

基于频域介电法的农田土壤剖面水分特征曲线原位测定方法

赵阳¹, 吴消同¹, 颜小飞², 程强^{1,3*}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;
3. 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 土壤水分特征曲线是研究土壤水动力学性质和指导灌溉的重要参数。该研究针对目前土壤水分特征曲线较难在田间原位测量以及只能定点测量的现状, 设计了一种基于频域介电法的土壤剖面多深度水信息原位扫描监测系统, 通过利用该系统获取不同深度土壤体积含水率和基质势数据, 得到土壤剖面水分特征曲线。该扫描监测系统组成包括: 介电管式传感器模块(包含2个传感器模块、水分和水势测量管)、主控模块、4G模块、太阳能供电模块和阿里云平台监测模块。主控模块控制2个介电管式传感器分别在水分和水势测量管中按照设定参数进行上下扫描, 监测不同深度下的(5~60 cm, 间隔5 cm)土壤含水率和基质势值。测量的数据存储在SD卡中, 并同步上传至云平台, 实现数据的远程监测与采集。系统工作1h的耗电量为0.68 W·h, 通过太阳能电池板进行供电可以实现野外长期监测。该系统含水率和基质势标定曲线的决定系数均大于0.98, 在测量范围内具有较好的一致性。农田环境下的观测结果表明: 该系统不仅能够监测冬小麦根区土壤剖面体积含水率和基质势的动态变化, 而且能够实现原位检测土壤剖面水分特征曲线, 为观测作物根区土壤水分变化、持水能力和指导智能节水灌溉提供重要依据和技术支持。

关键词: 土壤; 农田; 传感器; 水分特征曲线; 剖面; 原位检测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407019

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-06-0089-09

赵阳, 吴消同, 颜小飞, 等. 基于频域介电法的农田土壤剖面水分特征曲线原位测定方法[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 89-97. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407019 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Yang, WU Xiaotong, YAN Xiaofei, et al. In-situ measurement method for soil profile water characteristic curve in farmland based on frequency domain reflectometry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(6): 89-97. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407019 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤水分特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)是表征土壤含水率与土壤基质势之间关系的曲线, 反映了土壤的持水和释水特征^[1-2]。土壤质地、结构以及有机质含量等因素都会对土壤孔隙度的大小和连通性产生影响, 进而影响土壤水分特征曲线的形状和斜率^[3-4]。因此, 实时获取土壤剖面水分和水势的变化以及水分特征曲线, 可以更好地理解和预测土壤中水的分布和运移, 从而更有效地进行农业生产管理和水资源利用^[5-7]。

为了提高SWCC的测量精度和简化测量过程, 国内外学者与商业公司相继研制了一系列传感器检测装置^[8-10]。目前主要通过分离测量土壤含水率和土壤基质势来实现SWCC的测定^[11-13]。在土壤水分野外测量方法中, 介电

法因其具有灵敏度高、适用范围广以及可野外测量等优点被广泛关注^[14-16]。PATLE等^[17]设计的多感应点土壤水分传感器利用在5~25 cm内间隔5 cm布置的5个叉指电极采集土壤水分数据, 虽然其传感器探头的厚度仅为1.6 mm, 对土壤水分测量影响较小, 但是其深度不可调节且探头易被腐蚀。RAMADAN等^[18]设计的光伏土壤水分监测站通过在探头上安装4个不同深度的铜片实现多深度土壤水分测量, 但其存在铜片探头互换性差的问题。TRIME公司生产的TDR剖面土壤水分测量系统(TRIME-PICO-IPH)可实现土壤剖面水分测量, 但其测量成本较高, 设备均价在万元人民币以上。在土壤基质势野外测量方法中, 主要为张力计法和介电法^[19-22]。HAMDANY^[23]设计的NUT渗透压张力计利用聚合物的膨胀能力来实时测量土壤水势, 具有测量精度高和便携的优点, 但其安装后只能定点测量。介电法通过测量与被测土壤达到水力平衡的多孔材料的水分, 并依据该多孔材料的水分特征曲线间接获得土壤基质势, 如商用的TEROS 21传感器, 但其价格较为昂贵^[24-25]。YU等^[26]设计了一种介电管式传感器, 可以在非均质土壤中原位测量土壤含水率和基质势, 但其装置较复杂且较难在野外开展试验。

因此, 针对目前SWCC测量系统主要存在的多传感器探头之间有互换误差、价格昂贵、较难野外测量或只

收稿日期: 2024-07-19 修订日期: 2024-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271990); 国家重点研发项目(2023YFD2301101); 拼多多-中国农业大学研究基金资助项目(PC2023A02002)
作者简介: 赵阳, 研究方向为作物根区土壤水分水势原位测量。

Email: zhaoyang6@cau.edu.cn

*通信作者: 程强, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为面向智慧农业的土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统水信息传感机理与检测方法、参数辨识与优化、数据分析与处理等方面的科学研究与智能装备开发。

Email: chengqiang@cau.edu.cn

能定点测量的问题, 该研究基于频域介电法研制了一种能在农田土壤剖面尺度上同步实时获取土壤含水率和基质势信息的低成本测量系统, 用于实现 SWCC 的原位测定, 以期为观测作物根区土壤水分变化和指导智能节水灌溉提供依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 系统整体组成与功能

该系统主要由 4 G 传输和控制系统模块、阿里云远程数据采集平台、太阳能供电模块和介电管式传感器模块(含测量管)组成, 系统组成如图 1 所示。介电管式传感器模块由传感器探头和测量管组成(含水率测量管和基质势测量管), 用来测量土壤剖面含水率和基质势。主控模块控制系统整体运行, 同时可以在参数设置软件中根据实际需求设置系统测量总深度、传感器探头测量间隔以及测量周期等。通过 4 G 传输将系统测量到的数据无线传输至阿里云远程数据采集平台, 可以远程在云平台监测设备运行状况及下载测量数据。太阳能供电模块为系统在野外提供稳定的电能。

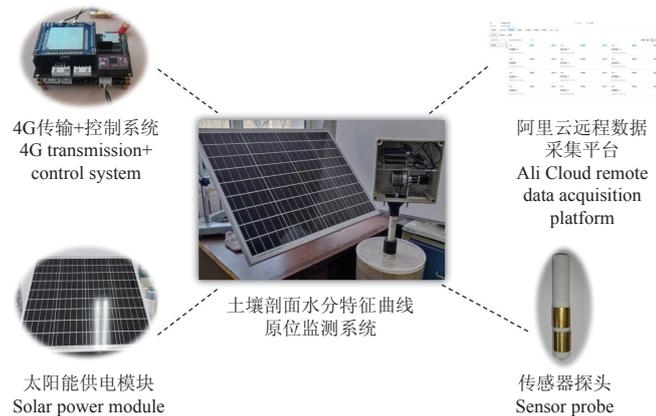


图 1 土壤剖面水分特征曲线原位扫描监测系统

Fig.1 In-situ scanning monitoring system for soil profile water characteristic curve

1.2 介电管式传感器测量原理和设计

1.2.1 土壤含水率测量

由于水的相对介电常数(20 °C 时为 81)与干土和石膏的相对介电常数(分别为 3 和 2)差异较大, 因此可通过测定土壤相对介电常数来间接测量土壤水分变化^[27]。本文基于频域介电法来实现土壤含水率和基质势的测定, 传感器测量电路如图 2a 所示。其原理是基于四分之一传输线理论, 在传输线两端理论的电压差 U_{ab} 为^[26]

$$U_{ab} = A(Z_p - Z_0) / (Z_p + Z_0) \quad (1)$$

式中 Z_p 是探头的阻抗值, Ω ; Z_0 为传输线的特征阻抗值, Ω ; 当传输线的长度为振荡器发射出电磁波波长的四分之一时, A 为激励信号的幅值。当 $Z_p = Z_0$ 时, 根据阻抗匹配原理, 传输线没有反射波产生, 自然也就没有驻波, 此时 $U_{ab} = 0$; 当 $Z_p \neq Z_0$ 时, 此时传输线阻抗没有发生匹配, 传输线产生一定的反射波, 入射波与反射波相叠加产生驻波, 当 Z_p 发生变化时, 驻波的幅值也随之产生变

化, 此时产生驻波电位差, 因此通过测量电位差的变化就能间接反映探头阻抗的变化^[28-29]。

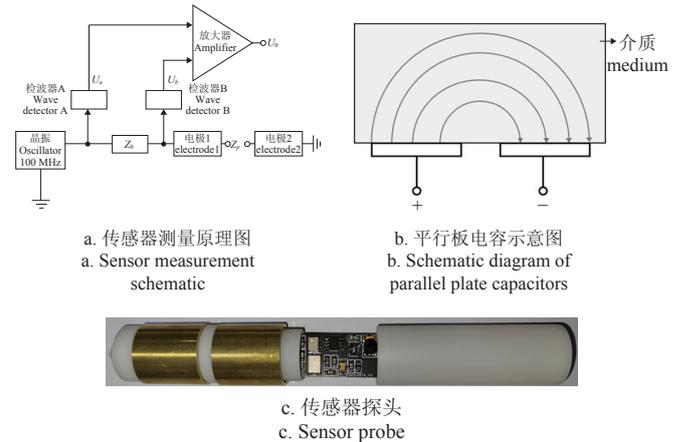


图 2 传感器测量示意图

Fig.2 Sensor measurement diagram

平行板电容器靠近边缘的电场线会变得弯曲, 这种现象称为电场边缘效应^[30]。若将平行板电容器两基板置于同一平面平行, 便可得到单边测量的电场泄露型传感器, 如图 2b 所示。本研究传感器由平行板电容器改进而来, 传感器电极结构为金属圆环, 其可以产生内边缘场和外边缘场。本研究使用 2 个金属圆环作为测量电极, 利用电极产生的外边缘场进行土壤多参数的测量。水分传感器探头实物如图 2c 所示。传感器探头整体长 120 mm, 直径 22 mm, 环形电极宽度为 23 mm, 间隔环宽度为 4 mm。传感器外壳内部为中空结构, 内置土壤含水率检测电路板。传感器探头外壳设计为圆柱体, 且 PVC 管壁与传感器外壳留有一定空隙, 使得传感器探头可以顺滑地在 PVC 管中上下移动, 因此选用的 PVC 管内径为 23 mm, 壁厚为 1 mm。传感器探头的顶部贴有金属铜箔, 可以被接近开关感知实现传感器探头初始位置的校准。

1.2.2 土壤基质势测量

土壤基质势的测量也基于频域介电法, 基质势测量管由 PVC 管和外层灌注的石膏构成, 石膏的水分特征曲线较为稳定。本文在测量土壤基质势时, 先将基质势测量管插到待测土壤后, 根据水力平衡原理, 土壤与测量管的石膏会存在势能差, 致使水分在两者之间运移并最终达到平衡, 此时土壤与测量管中石膏的基质势相等^[22,26]。石膏管内传感器探头通过测量管壁周围石膏的水分含量, 根据石膏的水分特征曲线确定石膏基质势, 也就是石膏周围土壤基质势。通过标定可以直接建立传感器探头输出电压与土壤基质势之间的对应关系。

1.3 主控模块设计

系统具有自动采集土壤不同深度处含水率和基质势的功能。系统测量的总深度、间隔距离、测量周期等参数均已在程序中定义且可根据试验需求进行更改。系统工作时将按已有的设置进行测量。系统上电时, 首先进行硬件初始化, 配置各外设的工作参数及模式, 配置时会检查各硬件模块功能是否正常(如 SD 卡、ADC 模块、

4G模块、步进电机等),若有异常则会进行故障提示(LED闪烁和串口提示)。若所有模块工作正常,则步进电机转动带动传感器顶端到达箱体的接近开关时完成位置初始化。然后步进电机反转下降至设定总深度,传感器模块开始工作,测量周围土壤含水率或基质势信息,测量完一层后逐步上移设定的间隔距离,完成不同深度的信息测量。测量的数据将按照时间、深度分条保存到SD卡中并上传至阿里云平台。采集完成后,系统将再次进行位置初始化,然后进行待机休眠,并等待下一次测量指令的到来。其他关于装置细节、硬件组成、关键电路设计等的主控模块具体设计与实现详见文献[16]。

1.4 太阳能和云平台模块设计

系统工作时,设置不同的测量总深度、间隔距离以及测量周期,系统的功耗是不一样的。在野外实际工作中,采用太阳能板对系统进行供电,选择合适容量的太阳能电池板既能满足供电需求,又能减少成本,因此,有必要根据系统工作的功耗和待机的功耗,选取合适的太阳能电池板。在实验室内采用优利德UTP1306S数字可调直流稳压电源12V对系统进行供电,设置系统测量周期为1h,则系统工作一轮时间为1h。因为系统的工作电压是恒定的,因此,只要记录系统工作和待机时的时间,以及最大工作电流和待机电流,就能计算出系统的功耗以及工作一轮的总电量。

系统每一轮的工作时间和待机时间都是一样的,系统处于待机时电流也是恒定的。由于系统的步进电机在运行和停顿采样时,系统的工作电流会有一些的波动,因此,采用最大工作电流来计算系统的最大工作功耗。将测得系统工作一轮的最大工作电流的数据求平均,得到系统的最大工作电流为200mA,工作功率为2.4W,待机电流为52mA,待机功率为0.62W。系统运行时间为2min/次,其正常工作1h的耗电量为0.68W·h。由此可见系统功耗整体较低,若选取合适的太阳能电池板,系统能在野外长时间工作。考虑极端天气存在,系统在长期无阳光的情况下仍可工作半个月,因此选用太阳能供电模块为太阳能电池板(额定电压22V、峰值功率为60W)、锂电池电池组(额定电压为12V,电池容量为 3×10^4 mAh)、电压转换芯片(MP2359)。单晶硅光伏板给锂电池电池组充电,电压转换芯片将锂电池电池组输出的电压转换为微控制器、外设和传感器等可用的电压,为整个系统提供电能,确保系统野外工作时的供电稳定性。

4G传输模块(创思通信,EC200U)将系统采集的数据实时发送至阿里云的物联网平台上,在该平台可以查看设备的在线状况、运行是否正常及查看和保存数据。主控模块上传数据时通过4G模块中内置的MQTT协议在阿里云平台进行动态注册,并发送产品三要素(产品ID、设备ID和设备密钥)进行认证,物联网平台认证成功后,主控模块将采集的数据打包为阿里云平台二次开发的Alink JSON格式并上传至阿里云平台,平台将数据包进行解析、提取并显示。系统采集的数据将按照测量

的土层顺序依次进行保存。

2 试验方案

2.1 农田观测试验

为检验本文开发的测量系统在大田环境中的实际测量效果,于2023年3月16日—4月24日在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地(试验区地理位置为 $116^{\circ}26'39''E$, $40^{\circ}10'43''N$)进行田间试验,土壤质地为壤土。在试验基地的冬小麦示范田中,根据测量系统中含水率测量管和基质势测量的尺寸在土壤中开孔并将2个测量管相邻埋入,安装测量系统。首先使用土钻(钻头略大于水分测量管与水势测量管外径)打孔,深度为60cm。将水分测量管(长75cm,外径25mm,其材质为PVC管)埋入孔中,表层留15cm用于与主控系统连接。使用少量土壤与水混合均匀形成泥浆,并将泥浆灌入水分测量管与土壤之间的空隙内,重复上述步骤直至土壤与水分管紧密接触无空气间隙,以确保土壤体积含水率测量准确。水势管安装也采用上述步骤。待2个测量管周围泥浆与田间土壤水分平衡后,将传感器探头放入测量管中,主控系统安装于测量管上,系统开始测量。由于冬小麦的根系主要分布在0~40cm的土层中^[31],因此在参数设置软件中将测量总深度、测量间隔距离和测量周期分别设置为60cm、5cm和1h。根据环刀法原位取土,0~20cm表层土壤容重为 1.2 g/cm^3 ,>20~40与>40~60cm土壤的容重均为 1.5 g/cm^3 。测量管埋入土壤中,传感器探头放置在测量管中,只有传感器探头在测量管中进行上下移动,其余部分均不需要移动。测量管埋置的深度为60cm,下雨浇水等会使得土壤发生一些轻微移动,但埋置60cm深的测量管不会发生形变或者移动。

2.2 传感器探头响应范围试验

为了使传感器采集的数据尽量准确地表示某一区域内的土壤含水率或土壤基质势,需要测量传感器探头的有效测量范围,以此来确定基质势测量管灌注的石膏厚度。厚度太小则传感器测量的不止石膏的含水率还包含一部分外围的土壤含水率,厚度太大则会对植物根区以及土壤造成较大的破坏和干扰。

试验装置采用塑料长方体状空心容器(高80cm),在靠近容器底部的位置水平方向钻一个25mm的孔,以便将PVC管放置于容器内。为了减小因土壤高度的增加引起的底部土壤容重的变化,通过3D打印一个填充材料,使得填充材料刚好包裹PVC管且外部与容器内壁贴合,填充材料的高度为20mm。在容器内壁贴有刻度尺,用于记录加入土壤的高度。在试验过程中,将传感器水平放置于PVC管内,并确保2个环形电极都在容器内部,且测量时传感器的位置不变。记录传感器测量空气的电压值,然后将预先制备好的10%质量含水率的土壤分批加入容器内,每次加入时先用电子秤称量,然后倒入容器中使用工具将土壤压实以确保容重为 1.2 g/cm^3 ,依次记录加入土壤后的传感器电压输出值,重复以上操作,

直至输出趋于平稳。试验示意图如图 3 所示。

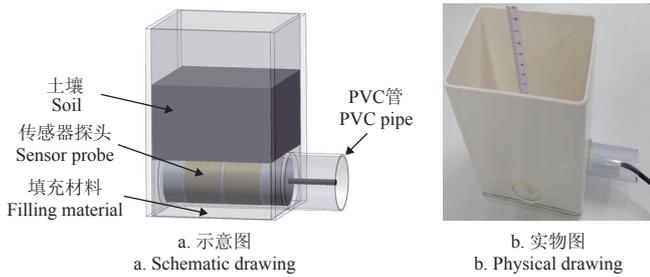


图 3 传感器探头响应范围试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of sensor probe response range experiment

2.3 土壤含水率标定试验

为了确保测量结果的准确性, 需先在实验室内对传感器进行标定, 建立传感器输出的电压值与不同土壤含水率之间的关系。野外测量时, 4 G 模块将系统测量的电压值传输至阿里云平台, 然后依据标定曲线即可得到土壤的实际含水率。传感器探头标定主要分为土壤含水率标定和土壤基质势标定。将农田中取回的壤土(按土壤质地标准三角分类图各部分质量分数: 黏粒 13.5%, 砂粒 39.9%, 粉粒 46.6%), 用烘箱烘至完全干燥(105 °C, 24 h), 并通过 2 mm 筛网后获得标定试验土壤^[28]。值得注意的是, 由于本研究原位试验土壤是壤土, 故此处仅进行壤土标定, 实际应用中, 为了测量的准确性, 推荐取待测区土壤进行校正。

在进行土壤含水率标定时, 首先将含水率测量管(底部用 3D 打印圆锥密封)放置于圆柱形容器中央, 然后将干燥的土样按照 1.2 g/cm³ 的容重放入容器中, 记录加入的土样质量和高度, 并记录传感器在测量管中的电压输出值, 此为传感器在土壤中输出的最低值, 之后将土样全部取出。按照 5% 质量含水率的梯度向土样加水, 每次加水后混合均匀然后将土样加入容器内, 后续填充时的容重均与第一次保持一致, 以便计算土壤体积含水率。记录该体积含水率下传感器在测量管中的电压输出值, 然后将土样全部取出继续加水, 重复上述步骤直至土壤趋于饱和。值得注意的是, 在标定过程中, 含水土样的配比使用的是质量含水率, 而最后的标定曲线应为传感器输出与土壤体积含水率之间的关系曲线。土壤质量含水率等于水的质量除以干土的质量, 土壤体积含水率等于土壤质量含水率乘以干土质量除以土样体积。

2.4 土壤基质势标定试验

土壤基质势的测量主要是通过测量基质势测量管周围石膏的水分, 然后依据石膏的水分特征曲线得到土壤基质势。与土壤含水率可自行配置不同, 土壤基质势标定时无法配置确定大小的土壤基质势, 故其真实值不能像体积含水率那样获得。因此采用商业基质势传感器 TEROS-21 对本文传感器的基质势测量进行标定^[32]。TEROS-21 是由美国 METER 公司生产的一款高精度土壤基质势传感器。它是基于频域介电法原理工作, 专门用于测量土壤中的基质势的变化。TEROS-21 传感器的

准确性和稳定性经过了长期验证, 特别适用于大部分常见的土壤类型。其量程为 0 ~ 10⁵ kPa, 分辨率为 0.1 kPa。在测量范围内准确度为 ±(读数的 10% + 2 kPa), 在湿润范围(接近 0 kPa)时, 准确度可达 ±1 ~ 5 kPa。

基质势测量管的制备采用浇筑的方法。石膏的厚度为传感器检测范围的最大半径, 即 30 mm, 单层石膏的高度为 5 cm。将透明 PVC 管立于圆柱形模具中心, 按照一定比例把干石膏粉与水混合后倒入模具中, 每次倒入高度为单层石膏的高度。待其凝固后, 在该石膏层的上方加入厚度为 2 mm 的隔水层, 再进行下一层石膏层的浇筑。隔水层主要用于阻断相邻石膏层之间的水分转移。重复上述步骤, 总共浇筑 12 层, 共 60 cm。石膏粉颗粒的大小会影响水分的平衡过程和测定的基质势数值, 故采用同一种高强石膏粉, 按照相同的干石膏粉与水的比例配比, 将传感器探头放入配置好的基质势测量管, 测量传感器输出与石膏基质势之间的关系, 尽可能避免因石膏粉颗粒大小影响水分平衡和测定的基质势数值。

标定时, 先将制备好一层的基质势测量管(底部用 3D 打印圆锥密封)和商用基质势传感器 TEROS-21 埋入土样的同一高度内, 通过滴灌将土样润湿, 滴灌点位于 TEROS-21 和传感器两者中心的上方, 直至 TEROS-21 的输出值趋于 0 kPa 时, 土壤趋近于饱和, 停止滴灌。在实验室环境下白天静置蒸发 12 h, 夜间用保鲜膜覆盖 12 h(目的是使土壤内水势重新达到平衡), 重复上述过程直至土壤水分蒸干。标定试验过程中记录 TEROS-21 和传感器的电压输出值, 将两者在土壤夜间平衡状态下的输出值进行拟合, 可得到该传感器的基质势标定曲线。

3 结果和分析

3.1 传感器标定结果

3.1.1 传感器响应半径

传感器的响应半径测试试验结果如图 4 所示, 随着土壤高度的增加, 传感器的输出呈现逐渐增加的趋势, 并且这种增加呈现单调性。当土壤高度增加至 30 mm 时, 随着土壤高度的继续增加, 传感器的输出开始趋于稳定, 说明传感器的响应半径为 30 mm。由于 PVC 管外半径为 12.5 mm, 因此基质势测量管的多孔材料外半径为 42.5 mm, 即 PVC 管半径与传感器响应半径之和。

3.1.2 土壤含水率标定

通过控制容重和加水梯度得到不同体积含水率的土壤样本, 记录不同土壤体积含水率下传感器的输出电压并对其进行拟合。传感器的含水率标定结果如图 5 所示, 可以看出土样的体积含水率与传感器输出呈显著线性关系, 决定系数 R^2 为 0.991 ($P < 0.01$), 说明该拟合曲线能较准确地表示此范围内土壤体积含水率与传感器输出的关系。曲线横坐标交点为 0.117, 说明当土壤中体积含水率为 0 时, 传感器输出最小值为 0.117 V。本研究团队自主研发的土壤水分监测系统已通过原位测量与烘干法的对比验证, 验证结果表明, 传感器测量值与烘干法测

定值之间的决定系数 R^2 均大于 0.96，相关结果已发表于文献 [33-34]，证实了该系统在野外环境下能够实现土壤体积含水率的高精度监测。

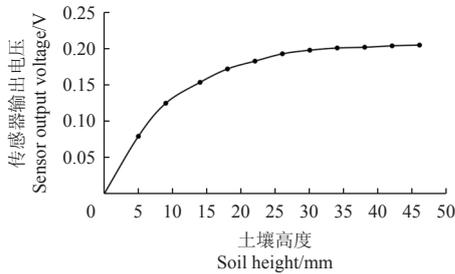


图 4 传感器响应半径测试结果
Fig.4 Response radius test results of sensor

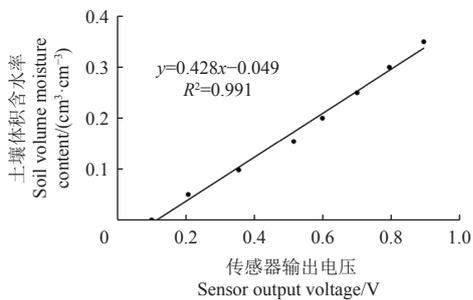


图 5 土壤体积含水率标定结果
Fig.5 Result of soil volume moisture content calibration

3.1.3 土壤基质势标定

传感器的土壤基质势标定结果如图 6 所示，土壤基质势与传感器输出呈幂函数关系， R^2 为 0.989 ($P < 0.05$)。从图中可以看出，当土壤越湿润时，其水势的绝对值越小，接近 0，反之亦然。由于拟合曲线为幂函数，所以当土壤在极端情况下，即土壤含水率达到饱和或极端干燥时会产生一定的误差，但在农田中极端情况较少发生，因此该传感器能较准确地表示此范围内土壤基质势与传感器输出之间的关系。

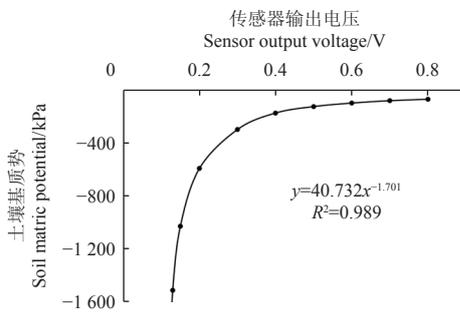


图 6 土壤基质势标定结果
Fig.6 Result of soil matrix potential calibration

3.2 传感器稳定性验证

为了检验该系统土壤含水率的测量稳定性，将从农田原位取回的土壤按照体积含水率为 0、8%、16%、24% 进行配制，分别装入相同的圆柱形密闭容器（直径 20 cm，高 15 cm）中，每个容器中土样深度为 14 cm。在每个容器中心留有直径为 25 mm 的圆孔用于

安装 PVC 管。将 4 个容器从下到上按照体积含水率 0、8%、16%、24% 进行堆叠放置。用该系统进行测量，设置测量间隔时间为 1 h，试验时长为 14 d，采集到 290 组试验数据。传感器稳定性和精度验证试验结果如图 7 所示。通过传感器测定每层土样的含水率，第一层： $0 \pm 0.008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，第二层： $0.080 \pm 0.009 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、第三层： $0.160 \pm 0.006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、第四层： $0.240 \pm 0.004 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。表明该系统的测量结果与实际土壤体积含水率吻合程度较高且检测稳定性较强。

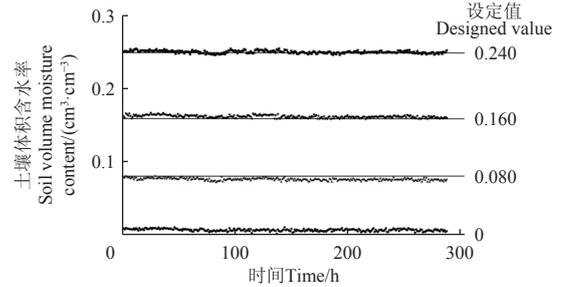


图 7 传感器稳定性试验结果
Fig.7 Sensor stability test results

3.3 农田观测试验结果

3.3.1 土壤剖面体积含水率动态变化

系统测量的农田土壤剖面体积含水率如图 8 所示（2023 年 3 月 16 日—4 月 24 日）。从土壤体积含水率变化过程可以看出，在入春之后，土壤剖面的体积含水率整体随着冬小麦的生长呈下降趋势。其中表层的体积含水率最低，随着土壤深度的增加，土壤体积含水率较之上一层也在增大。

由图 8 可以看出，距离地表 0~15 cm 处的土壤体积含水率变化最为明显，这一层称为水分强烈消耗层；20~45 cm 处的土壤体积含水率变化较为明显，这一层称为次水分消耗层；50~60 cm 处的土壤体积含水率变化很小，称为弱水分消耗层。这是由于返青期冬小麦根区分布主要集中在 0~60 cm 的土壤范围内，但是对根区土壤水分的消耗主要集中在 0~20 和 >20~40 cm 的土层区间 [35]。

在 4 月 4 日中午 14:00 对农田土壤进行了灌溉。在灌溉之后，可以看到土壤剖面体积含水率都有增大，特别是表层的 0~15 cm 都有一个较大的提高，5 cm 处土壤体积含水率由 11.18% 升高至 25.71%，之后土壤体积含水率随地表蒸发以及冬小麦根区水分吸收缓慢降低，其余各深度土壤体积含水率在灌溉之后也都有着不同程度的增大。整体来说，表层土壤体积含水率要比深层土壤体积含水率增加的多。由不同土层的体积含水率增加的时刻可以看出水分由表层到深层不断入渗的过程。

3.3.2 土壤剖面基质势动态变化

系统测量的农田土壤剖面基质势动态变化如图 9 所示。表层土壤的基质势整体较低，随着土壤深度的增加，由于土壤体积含水率较大，其基质势较高。随着地表蒸发以及冬小麦根区对水分的吸收消耗，导致水势随着时间逐渐变低。

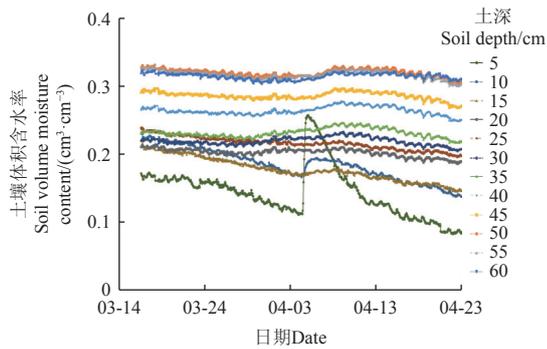


图8 小麦根区土壤剖面含水率动态变化

Fig.8 Dynamic change of soil moisture content in wheat root zone

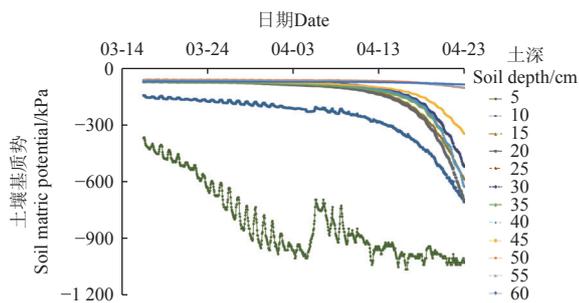


图9 小麦根区土壤剖面基质势动态变化

Fig.9 Dynamic change of matrix potential of soil profile in wheat root zone

表层 5 cm 处的土壤基质势一直较低, 说明表层土壤整体较为干燥, 4 月 4 日灌溉之后, 基质势先增大然后又逐渐减小。从 4 月 13 日开始, 10~45 cm 的土壤基质势开始逐渐减小, 其中 20 和 40 cm 处的土壤基质势是减小最快的, 说明冬小麦根区耗水主要集中区域为 20 和 40 cm 处。50~60 cm 的土壤基质势整体变化不大, 说明冬小麦根系在该层分布较少, 对土壤水分的消耗也较小。

3.3.3 土壤剖面水分特征曲线

由土壤体积含水率和基质势可以得到土壤剖面水分特征曲线如图 10 所示。由于 4 月 4 日进行了灌溉, 等到水分平衡之后, 选取 4 月 10 日—4 月 24 日之间的水分与水势数据作土壤剖面水分特征曲线。其中表层 5 cm 处由于灌溉之后基质势一直较低, 因此选取 3 月 17 日—4 月 2 日之间的水分与水势数据作水分特征曲线。图 10a 所示为 0~20 cm 处的土壤剖面水分特征曲线, 表层土壤水分的消耗除了冬小麦根系水分的吸收外, 还有土壤水分的蒸发。图 10b 所示为 25~45 cm 处的土壤剖面水分特征曲线, 该层为返青期冬小麦根系水分吸收的主要区域。由于表层土壤容重小于中间层土壤容重, 所以在相同的土壤基质势下, 表层的土壤体积含水率要小于中间层的土壤体积含水率。图 10c 所示为 50~60 cm 处的土壤剖面水分特征曲线, 该层冬小麦根系较少, 对土壤水分的吸收不太明显, 所以该层土壤水分特征曲线整体呈现体积含水率较高、基质势较小的特点。

综上所述, 农田原位测定试验结果表明, 本文研制的农田土壤剖面水分特征曲线原位测量系统不仅可以自动准确地原位监测冬小麦根区土壤剖面体积含水率和基质势的动态变化, 而且能够实现土壤剖面水分特征曲线

的原位测定, 对于农田水分管理和冬小麦生长调控具有重要意义。

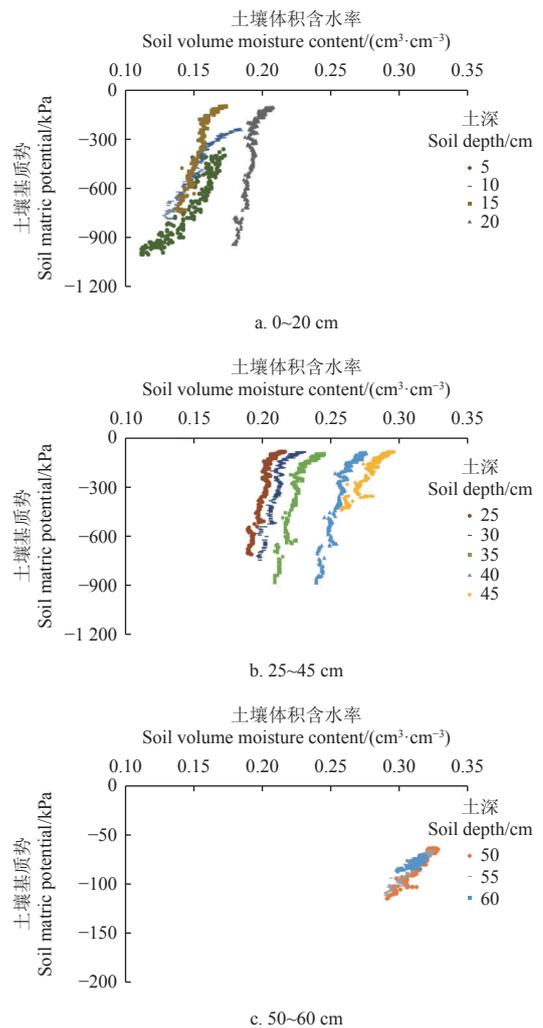


图10 小麦根区土壤剖面水分特征曲线

Fig.10 Water characteristic curve of soil profile in wheat root zone

4 结论

本文研制了一种基于频域介电法的农田土壤剖面水分特征曲线原位测定系统。该系统含水率和基质势标定曲线的决定系数分别为 0.991 和 0.989, 在测量范围内具有较好的一致性。采用 2 个相同的传感器探头实现了对土壤剖面含水率和基质势的原位测量, 较传统多探头测量方法提高了测量精度且可原位多深度测量。系统的整体功耗较低, 通过太阳能电池板进行供电可以实现野外长期监测。系统整体成本较国外同类型传感器降低 80%。安装系统时只需使用小孔径钻头 (体积含水率测量管直径 25 mm、基质势测量管直径 85 mm) 在待测土壤中钻孔安装测量管即可。可根据实际测量需求, 对系统测量总深度、传感器探头测量间隔以及测量周期等进行灵活修改。系列试验及野外观测结果表明: 该系统能够原位获取农田环境下土壤剖面水分特征曲线, 为原位自动观测作物根区土壤水分变化、持水能力和指导智能节水灌溉提供了重要依据和技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] BRDONI M, BITTELLI M, VALENTINO R, et al. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 283-305.
- [2] 王愿斌, 王佳铭, 樊媛媛, 等. 土壤水分特征曲线模型模拟性能评价[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1448-1455.
WANG Yuanbin, WANG Jiaming, FAN Yuanyuan, et al. Performance evaluation of 12 models describing the soil water retention characteristics[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1448-1455. (in Chinese with English abstract)
- [3] 汪时机, 曹俊嘉, 李贤, 等. 砂质黏性紫色土粒组缺失对降低持水特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 134-143.
WANG Shiji, CAO Junjia, LI Xian, et al. Effects of grain group absence of sandy clayey purple soil on the reduction of water-holding characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(24): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈瑞, 陈晓芳, 李红, 等. 间歇和连续喷灌下土壤水分运动特征 COMSOL 数值模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 237-247.
CHEN Rui, CHEN Xiaofang, LI Hong, et al. COMSOL numerical simulations and experiments of soil water movement under intermittent and continuous sprinkler irrigation[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(6): 237-247. (in Chinese with English abstract)
- [5] KOJIMA Y, OKUMURA K, AOKI S, et al. A four-parameter-based thermo-TDR approach to estimate water and NAPL contents of soil liquid[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116263.
- [6] IYAMA I. Differences between field-monitored and laboratory-measured soil moisture characteristics[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(5/6): 416-422.
- [7] 郭拿拿, 黄明斌. 不同类型重构土壤水分运移特征[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(3): 94-102.
GUO Nana, HUANG Mingbin. Water movement characteristics of different reconstructed soils[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(3): 94-102. (in Chinese with English abstract)
- [8] 任淑娟, 孙宇瑞, 任图生. 测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5): 56-58.
REN Shujuan, SUN Yurui, REN Tusheng. Design of dual-sensor for measuring soil water characteristic curve[J]. *Transactions of the Chinese Society for*, 2009, 40(5): 56-58. (in Chinese with English abstract)
- [9] 付磊, 孙宇瑞. 土壤水分剖面测量系统设计与应用性能检验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 42-46.
FU Lei, Sun Yurui. Design and applicable evaluation of instrument for determining soil moisture profile[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(6): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [10] LIU H, RAHARDJO H, SATYANAGA A, et al. Use of osmotic tensiometers in the determination of soil-water characteristic curves[J]. *Engineering Geology*, 2023, 312: 106938.
- [11] 邵长亮, 吴东丽. 土壤水分测量方法适用性综述[J]. *气象科技*, 2019, 47(1): 1-9.
SHAO Changliang, WU Dongli. Review of applicability of soil moisture measurement techniques[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [12] FU Y, HORTON R, HEITMAN J. Estimation of soil water retention curves from soil bulk electrical conductivity and water content measurements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104948.
- [13] HEDAYATI M, AHMED A, HOSSAIN M S, et al. Evaluation and comparison of in-situ soil water characteristics curve with laboratory SWCC curve[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 23: 100351.
- [14] 王黎明, 常硕, 侯海军, 等. FDR 土壤水分传感器测量重复性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(1): 231-238.
WANG Liming, CHANG Shuo, HOU Haijun, et al. Study on repeatability of FDR soil moisture sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(1): 231-238. (in Chinese with English abstract)
- [15] MANE S, DAS N, SINGH G, et al. Advancements in dielectric soil moisture sensor Calibration: A comprehensive review of methods and techniques[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 218: 108686.
- [16] 向阳, 于淞, 徐婧, 等. 太阳能供电的土壤剖面水分动态原位自动监测系统的研制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 150-157.
XIANG Yang, YU Song, XU Qiang, et al. Development of a novel solar-powered system for in-situ automatic monitoring of soil water dynamics in a soil profile[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(7): 150-157. (in Chinese with English abstract)
- [17] PATLE K S, PANCHAL V, SAINI R, et al. Temperature compensated and soil density calibrated soil moisture profiling sensor with multi-sensing point for in-situ agriculture application[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111703.

- [18] RAMADAN K M, OATES M J, MOLINA-MARTINEZ J M, et al. Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 148-159.
- [19] CHEN Y, TIAN Y, WANG X, et al. Miniaturized, field-deployable, continuous soil water potential sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(23): 14109-14117.
- [20] TSAI Y Z, CHENG M L, HUANG Q Z, et al. Effect of effective saturation and ceramic cup properties on The response time of tensiometers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124445.
- [21] 林昱槟, 程强, 向梓薇, 等. 土壤水分-基质势-温度复合传感器研制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 35-43.
LIN Yubin, CHENG Qiang, XIANG Ziwei, et al. Development of a composite sensor for the soil moisture, matric potential and temperature synchronous measurement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(6): 35-43. (in Chinese with English abstract)
- [22] WHALLEY W R, CLARK L J, TAKE W A, et al. A porous - matrix sensor to measure the matric potential of soil water in the field[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 18-25.
- [23] HAMDANY A H, SHEN Y, SATYANAGA A, et al. Field instrumentation for real-time measurement of soil-water characteristic curve[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(4): 586-596.
- [24] CRESSWELL H P, LILLY A. A two-point method for determining the soil water characteristic of typical northern temperate boreal soils[J]. *Geoderma Regional*, 2015, 5: 71-76.
- [25] CHEN C, YAN X, MA Y, et al. Monitoring near-surface soil water content using an innovative perforated cylinder coaxial dielectric sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 746-754.
- [26] YU S, XU Q, CHENG X, et al. In-situ determination of soil water retention curves in heterogeneous soil profiles with a novel dielectric tube sensor for measuring soil matric potential and water content[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126829.
- [27] ALHARTHI A, LANGE J. Soil water saturation: Dielectric determination[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(4): 591-595.
- [28] SUN Y, ZHOU H, QIN Y, 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.
- [29] GASKIN G J, MILLER J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(2): 153-159.
- [30] MAMISHEV A V, SUNDARA-RAJAN K, YANG F, et al. Interdigital sensors and transducers[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(5): 808-845.
- [31] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007(8): 18-21.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, DUAN Aiwang, et al. Root distribution and water consumption on characteristics of winter wheat under different soil moisture[J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2007(8): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [32] ZEITOUN R, VANDERGEEST M, VASAVA H B, et al. In-situ estimation of soil water retention curve in silt loam and loamy sand soils at different soil depths[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 447.
- [33] YAN X, SONG X, WANG Y, et al. A pipeline robot system for monitoring soil water content distribution[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129526.
- [34] 颜小飞, 王韵博, 宋晓波, 等. 植物根系特征与根区土壤水分高通量监测管道机器人研制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 192-202.
YAN Xiaofei, WANG Yunbo, SONG Xiaobo, et al. Development of a pipeline robot for high-throughput monitoring plant root characteristics and soil moisture in root zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(6): 192-202. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马青荣, 刘荣花, 胡程达, 等. 干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J]. *气象*, 2019, 46(7): 971-981.
Ma Qingrong, LIU Ronghua, HU Chengda, et al. Effects of drought and irrigation on root system and yield of winter wheat[J]. *Meteorology*, 2019, 46(7): 971-981. (in Chinese with English abstract)

In-situ measurement method for soil profile water characteristic curve in farmland based on frequency domain reflectometry

ZHAO Yang¹, WU Xiaotong¹, YAN Xiaofei², CHENG Qiang^{1,3*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agri-cultural Water Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The soil water characteristic curve is one of the most crucial indicators in soil water dynamics and irrigation. However, the current measurement systems of soil water characteristic curves still had some challenges, such as the switching errors among multiple sensor probes, high costs, and limited fixed-points difficult in the field. In this study, an in-situ scanning system was designed to monitor the soil water at multiple depths in farmland using the frequency domain dielectric spectroscopy. The volumetric water content and matric potential data were collected from different depths. The scanning system also comprised a dielectric tube sensor module (including two sensors for the moisture and matric potential), a main control, a 4G communication, solar power, and an Alibaba Cloud monitoring module. The dielectric tubes were vertically installed in the soil to be tested. Two sensors were then utilized to scan and monitor the soil moisture and matric potential at various depths (5-60 cm, at 5 cm intervals). The data was collected to store locally on an SD card and then uploaded simultaneously into the cloud platform for remote monitoring. In system installation, the small-diameter drill bits (25 mm for the volumetric water content tube, and 85 mm for the matric potential tube) were used to bore holes for the dielectric tubes into the soil. A series of measurements were carried out in the various total depths, sensor probe intervals, and cycles. The low consumption of the system was obtained with the standby power at 0.62 W and working power at 2.4 W. Each operational cycle was about 2 min, with an hourly power consumption of 0.68 W·h. The capacity of the solar panel battery was 3×104 mAh with a rated voltage of 12 V. A long-term monitoring was realized in the field under adequate sunlight. The effective response radius of the sensors was determined to incrementally increase the soil layer height until the sensor output stabilized. The thickness of gypsum was 30 mm to measure the matric potential. The sensors were calibrated for the volumetric water content using soil samples with different water contents. A determination coefficient of 0.991 was achieved in the calibration curve. A commercial matric potential sensor (TEROS-21) was used to calibrate the soil matric potential. The determination coefficient of 0.989 was observed in the calibration curve, indicating excellent consistency within the measurement range. Field trials of the system were conducted in a demonstration field of returning green winter wheat. A total depth of 60 cm was measured with intervals and cycles of 5 cm and 1 h, respectively. The results indicate that the scanning system can accurately monitor the dynamic changes in the soil profile volumetric water content and matric potential within the root zone of winter wheat. The water characteristic curve of the soil profile showed that the water consumption in the 0-20 cm layer was attributed to both root absorption and surface soil evaporation. The main root absorption area of winter wheat in the regreening period was 25-45 cm, while the 50-60 cm layer with fewer roots maintained the higher soil water content. In-situ determination of soil profile moisture characteristic curves can be expected to assess the soil water retention capacity. The finding can also provide essential data and technical support for the soil moisture in the crop root zones during intelligent water-saving irrigation.

Keywords: soils; farmlands; sensors; water characteristic curve; profile; in-situ detection