doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.043

基于内边缘场电容效应的树干/枝水分传感器研究

周海洋[1] 孙宇瑞[1] P Schulze Lammers[2] 单桂林[1] 程 强[1] 温渤婴[1]

(1.中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室,北京 100083;2.波恩大学农业工程研究所,波恩 53115)

摘要: 茎秆水分与茎流速率是解析植物茎秆内水分传输的2个重要参数。设计了一种基于内边缘场电容效应的树干/枝水分传感器。采用有机溶液试剂法与枝条冻融法分别对传感器做了性能测试试验,证实了传感器在相对介电常数16.8~81变化范围内具有很好的线性关系($R^2=0.9772$),并从冻融-干湿等价性能看,传感器反应灵敏度满足测量要求。利用枝条脱水法得到了传感器参考标定曲线,决定系数为0.9922。温室环境下的盆栽苹果树试验证实了该传感器既可无损观测树干细胞昼夜间的充放水过程,还可感测亏水树干内膨压崩溃与恢复过程。

关键词: 茎秆;水分;内边缘场;电容传感器

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0317-07

Inner Fringing-field Capacitance Sensor for Measurement of Stem Water Content

Zhou Haiyang[1] Sun Yurui[1] P Schulze Lammers[2] Shan Guilin[1] Cheng Qiang[1] Wen Boying[1]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *Institute of Agricultural Engineering*, *University of Bonn*, *Bonn* 53115, *Germany*)

Abstract: Stem water content and sap flow rate are regarded as two important parameters associated with water transport through plant stem. Gamma-ray instruments, although often highly accurate and noninvasive, carried a potential risk of radiation exposure restricting their applications. The MRI method is noninvasive and safe, but it is costly and impractical for long-term monitoring of plant water status in natural circumstances. Generally TDR and FD sensors are often regarded as invasive methods because both techniques are depended on inserting two or more waveguide lines into the stem, causing some tissue damages in the stem. For this purpose, a novel sensor was presented based on the inner fringing field of capacitor. The sensor comprises a pair of metallic electrodes designed to wrap around stems likes an upper and a lower strap-ring. The strap-rings were connected to a high frequency oscillator operating at 100 MHz. Because the dielectric property of stems is closely correlated with the amount of water in the stem, stem water content can be measured without causing stem tissue damage. To verify its technical performance, firstly, three different physical tests were conducted in the laboratory. The results confirmed that both sensitivity and linearity of the sensor were satisfactory. Then these sensors were tested with three potted apple trees grown in a greenhouse. By using the proposed technique, the actual water recharge and discharge occurred between the stem tissues and the water pipes in the stem were successfully observed. Furthermore, the turgor breakdown and recovering process were observed when these apple tree samples suffered from water deficit. In general, all measured data were clearly interpretable to the known knowledge of plant water relation

Key words: stem; water content; inner fringing-field; capacitance sensor

收稿日期:2015-06-08 修回日期:2015-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)和中德科学中心项目(GZ494)

作者简介: 周海洋(1988—),男,博士生,主要从事植物茎秆水分传感技术研究,E-mail:hi_ocean@163.com

通信作者: 孙宇瑞(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业先进传感技术研究,E-mail:Pal@cau.edu.cn

引言

在茎秆类植物水生理调节过程中,茎秆木质部中的导管束负责运输水分和无机盐,这种将根系吸收的水分传输到叶片的过程通常称为水分的长距离传输,研究对象参数为茎流速率[1-2]。此外,导管束与韧皮周围的细胞组织具有水分存储与释放功能,它的变化规律为当清晨叶片蒸腾速率迅速增加时,细胞组织及时释放部分水分支持蒸腾,下午随着光照的减弱,叶片蒸腾随之减小,细胞组织逐渐转为补水状态[3]。相对于长距离传输,这种茎秆细胞组织的充放水功能称之为水分的局部交换,在清晨叶片蒸腾量迅速增加而根系暂时不能通过长距离传输提供足够多水分支持蒸腾时,茎秆细胞水的释放对缓解植物水分亏缺、保护植物细胞组织起着重要的调节作用,此研究对象参数为茎秆水分[4]。前人的研究结果提供了2个直接的证据表明茎秆细胞组织具有充/放水功能。首先,清晨日光激励下叶片水分蒸腾量的增加与茎秆茎流的增加存在一定的时间差,即茎流的变化存在明显的滞后[5]。其次是茎秆的生理收缩与膨胀具有日周期性,它的变化与叶片蒸腾变化呈反相关系[6]。植物水分长距离传输的测量主要依靠茎流速率传感器,并且茎流速率传感器已经实现了商品化。然而,观测植物茎秆水分的日周期局部交换至今尚未找到一种有效且安全的传感方法。早在20世纪80年代,首先被用于观测树干水分充放规律的是伽马射线传感器[7-9]。尽管得到的测量结果对植物水生理研究有非常重要的学术价值,但是伽马射线传感器的辐射危害迫使人们最终放弃了这种测量手段[10]。随后,时域反射传感器(TDR)[11-13]和频域反射传感器(FDR)[14-16]先后被尝试用于测量树干水分变化。安装这些传感器必须在树干上钻孔,孔深取决于木质部的位置。然后将这些传感器的针状电极穿过树皮钻孔嵌入其木质部,其结果必然导致与电极接触的植物细胞组织受到生理性伤害。据研究文献报道,为了获得正常的测量信号,被测植物在体内嵌入传感器后,通常需要7~10周的伤口愈合期。此外,这种测量要求树枝直径显著大于传感器电极,对于细小的枝干无法安装测量[17-19]。针对植物水生理研究的需求与上述各种传感器在使用上的技术局限性,本文提出一种基于高频内边缘场介电传感器测量树枝水分的方法。

1 材料与方法

1.1 传感器测量原理

树干/枝水分传感器安装位置与电极结构如图1所示。将一对类似金属表带的铜带电极(宽度8 mm,厚度1 mm,间距5 mm)并行绕在被测树干/枝上,绕过一圈后用塑料卡扣固定住重合部分,使电极恰好紧贴树干/枝并且不相对滑动。传感器电路由100 MHz振荡器和电容检测电路两部分组成。在100 MHz高频信号的激励下,两电极之间产生的内边缘电磁场与被测树干/枝构成一个电容,其电容值与树干/枝含水率呈正比。因此,在获得枝条的水分标定方程后,实时测量该电容阻抗变化可间接获得树干/枝的水分动态。测量电路的详细描述参照文献[20-23]。目前这类频域介电传感器已经广泛应用于土壤水分测量,不同的是土壤水分测量借助于电容电极产生的外缘电磁场,而树干/枝水分的测量借助于内缘电磁场。显然,图1所示的成对电极不需要在树干/枝上钻孔后嵌入木质部以保证传感器具有一定的灵敏度,因而这种内边缘场电极不存在对树干/枝内细胞组织造成物理性伤害的问题。需要特别指出的是,这类介电传感器在借助外边缘电磁场测量土壤水分时,土壤水分变化通常在纯干土到土壤饱和之间,而树干/枝的含水率较高,变化范围通常在0.75~0.90 cm^3/cm^3。由于内边缘场比外边缘场相对要弱而被测对象的含水率高,从电路设计的角度看,研制内边缘场传感器具有更大的技术难度。

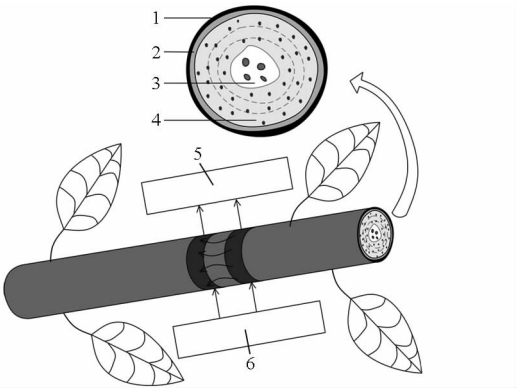

图1 传感器电路与电极结构

Fig. 1 Sensor circuit and electrodes structure

1. 树皮 2. 形成层 3. 髓 4. 木质部

5. 电容测量电路 6. 有源晶振(100 MHz)

1.2 传感器内边缘场灵敏度性能测试

为了保证传感器内边缘场具有足够的灵敏度,在传感器用于测量实际植物对象之前,利用有机溶液试剂法与枝条冻融法分别对传感器做了性能测试试验。本传感器通过电极内边缘场中树干/枝介电常数的变化来检测树干/枝含水率的变化,故选取不同介电常数的液体等效出不同含水率的树干/枝。树干/枝的干物质和水的介电常数分别为3.0~

81.0(20℃)，故选取的液体介电常数也介于 3.0～81.0 之间。所用的液体名称与对应的介电常数见表 1。图 2 给出了溶液标定法的示意图，如图所示，将传感器固定在铁架台上，并将两电极并行绕在有机玻璃管(外径 20 mm，壁厚 1 mm，长度 15 mm)上，在电极贴紧管壁后用卡扣固定。有机玻璃管下端没入烧杯液面以下，上端通过胶皮软管连接至负压调节器。通过调节负压调节器使有机玻璃管内充满或排尽液体，更换烧杯内的液体，并记录有机玻璃管充满液体时传感器的输出值。枝条冻融法是利用冰的相对介电常数近似为 3.4，树干/枝冻结过程和融化过程其相对介电常数分别逐渐减小和逐渐增大，并以此来检验传感器的灵敏度。首先从树上锯下一段新鲜枝条，将枝条锯口用蜡密封，再将传感器连同电极安装在枝条上后放入冷冻室。将冷冻室温度调至 －15℃，冷冻 11 h 后关闭制冷，枝条逐渐融化至室温(20℃)，整个冻融过程中始终连续观测介电传感器的输出变化。传感器连同枝条在冰箱中冻结过程反映了被测电容或传感输出信号从大到小的渐变过程。同理，室温下枝条水分的融化过程反映了被测电容或传感器输出信号是一个从小到大逐渐增加的过程。

表 1　所用溶液与对应的介电常数

Tab. 1　Solution and dielectric constant

溶液	相对介电常数
二丁醇	16.8
乙醇	25.0
乙醇：水(体积比 2:1)	43.6
乙醇：水(体积比 1:1)	53.3
去离子水	81.0

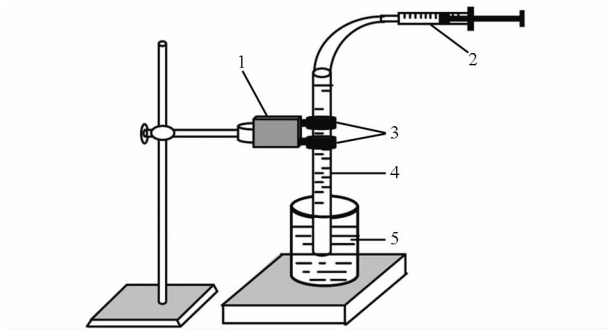

图 2　溶剂标定示意图

Fig. 2　Solvent calibration diagram

1. 测量存储电路　2. 负压调节器　3. 电极　4. 塑料试管　5. 配制溶液

1.3　树枝脱水试验与传感器标定

鉴于树干/枝含水率传感器无法实现在线标定，因此采用称量法进行标定，即使用电子秤得到的自然脱水状态下树枝内含水率变化对传感器进行标定，并得到一条参考标定曲线。首先截取一段被测新鲜树枝(长度 10 cm，直径 2.3 cm)，然后与传感器连接后放置在一个高精度数字电子秤上(MP5002 型，上海舜宇恒平科学仪器有限公司，测量范围 0.5～500 g，分辨率 0.01 g)。树枝在室温环境下脱水过程中，连续记录数字电子秤的输出与传感器的输出变化。一旦传感器和电子秤的输出变得非常缓慢后，表明树枝的水分趋于耗尽。此时取下树枝上传感器，将树枝放入烘箱在 60℃下烘烤 1 周，称出树枝干质量后即可确定出参考标定方程。

1.4　植物样本与试验环境

观测试验植物样本为 3 a 树龄的盆栽苹果树(*Pyrus malus* L.)，观测样本共 3 棵，其主干距土面 10 cm 高度的直径分别为 2.2、2.3、2.5 cm，花盆容量为 10 L。如图 3 所示，这些盆栽苹果树生长在德国波恩大学园艺所的一个温室(3 m×5 m×3.5 m，6°43′33″E，50°43′9″N)中。为了连续观测每个植物样本的日蒸腾量，苹果树的花盆下均放置有电子秤(UWA－T－030 型，朗科兴业称重设备有限公司，测量范围 0～30 kg，分辨率 1 g)。通过该电子秤的串口读取数据(采样周期为 5 min)。每天 20:00 后根据读取的电子秤数据确定该植物的日蒸腾量，并依此给植物样本补充等量的水。

图 3　苹果样本与试验环境

Fig. 3　Apple samples and experimental environment

1.5　微气象因子

与本试验相关的微气象因子包括：微环境温度(使用 DS18B20 型传感器测量：美国 Dallas 公司，量程 －55～125℃，精度 ±0.5℃)，空气相对湿度(使用 PTS－2A 型传感器测量：锦州阳光气象科技公司，量程 0～100%，精度 ±2%)，光合有效辐射量(PAR)(使用 AV－19Q 型传感器测量：美国 AVALON 公司，量程 0～3 000 μmol/(m^2·s)，精度 ±3%)和饱和水汽压差(VPD)。饱和水汽压差综合反映了空气温度与相对湿度对植物蒸腾的影响，它可由这 2 个参数换算得出。试验时间是 2014 年 7—9 月。

2 结果与分析

2.1 传感器内边缘场灵敏度性能测试结果

图 4 给出了传感器在 4 种溶液试剂与去离子水中的试验结果，它表明传感器内边缘场在相对介电常数 16.8 ~ 81 的变化范围内具有很好的线性关系（R^2 = 0.977 2）。由于树干/枝的含水率通常变化在 75% ~ 90% 范围内[24]，其回归方程的斜率为常数（k = 0.1325）表明传感器的灵敏度完全可以满足实际测量对象的变化。图 5 给出了传感器随着树枝的冻结与融化的输出电压曲线。在树枝冻结过程中，当环境温度低于 −5℃ 时，传感器输出电压开始陡然下降，表明树枝内液态水开始冻结。这种急剧下降的趋势保持到环境温度低于 −10℃ 时开始变缓，表明树枝内液态水趋于转化为固态水（冰）。众所周知，在标准大气压下自由水的冰点为 0℃。但是树枝中的水既有自由水（存在与导管束中），又有大量束缚水（吸附于细胞中或细胞之间），水分子只有从束缚状态解脱出来才能转化为固态水。因此，图 5 中水的冰点低于 0℃ 是符合多孔介质内水的冻融规律的。总之，从介电物理冻融−干湿等价性看[13,25]，图 5 的结果表明该传感器可以用来观测树干/枝从干到湿或从湿到干的整个变化过程。

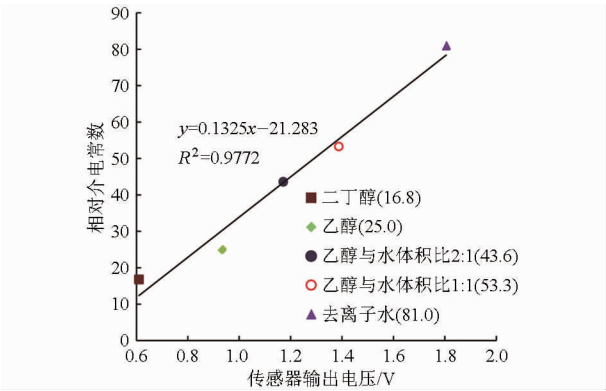

图 4 溶剂测试结果

Fig. 4 Solvent test results

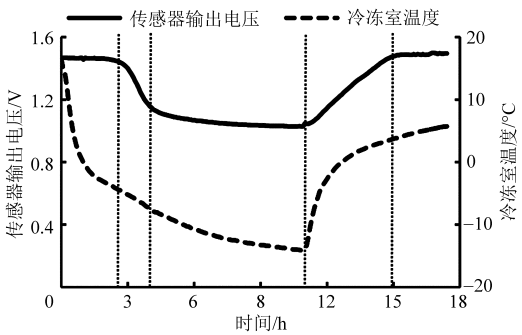

图 5 树枝的冻结与融化试验结果

Fig. 5 Stem of apple tree frozen and melt test results

2.2 传感器标定结果

图 6 给出了实际观测对象（苹果树枝）在枝条脱水试验中得到的传感器参考标定曲线。其线性关系（R^2 = 0.992 4）再次表明该传感器的技术性能完全可以满足对活体植物在线无损测量树干/枝水分的需求。

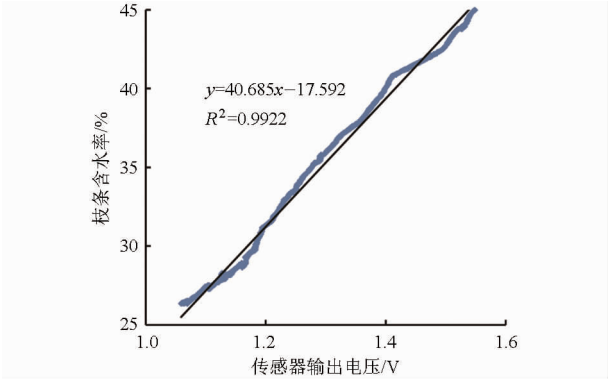

图 6 传感器水分参考标定曲线

Fig. 6 Stem water content sensor reference calibration curve

2.3 苹果树样本定时补水观测结果

图 7 给出了 3 棵苹果树在定时补水生长状态下、连续 5 d 的树干水分日变化观测结果以及电子秤给出的样本水分蒸散数据和对应的微气象信息。图中 3 条树干水分曲线的变化规律与文献[7]借助于伽马射线得到结果非常相似，符合植物水生理日变化规律：即清晨日光激励下叶片蒸腾迅速增加时，树干内细胞水处于释放状态以支持蒸腾需要。这个现象从植物水传输的内聚力−张力理论亦可得到明确的解释，即叶片气孔张开后，形成的负压导致导管束内的压力（负压）显著降低，对导管周围的细胞水逐渐形成一个较大的吸力，导致这些细胞失水。反之，下午随着日照逐渐减弱，叶片气孔开度趋之减小，蒸腾随之减弱，导管束内的液体压力逐渐升高，内壁细胞又转化为补水状态。从图中也可看出晴天与多云天气之间树干内细胞充/放水数量的差异。与晴天测量数据相比，多云天气（7 月 26 日）下树干细胞水的释放量相对小，这是因为叶片蒸腾量相对小的缘故。3 个传感器的输出结果是一致的，它既表明传感器具有很好的互换性，也说明 3 棵苹果树的生长状态基本上是一致的。

2.4 苹果树样本亏水状态观测结果

图 8 显示的结果来自 3 棵苹果树样本的亏水试验。从图中可以看到由于在 8 月 6 日没有补水，使得这些苹果树样本出现亏水反应，传感器的信号输出呈现明显下降趋势。尽管如此，仍然可以观测到细胞水昼夜间的充放规律。8 月 7 日清晨随着叶片蒸腾的迅速增加，传感器输出电压呈现一个负的跳

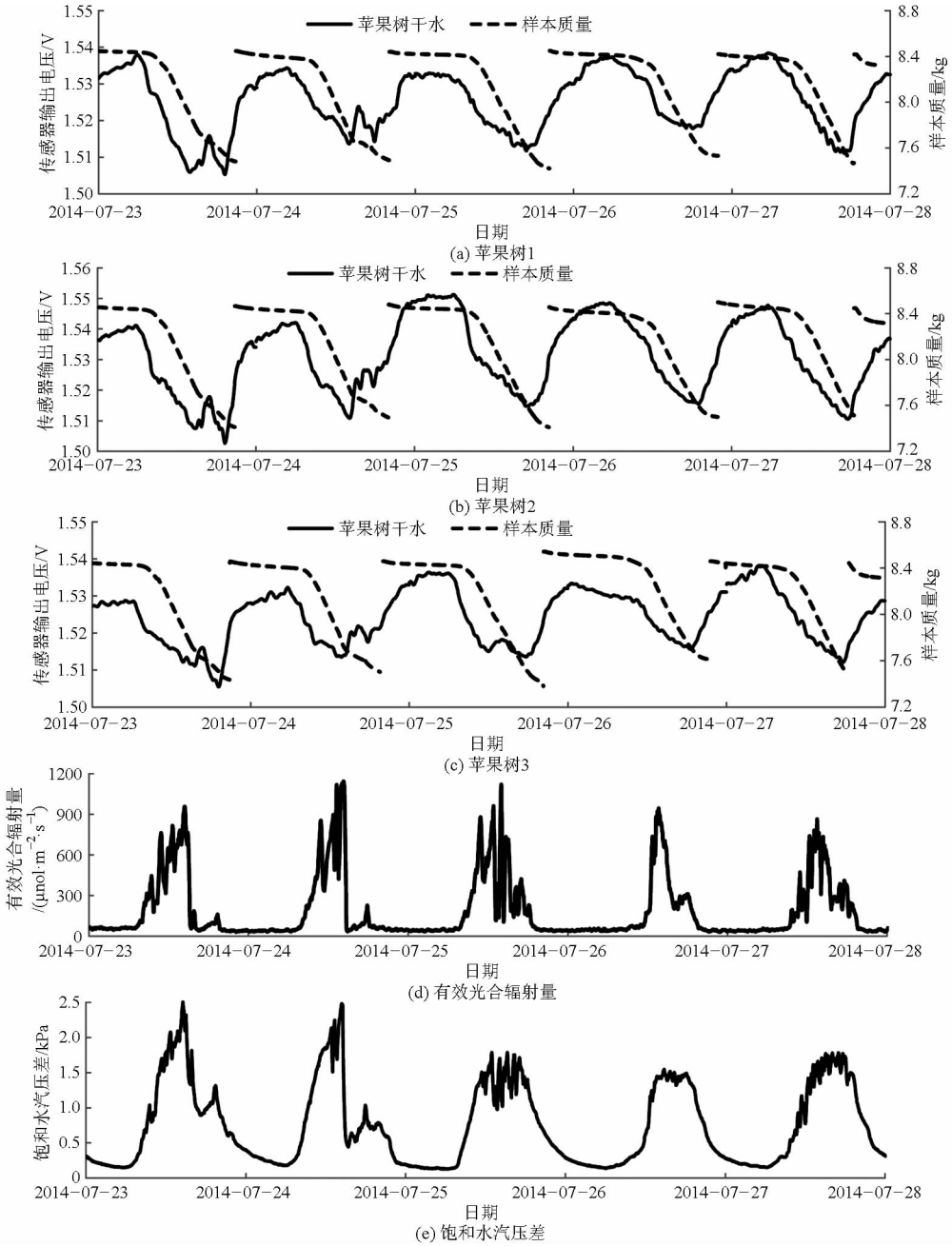

图 7　苹果树干水分日变化测量结果

Fig. 7　Diurnal changes in water content of apple trees stems measurement results

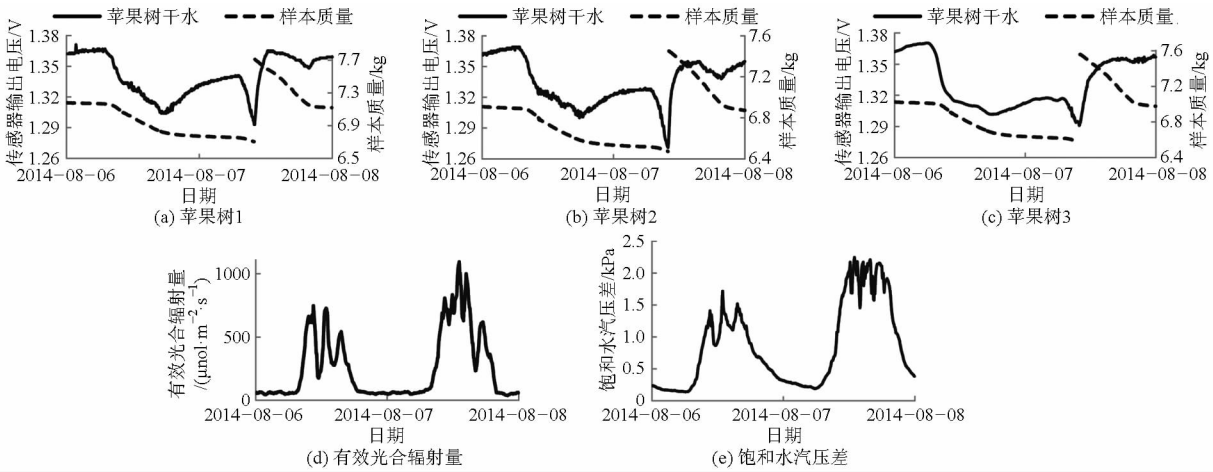

图 8　苹果树干亏水状态观测结果

Fig. 8　Water deficit condition of apple tree stem measurement results

变,它表明样本由于亏水严重导致树干细胞水释放过程中树干内部出现了膨压崩溃,此刻肉眼观测到叶子出现萎蔫也证实了这一点。当及时(8月7日10:00)给每棵苹果树样本补水后,树干内细胞很快转为补水状态,膨压随之恢复正常,对此传感器的响应为正向跃变。此后,在中午时段枝干内部水分达到一个新的平衡状态。

除了以上这些观测结果,需要特别指出的是无论是2.3节还是2.4节中讨论的测量结果都与树干内的茎流变化无关。这是因为导管束中的水始终处于饱和流状态[27],当日出导致叶片水势下降、蒸腾量增加时,导管内的茎流变化仅仅是流速的增加,而不是树干内容积含水率增加,因此对本文研制的传感器测量结果不受影响,这也是该传感器能够观测到树干内部细胞水充放过程的一个重要依据。

3 结束语

利用实验室环境下有机溶液试剂法、枝条冻融法和枝条脱水法3个物理试验,证实了内边缘场介电传感器对被测对象内部的水分变化具有充放水过程,以及样本由于亏水导致的细胞膨压崩溃与补水后的恢复过程。利用该传感器对温室内3棵苹果树样本的测量结果表明,本文设计的水分传感器可为研究树干细胞昼夜间植物水生理调节提供一种新的观测技术。

参考文献

1 Scheenen T W J, Vergeldt F J, Heemskerk A M, et al. Intact plant magnetic resonance imaging to study dynamics in long-distance sap flow and flow-conducting surface area [J]. Plant Physiology, 2007, 144(2): 1157 – 1165.

2 Minchin P E H, Lacointe A. New understanding of phloem physiology and possible consequences for modelling long distance carbon transport [J]. New Phytologist, 2005, 166(3): 771 – 779.

3 Steppe K, de Pauw D J W, Lemeur R, et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth [J]. Tree Physiology, 2006, 26(3): 257 – 273.

4 Fabian G S, Sandra J B, Guillermo G, et al. Temporal dynamics of stem expansion and contraction in savanna trees: withdrawal and recharge of stored water [J]. Tree Physiology, 2008, 28(3): 469 – 480.

5 Herzog K M, Häsler R, Thum R. Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration [J]. Trees, 1995, 10(2): 94 – 101.

6 Fernandez J E, Cuevas M V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 135 – 151.

7 Edwards W R N, Jarvis P G. A method for measuring radial differences in water content of intact tree stems by attenuation of gamma radiation [J]. Plant, Cell & Environment, 1983, 6(3): 255 – 260.

8 Brough D W, Jones H G, Brace J. Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation [J]. Plant, Cell & Environment, 1986, 9(1): 1 – 7.

9 Jones H G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2427 – 2436.

10 Irvine J, Grace J. Non-destructive measurement of stem water content by time domain reflectometry using short probes [J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(3): 813 – 818.

11 Constantz J, Murphy F. Monitoring storage moisture in trees using time domain reflectometry [J]. Journal of Hydrology, 1990, 119(1 – 4): 31 – 42.

12 Wullschleger S, Hanson P, Todd D. Measuring stem water content in four deciduous hardwoods with a time-domain reflectometer [J]. Tree Physiology, 1996, 16(10): 809 – 815.

13 Sparks J P, Gaylon S, Campbell R, et al. Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study [J]. Oecologia, 2001, 127(4): 468 – 475.

14 Holbrook N M, Burns M J, Sinclair T R. Frequency and time-domain dielectric measurements of stem water content in the arborescent palm *Sabal palmetto* [J]. Journal of Experimental Botany, 1992, 43(1): 111 – 119.

15 Kumagai T O, Aoki S, Otsuki K, et al. Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(16): 2335 – 2344.

16 Hao G Y, Wheeler J K, Holbrook N M, et al. Investigating xylem embolism formation, refilling and water storage in tree trunks using frequency domain reflectometry [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(8): 2321 – 2332.

17 Lu P, Woo K, Liu Z. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(375): 1771 – 1779.

18 Nadler A, Raveh E, Yermiyahu U, et al. Evaluation of TDR use to monitor water content in stem of lemon trees and soil and their response to water stress [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 437 – 448.

19 Wullschleger S D, Meinzer I F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees [J]. Tree Physiology, 1998,

18(8 – 9)：499 – 512.

20 Sun Y, Li L, Schulze Lammers P, et al. A solar-powered wireless cell for dynamically monitoring soil water content [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1)：19 – 23.

21 Sheng W, Sun Y, Schulze Lammers P, et al. Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1 – 2)：555 – 560.

22 周海洋，孙宇瑞，Schulze Lammers P，等. 基于水平尺度扩展的土壤水分介电传感技术 [J]. 农业机械学报，2015，46(4)：261 – 265.
Zhou Haiyang, Sun Yurui, Schulze Lammers P, et al. Dielectric soil moisture sensing technique based on horizontal scale expansion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4)：261 – 265. (in Chinese)

23 Sun Y R, Zhou H Y, Qin Y L, et al. Horizontal monitoring of soil water content using a novel automated and mobile electromagnetic access-tube sensor [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516：50 – 55.

24 赵燕东，王海兰，胡培金，等. 基于活立木介电特性的植物茎体含水量测量方法 [J]. 林业科学，2010，46(11)：179 – 183.
Zhao Yandong, Wang Hailan, Hu Peijin, et al. A method for measuring plant stem water content based on plant dielectric properties [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(11)：179 – 183. (in Chinese)

25 Cheng Q, Sun Y, Qin Y, et al. In situ measuring soil ice content with a combined use of dielectric tube sensor and neutron moisture meter in a common access tube [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171 – 172：249 – 255.

26 Tyree M T, Ewers F W. Tansley Review No. 34. The hydraulic architecture of trees andother woody plants [J]. New Phytologist, 1991, 119(3)：345 – 360.