品种为“佳丽14”。在育苗室内培养至五叶一心时移栽于试验温室塑料花盆中,盆上口直径34.2 cm、底直径18.5 cm、深22.3 cm,采用盆栽土壤栽培,每盆装种植土壤11.0 kg(种植土壤为有机肥与自然土按质量比为1:80的比例混合并用微生物菌剂和敌百虫作灭菌、杀虫处理),施复合肥25 g。经测定,供试土壤理化性质为:土壤容重为 1.48 g/m^3 ,最大田间持水量为25.1%(即土壤含水率为37.1%),电导率为 0.5 mS/cm ,有机质含量24.5%,有效磷含量 91.7 mg/kg ,速效钾含量 310.6 mg/kg 。试验番茄于2016年9月26日定植,每盆定植长势一致的植株1株,共20株,对所有供试番茄浇透水缓苗10 d后,用保鲜膜进行覆盖密封盆栽土壤处理。试验开始于11月27日,灌溉饱和和水后进行土壤含水率、AE信号的连续监测,依次将试验过程划分为DAY1、DAY2、DAY3和DAY4共4个阶段,每组试验重复3次。试验期间进行正常田间管理,不喷施任何农药和激素。

1.2 测定内容与方法

(1)土壤含水率:试验期间,在植株根部右侧15 cm处安装ECH₂O土壤水分监测系统配套的GS3型土壤含水率传感器(精度: -2% ~ 2%),连续监测盆栽番茄距根茎部15 cm处的土壤含水率,每5 min读取1个数据。

(2)光合特征参数:试验采用美国LI-COR公司Li-6400XT型便携式光合速率测试仪,随机选取生长健康、长势一致的番茄植株为测量对象,测量位置选择为自上而下第5叶位的功能叶片,从灌溉饱和和水后连续3 d测定番茄叶片净光合速率(Net photosynthesis rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i),从08:00—16:00,每2 h整点测定,为减少试验数据的偶然性,每组试验条件重复3次。

(3)环境参数:试验温室内环境的光照强度和空气温度采用RS-13L型记录仪进行测定,测量范围:0 ~ 55℃、0 ~ 130 klx;测量精度:±0.5℃、±5%;分辨率:0.1℃、0.01 lx,每5 min读取1个数据。

(4)AE信号:声发射信号采集选用MICRO II

声发射监测系统、配套声发射采集卡 PCI-2(8 通道同步采集、18 位 A/D 分辨率、40 M/s 采样率、1 kHz ~ 3 MHz 频率范围)、声发射传感器选用 Nano30 型(响应频率为 125 ~ 750 kHz、灵敏度为 62 [- 72] dB ref. 1 V/(m/s) [10 V/ μ MPa])、放大器选用 2/4/6 型(响应频率为 20 ~ 1 200 kHz, 20/40/60 dB 3 挡), 实行 24 h 连续采集, 每天存储为 1 个数据文件。声发射传感器固定在番茄植株倒五叶位置的茎秆部位, 两者间涂抹凡士林保证充分接触。

1.3 数据处理与分析

选用 MICRO II 声发射监测系统配套的声发射信号分析软件 AE win-2 进行 AE 特征参数分析。为了研究番茄 AE 信号随土壤含水率的变化规律, 试验选取灌水后连续 4 d 的 AE 信号, 统计分析 AE 信号幅值(包括最大值、最小值和平均值)与发生频次; 为研究水分亏缺条件下番茄 AE 信号的频谱特征, 采用 LabVIEW 2014 编程计算频谱特征参数, 以均值 \pm 标准偏差的方式表示。

2 结果与分析

2.1 盆栽番茄土壤含水率的连续变化

盆栽番茄在水分亏缺下土壤含水率的连续变化如图 1 所示。试验结果表明, 土壤含水率呈现连续下降的趋势, 但降低速率和变化规律不一致。灌溉饱和水后的第 1 天, 土壤含水率从 36.3% 减少到 27.7%, 减少了 8.6 个百分点; 第 2 天, 土壤含水率从 27.7% 减少到 22.3%, 减少了 5.4 个百分点; 第 3 天, 土壤含水率从 22.3% 减少到 19.7%, 减少了 2.6 个百分点; 第 4 天, 土壤含水率从 19.7% 减少到 19.0%, 减少了 0.7 个百分点。据此可知, 番茄灌溉

饱和水后, 土壤含水率变化较大, 这是因为刚灌水后, 土壤表层较为湿润, 蒸发量较大, 土壤含水率变化较大, 此后土壤含水率降低速率逐渐减少, 并趋于平稳。

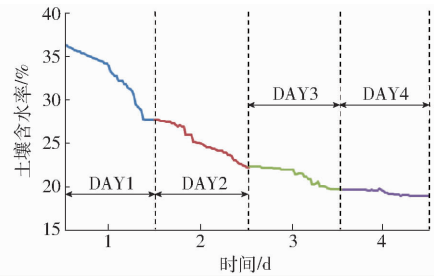


图 1 在水分亏缺下盆栽番茄土壤含水率的连续变化
Fig. 1 Continuous variations of soil water contents with tomato under water deficit

2.2 盆栽番茄光合特征的连续变化

盆栽番茄试验温室内光照强度、空气温度和光合特征的日变化如图 2、3 所示。试验结果表明, 试验过程中试验温室光照强度和空气温度连续 3 d 的变化基本一致。由图 3 可知, 番茄叶片 P_n 的变化呈现单峰曲线, 在 12:00 出现峰值, 自 DAY1 起番茄 P_n 分别为 10.8、9.1、4.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, DAY2 的番茄 P_n 比 DAY1 降低了 16.1%, DAY3 的番茄 P_n 比 DAY2 降低了 56.2%; 番茄叶片 C_i 呈先降后增的变化规律, 其最大值出现在 8:00, DAY1、DAY2 和 DAY3 的 C_i 依次是 345.3、344.4、347.7 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 差异不显著; 最小值出现在 12:00, 3 d 的 C_i 分别是 289.3、263.3、222.5 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 呈现逐渐降低的趋势。由图 1 可知, DAY1 ~ DAY3 3 d 中 12:00 的土壤含水率依次是 31.8%、24.6% 和 21.2%。结合图 2 中试验温室光照强度和空气温度的日变化可知, 随

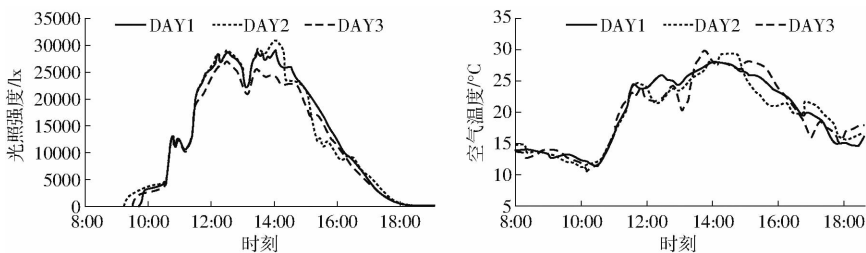


图 2 试验温室光照强度和空气温度日变化曲线

Fig. 2 Daily variation curves of illumination intensity and air temperature in experimental greenhouse

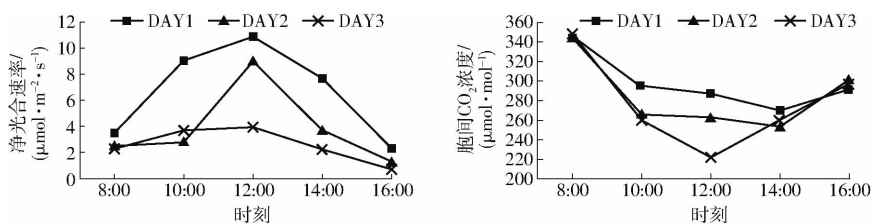


图 3 水分亏缺下番茄光合特征日变化曲线

Fig. 3 Daily variation curves of net photosynthetic rate (P_n) and intercellular CO_2 concentration (C_i) of tomato under water deficit

着光照强度和空气温度的增加,番茄 C_i 减小;随着土壤含水率的连续降低,番茄 C_i 减少的趋势更为显著。

2.3 水分亏缺下番茄 AE 信号的持续变化

水分亏缺下盆栽番茄 AE 信号、土壤含水率的持续变化如图 4 所示。试验结果表明,番茄 AE 信号为偶发性信号,在 DAY1、DAY2、DAY3 和 DAY4 的 AE 信号出现频次、幅值和变化规律不一致,但 AE 信号出现频次高峰期为每天的 10:00—16:00,幅值集中在 40 ~ 60 dB。DAY1:土壤含水率从 36.3% 降低到 27.7%,降低幅度为 8.6 个百分点;番茄 AE 信号发生频次为 41,最大幅值为 59 dB。DAY2:土壤含水率降低幅度为 5.4 个百分点;番茄 AE 信号发生频次为 6,最大幅值为 45 dB。DAY3:土壤含水率降低幅度为 2.6 个百分点;番茄 AE 信号发生频次为 26,最大幅值为 61 dB。DAY4:土壤含水率从 19.7% 降低到 19.0%,其降低幅度为 0.7 个百分点;番茄 AE 信号发生频次为 3,最大幅值为 48 dB。分析可知,DAY1 的番茄处于灌溉后不缺水、轻度胁迫时(土壤含水率维持在田间持水量的 75% ~ 100%),土壤含水率降低幅度越大,AE 事件出现较为频繁,AE 信号幅值和发生频次较大。DAY3 的番茄处于缺水状态时,土壤含水率与 AE 信号频次和幅值的变化趋势一致。对比这 2 种状态下番茄 AE 频次及幅值发现,番茄在灌溉初期、缺水初期的声发射频次及幅值较大,声发射活动较为活跃。

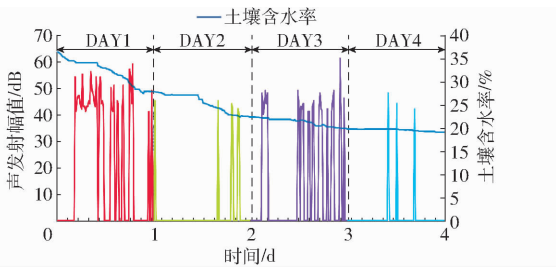


图 4 水分亏缺下声发射与土壤含水率的持续变化

Fig.4 Continuous variations of soil water contents and acoustic emissions of tomato under water deficit

2.4 番茄 AE 信号的功率谱分析

番茄 AE 信号 $x(t)$ 一般可认为是能量有限的随机信号,具有时域和频域的统计特性^[21-22],其周期图法估计功率谱的数学表达式为

$$G(f) = \frac{2}{T} |X(f)|^2 \quad (1)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

$$T = N\Delta t \quad (3)$$

式中 T ——样本长度

N ——数据长度

Δt ——采样时间间隔

试验过程中,选用短时傅里叶变换(Short-time Fourier transform, SFFT)对番茄声发射信号进行功率谱分析,窗函数选用 Hanning 窗,其功率谱分析软件界面如图 5 所示。

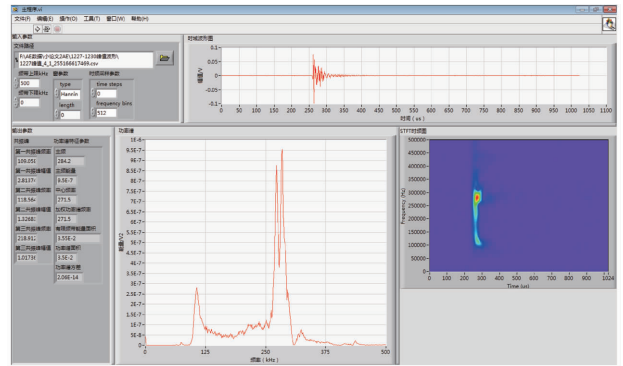


图 5 番茄声发射信号功率谱分析软件界面

Fig.5 Power spectrum software interface for analysis of acoustic emissions for tomato

对于分布在 0 ~ 500 kHz 的频谱信号均分为 4 个阶段,分别是: 0 ~ 125 kHz、125 ~ 250 kHz、250 ~ 375 kHz 和 375 ~ 500 kHz。频谱特征参数从频率和能量 2 个角度进行考察,研究采用的频率参数有主频 f_p 、中心频率 f_a 及加权功率谱频率 f_{50} ,能量参数包括有限频带能量 E_{LFB} 和主频对应的能量 E_{PF} ,其定义及公式如表 1 所示。

表 1 功率谱特征参数的含义及公式

Tab.1 Implication and formula for characteristic parameters of power spectrum

参数	定义	公式
主频	功率谱曲线取得最大值时对应的频率,记为 f_p	$f_p = \max_f G(f) $
中心频率	在频带范围内,把功率谱曲线下的面积分成 2 个相等面积处的频率,记为 f_a	$f_a = \frac{\int_{f_L}^{f_H} f G(f) ^2 df}{\int_{f_L}^{f_H} G(f) ^2 df}$
加权功率谱频率	频率加权功率谱到达全频带范围内频率加权功率谱的 50% 处的频率,记为 f_{50}	$f_{50} = \frac{1}{2} \int_{f_L}^{f_H} f G(f) ^2 df$
有限频带能量	在有限频带范围内功率谱下的总面积,记为 E_{LFB}	$E_{LFB} = \int_{f_L}^{f_H} G(f) df$
主频能量	主频对应的能量,记为 E_{PF}	$E_{PF} = \max(G(f)) ^2$

注: $f \in (f_L, f_H)$, f_L 和 f_H 分别为低截止频率和高截止频率,本研究分别是 0 kHz 和 500 kHz。

水分亏缺下番茄 AE 信号的功率谱特征参数如表 2 所示。4 d 内番茄 AE 信号 f_p 和 f_a 位于 250 ~ 375 kHz, DAY1 的声发射信号 f_p 和 E_{PF} 均高于

DAY2、DAY3 和 DAY4, 中心频率略低; DAY2、DAY3 和 DAY4 的 f_a 和 f_{50} 非常接近。特征参数 E_{LFB} 的变化规律不明显。

表 2 番茄 AE 信号功率谱特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of power spectrum for acoustic emissions of tomato

阶段	主频 f_p /kHz	主频能量 E_{PF}/V^2	中心频率 f_a /kHz	加权功率谱频率 f_{50} /kHz	有限频带能量 E_{LFB}/V^2
DAY1	284.2 ± 26.9	$(9.5 \pm 1.9) \times 10^{-7}$	271.5 ± 28.4	271.5 ± 28.4	$(3.55 \pm 0.45) \times 10^{-2}$
DAY2	274.4 ± 69.9	$(2.2 \pm 0.3) \times 10^{-7}$	285.2 ± 73.7	285.2 ± 73.7	$(5.17 \pm 0.95) \times 10^{-3}$
DAY3	274.4 ± 51.1	$(1.0 \pm 0.3) \times 10^{-5}$	284.2 ± 38.2	284.2 ± 38.2	$(2.09 \pm 0.60) \times 10^{-1}$
DAY4	275.4 ± 87.0	$(2.4 \pm 0.8) \times 10^{-7}$	283.2 ± 60.9	283.2 ± 60.9	$(5.40 \pm 1.27) \times 10^{-3}$

番茄声发射信号共振峰对应的频率和幅值如表 3 所示。分析发现, DAY1 的第 1 共振峰出现在 0 ~ 125 kHz 区间, 第 2 共振峰、第 3 共振峰位于 250 ~ 375 kHz 区间, DAY2、DAY3 和 DAY4 的第 1、第 2、第 3 共振峰均在 250 ~ 375 kHz 区间; 从共振峰幅值上看, DAY1 的排列顺序为第 3、第 2、第 1 共振峰; DAY2 和 DAY4 的大小次序与之相反。功率谱

分析与共振峰的计算结果与 2.3 节中的灌溉饱和后水分亏缺及胁迫状态密切相关, 与番茄净光合速率、胞间 CO_2 浓度及光合作用的表现相互一致。

3 结论

(1) 随着水分亏缺程度的加深与亏缺时间的延长, 番茄净光合速率和胞间 CO_2 浓度均降低, 随着水分亏缺程度的加剧, 下降趋势显著, 说明番茄光合作用的降低主要是由于气孔限制所致。

(2) 番茄 AE 信号发生频次每天呈现出规律性, 高峰期发生在 10:00—16:00, 幅值为 40 ~ 60 dB。对于不同的土壤含水率, AE 信号日变化规律较为稳定, 但其发生频次总量和最大幅值差别较大, 表明土壤含水率与 AE 信号有着一定的相关性。

(3) 频谱分析结果表明番茄 AE 信号主频和中心频率分布在 250 ~ 375 kHz, 随着土壤含水率的持续降低, 其主频与中心频率无显著变化。对比分析番茄 AE 信号的共振峰特征参数表明, 番茄灌溉初期与灌水后期的 AE 信号共振峰幅值、频率的变化规律不尽相同, 其与水分亏缺程度密切相关, 与番茄净光合速率、胞间 CO_2 浓度和光合作用表现相互一致。

表 3 番茄 AE 信号共振峰特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of resonance peaks for acoustic emissions of tomato

阶段	共振峰类别	频率/kHz	幅值/V
DAY1	第 1 共振峰	109.1 ± 34.3	$(2.8 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
	第 2 共振峰	279.2 ± 62.4	$(8.8 \pm 0.7) \times 10^{-7}$
	第 3 共振峰	290.7 ± 41.9	$(9.6 \pm 1.9) \times 10^{-7}$
DAY2	第 1 共振峰	281.2 ± 95.1	$(2.3 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
	第 2 共振峰	294.4 ± 36.3	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^{-7}$
	第 3 共振峰	298.9 ± 68.9	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-7}$
DAY3	第 1 共振峰	174.1 ± 20.6	$(1.0 \pm 0.7) \times 10^{-7}$
	第 2 共振峰	182.3 ± 16.8	$(1.2 \pm 0.6) \times 10^{-7}$
	第 3 共振峰	222.2 ± 36.0	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
DAY4	第 1 共振峰	281.6 ± 93.1	$(2.4 \pm 1.1) \times 10^{-7}$
	第 2 共振峰	292.0 ± 96.0	$(2.1 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
	第 3 共振峰	294.6 ± 52.3	$(1.7 \pm 0.9) \times 10^{-7}$

参 考 文 献

- 赵燕东, 高超, 张新, 等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 290-300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160740&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.040.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 290-300. (in Chinese)
- OSAKABE Y, OSAKABE K, SHINOZAKI K, et al. Response of plants to water stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5(5): 86.
- MAYR S, SPERRY J S. Freeze-thaw-induced embolism in Pinus contorta; centrifuge experiments validate the "thaw-expansion hypothesis" but conflict with ultrasonic emission data[J]. New Phytologist, 2009, 185(4): 1016-1024.
- CHARRIER G, CHARRA-VASKOU K, KASUGA J, et al. Freeze-thaw stress: effects of temperature on hydraulic conductivity and ultrasonic activity in ten woody angiosperms[J]. Plant Physiology, 2014, 164(2): 992-998.
- KIKUTA S B. Ultrasound acoustic emissions from bark samples differing in anatomical characteristics[J]. Phytion, Annales Rei Botanicae, 2003, 43(1): 161-178.
- 杨世凤, 钱东平, 霍晓静, 等. 作物水胁迫声发射检测及视情灌溉系统的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 150-152.
YANG Shifeng, QIAN Dongping, HUO Xiaojing, et al. Test of water stress in crops with acoustic emission technology and

- automatic irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 150-152. (in Chinese)
- 7 尹飞星,孙耀杰,高丽哲,等.作物水胁迫声发射监测系统研究[J].农机化研究,2007,29(3):84-86.
YIN Feixing, SUN Yaojie, GAO Lizhe, et al. Study on monitoring system of crop water stress[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(3): 84-86. (in Chinese)
- 8 高峰,俞立,张文安,等.基于作物水分胁迫声发射技术的无线传感器网络精量灌溉系统的初步研究[J].农业工程学报, 2008, 24(1): 60-63.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wen'an, et al. Preliminary study on precision irrigation system based on wireless sensor networks of acoustic emission technique for crop water stress[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 60-63. (in Chinese)
- 9 ROSNER S, KARLSSON B O, KONNERTH J, et al. Shrinkage processes in standard-size Norway spruce wood specimens with different vulnerability to cavitation[J]. Tree Physiology, 2009, 29(11): 1419-1431.
- 10 王秀清,王海燕,杨世凤.基于近场声全息植物病害检测[J/OL].农业机械学报,2014,45(2):256-261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140243&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.043.
WANG Xiuqing, WANG Haiyan, YANG Shifeng. Plant disease detection based on near-field acoustic holography[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 256-261. (in Chinese)
- 11 王秀清,张春霞,杨世凤.番茄病害胁迫声发射信号采集与声源定位[J].农业机械学报,2011,42(4):159-162.
WANG Xiuqing, ZHANG Chunxia, YANG Shifeng. Detection and identification for disease stress tomato acoustic emission signal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 159-162. (in Chinese)
- 12 王秀清,王尹超,杨世凤,等.基于柱面近场声全息的植物病害胁迫分析[J/OL].农业机械学报,2012,43(10):179-183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.032.
WANG Xiuqing, WANG Yinchao, YANG Shifeng, et al. Plant disease stress analysis based on cylindrical near-field acoustic holography[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 179-183. (in Chinese)
- 13 KASUGA J, CHARRIER G, UEMURA M, et al. Characteristics of ultrasonic acoustic emissions from walnut branches during freeze-thaw-induced embolism formation[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(7): 1965-1975.
- 14 VERGEYNST L L, SAUSE M G, HAMSTAD M A, et al. Deciphering acoustic emission signals in drought stressed branches: the missing link between source and sensor[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: NO.494.
- 15 KIKUTA S, GULLO M, NARDINI A, et al. Ultrasound acoustic emissions from dehydrating leaves of deciduous and evergreen trees[J]. Plant Cell & Environment, 1997, 20(11): 1381-1390.
- 16 HACKE U G, SPERRY J S, PITTERMANN J. Drought experience and cavitation resistance in six shrubs from the Great Basin, Utah[J]. Basic & Applied Ecology, 2000, 1(1): 31-41.
- 17 MAIA L H A, ABRAO A M, VASCONCELOS W L, et al. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission[J]. Tribology International, 2015, 92: 519-532.
- 18 RASTEGAEV I, DANYUK A, AFANAS' YEV M, et al. Acoustic emission assessment of impending fracture in a cyclically loading structural steel[J]. Metals, 2016, 6(11): 1-11.
- 19 段虎明,石锋,马颖,等.基于功率谱密度的路面评价与特征参数提取[J].振动与冲击,2013,32(4):26-30.
DUAN Huming, SHI Feng, MA Ying, et al. Evaluation and extracting characteristic parameters for a road profile based on PSD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 26-30. (in Chinese)
- 20 张雅静,林莉,李喜孟.超声功率谱特征参数在复合材料孔隙率检测中的应用[J].理化检验-物理分册,2010,46(3):159-163,170.
ZHANG Yajing, LIN Li, LI Ximeng. Application of characteristic parameters of ultrasonic power spectrum in testing for composite porosity[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2010, 46(3): 159-163, 170. (in Chinese)
- 21 ROO L D, VERGEYNST L L, BAERDEMAEKER N J F D, et al. Acoustic emissions to measure drought-induced cavitation in plants[J]. Applied Sciences, 2016, 6(3): 1-15.
- 22 GAGLIANO M. Green symphonies: a call for studies on acoustic communication in plants[J]. Behavioral Ecology, 2013, 24(4): 789-796.