

# 基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究

穆永航<sup>1</sup> 李莉<sup>1</sup> 王俊衡<sup>2</sup> 王海华<sup>1</sup> 付强<sup>2</sup> SIGRIMIS N<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业信息获取技术农业部重点实验室, 北京 100083; 3. 雅典农业大学农业工程系, 雅典 11855)

**摘要:** 本文对基于频域法 FDS-100 型土壤含水率传感器在基质含水率中的检测性能进行了研究。首先, 对不同配比的基质, 使用 FDS-100 型传感器测量并将测量结果与干燥法得到的标准含水率进行对比, 将 FDS-100 型传感器与 ECH2O-5TE 型基质含水率传感器在混合基质中的测量性能进行对比, 并研究了压实程度、电导率和温度对传感器性能的影响。试验结果表明: FDS-100 型传感器在不同配比基质中得到的测量值并不遵循同一曲线; 测量值随压实程度增大而增大, 测量误差在  $-1\% \sim 10\%$  之间; 电导率对测量值有一定影响, 测量误差在  $\pm 5\%$  之间; 温度对 FDS-100 型传感器测量值影响极小, 测量误差在  $2\%$  以下; FDS-100 型传感器与 ECH2O-5TE 型传感器之间的相对误差为  $4.32\%$ 。FDS-100 型传感器可用于基质含水率检测, 但在实际使用时需要针对不同基质与不同压实程度进行标定。

**关键词:** 基质; 含水率检测; 频域法传感器; 性能评估

**中图分类号:** S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0341-06

## Performance Evaluation of Substrate Moisture Detection Based on Frequency Domain Sensor

MU Yonghang<sup>1</sup> LI Li<sup>1</sup> WANG Junheng<sup>2</sup> WANG Haihua<sup>1</sup> FU Qiang<sup>2</sup> SIGRIMIS N<sup>3</sup>

(1. *Modern Precision Agriculture System Integration Research Key Laboratory, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China*

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

3. *Department of Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Athens 11855, Greece*)

**Abstract:** Closed soilless substrate cultivation is the direction of modern agricultural transformation, substrate water content is an important detection indicator of the cultivation process, but the study of the soil moisture sensor used for detecting water content of substrate is rear. To solve this problem, this paper evaluated the performance of a frequency domain soil moisture sensor FDS-100 in the substrate water content detection comprehensively. For different proportions of the substrate, compared and analyzed the standard water content obtained from the drying method and FDS-100 measurement. Besides, it also compared the measure performance of FDS-100 and ECH2O-5TE in a mixed substrate. The influence of compaction degree, EC value and temperature value on sensor is also tested. The results shows that measured values from FDS-100 measurement in different proportions substrate did not follow the same curve; the degree of compaction impacted the FDS-100 measurement, measured value increased with the degree of compaction, the measurement error is between  $-1\%$  and  $10\%$ ; EC had a certain influence on FDS-100 measurement, measurement error is between  $\pm 5\%$ ; temperature had less effect on the measurement of FDS-100, the measurement error is below  $2\%$ ; the relative error between FDS-100 and ECH2O-5TE is  $4.32\%$ . In summary, FDS-100 can be used in substrate moisture detection, it should be calibrated for different substrates and different degrees of compaction in actual use.

**Key words:** substrate; moisture content detection; frequency domain sensor; performance evaluation

收稿日期: 2017-07-18 修回日期: 2017-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201000-2016YFD0201003)和云南省汪懋华院士工作站(2015IC016)

作者简介: 穆永航(1993—),男,硕士生,主要从事物联网技术在设施园艺中的应用研究,E-mail: 412377670@qq.com

通信作者: 李莉(1978—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

## 引言

无土基质封闭式栽培已经成为温室栽培模式的发展方向<sup>[1]</sup>, 基质含水率是建立作物蒸腾量、需水量模型的重要指标, 也是基质栽培中需要重点监测的参数。

含水率检测的方法多种多样, 目前仍处于快速发展阶段<sup>[2]</sup>。通过测量介质的介电常数间接表征含水率是含水率测量的一种常用手段, 基于该原理的方法有时域反射法 (TDR)<sup>[3]</sup>、时域传播法 (TDT)、驻波率法 (SWR)、频率法 (FD) 等。基于不同方法研制的含水率传感器种类也很丰富。在基质含水率检测方面, 目前有大量研究证明<sup>[4-9]</sup> 电容型电介质传感器 ECH2O 系列经过修正后可以较好地反映基质体积含水率。由于价格昂贵, ECH2O 系列并未实际投入农业生产中。而其他方法在基质含水率检测领域中的研究较为缺乏。SIGRIMIS 等<sup>[10]</sup> 研究了通过实时监测栽培系统水分流动情况控制灌溉的算法, 但是由于价格昂贵并没有长期稳定工作的基质含水率传感器, 该算法未能得到有效推广。

基于频域法的含水率传感器在土壤水分检测中具有较好的性能, 应用广泛, 但是由于基质与土壤特性不同, 土壤含水率传感器不能直接应用于基质水分测量, 需要进行误差和精度分析。国内外对 FDS-100 型传感器进行了研究<sup>[11-19]</sup>, 其优势为输出稳定, 检测精度高, 并且得到了其初始标定方法与实际含水率检测室内外标定方法, 但均未对其可行性进行试验。本文对 FDS-100 型传感器在 4 种不同基质以及混合基质中水分检测性能以及干扰因素对其影响进行研究评估, 以期对基质水分测量提供有效手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 基质选择及其理化特性

基质的理化特性复杂多样, 对作物生长有较大影响的物理特性主要有容重、总孔隙度、颗粒大小、水气比等, 对作物生长有较大影响的化学特性有基质化学组成、酸碱度、阳离子交换量、缓冲能力与电导率。在基质水分检测时影响较大的为基质物理特性, 其中影响最大的为容重与孔隙度。

容重过大, 透气透水性差, 容重过小, 基质太轻不能很好地固定根区, 所以基质容重一般在 0.1 ~ 0.8 g/cm<sup>3</sup> 较好。总孔隙度大, 表明容纳空气和水的量大, 基质较轻, 有利于根部生长; 过小则表明容纳水和空气的能力差, 需要增加供液次数, 持水孔隙与通气孔隙分别表示基质持水性能与通气性能。

试验选用草炭、蛭石、珍珠岩和椰糠 4 种常用基质, 其基质理化特性如表 1 所示。

表 1 基质理化特性

Tab. 1 Substrate physical and chemical properties

基质名称	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	通气孔隙/%	持水孔隙/%	水气比
蛭石	0.151	95.0	30.0	65.0	2.17
珍珠岩	0.093	60.3	29.5	30.8	1.04
草炭	0.169	89.8	24.4	65.4	2.68
椰糠	0.106	90.3	9.6	80.7	8.41

草炭为德国产, 容重 0.169 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度较大, 持水能力强, 呈弱酸性, 缓冲性能强, 有机质含量高; 蛭石为河北产, 容重 0.151 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒大小 3 ~ 6 mm, 总孔隙度较大, 通气持水强, 具有较高的缓冲性和离子交换能力, 呈中性或微碱性, 吸水能力强, 绝缘性好, 但易破碎, 不宜重复使用; 珍珠岩为河北产, 容重 0.093 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒大小 4 ~ 8 mm, 总孔隙度适中, 通气排水性好, 几乎没有缓冲性能, 呈中性, 稳定性好, 不易分解, 但受压易破碎; 椰糠为海南产, 容重 0.106 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度大, 持水能力极好, 通气能力较差, 具有较高的缓冲性和离子交换能力。

试验采用 5 种基质配方对传感器性能进行评估, 其中 4 种配方使用单一基质, 另一种配方 E 使用 2 种矩阵法综合比较结果最优的基质配比方案<sup>[20]</sup>。基质配比方案如表 2 所示。

表 2 基质配比

Tab. 2 Substrate proportioning %

基质	草炭	蛭石	珍珠岩	椰糠
A	100	0	0	0
B	0	100	0	0
C	0	0	100	0
D	0	0	0	100
E	60	20	20	0

### 1.2 试验材料

#### 1.2.1 FDS-100 型土壤含水率传感器

FDS-100 型土壤含水率传感器有 3 根不锈钢探针, 探针长度 55 mm, 直径 3 mm, 每个探针之间的间隔为 8 mm; 工作电压 5 V, 输出信号 0 ~ 2 V, 测量精确度 ±3%, 响应时间小于 1 s, 测量稳定时间 2 s。传感器测量区域为以中央探针为中心, 围绕中央探针的直径 7 cm、高 7 cm 的圆柱体, 工作温度范围为 -40 ~ 85℃。传感器为 3 线接口, 分别为电源输入, 电压信号与地线。

传感器出厂时内置信号采样及放大模块与内置漂移校正功能, 所以可以将传感器测量值视为没有内部误差。

使用 MSP430 型单片机搭建传感器数据采集系统得到测量的含水率,含水率测量公式为

$$\theta = \frac{U}{2} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\theta$ ——含水率, %  $U$ ——输出电压, V

### 1.2.2 ECH2O-5TE 型基质含水率传感器

ECH2O-5TE 型基质含水率传感器使用三叉状探针,测量范围为 0~100%V,工作温度范围为 -40~50℃,测量精确度  $\pm 3\%$ ,响应时间小于 1 s,测量稳定时间 1 s。传感器测量区域为以中央探针为中心,围绕中央探针的直径 7 cm、高 7 cm 的圆柱体。

传感器使用 Decagon 专用的读数设备进行读数,分辨率可达 1%,该传感器能测量电导率与温度,自带温度补偿与电导率校准,可将其视为电导率与温度变化对其测量值无影响。

### 1.3 试验方法

试验将传感器测量值与干燥法<sup>[2]</sup>得到基质实际含水率进行对比。试验使用装置为:方形容器(尺寸为 40 cm × 20 cm × 30 cm)、圆台形塑料容器(上端直径 16 cm,下端直径 10 cm,高 12 cm)、电子天平和干燥箱。

在方形容器中对配方 A~E 的基质进行不同体积含水率样本的配比,根据基质最大持水率与数据采集密度计算加水量间隔,根据加水量间隔从干燥到饱和配成 24 组不同体积含水率的样本,每完成一个含水率后将基质搅拌均匀,均匀填入圆台塑料容器中,避免挤压基质,自然填装,填满后用保鲜膜封口,加盖静置于避光处静置。24 h 后称量塑料容器连同含水基质的质量  $w_w$  (g);将保鲜膜揭开,将 FDS-100 型传感器从容器上方正中心垂直插入基质直至探针完全没入基质,为减小读数的误差,使用多次读数的平均值代表测量值,待传感器读数稳定后,间隔 10 s,采集 5 组数据,取其平均值为传感器测得含水率  $\theta$  (%);将基质放入干燥箱,恒温 80℃ 进行 24 h 干燥,干燥结束后取出基质放置至室温称量,读数不变以后记录干燥基质的质量  $w_d$  (g);已知塑料容器质量为  $w_o$  (g);被测基质容重为  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)。所以干燥法测量得到基质体积含水率  $\theta$  计算公式

$$\theta = \frac{w_w - w_d}{w_d - w_o} \rho \times 100\% \quad (2)$$

对配方 E 的基质即混合基质,使用前文所述的方法配制 18 个不同含水率的样本,同时记录 FDS-100 型传感器和 ECH2O-5TE 型传感器在基质中的读数,进行对比反映 FDS-100 型传感器在混合基质中的测量性能与 ECH2O-5TE 型传感器的差距。

将 3 个体积含水率、已知质量配方 E 的基质装

进圆台形容器,通过压实的方法改变基质单位体积的质量,各配成 6 个样本,将 FDS-100 型传感器从容器上方正中心垂直插入容器中,使用前文所述方法记录传感读数和与之对应的基质体积含水率,对比两者间不同,反映基质压实情况对基质含水率测量的影响。

使用蒸馏水与不同浓度营养液进行配比,得到电导率不同但体积相同的溶液,一共配比 18 组样本,溶液电导率范围为 0~3 mS/cm,每组间隔 0.5 mS/cm。将不同电导率的溶液加入干燥、已知质量的配方 E 基质进行含水率配比,得到 3 个水平体积含水率。使用前文所述方法记录传感器读数,来反映电导率对基质含水量测量的影响。

将 2 个体积含水率、已知质量的配方 E 基质填入圆台形容器中,盖上保鲜膜密封后置于室外无阳光直射处,将传感器穿透保鲜膜并插在容器中央,每 30 min 记录一次传感器测量值与温度,用以分析温度对基质含水率测量的影响。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 基质对比对 FDS-100 型传感器性能影响

在 A、B、C、D 4 种单一基质中 FDS-100 型传感器测量值与干燥法测量值之间的关系如图 1 所示。

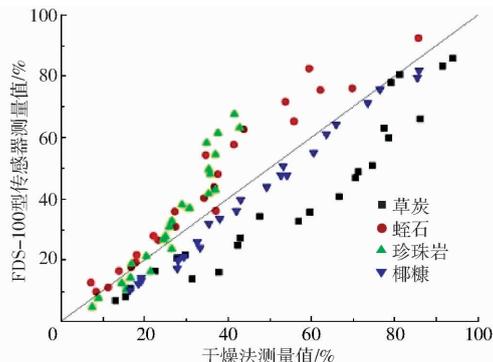


图 1 单一基质中 FDS-100 型传感器测量值与干燥法测量值之间的关系

Fig. 1 Relationship between FDS-100 measurement and drying method measurement in single substrate

从图 1 可以看出, FDS-100 型传感器检测下限为 8%。传感器测量值基本呈现线性规律,不同基质得到的线性关系与线性度各不相同。

在混合基质中 FDS-100 型测量值与干燥法测量值之间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,因混合基质中理化特性与土壤的理化特性在持水性能方面较为接近, FDS-100 型能较好地表征混合基质中的含水率。

FDS-100 型检测各配比的基质含水率的误差如表 3 所示。

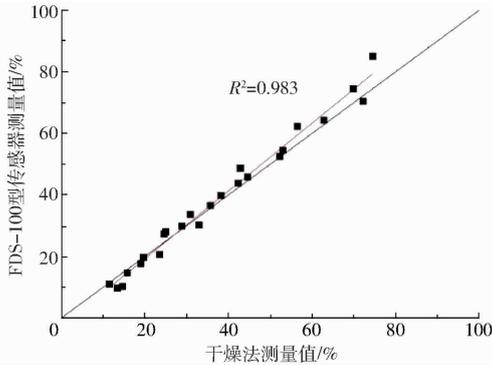


图2 配方E中FDS-100型传感器测量值与干燥法测量值之间的关系

Fig.2 Relationship between FDS-100 measurement and drying method measurement in mixing substrate

表3 误差分析

Tab.3 Errors analysis

配比	$R^2$	MBE/%	RMSE/%
A	0.901	-14.09	16.26
B	0.943	7.55	10.24
C	0.917	6.67	11.55
D	0.992	-5.33	5.83
E	0.983	1.06	3.47

在纯草炭中,FDS-100型传感器测量 $R^2$ 为0.901,在评价的几种基质中线性度较低,但依然呈现线性规律;MBE为-14.09%,RMSE为16.26%,测量值平均低于干燥法测得标准含水率14.09%,与干燥法测量标准含水率离散程度较高,FDS-100型测量值与干燥法测得标准含水率之间存在明显误差。引起此现象的原因是草炭容重高且孔隙度大,结块现象严重,导致测量值误差较大。

在纯蛭石中,FDS-100型传感器测量 $R^2$ 为0.943,线性度较高,呈现线性规律;MBE为7.55%,RMSE为10.24%,测量值平均高于干燥法测得标准含水率7.55%,与干燥法测得标准含水率离散程度较高,在含水率处于8%~40%时,FDS-100型测量值与标准含水率之间偏差明显含水率高于40%时。引起此现象的原因是蛭石与草炭理化特性相近,容重高且孔隙度大,易结块,所以当含水率升高时,结块现象更频繁,测量误差增大。

在纯珍珠岩中,FDS-100型传感器测量 $R^2$ 为0.917,线性度较低,但依然呈现线性规律;MBE为6.67%,RMSE为11.55%,测量值平均高于干燥法测量得标准含水率6.67%,与干燥法测量得标准含水率离散程度较高,在含水率处于8%~40%时,FDS-100型传感器测量值与标准含水率之间偏差较小,但当含水率高于40%时,FDS-100型传感器测量值出现急剧偏移,在干燥法测得标准含水率达

到50%左右时,FDS-100型传感器测量值已经达到80%左右。引起此现象的原因是珍珠岩颗粒太大,持水能力较低,当含水率达到一定值时,珍珠岩无法继续持水,导致误差急剧增大。

在纯椰糠中,FDS-100型传感器测量 $R^2$ 为0.992,线性度最高;MBE为-5.33%,RMSE为5.83%,测量值平均低于干燥法测量得标准含水率5.33%,与干燥法测量得标准含水率离散程度较低,能较好表征实际含水率,原因是椰糠的理化特性在持水能力方面更接近土壤。

在混合基质中,FDS-100型传感器测量 $R^2$ 为0.983,线性度高,但低于椰糠中的线性度;MBE为1.06%,RMSE为3.47%,测量值平均低于干燥法测量的标准含水率3.47%,与干燥法测量得标准水分含量离散程度极低。误差相较于单一基质有明显减小,可认为FDS-100型测量值能表征实际含水率。

试验结果表明,对于不同理化特性的基质,FDS-100型传感器测量值的线性度与误差并不相同,所以对不同理化特性的测量对象,需要一个与之对应的校准方程,FDS-100型传感器在实际运用之前,需要对其进行针对性标定。

## 2.2 FDS-100型传感器与ECH20-5TE型传感器的对比

使用FDS-100型传感器和ECH20-5TE型传感器对不同含水率处理下的混合基质进行测定,结果如图3所示。从图3可以看出,ECH20-5TE型传感器测量精度高于FDS-100型,ECH20-5TE型在所有含水率的情况下的测量精度表现良好。含水率在10%~40%时,2种传感器的测量精度较为接近,都接近干燥法测量得标准含水率,其 $R^2$ 为0.995;在含水率高于40%时,FDS-100型测量值开始向上漂移,随着含水率的增大,FDS-100型传感器的漂移量呈现增大的趋势,其 $R^2$ 为0.952。两者相对误差为4.32%。试验表明,FDS-100型在混合基质中的测量精度与性能与市面上工业级传感器的差距较小。

## 2.3 压实情况对FDS-100型传感器性能影响

使用FDS-100型对在不同体积质量和不同含水率处理下的混合基质进行测定,结果如图4所示。在基质体积质量达到0.24 g/cm<sup>3</sup>时,基质的压实程度已经接近饱和,可以认为此时为最大压实程度。由图4可见,FDS-100型测量值与体积质量有较好相关性,并呈现线性增加关系。传感器测量值与真实含水率之间的平均误差在-1%~10%之间,并随体积质量升高而快速增大,试验表明,在传感器实际

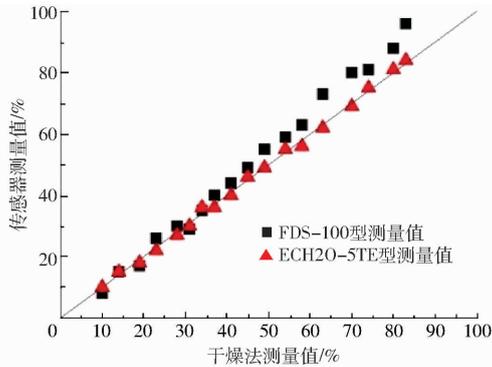


图3 FDS-100型与ECH2O-5TE型测量值的对比

Fig. 3 Comparison of FDS-100 and ECH2O-5TE

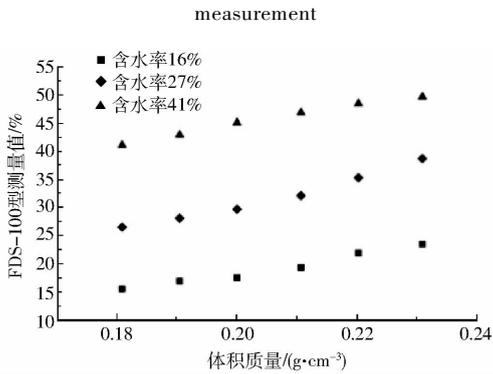


图4 体积质量与FDS-100型测量值的关系

Fig. 4 Relationship between bulk density and FDS-100

measurement

运用中,需要保证传感器使用时尽可能保持被测对象体积质量保持不变。如体积质量在测量过程中产生变化,需要对传感器进行针对体积质量与基质种类的同步标定。

#### 2.4 电导率对FDS-100型传感器性能影响

使用FDS-100型对在不同电导率和不同含水率处理下的混合基质进行测定,结果如图5所示。由图5可知,电导率对FDS-100型测量值有一定影响,但是并不非常强烈,且不存在一定的规律性,FDS-100型测量值在真实含水率上下漂移,变化范围随含水率增大而增大,传感器测量值与真实含水率之间的平均误差在 $\pm 5\%$ 之间。试验表明,FDS-100型测量值受电导率影响,但不存在一定规律,且并不会过度影响FDS-100型的测量值。

#### 2.5 温度对FDS-100型传感器性能影响

使用FDS-100型对在不同温度和不同含水率处理下的混合基质进行测定,结果如图6所示。由图6可知,温度对FDS-100型测量值有一定影响,

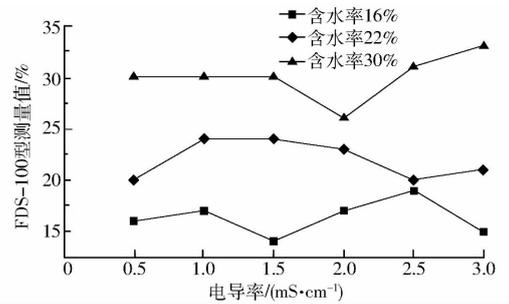


图5 电导率与FDS-100型测量值的关系

Fig. 5 Relationship between EC and FDS-100 measurement

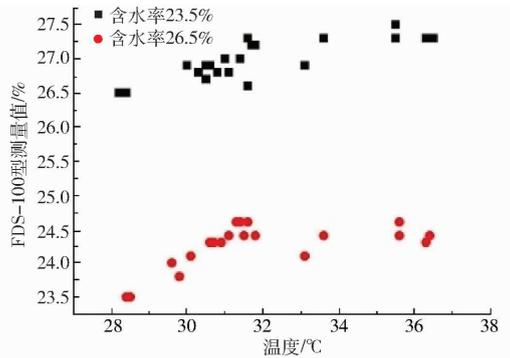


图6 温度与FDS-100型测量值的关系

Fig. 6 Relationship between temperature and FDS-100

measurement

FDS-100型测量值随温度增高有增大的趋势,但没有线性关联。不存在一定的规律性,但变化轨迹相同。传感器测量值与真实含水率之间的平均误差在2%以下,因为FDS-100型内部具有温度校正模块,能对温度变化进行自我校正。

### 3 结论

(1) FDS-100型传感器可用于基质含水率检测,对不同理化特性的基质,FDS-100型传感器的性能特性不同,FDS-100型需要针对具体基质进行具体标定。

(2) FDS-100型传感器对基质压实情况较为敏感,呈现线性关系,误差在 $-1\% \sim 10\%$ 之间,使用时需要根据测量基质的理化特性与体积质量情况进行同步校准。

(3) 电导率对FDS-100型测量值的影响在 $\pm 5\%$ 以内,且无特定规律,其波动范围较小,并不过度影响测量结果。温度对FDS-100型的测量情况影响误差在2%以下,可以忽略不计。

#### 参考文献

- 袁洪波,王海华,庞树杰,等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与实验[J]. 农业工程学报,2013,29(21): 159-165. YUAN Hongbo, WANG Haihua, PANG Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(21): 159-165. (in Chinese)
- DOBRIYAL P, QURESHI A, BADOLA R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications

- for water resource management[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458(3): 110–117.
- 3 王克栋,王一鸣,冯磊,等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. *农业机械学报*,2010,41(1):72–76.  
WANG Kedong, WANG Yiming, FENG Lei, et al. Measurement of soil moisture based on phase detecting principle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2010,41(1):72–76. (in Chinese)
- 4 KRISHNA S N, FRANCESCO M, SUE K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112(2): 227–234.
- 5 LEA-COX J D, ARGUEDAS-RODRIGUEZ F R, RISTVEY A G, et al. Relating real-time substrate matric potential measurements to plant water use for precision irrigation[J]. *Acta Horticulturae*, 2011, 891(891):201–208.
- 6 刘志刚,李萍萍,胡永光,等. 电介质型水分传感器测定栽培基质含水率的标定模型[J]. *农业工程学报*,2011, 27(2): 199–202.  
LIU Zhigang, LI Pingping, HU Yongguang, et al. Calibration method for detection of matrix water content with dielectric-type moisture sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 199–202. (in Chinese)
- 7 刘志刚. 电容传感器在栽培基质含水量检测中的应用研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.  
LIU Zhigang. Study on the application of the capacitance sensor in the substrates moisture detection[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- 8 LIU Zhigang, LI Pingping, HU Yongguang, et al. Temperature calibration of capacitance probes to measure soilless substrate water [C]//International Conference on New Technology of Agricultural, 2011: 263–265.
- 9 SÁNCHEZ-MOLINA J A, RODRÍGUEZ, GUZMÁN J L, et al. Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 151: 114–125.
- 10 SIGRISMIS N, ARVANITIS K G, PASGIANOS G D, et al. Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser[J]. *Computer and Electronics in Agriculture*, 2001,31(1):31–46.
- 11 SUN Yurui, MA Daokun, LIN Jianhui, et al. An improved frequency domain technique for determining soil water content[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(6): 805–812.
- 12 高艳,孙宇瑞,马道坤,等. FDS土壤水分传感器的两步标定法[J]. *中国农业大学学报*,2006,11(2): 78–81.  
GAO Yan, SUN Yurui, MA Daokun, et al. Two-step calibration of the FDS soil water content sensor[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006,11(2): 78–81. (in Chinese)
- 13 吴日峰,李润奎,刘生根,等. 不同原理土壤水分传感器的室内外标定方法及对比测试研究[J]. *安徽农业科学*,2013, 41(13): 6048–6050.  
WU Rifeng, LI Runkui, LIU Shenggen, et al. Research of calibration methods and contrast tests of soil moisture sensors with different working principles[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2013, 41(13): 6048–6050. (in Chinese)
- 14 VARBLE J L, CHÁVEZ J L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 101(1): 93–106.
- 15 MITTELBACH H, LEHNER I, SENEVIRATNE S I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430–431(1): 39–49.
- 16 宋庆恒,谭懿. 便携式土壤水分测试仪的设计与实现[J]. *农机化研究*,2015,37(8):208–211.  
SONG Qingheng, TAN Yi. The design and implementation of portable instrument for measurement of soil moisture[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015,37(8):208–211. (in Chinese)
- 17 张阳. 基于无线地下传感器的土壤含水率监测系统设计与实现[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.  
ZHANG Yang. Design of soil moisture monitoring system based on wireless underground sensor[D]. Yangling: Northwest A & F University,2015. (in Chinese)
- 18 FEI Hu, CAI Rongchen, XUN Li. Design of wireless water-saving irrigation controller[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 278–280:1577–1580.
- 19 朱咏莉,李萍萍,孙德民,等. 醋糟有机基质含水率的可见/近红外光谱检测[J]. *农业机械学报*,2010,41(9):178–181.  
ZHU Yongli, LI Pingping, SUN Demin, et al. Detection of moisture in vinegar residue substrate using visible near infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2010,41(9):178–181. (in Chinese)
- 20 甘露,范海燕,吴文勇,等. 无土栽培基质水分特性参数研究[J]. *农业机械学报*, 2013,44(5): 113–118.  
GAN Lu, FAN Haiyan, WU Wenyong, et al. Water retention parameters of soilless-culture substrates[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(5): 113–118. (in Chinese)