

测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计*

任淑娟¹ 孙宇瑞¹ 任图生²

(1. 中国农业大学精细农业研究中心, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100083)

【摘要】 为了直接获取土壤水特征曲线,在一种商品化微型张力计的基础上,设计了一种同步测量土壤水吸力与容积含水率的复合传感器。将张力计中的一段金属保护套管作为天线,利用其辐射阻抗随着土壤含水率变化的规律来测量土壤容积含水率。在实验室环境下,利用3种不同质地土样(砂土、砂壤土、粘壤土)对复合传感器进行了试验,并与经典土壤水特征曲线测量方法(压力锅法结合砂箱法)获得的数据进行了比较。结果表明,复合传感器在3种土壤样品上获得的水分特征曲线的均方根误差均小于0.05,与标准方法所获得的结果具有较好的一致性。

关键词: 土壤 含水率 水吸力 水特征曲线 复合传感器

中图分类号: S126

文献标识码: A

Design of Dual-sensor for Measuring Soil Water Characteristic Curve

Ren Shujuan¹ Sun Yurui¹ Ren Tusheng²

(1. *Research Center for Precision Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China*

2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

Abstract

Based on a commercialized tensiometer, a dual-sensor was presented that it was able to simultaneously determine soil matric suction and volumetric water content, and therefore obtain soil water characteristic curve (SWCC) directly. Soil volumetric water content was measured by employing the metallic tube of the tensiometer as an antenna, whose radiating impedance varied as soil water content. Soil samples of three texture classes (sand, sandy-loam, and clay-loam) were tested and compared with the data from the sand box and pressure chamber methods. The results indicate that for all the three soils, the RMSE of the dual sensor was less than 0.05, the results of the dual-sensor agreed to that of classical method.

Key words Soil, Water content, Matric suction, Water characteristic curve, Dual-sensor

引言

测定土壤水特征曲线(soil water characteristic curve,简称 SWCC)通常是在同一土样上利用不同技术分别测量土壤水基质势与含水率^[1]。其测定程序不仅繁琐,而且费时费工。为了在提高测定精度的同时尽可能地简化 SWCC 的测量过程,国内外学者都曾作过针对性研究。王文焰、张建丰^[2]曾将

张力计法与 γ 射线透射法相结合,原位测定 SWCC。其中张力计用于测量土壤水基质势, γ 射线透射法用于测定土壤含水率。这种方法的缺点是 γ 射线透射仪成本较高,更主要的问题是必须确保 γ 射线使用过程的安全性。Noborio 等^[3]将 TDR (time domain reflectometry)针式电极嵌入到张力计的多孔杯中,以达到同步测量土壤容积含水率与土壤水基质势的目的。这种方法的缺陷是 TDR 测出的数

收稿日期: 2008-07-01 修回日期: 2008-07-14

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z205)

作者简介: 任淑娟,硕士生,主要从事智能传感技术研究, E-mail: sjrenyj@163.com

通讯作者: 孙宇瑞,教授,博士生导师,主要从事智能检测与信号处理研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

值并非土壤中的真实含水率,而是多孔杯材料中的含水率。此后,作为前者技术路线的改进,Carlos 等^[4]将 TDR 传感器的两根波导线以螺旋形式平行缠绕在多孔杯外壁上。由于这种改进使得波导线与土壤直接接触,真正实现了土壤含水率与基质势的同步测量。然而其传感器制作工艺复杂,且成本高。本文设计另一种测量土壤水分特征曲线的复合式传感器。

1 复合传感器测量原理

土壤水分复合传感器物理结构如图 1 所示,是在一个商品化微型张力计(UGT, Germany)基础上嵌入一个水分传感器。其中水分传感器的传感电极借用了一段张力计原有的铠装套管,其内径约 7.5 mm,长 3.7 mm。多孔杯从金属空心管穿过,裸露出约 3.5 mm,与土壤直接接触,用于测量水吸力。多孔杯的另一端隐藏在金属管内部,与一个预先充满蒸馏水的封闭室连接。当被测土壤处于非饱和水分状态,在蒸馏水和多孔杯裸露端与土壤之间水势差的作用下,蒸馏水通过多孔杯流入土壤,使得张力计管内封闭室出现局部真空,这种压力的微小变化(水吸力)通过压力传感器测量即可反映土壤水吸力。本文将图 1 中铠装套管视为一段天线,这是因为当一段载有高频信号的短导线若满足其长度 $l \ll \lambda$ (波长)时,可等效成一个微元辐射体,其辐射电阻为^[5]

$$R_r = k\epsilon \tag{1}$$

其中 $k = 80\pi^2(l/\lambda)^2$ (2)

式中 ϵ ——被测介质的相对介电常数
 k ——几何常数,取决于辐射微元的几何长度 l 与辐射信号

本研究中信号源激励频率为 100 MHz,即 $\lambda = 3\text{ m}$, $l = 3.7\text{ cm}$,完全满足 $l \ll \lambda$ 的约束条件。将 l

与 λ 代入式(2),可知 $k = 0.12$ 。由于含水土壤的相对介电常数在 2~81 之间变化,又可推知辐射电阻 R_r 的变化范围近似为 0.25~10 Ω 。另一方面,由 Topp 公式知,土壤容积含水率 θ_v 与 ϵ 存在着一个确定三次多项式^[6],即

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \tag{3}$$

由于辐射电阻 R_r 与土壤相对介电常数 ϵ 呈线性关系,进一步可推知: θ_v 与 R_r 也同为三次多项式的单值关系。因此,通过测量微元辐射体的辐射电阻 R_r ,可间接获得土壤容积含水率。

2 试验材料与方法

2.1 土样选取与制备

为了考察新型复合传感器对不同质地土样的实际应用效果,在实验室环境下利用 3 种典型土样进行了试验。按照美国农业部颁布的土壤质地分类标准,土样分别属于砂土(砂粒 91.9%、粉粒与粘粒 8.1%)、砂壤土(砂粒 71%、粉粒 19%、粘粒 10%)与粘壤土(砂粒 21.5%、粉粒 48%、粘粒 30.5%)。土样制备过程是:首先在烘箱内干燥(105℃)24 h,碾碎,过 2 mm 筛;再将样品按一定容积密度(砂土 1.43 g/cm³,砂壤土 1.37 g/cm³,粘壤土 0.96 g/cm³)装入一 PVC 容器中(内径 16 cm,高 8 cm);在 3 种样品中分别加水直至饱和,此时土壤水吸力理论上为零;此后在容器顶部覆盖塑料薄膜密封 48h,使容器内土壤与水分达到充分平衡。

2.2 试验方法

土壤吸水过程与脱水过程得到的土壤水分特征曲线并非重合,两者间有一回滞^[7],即在同一水吸力条件下,脱水过程获得的曲线明显高于吸水过程得到的曲线。由于本研究主要目的是检验这种新型复合传感器同步获取土壤水特征曲线的可行性,而不是分析土壤水特征曲线存在回滞的复杂客观原因,故只结合脱水过程对土样分别进行试验。

试验开始之前将复合传感器中的张力计内部用注射器注入去气水,注水结束时确保管内无气泡,然后放置 24 h,让多孔杯内水分运移达到充分平衡。试验开始后揭去容器顶部覆盖的塑料薄膜。土样在自然风干过程中,其内部含水率与水吸力都会随时间缓慢变化,因此每隔 12 h 对土壤含水率与水吸力进行一次测量。当土壤水吸力增加到 80 kPa 时,即张力计的测量上限时,采集数据过程结束。为了对复合传感器获得的数据进行比对,同时利用经典的土壤水分特征曲线测定方法(砂箱法结合压力锅法)测定土样 SWCC。其中砂箱法用来测量小于 10 kPa

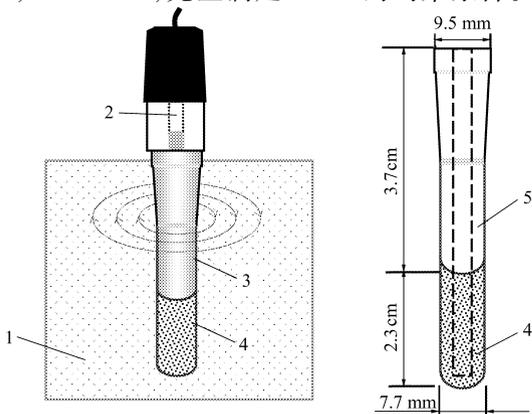


图 1 复合传感器物理结构示意图

Fig.1 Schematic view of the dual-sensor

- 1. 土壤 2. 压力传感器 3. 铠装套管水分电极 4. 多孔杯
- 5. 水分电极

范围内给定水吸力下的土壤含水率,压力锅法则测量 10~80 kPa 范围内给定水吸力下的土壤含水率。

2.3 复合传感器的标定

对于复合传感器中的张力计标定,选用了一款带有压力表(0~100 kPa)的手动真空泵(P1-5201,见图2)。首先在复合传感器管内注满去气水,再使多孔杯部分与手持式真空泵的进气口密封连接。根据每次手动抽取不同压力数值(由图示压力表读出)与张力计对应的响应输出信号进行换算。

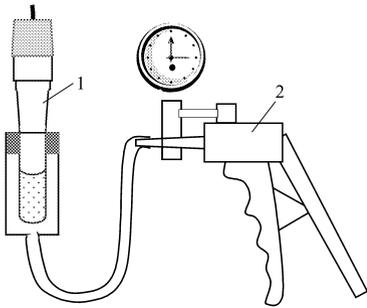


图2 张力计标定示意图

Fig.2 Scheme of calibrating tensiometer

1.复合传感器 2.手动真空泵

对水分传感器部分的标定,试验过程中采用称量法。由于容器的容积、干燥样本质量和容积密度均为已知,只要用称量法测出失去的水分,即可换算出容积含水率与水分传感器输出信号之间的对应关系。

3 试验结果

3.1 张力计标定结果

图3给出了张力计输出电压 U_ψ 与土壤水吸力 ψ 的标定关系。由此可见两者间满足线性关系,其决定系数 $R^2 = 0.98$ 。

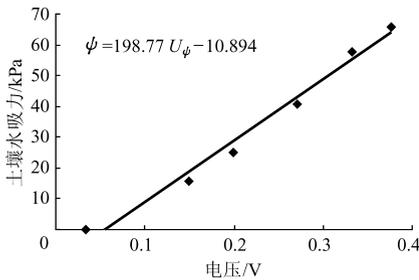


图3 土壤水吸力标定结果

Fig.3 Calibration results of soil matric suction against tensiometer output

3.2 水分传感器标定结果

对于3种试验土样,容积含水率 θ_v 与传感器输出 U_θ 的标定结果见图4。由图可知,不同土壤质地对水分传感器输出的影响明显,因而根据不同质地土样分别进行标定是必要的。用二阶多项式拟合图4中 θ_v 和电压信号 U_θ 间相关性: $\theta_v = a + bU_\theta +$

cU_θ^2 ,拟合曲线的决定系数 R^2 介于 0.87~0.95 之间,具体拟合参数与 R^2 数值如表1所示。

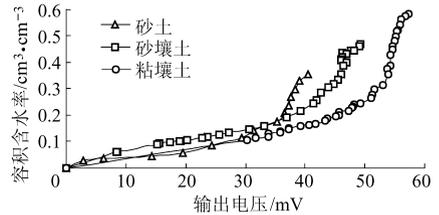


图4 含水率标定结果

Fig.4 Calibration results of soil water content against sensor output

表1 3种土样含水率拟合参数

Tab.1 Fitted parameters of water content in terms of three soils

样本类型	拟合参数			R^2
	a	b	c	
砂土	0.037	-5.933	317.61	0.94
砂壤土	0.069	-4.108	235.14	0.95
粘壤土	0.046	-9.504	303.85	0.87

3.3 土壤水特征曲线

图5是复合传感器与传统测量方法获得的土壤水特征曲线结果比较。方法1:复合传感器测量结果;方法2:砂箱法结合压力锅法测量结果。可以看出,2种试验方法得到的结果是接近的,尤其是对砂土和砂壤土,复合传感器测量结果与经典法测量结果相当吻合。对于粘壤土,当水吸力 $\psi > 30$ kPa 之后,误差开始逐渐增大。依据 Van Genuchten 方程,得到了与传统方法中含水率对应的复合传感器的水吸力,并以传统方法的测量结果为实际值,计算了复合传感器在3种土样上的均方根误差(RMSE)。结果表明,砂土、砂壤土和粘壤土的 RMSE 分别为 0.014 4、0.027 6 和 0.038 7,表明复合传感器具有较高的精度。然而,在水吸力 $\psi > 30$ kPa 时,粘壤土的 RMSE 达到 0.043 8。其原因可能是粘壤土在脱水过程中因收缩不一致出现局部开裂,从而导致传感器水分电极与土样不能很好地物理接触,随着水分减少,气隙逐渐加大,引起较为显著的测量误差。

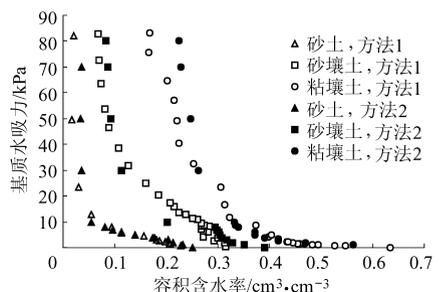


图5 2种方法、3种土样获得的土壤水特征曲线

Fig.5 SWCC of three soil samples using two methods

- 4 王俊丽, 扶雄, 黄强, 等. 淀粉基木板胶粘剂的研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2006, 15(1): 45~48.
Wang Junli, Fu Xiong, Huang Qiang, et al. Research progress of starch-based adhesives used in wood[J]. China Adhesives, 2006, 15(1): 45~48. (in Chinese)
- 5 张燕萍. 变性淀粉制造与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- 6 Panthapulakkal S, Zereshkian A, Sain M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(2): 265~272.
- 7 Wang D H, Sun X S. Low density particleboard from wheat straw and corn pith[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15(1): 43~50.
- 8 王琪, 史宇亮, 李济宁, 等. 玉米秸秆板加工工艺优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 199~201.
Wang Qi, Shi Yuliang, Li Jining, et al. Research on manufacturing process optimization for corn straw boards [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 199~201. (in Chinese)
- 9 高德, 刘壮, 孙智慧. 秸秆纤维 EPS 缓冲包装材料性能的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 201~204.
Gao De, Liu Zhuang, Sun Zhihui. Study on the properties of cushioning package material made of corn straw and EPS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 201~204. (in Chinese)
- 10 GB/T 2677.2—1993 造纸原料水分的测定[S].
GB/T 2677.2—1993 Fibrous raw material determination of moisture content[S]. (in Chinese)
- 11 GB/T 3356—1999 单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].
GB/T 3356—1999 Test method for flexural properties of unidirectional fiber reinforced plastics[S]. (in Chinese)

(上接第 58 页)

4 结束语

设计了一种用于测量 SWCC 的复合传感器。

实验室环境下, 在 3 种土样上的试验结果表明, 该复合传感器能够同步测量土壤水基质势与容积含水率, 可直接用于测定低吸力下的土壤水特征曲线, 在复杂农田环境下具有较好应用前景。

参 考 文 献

- 1 Rassam D W, Williams D J. A dynamic method for determining the soil water characteristic curve for coarse-grained soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(1): 67~71.
- 2 王文焰, 张建丰. 动力水文试验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- 3 Noborio K, Horton R, Tan C S. Time domain reflectometry probe for simultaneous measurement of soil matric potential and water content[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1999, 63(6): 1 500~1 505.
- 4 Carlos M P Vaz, Hopmans Jan W, Alvaro Macedo, et al. Soil water retention measurements using a combined tensiometer-coiled time domain reflectometry probe[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 2002, 66(6): 1 752~1 759.
- 5 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
Sun Yurui. Study on the measuring theory & method of dielectric characteristics for unsaturated soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 6 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resour. Res., 1980, 16(3): 574~582.
- 7 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 8 程强, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 牧场土壤含水率与坚实度空间变异与相关性分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 103~107, 89.
Cheng Qiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Determining spatial variability of water content and hardness in pastureland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 103~107, 89. (in Chinese)