

基于超声射频的植物茎体水分无损检测方法研究

吕丹桔^{1,2} 施心陵¹ 董易¹ 王跃民¹ 王霞¹ 王超³

(1. 云南大学信息学院, 昆明 650091; 2. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 昆明 650224;

3. 西南林业大学林学院, 昆明 650224)

摘要: 对植物茎体水分进行实时无损的在线检测成为研究植物水分生理活动的热点之一。本文提出一种基于超声射频回波技术的植物茎体水分实时无损在线检测方法, 该系统硬件由超声探头、超声射频发射接收器、数据采集卡和计算机组成; 软件由 LabVIEW 平台开发完成。通过系统获取有机溶液超声回波速度, 仿真植物茎体含水率; 以杨树截断样品为对象, 分析其茎体吸水过程的含水率变化与超声回波速度变化的相关性, 平均决定系数为 0.98; 以活体立木白玉兰为检测对象, 完成其茎体超声波日变化检测, 最高超声回波速度出现在 14:00, 最低值出现在 22:00。实验表明超声回波速度与植物生理变化特性相符。同时, 本文通过茎体样品及活立木的超声检测, 验证了该方法可有效反映植物茎体轴向、径向及不同树种的结构差异, 为植物茎体水分的检测提供了一种携带茎体结构特性的检测方法。

关键词: 茎体水分; 超声; 无损检测

中图分类号: TP912.16; S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0195-07

Non-destructive Measurement of Plant Stem Water Content Based on Ultrasonic Radio Frequency

LÜ Danju^{1,2} SHI Xinling¹ DONG Yi¹ WANG Yuemin¹ WANG Xia¹ WANG Chao³

(1. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China

2. School of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

3. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Water is directly or indirectly involved in the activities of plant physiology. One role of stems is water storage, the other is water transmission channel. Detection of plant stem water by non-destructive online method becomes one of the hot spots in the study of plant water physiological activity. A real-time online non-destructive detection system designed by LabVIEW was proposed based on ultrasonic echoes, which was composed by ultrasonic probe, ultrasonic RF transmitter receiver, data acquisition instrument and portable computer. The simulation model was built by the system with various ultrasonic velocities of different organic solutions to represent the water content of plant stems. The correlation between the changes of water content and that of ultrasonic velocity was analyzed on a set of poplar cutting samples in the process of water absorption of those samples. The average determination coefficient reached about 0.98. For 24 h detection on stem of a living *Michelia alba*, the highest ultrasonic velocity appeared at 14:00, and the lowest appeared at 22:00. The results showed the variations of ultrasonic velocity accorded with plant physiological characteristic. Meanwhile, the variations of velocities in radial and axial directions and in different kinds of plant stem were detected by the system, which provided a detection instrument with structural differences for the research on plant stem water physiological characteristics.

Key words: stem water content; ultrasonic; non-destructive detection

收稿日期: 2017-04-22 修回日期: 2017-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61661050)和昆明市林业信息工程技术研究中心重点项目(2015)

作者简介: 吕丹桔(1977—),女,博士生,西南林业大学副教授,主要从事林业信息智能检测与分析研究,E-mail: lvdanjv@hotmail.com

通信作者: 施心陵(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与控制研究,E-mail: lshi@ynu.edu.cn

引言

植物茎体的含水量是植物水分生理活动的指标之一,也是精准农业获取植物生理生长的需求^[1-2]。目前,常通过直接测定茎体部位含水量,获得水分胁迫或充盈的信息。其主要的检测手段有烘干法、 γ 射线法^[3]、核磁共振法^[4-6]、X射线计算机层析成像技术^[7]、电阻法^[8]、时域反射法 TDR^[9]和频域电容法^[10]。 γ 射线法和核磁共振法具有高准确性和无损性^[11],但检测设备昂贵且不易长期进行检测。而时域反射法和频域电容法为侵入式检测,即在检测时,需将探针插入植物茎体内,对植物本身造成损伤,影响植物的生理活动^[12-13],导致茎体含水量动态变化检测误差的产生^[14];同时,采用 TDR 检测时,探针插入的深度还与植物茎体结构贮水特性有关,影响检测的一致性^[13]。最近,提出了基于驻波率原理的检测方法^[15]与无损在线频域电容法^[16],实现了茎体水分的动态无损检测。但上述研究团队均指出所采用检测方法会受到植物茎体结构差异的影响,对于不同直径的茎体水分需要分别标定^[15-16]。

为了揭示植物生理活动变化的动态特性,探寻一种在线无损具有结构差异的茎体水分检测手段与方法成为植物茎体检测的热点。本文提出一种可反映茎体结构差异的超声射频植物茎体水分无损在线检测方法。

1 植物茎体水分超声检测

1.1 检测原理

植物茎体可视为木质纤维、水、空气甚至是冰的混合物^[17]。活体植物茎体的水分调节过程,实为上述介质混合比例的变化。超声技术检测植物茎体水分的基础是由于植物茎体内水分充盈与亏缺,导致茎体物理性质不同^[18-20],当超声射频信号在含水量不同的植物茎体中传播时,形成不同的超声界面,产生相应规律性的反射回波。本文通过获取植物茎体超声射频回波信号,研究其水分的变化。

1.2 声波速度与茎体含水率的检测方法

超声波在固体介质中传播受介质密度和弹性性能决定。其回波速度为

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}} \quad (1)$$

式中 E ——弹性模量, N/mm²

ρ ——介质密度, g/cm³

σ ——介质泊松比(弹性常数)

植物茎体含水量变化时,针对同株植物介质泊

松比 σ 视为常数^[19-20],水分含量变化梯度对超声回波速度具有主导作用^[21-22]。植物的水分调节从匱水到充盈的周期变化过程的超声表现为:茎体水分含量增大使 ρ 增大^[20],据式(1)可知最终导致 v_l 下降。反之,当茎体从充盈到匱水时, ρ 减小, v_l 上升。因此通过对植物茎体超声回波速度的检测可获取茎体含水率变化特点,且两者具有二次式的关系。

超声回波速度的检测可通过第 1 回波位置出现的时间与声波传播经历的路径确定,其回波速度 v_l 的检测公式为

$$v_l = \frac{2D}{t} \quad (2)$$

式中 $2D$ ——超声回波在介质中经历的直线路径长度, m

t ——超声射频到达第 1 回波位置的时间, s

1.3 检测系统的实现

超声植物茎体水分检测系统的硬件由 1 MHz 非金属超声探头、超声波信号发生接收器(CTS-8077PR)、基于 LabVIEW 的 Nextkit 数据采集仪(采样深度 2 000 个采样点/超声脉冲触发,采样频率 10 MHz)和计算机组成;软件系统是基于 LabVIEW 开发的,用于超声射频回波信号的采集与存储,如图 1、2 所示。超声脉冲发射设备以 1 kHz 产生窄脉冲(脉冲宽度为 1 000 ns)送至 1 MHz 的超声探头,产生超声射频信号;将探头涂以足量耦合剂,置于待检测植物茎体处,确保探头与待检处充分耦合,使超声射频信号以轴/径向方向有效进入植物茎体。超声射频信号在植物茎体内传播时,因受茎体水分等特性的影响,使超声射频回波信号发生变化,回波信号经探头接收至超声脉冲接收设备后,通过 Nextkit 数据采集卡的 LabVIEW 平台将回波信号显示并存储于计算机上,完成植物茎干超声射频回波信号的采集。



图1 超声植物茎体水分检测系统

Fig. 1 Stem water content detection system by ultrasonic

1.4 植物茎体超声射频回波速度计算

从获取的超声射频信号中确定第 1 回波的时间 t , 通过测量其茎体传播路径长度 $2D$, 利用式(2)计算回波速度。为了验证上述超声速度的检测结果,实验以

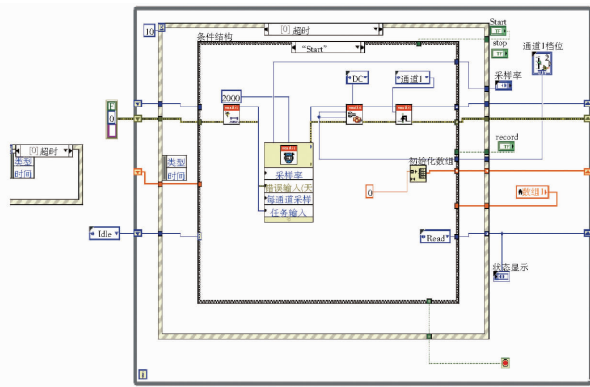


图 2 LabVIEW 设计的超声植物茎体水分检测系统

Fig.2 Stem water content detection ultrasonic system on LabVIEW

装有乙酸乙酯的烧杯模拟植物茎体,超声探头置于烧杯外壁,获得的射频回波信号如图 3 所示,其回波的传播路径长度为 2 倍烧杯直径(7 cm),第 1 回波时间为 1.04×10^{-4} s,计算得其回波速度为 1 347 m/s。

2 回波速度与液体密度相关性分析

2.1 有机溶剂的超声射频回波声速与茎体体积含水率的相关性分析

参照文献[15]的实验设计方案,构建液体超声

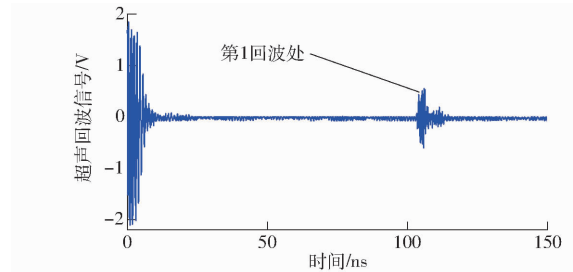


图 3 直径 7 cm 烧杯乙酸乙酯的超声回波信号

Fig.3 Ultrasonic wave signal of beaker with diameter of 7 cm with ethyl acetate

速度与植物茎体体积含水率的相关性,即用不同超声速度等级代表不同的茎体体积含水率。将液体中具有的最高超声速度表示茎体体积含水率最低值,以速度最小值表示茎体体积含水率最大值,建立超声回波速度与植物茎体体积含水率的相关性。实验中,用装有不同密度的有机溶剂的烧杯来模拟具有不同体积含水率的植物。用本文检测系统对上述烧杯进行检测,获取超声回波速度。其相关性如表 1 所示。

表 1 有机溶剂的超声回波速度 980 m/s 对应的植物茎体体积含水率为 60%;有机溶剂的超声回波速度 1 904 m/s 对应植物茎体体积含水率为 2%。一般植物茎体的鲜质量含水率在 40% ~ 50% 之

表 1 有机溶剂超声回波速度与茎体体积含水率关系

Tab.1 Relationship between ultrasonic velocity and stem water content

参数	溶剂					
	甘油	蒸馏水	橄榄油	乙酸乙酯	乙醇	异戊烷
标准声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 904	1 498	1 431	1 338	1 207	980
实测均值声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 935	1 553	1 428	1 346	1 247	1 000
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.260	0.996	0.910	0.867	0.790	0.620
茎体体积含水率/%	2.0	42.7	45.5	48.5	51.2	60.0

间^[23],而植物茎体体积含水率小于鲜质量含水率,因此超声回波检测能够满足植物茎体水分检测的需要。

根据上述有机溶剂的声波速度与设定的茎体体积含水率对应关系,得到由超声速度计算植物茎体体积含水率公式为

$$\theta = -3457.9v_l^2 + 550.8v_l + 1894.4 \quad (3)$$

2.2 不同烧杯直径对超声射频回波声速的影响

为探讨植物茎体的粗细对超声速度的影响,在 6 个直径不同的烧杯中装入异戊烷溶液,依次记录其超声回波速度,分析茎体直径不同对超声回波速度的影响。然后依次改变烧杯中有机溶液,模拟不同粗细茎体在不同体积含水率时,植物茎干超声回波速度,检测结果如图 4 所示。

图 4 表明,不同液体具有不同的超声回波速度,所测液体超声波速范围在 1 000 ~ 1 933 m/s,用此变化范围表示植物茎体体积含水率为 2% ~ 60% 的变

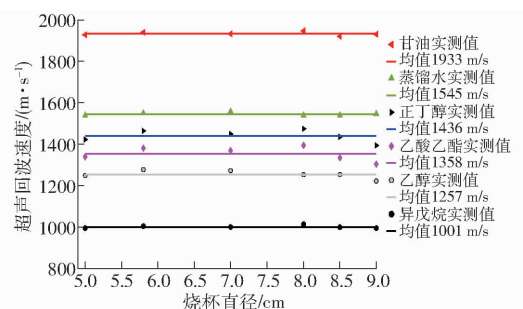


图 4 不同直径烧杯中 6 种有机溶剂的超声回波速度

Fig.4 Ultrasonic velocities of six kinds of organic solution in different diameters beaker

化范围。同时结果表明波速的变化只与液体密度有关,不会因直径变化而变化,从而确保超声检测植物茎体水分的稳定性。

3 植物茎体结构差异与回波速度关系

超声波在植物茎体中传播因结构差异、密度不

同等因素,会引起超声回波波形的变化^[24-25]。

3.1 植物茎体轴向径向超声回波信号差异

同一植物茎体超声回波信号在轴向与径向的差异是由其茎体细胞结构在径向与轴向的生理结构特性不同导致^[17]。实验选取 6 cm × 6 cm 杨树茎体截断样品为检测对象,进行径向与轴向的超声检测,在径向与轴向的超声回波传输距离均为 2 × 6 cm。其超声射频回波信号如图 5、6 所示。检测得到径向速度为 4 705.9 m/s,轴向速度为 7 643.3 m/s。实验结果表明植物茎体在径向与轴向的结构特性不同,导致超声回波波形不同,径向速度比轴向速度小^[24-25]。

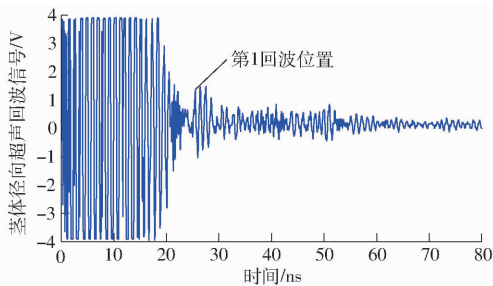


图 5 植物茎体径向超声回波信号

Fig. 5 Ultrasonic wave signal of plant stem in radial direction

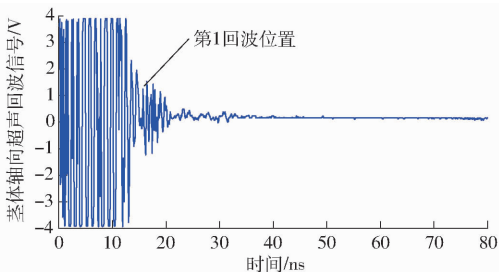


图 6 植物茎体轴向超声回波信号

Fig. 6 Ultrasonic wave signal of plant stem in axial direction

3.2 活立木不同类植物茎体的超声回波信号差异

选取西南林业大学内 1 株白玉兰树和 1 株棕榈树为实验对象,白玉兰检测点距地面高度为 87 cm,直径为 5.4 cm,棕榈检测点距地面高度为 78 cm,直径为 10.1 cm。检测日期为 3 月 27 日,检测时间为 10:00,对其植物茎体径向方向进行活体检测。其超声射频回波信号如图 7、8 所示。两种植物茎体结构本身具有的差异通过超声回波信号可以明显看出。计算得出白玉兰超声速度为 3 312.8 m/s,棕榈超声速度为 4 139.3 m/s。因超声波在棕榈茎体的衰减,导致第 1 回波位置不易确定,实验中采用自相关函数确定第 1 回波位置^[26],结果如图 9 所示。

4 植物茎体水分超声检测的性能分析

4.1 植物截断茎体含水率变化超声检测分析

在线动态的植物茎体检测(即同一检测位置

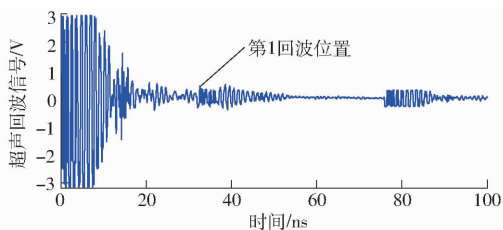


图 7 白玉兰植物茎体径向超声回波信号

Fig. 7 Ultrasonic wave signal of *Michelia alba* stem in radial direction

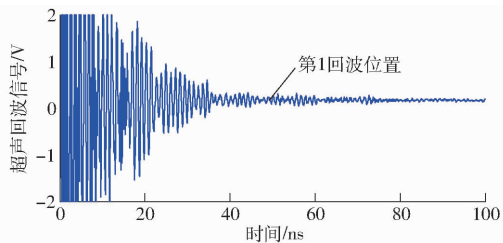


图 8 棕榈植物茎体径向超声回波信号

Fig. 8 Ultrasonic wave signal of palm stem in radial direction

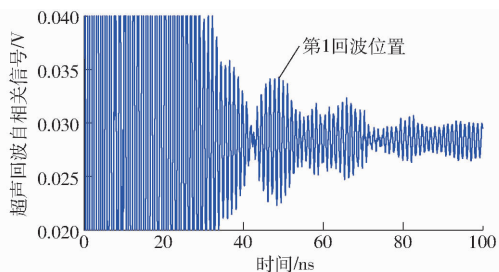


图 9 棕榈植物茎体径向超声回波自相关信号

Fig. 9 Autocorrelation ultrasonic wave signal of palm stem in radial direction

处),其水分的变化主要表现为因含水率不同引起的密度变化。实验选取杨树 6 cm × 6 cm、7 cm × 7 cm 和 10 cm × 10 cm 的茎体截断样品,经干燥处理后作为检测对象。将检测对象进行浸水实验,检测其质量、密度、超声速度及体积与质量含水率。因茎体吸水在最初阶段变化明显,检测时间间隔设置为 10 min 或 20 min,共检测 6 次;茎体吸水中段检测时间间隔 3 ~ 4 h,检测 2 次;后期,茎体检测时间间隔为 24 h 内检测 1 ~ 2 次,最后,茎体检测频率为 1 次/(2 d),当 2 d 内吸水量小于 10 g 时,停止实验。其实验检测结果如表 2 所示。

体积含水率为

$$\theta = (m_A - m_B) / (\beta V) \times 100\%$$

式中 m_A ——浸水后样品质量, g

m_B ——干燥后样品质量, g

β ——水的密度, g/cm³

V ——样品体积, cm³

上述实验表明茎体截断样品在最初的浸水 1 h 内,其吸水现象明显,尤其是前 20 min,6 cm 直径样

表 2 不同茎体浸水时间下超声回波速度、质量含水率和体积含水率

Tab. 2 Measured ultrasonic velocity, mass water content and volume water content of stems with different soaking times

参数	样品直径/cm	样品浸水时间														
		0	10 min	20 min	30 min	40 min	1 h	4 h	5 h	22 h	24 h	30 h	32 h	48 h	7 d	9 d
质量/g	6	102.6	106.6	115.8	117.2	120.9	125.9	132.0	133.7	144.4	145.0	148.7	150.1	154.5	169.8	173.6
	7	111.2	122.6	125.7	127.3	129.7	132.9	141.7	144.0	157.0	160.0	165.4	166.0	172.0	191.5	196.7
	10	294.0	311.0	320.8	328.7	331.4	339.2	366.2	373.1	410.2	415.0	426.1	429.2	448.2	494.1	506.7
密度/(g·cm ⁻³)	6	0.60	0.63	0.68	0.69	0.71	0.74	0.78	0.79	0.85	0.85	0.88	0.88	0.91	1.00	1.02
	7	0.41	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.53	0.53	0.58	0.59	0.61	0.62	0.64	0.71	0.73
	10	0.37	0.40	0.41	0.42	0.42	0.43	0.47	0.48	0.52	0.53	0.54	0.55	0.57	0.63	0.65
超声速度/(m·s ⁻¹)	6	4 705.88	4 347.83	3 858.52	3 478.26	3 200.00	3 037.97	2 777.78	2 758.62	2 380.95	2 343.75	2 277.04	1 954.40	1 818.18	1 634.88	1 500.00
	7	4 947.00	4 416.40	3 954.80	3 693.93	3 655.35	3 500.00	2 898.55	2 880.66	2 276.42	2 105.26	2 333.33	2 026.05	1 703.16	1 555.56	1 516.79
	10	5 141.39	4 545.45	4 434.59	4 338.39	4 115.23	3 968.25	3 766.48	3 676.47	2 840.91	2 766.25	2 597.40	2 490.66	2 162.16	1 739.13	1 639.34
质量含水率/%	6	0	4	11	12	15	19	22	23	29	29	31	32	34	40	41
	7	0	9	12	13	14	16	22	23	29	31	33	33	35	42	43
	10	0	5	8	11	11	13	20	21	28	29	31	32	34	40	42
体积含水率/%	6	0	2	8	9	11	14	17	18	25	25	27	28	31	40	42
	7	0	4	5	6	7	8	11	12	17	18	20	20	23	30	32
	10	0	2	3	4	5	6	9	10	15	15	17	17	20	25	27

品吸水近 14 g, 超声回波速度由 4 706 m/s 快速降至 3 859 m/s, 其体积含水率从零增至 8%。随着浸水时间的增加, 茎体吸水现象渐缓, 最后浸水 9 d 后 (48 h 内), 6 cm 直径样品仅增质量 3.8 g, 最终超声回波速度为 1 500 m/s, 体积含水率为 42%。实验结果说明: 茎体体积含水率的增加会引起超声回波速度的减小, 超声回波速度的变化可有效跟踪茎体体积含水率的变化。

茎体样品吸水过程的超声回波速度与茎体体积含水率变化可通过二次多项式进行有效拟合, 样品拟合程度如表 3 和图 10 所示。

表 3 超声回波速度和茎体体积含水率的相关性分析

Tab. 3 Analysis of correlation between ultrasonic velocity and plant stem water content

样品直径/cm	决定系数	每次检测样本数
6	0.982 4	68
7	0.962 6	51
10	0.992 5	76

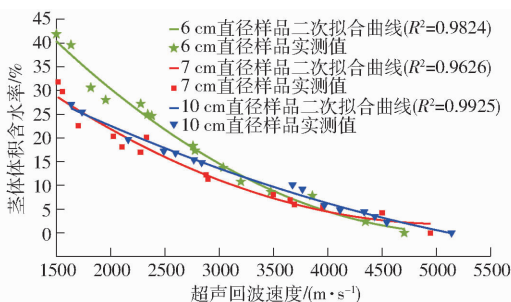


图 10 植物茎体体积含水率和超声回波速度的关系
Fig. 10 Relationship between plant stem water content and ultrasonic velocity

4.2 活立木茎体超声检测日变化性能分析

以西南林业大学校园内 15 a 生白玉兰树茎体为实验对象, 将超声探头涂以足量的耦合剂放置于白玉兰茎体距地面 87 cm 处进行检测。检测日期为 3 月 20 日, 检测间隔为 1 h, 连续检测 24 h。根据检测的超声回波信号, 确定第 1 回波位置, 计算出每次检测的白玉兰茎体的超声回波速度, 从而得到 24 h 植物茎体归一化超声回波速度比变化曲线, 如图 11 所示。

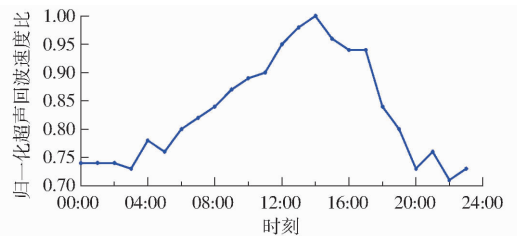


图 11 白玉兰茎体径向归一化超声回波速度比变化曲线
Fig. 11 Diurnal variation curve of ultrasonic velocity of *Michelia alba* stem in radial direction

检测结果表明在 14:00 时具有最高超声速度, 22:00 时出现最低超声速度。6:00—18:00 时段, 其超声速度均比夜晚的高, 上述超声回波速度的变化符合白天因植物的蒸腾作用显著, 导致茎体水分下降, 而夜晚茎体水分因蒸腾作用较弱, 至使水分增加的植物生长现象。同时, 因为一天中由于光强、温湿度的影响, 植物表现为不同时段耗水情况变化明显, 其中耗水最多的时段常发生在光强、温度最高后 1~2 h; 检测结果显示超声回波速度最大值发生在 14:00, 与所述植物茎体体积含水率变化情况相符。

5 结论

(1) 基于超声射频回波技术, 设计了无损动态的植物茎体水分检测系统。实验表明超声回波速度与检测茎干的密度密切相关, 而基本不受植物茎干直径的影响。

(2) 以杨树茎干截断样品为检测对象, 获取样品浸水过程水分变化的超声射频回波信号, 结果表明茎体水分增加, 超声回波速度下降。超声回波速度与茎体体积含水率的平均决定系数为 0.98, 能够

满足植物茎体水分检测需求。

(3) 对活体白玉兰茎体含水率的日变化情况进行了超声检测, 其超声变化特点与植物茎干水分的日变化相符: 白天茎体水分比夜晚少, 茎体水分最小时刻出现在 14:00。

(4) 系统满足茎体结构差异的检测需求。茎体在径向、轴向超声回波信号不同, 其速度也不同, 径向方向速度小于轴向的。不同植物茎体其径向方向的超声波不同, 速度各异。

参 考 文 献

- 姚元森, 廖桂平, 赵星, 等. 农作物生长环境信息感知技术研究进展[J]. 作物研究, 2013, 27(1): 58-63.
YAO Yuansen, LIAO Guiping, ZHAO Xing, et al. Research progress of crop growth environment information perception techniques [J]. Crop Research, 2013, 27(1): 58-63. (in Chinese)
- 许世卫, 王东杰, 李哲敏. 大数据推动农业现代化应用研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3429-3438.
XU Shiwei, WANG Dongjie, LI Zhemin. Application research on big data promote agricultural modernization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3429-3438. (in Chinese)
- 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 and Environment, 1983, 6(3): 255-260.
- BYRNE G F, FENN M D, BURGAR M I. Nuclear magnetic resonance studies of water in tree sections [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 38(4): 307-317.
- BORISJUK L, ROLLETSCHEK H, NEUBERGER T. Surveying the plant's world by magnetic resonance imaging [J]. The Plant Journal, 2012, 70(1): 129-146.
- WINDT C W, BLÜMLER P. A portable NMR sensor to measure dynamic changes in the amount of water in living stems or fruit and its potential to measure sap flow [J]. Tree Physiology, 2015, 35(4): 366.
- RASCHI A, TOGNETTI R, RIDDER H W, et al. Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission [J]. Plant Cell and Environment, 1995, 18(5): 545-554.
- 宋蛰存, 林迎忠, 顾广滨. 活性对电导法测量木材含水率的影响[J]. 东北林业大学学报, 1994(1): 113-116.
SONG Zhecun, LIN Yingzhong, GU Guangbin. The influence of wood cell activity on moisture content measurement by electric resistance [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1994(1): 113-116. (in Chinese)
- SPARKS J P, CAMPBELL G S, BLACK A R. Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study [J]. Oecologia, 2001, 127(4): 468-475.
- 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.
- JONES H G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2427-2436.
- LU P, WOO K C, LIU Z T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(375): 1771-1779.
- 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.
- MADURAPPERUMA W S, BLEBY T M, BURGESS S S. Evaluation of sap flow methods to determine water use by cultivated palms [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 66(3): 372-380.
- 赵燕东, 高超, 张新, 等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 310-316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160142&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 310-316. (in Chinese)
- ZHOU H, SUN Y, TYREE M T, et al. An improved sensor for precision detection of in situ stem water content using a frequency domain fringing capacitor [J]. New Phytologist, 2015, 206(1): 471.
- GUILLAUME C, KATLINE C V, BENOIT L, et al. Changes in ultrasound velocity and attenuation indicate freezing of xylem sap [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 185(185): 20-25.
- TOMPO L. Novel applications of electrical impedance and ultrasound methods for wood quality assessment [D]. Finland: University of Eastern Finland, 2013.
- 彭辉, 蒋佳荔, 詹天翼, 等. 木材密度和含水率对其轴向超声波传播速度的影响[J]. 林业科学, 2016, 52(10): 117-124.

- PENG Hui, JIANG Jiali, ZHAN Tianyi, et al. Influence of density and moisture content on ultrasound velocities along the longitudinal direction in wood [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(10): 117–124. (in Chinese)
- 20 OLIVEIRA F G R D, CANDIAN M, LUCCHETTE F F, et al. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*) [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(2): 297–300.
- 21 SIMPSON W T, WANG X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying [J]. *Forest Products Journal*, 2001, 51(10): 51–54.
- 22 MISHIRO A. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I. effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood [J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 1995, 41(12): 1086–1092.
- 23 陈昌雄, 余坤勇, 曹祖宁. 小叶青冈天然林树干含水率的研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(12): 39–41, 46.
CHEN Changxiong, YU Kunyong, CAO Zuning. Moisture content of tree stem of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* (Bl.) oerst in natural forest [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2010, 30(12): 39–41, 46. (in Chinese)
- 24 HASEGAWA M, TAKATA M, MATSUMURA J, et al. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(3): 296–302.
- 25 HASEGAWA M, YANO Y, MATSUMURA J, et al. Prospects for within-tree variation of the acoustoelastic behaviors in Japanese cedar [J]. *Ndt and E International*, 2012, 49(7): 57–63.
- 26 李国定, 涂坚, 石长生. 大噪声中微弱周期信号的自相关检测法 [C] // 中国计算机学会信息保密专业委员会年会, 1999.

~~~~~

(上接第 228 页)

- 25 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 84–87.  
GUO Tailong, CHI Daocai, WANG Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5): 84–87. (in Chinese)
- 26 CHEN L J, FENG Q, LI F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146(24–33): 24–33.
- 27 杨艳. 土壤溶质运移特征实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.  
YANG Yan. Experimental studies on soil solute transport [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 28 马东豪. 土壤水盐运移特征研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2005.  
MA Donghao. Studies on characteristics of soil water and salt movement [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese)
- 29 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响 [J]. *干旱区地理*, 2005, 28(4): 100–104.  
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, SU Ying. Effects of slight saltwater quality on the characteristics of soil water and salt transference [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 100–104. (in Chinese)
- 30 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 108–114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161015&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161015&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015.  
TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 108–114. (in Chinese)
- 31 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 360–363.  
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, JU Long. Parameters of Philip and Green-Ampt models for soils infiltrated with brackish water [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 360–363. (in Chinese)
- 32 FEIGIN A, RAVINA I, SHALHEVET J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment [M]. Springer Berlin Heidelberg, 1991: 34–116.
- 33 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 44–51.  
CHEN Lijuan, FENG Qi, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(8): 44–51. (in Chinese)
- 34 MASS E V, HOFFMAN G J. Crop salt tolerance: current assessment [J]. *Journal of the Irrigation & Drainage Division*, 1977, 103(2): 115–134.
- 35 邱让建, 刘春伟, 徐金勤, 等. 灌溉水含盐量对辣椒产量品质及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 75–80.  
QIU Rangjian, LIU Chunwei, XU Jinqin, et al. Effect of irrigation water salinity on yield, quality and water use efficiency of hot pepper [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(10): 75–80. (in Chinese)
- 36 王军涛, 程献国, 李强坤. 基于春玉米微咸水灌溉的水盐生产函数研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 78–80.  
WANG Juntao, CHENG Xianguo, LI Qiangkun. Study on the placement of sensors for moisture content in soil profile for cotton under mulched drip irrigation condition [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 78–80. (in Chinese)