

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.038

基于水平尺度扩展的土壤水分介电传感技术*

周海洋¹ 孙宇瑞¹ P. Schulze Lammers² 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: 设计了一种水平放置管式结构的介电水分传感器测量系统, 通过水平往复移动扫描, 测量一定深度下水平剖面的土壤水分。水分传感器的测量原理为频域(FD)外缘场阻抗法, 该系统实现了土壤水平剖面含水率的线扫描测量, 其最大扫描长度为380 cm。为了检验该测量系统的技术性能与可应用性, 结合农田滴灌试验给出了2个点源激励下土壤入渗的应用测试案例。试验结果显示了不同质地土壤的入渗差异并记录了点源激励下土壤入渗过程的时间、空间三维数据。

关键词: 土壤 水分传感器 介电原理 水平尺度扩展 线扫描

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0261-05

Dielectric Soil Moisture Sensing Technique Based on Horizontal Scale Expansion

Zhou Haiyang¹ Sun Yurui¹ P. Schulze Lammers² Shan Guilin¹ Cheng Qiang¹ Wen Boying¹

(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: To date diverse soil moisture sensors have been commercially available but all of these are at point-scales of centimeters-to-decimeters with limited volume of sensitivity (VOS). In many cases, the spatial variability of soil moisture distribution can be considerably larger than the VOS. A novel motorized dielectric PVC-tube sensor prototype was presented for horizontally scanning soil moisture content (maximum scanning length 380 cm). The sensing probe was cylindrical and thus can be mobilized through the PVC tube which was horizontally embedded at a certain depth of soil layer. In order to prove its technical feasibility, two case applications associated with drip emitter tests were presented as well. The experimental results demonstrated that the applications were potential to support the model validation for simulating water migration, monitor soil water variation in root-zone accompanying plant growth, provide one-dimension data for precision irrigation and evaluate the effectiveness of irrigation equipment.

Key words: Soil Moisture sensor Dielectric principle Horizontal scale expansion Linear scan

引言

在农业节水装备技术发展需求与精细农业技术实践动力的推动下, 层出不穷的科技创新不仅显著提升了土壤水分传感器的测量精度, 同时还加速了传感器的商业化进程与工程应用。然而, 无论是基

于介电原理的时域传感技术(Time domain reflectometry, TDR)^[1-3]、频域传感技术(Frequency domain, FD)^[4-8], 还是基于土水势测量的土壤张力计^[9-10], 都是对土壤水在某个确定位置的点测量^[11]。大量前人研究结果表明, 点测量的影响空间局限在立方分米尺度上^[12-13]。事实上, 土壤水的复

收稿日期: 2014-06-11 修回日期: 2014-07-18

* 国家自然科学基金资助项目(31171458)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110008110046)

作者简介: 周海洋, 博士生, 主要从事土壤水分传感技术研究, E-mail: hi_ocean@163.com

通讯作者: 孙宇瑞, 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

杂性不仅因为它是时变的,而且体现在空间尺度的变异^[14-15]。后者既可能是土壤结构、地表不平整或质地差异等土壤内部原因所致^[16-20],也可能是由于外部人为因素,如耕作方式、作物栽培种类与灌溉方式等^[21-22]。相比之下,传感器点测量尺度比土壤水分空间变异尺度要小得多。为解决该矛盾,通常采用多传感器分布式测量或无线传感器网络技术^[23-25]。然而,上述方案不仅显著增加了测量系统成本,更重要的是不可避免地引入了传感器之间的互换误差,对于最优灌溉决策该误差往往是不可忽略的。为此,本文设计一种可在一定深度土壤内水平往复移动扫描的管式介电水分传感器测量系统,并给出2个滴灌与入渗的应用案例。

1 测量系统简述

测量系统总体结构如图1所示,主要包括水分传感探头、U型PVC管、收/放线机构、步进电动机、直流电动机、限位开关、数据存储、传输与系统控制单元等。

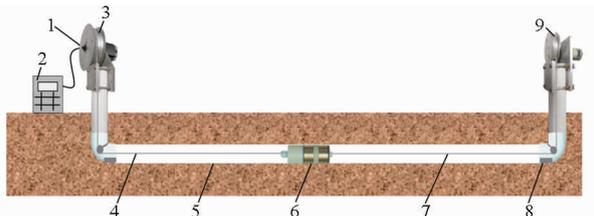


图1 测量系统总体结构图

Fig.1 Schematic of measurement system configuration

1. 导电滑环 2. 控制盒 3. 步进电动机 4. 电缆 5. PVC管
6. 传感器 7. 尼龙线 8. 限位开关 9. 直流电动机

为了实现传感器在土壤中进行测量,将1个组合的U型PVC管(其中横管长400cm,外径5cm,壁厚0.24cm,通过弯头与竖管相连)在作物种植前埋入土壤中,埋入深度可根据作物种类与根系特征决定。土壤水分传感探头按照运动部件配合精度置于横管内,在电缆和尼龙线的拖拽下通过步进电动机与直流电动机的协调运转往复移动测量。电缆和尼龙线经过固定在弯头中的导向装置分别绕在步进电动机和直流电动机的绕线轮上。其中步进电动机绕线轮内部为中空结构,在轴线上安装有导电滑环,多芯电缆借助导电滑环保证对传感探头可靠供电,并将传感探头实时采集到的土壤水分数据传送到控制器的内存单元。传感探头的实时定位通过步进电动机的驱动脉冲计数确定。此外,横管两端分别设有限位开关,用于传感探头行进限位保护和测量起始点定位。因此,该传感器的有效测量空间取决于它的敏感半径与

扫描行程长度。

2 传感器结构与测量原理

测量原理建立在土壤介电常数是土壤含水率的函数这一物理事实基础上。采用前人提出的FD传感器设计方法,其优点是允许高频传感器具有灵活的电极结构^[5-8]。为保证传感器在PVC管中实现行进测量,采用的可移动传感器为圆柱体,如图2所示,壳体为尼龙材料,具有可拆卸底盖、顶盖,整体长98mm,外径44mm。2个具有相同参数的铜质环形电极(外径44mm、内径42.5mm、宽24.5mm)间距12.5mm,由凸起壳体隔开。凸起部分略粗于尼龙主体,以避免环形电极磨损。土壤水分传感器电路板置于主体空腔内,信号线通过防水端子引出。传感器内部的高频振荡器(100MHz)通过电极释放的高频电磁波可以穿透PVC管,并在两电极间的一个电磁感应空间内(包括PVC管附近的土壤)形成外边缘电场回路。如果将2个环形电极视为一对电容极板,则可通过测量传感探头的高频阻抗实现土壤水分的间接测定。

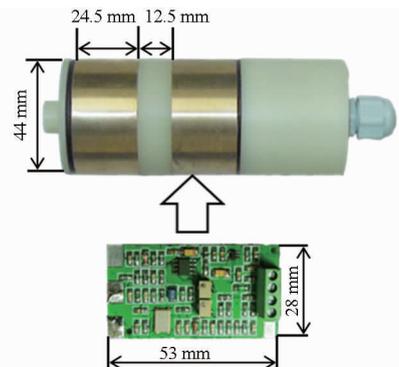


图2 传感器实物图

Fig.2 Photo of soil moisture sensor

这种管式传感器最初由Dean等提出并产业化,但他们是将PVC管垂直嵌入土壤,其目的是观测土壤纵向剖面水分^[26]。还需要特别指出的是外边缘场电容不具有平板电容所知的解析表达式,对此必须通过实验室土样标定方法来确定土壤水分与传感器阻抗输出的关系^[27-28]。传感器的阻抗输出为

$$Z_p(\varepsilon) = \frac{\bar{U}_b}{U_a - U_b} Z_0 \quad (1)$$

式中 ε ——含水土壤的介电常数

Z_0 ——平衡阻抗

\bar{U}_a 、 \bar{U}_b ——检波电路的输出电压

由于 $\varepsilon = \varepsilon_r(f) - j\varepsilon_i(f)$ 是一个复合变量,根据诸多早期研究只有当 f 足够大时(大于30MHz)才能忽略虚部(ε_i)。

3 测量与控制单元

测量与控制单元框图如图 3 所示,包括土壤水分传感器电路和信号模数转换、数据传输、存储和系统控制等环节。系统以 MSP430F149 型单片机为处理核心,时钟定时唤醒单片机系统进行测量工作。电动机驱动模块在单片机控制下通过 PWM 脉冲和其他控制信息对步进电动机和直流电动机进行驱动和控制。系统运行时,控制步进电动机转速,使传感探头以 5 cm 步距行进,步间停顿 0.5 s,其间 A/D 模块对传感器信号进行采样与数字化转换。测量数据连续采集 10 次取算术平均后转存到外部 Flash 模块,同时存入 Flash 模块的信息还包括传感器位置信息和时间信息,其中位置信息通过记录步进电动机驱动脉冲数获得,时间信息通过读取外部时钟获得。此过程中直流电动机在步进电动机的拉力下被动旋转释放尼龙线,由于直流电动机的减速齿轮组具有阻尼作用,所以尼龙线和电缆一直处于绷紧状态。在传感器探头行进了 380 cm 或 $380/5 = 76$ 个步距后,在控制器的作用下直流电动机主动运转,同时步进电动机受反转控制,最终将传感探头送回到测量起始位置,等待下一次测量启动。对于 400 cm 长的管路,一个测量过程大约需要 200 s。

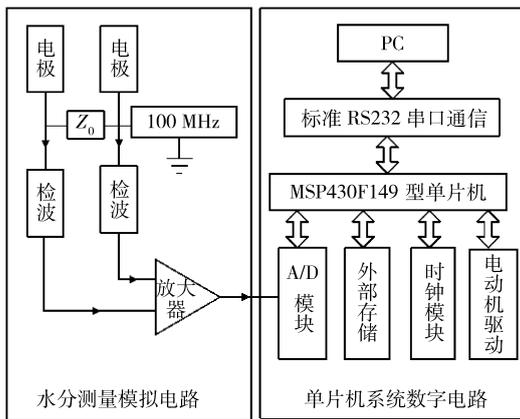


图 3 测量与控制单元框图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement and control system

4 传感器标定结果

选用 2 种典型农田土壤。根据美国农业部分类标准分别属于砂土与粉壤土,其盐分含量(电导率)分别为 0.51、1.33 mS/m,质地构成如表 1 所示。

表 1 试验土壤质地构成

Tab. 1 Soil textural composition of experiment %

	砂粒	粉粒	粘粒
砂土	91.9	8.1	0
粉壤土	11	71	18

标定过程首先将农田取回的土样过 2 mm 孔径筛,再将其置于干燥箱内干燥(105℃,24 h)。水分与干燥土样配比时,砂土和粉壤土分别按 5% 和 2.5% 的质量含水率递增直至土壤饱和,再将配水后土样按干容重 1.3 g/cm^3 装入容器(直径 20 cm、高 20 cm),密封静置 48 h 使土壤内部水分达到充分均匀分布。标定过程在室温(25℃)下进行。标定时对每个含水率的土样测量 6 次,取算术平均,最后对测量数据进行二次曲线的最小二乘拟合,所得标定曲线如图 4 所示,2 种土样的土壤体积含水率(Volumetric soil moisture content)与传感器输出电压均呈线性关系,决定系数 R^2 分别为 0.9694 与 0.9807。

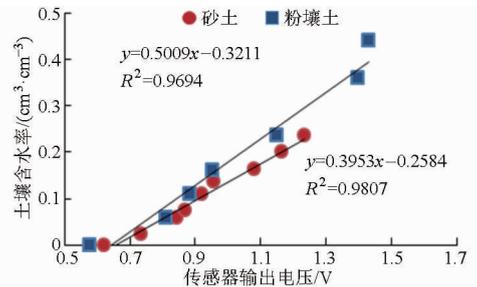


图 4 土壤水分传感器标定曲线

Fig. 4 Calibration curves of soil moisture sensor

5 试验

5.1 2 种质地土壤的滴灌对比试验

试验前在地面挖开一个长 450 cm、宽 50 cm、深 40 cm 的土槽,将测量系统的 PVC 管水平放入槽底,再将事先过筛并干燥的土样按干容重为 1.43 g/cm^3 填入土槽中(图 5)。2 个滴头间距为 70 cm,当管内水压控制在 0.1 MPa 时,滴头的出水速率约为 1.1 L/h。

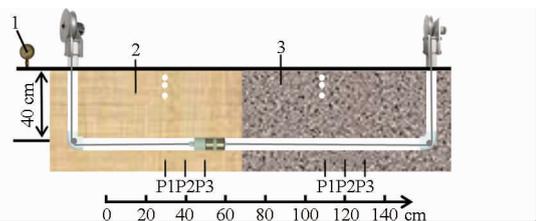


图 5 2 种质地土壤滴灌试验

Fig. 5 Drip irrigation experiment of two soil textures

1. 水压表 2. 砂土 3. 粉壤土

图 6a 与图 6b 所示结果分别对应为砂土和粉壤土在 3 个参考位置的滴灌时间序列。其中 P1 表示与滴头垂直的测量区,P2、P3 与 P1 水平距离分别为 10 cm 和 20 cm(图 5)。测量结果表明传感器在 3 个测量点对滴灌土壤含水率的响应曲线近似呈指数关系,即开始的一段时间传感器输出呈快速变化,经过一个拐点后变化速率显著下降,表明土壤已经接近饱和。因为本测量系统没有传感器互换误差,获得

的3条曲线非常相似,不同之处只是拐点出现的时间差异。鉴于该拐点信息对研究土壤水在水平方向入渗的重要性,可依据双切线法确定拐点出现的时间。图7给出了2种土壤入渗试验获得的曲线拐点出现时间与对应位置的统计关系。结果表明:砂土的土壤入渗率显著高于粉壤土,但其土壤持水性能

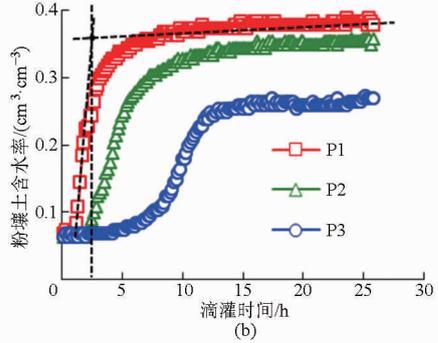
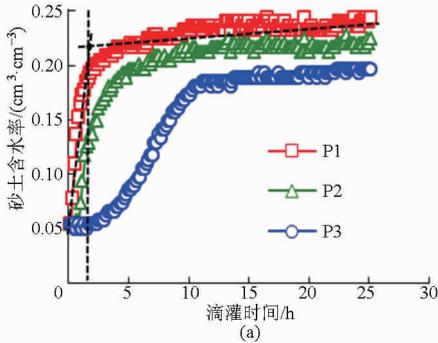


图6 参考位置水分变化图

Fig.6 Variations of soil moisture content in reference positions

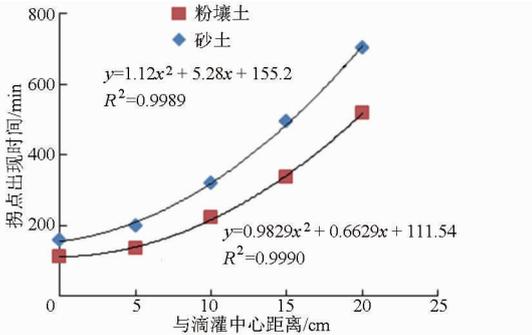


图7 曲线拐点出现时间与对应位置统计关系

Fig.7 Statistical graph of inflection point time and corresponding position

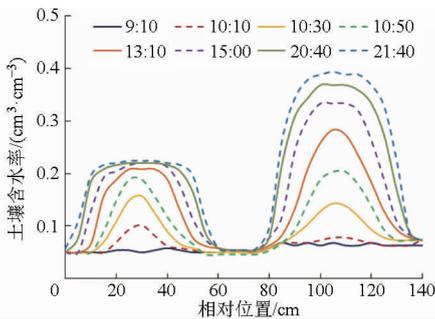


图8 不同土质滴灌试验多时间点线扫描结果

Fig.8 Multi-time linear scanning results of drip irrigation experiment in different soil textures

5.2 曲面坡多点滴灌试验与结果

试验方案如图9所示,滴灌管铺设在一个扇形曲面上,该曲面弧度对称,为两端低、中间高。整个曲面上分布7个滴管,其间距为50 cm。土壤质地为粉壤土,土壤干容重、水压和出水速率均与5.1节试验相同。

图10为试验获得的三维(3D)数据结果,其中x轴对应测量位置,y轴对应入渗时间,z轴为根据图4标定结果将传感器输出换算出的土壤含水率。结果

明显低于粉壤土。图8为线扫描位置连续变化、时间为间隔变化的2簇曲线。由图8可知,砂土的持水率约为0.23 cm³/cm³,粉壤土的持水率为0.35 cm³/cm³。此外,图8还表明砂土由于入渗率高、持水率低,滴灌入渗到达稳态的时间明显短于粉壤土。

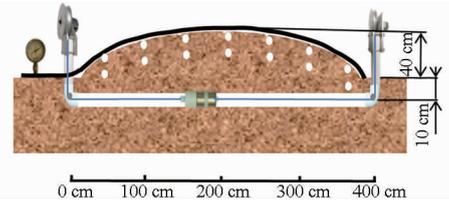


图9 曲面坡多点滴灌试验示意图

Fig.9 Schematic of curved surface drip irrigation experiment

表明,球面两端的滴灌入渗锋首先进入传感器埋设深度的灵敏区(约0.5 h),顶点滴灌的入渗锋最后到达(约8 h)。由于土壤地表为扇形曲面且具有几何对称性,所以获得的3D数据结果与预想一致,也是对称的。显然,该3D测量结果表达了点源激励下的土壤水分空间分布的动态变化,这也是土壤运动的达西定律(Darcy-law)力求刻画的。

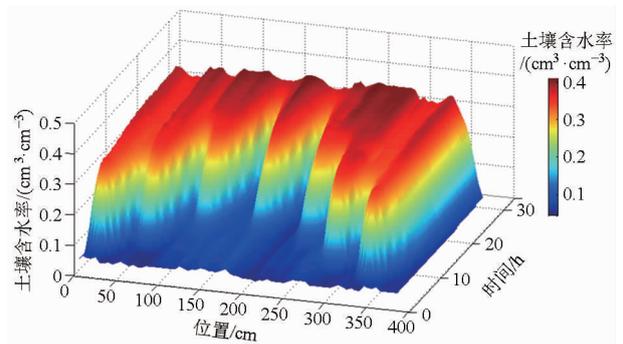


图10 曲面滴灌试验结果

Fig.10 Experimental results of curved surface drip irrigation

6 结束语

给出了基于水平线尺度扩展的管式介电水分传感器测量技术与应用测试结果。它表明将土壤介电水分传感器置于横管中以实现点尺度向线尺度扩展

的设计方案是可行的。本文提出的技术方案和测量系统可以完成水平线尺度下土壤水分的空间连续测量,相比现有的只能单点或多点测量的传感器在技

术上有显著进步。测量尺度的扩展将为复杂农田环境水分入渗模型研究、作物生长过程中根区水分变化及灌溉决策等研究提供可靠的技术支持与基础数据。

参 考 文 献

- 1 Topp G C, Davis J L, Ann A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resource*, 1980, 16(3): 574 - 582.
- 2 Zegelin S J, White I, Jenkins D R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry [J]. *Water Resource*, 1989, 25(11): 2367 - 2376.
- 3 Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(3): 213 - 237.
- 4 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(1): 153 - 160.
- 5 Sun Y R, Ma D K, Lin J H, et al. An improved frequency domain technique for determining soil water content [J]. *Pedosphere*, 2005, 15(6): 805 - 812.
- 6 Sheng W Y, Sun Y R, 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.
- 7 曾庆猛, 马道坤, 林剑辉, 等. 面向车载式测量的土壤含水量与电导率复合传感器设计 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 163 - 167.
- 8 Zeng Q M, Ma D K, Lin J H, et al. On-the-go measurement oriented combined sensor design for soil moisture content and electrical conductivity [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 163 - 167. (in Chinese)
- 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.
- 10 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.
- 11 Essert S, Hopmans J W. Combined tensiometer-solution sampling probe [J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 45(3 - 4): 299 - 309.
- 12 Weiler K W, Steenhuis T S, Boll J, et al. Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1237 - 1239.
- 13 Fernández-Gálvez J, Simmonds L P. Monitoring and modeling the three-dimensional flow of water under drip irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(3): 197 - 208.
- 14 Weihermüller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(3 - 4): 205 - 216.
- 15 Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 358 - 389.
- 16 Sun Y R, Sheng W Y, Cheng Q, et al. A novel method to determine the volume of sensitivity for soil moisture sensors [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 1987 - 1991.
- 17 Kachanoski R G, Gregorich E G, Van Wesenbeeck I J. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 68(4): 715 - 722.
- 18 Triantafyllis J, Lesch S M. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1 - 3): 203 - 237.
- 19 Mertens F M, Paetzold S, Welp G. Spatial heterogeneity of soil properties and its mapping with apparent electrical conductivity [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(2): 146 - 154.
- 20 Sun Y R, Druecker H, Hartung E P, et al. Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 149 - 158.
- 21 Sun Y R, Cheng Q, Lin J H, et al. Investigating soil physical properties and yield response in a grassland field using a dual-sensor penetrometer and EM38 [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(2): 209 - 216.
- 22 Cheng Q, Sun Y R, Lin J H, et al. Applying two-dimensional Fourier transform to investigate soil surface porosity by laser-scanned data [J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 183 - 189.
- 23 Subbaiah R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation [J]. *Irrigation and Science*, 2013, 31(3): 225 - 258.
- 24 Cano A, Añón J L, Reigl C, et al. Automated soil moisture monitoring wireless sensor network for long-term cal/val applications [J]. *Wireless Sensor Network*, 2012, 4(8): 202 - 209.
- 25 Bogaen H R, Huisman J A, Oberdo-rster C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(1 - 2): 32 - 42.
- 26 Zhang R B, Guo J J, Zhang L, et al. A calibration method of detecting soil water content based on the information-sharing in wireless sensor network [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(2): 162 - 168.
- 27 Dean T J, Bell J P, Baty A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 93(1 - 2): 67 - 78.
- 28 Sun Y R, Schulze Lammers P, Ma D K. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(6): 745 - 751.
- 29 Thomas A M. In situ measurement of moisture in soil and similar substances by "fringe" capacitance [J]. *Journal of Science Instruments*, 1996, 43(1): 21 - 27.