

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.033

# 面向车载式测量的土壤含水量与电导率复合传感器设计\*

曾庆猛<sup>1</sup> 马道坤<sup>1</sup> 林剑辉<sup>2</sup> Schulze Lammers P<sup>3</sup> 孙宇瑞<sup>1</sup>

(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. 波恩大学农业工程研究所, 波恩 53115, 德国)

**【摘要】** 基于介电方法设计了符合车载测量要求的四环电极结构土壤含水量与电导率复合传感器。分别在 NaCl 电导率溶液、含水土样和混合土样中进行标定试验分析, 结果证实了复合传感器的可行性。通过分析混合土样中含水量和电导率与传感器输出信号之间的相关性, 分别建立土壤含水量与电导率的统计预测模型。

**关键词:** 复合传感器 土壤含水量 土壤电导率 标定

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0163-05

## On-the-go Measurement Oriented Combined Sensor Design for Soil Moisture Content and Electrical Conductivity

Zeng Qingmeng<sup>1</sup> Ma Daokun<sup>1</sup> Lin Jianhui<sup>2</sup> Schulze Lammers P<sup>3</sup> Sun Yurui<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electronic Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

### Abstract

A combined sensor for soil moisture content (MC) and electrical conductivity (EC) with 4-ring electrode was developed, based on the dielectric theory. The calibration tests with NaCl solution, moist soil sampler and mixed soil sampler were conducted. The results demonstrated that the combined sensor could response the variation of soil MC and EC. By means of analyzing the outputs of 4-ring sensor in mixed soil sampler, statistical prediction models for soil MC and EC were established, respectively.

**Key words** Combined sensor, Soil moisture content, Soil electrical conductivity, Calibration

### 引言

土壤含水量与电导率是影响作物生长发育的重要物理参数<sup>[1-2]</sup>, 水是土壤的重要组成部分, 土壤中各种营养物质都是通过水而被植物根系吸收, 土壤中有机、无机物质的积累、转化和运移, 均需水的参与。土壤电导率是反映土壤盐分等属性的综合物理参数, 土壤中盐分过高, 将导致植物吸水困难, 造成生理干旱, 作物逐渐枯萎死亡, 同时使植物吸收营养元素失调, 干扰正常的新陈代谢活动。

在土壤含水量与电导率复合测量研究中, Dalton 等首次将 TDR (time domain reflectometer) 用于土壤含水量与电导率的复合测量<sup>[3]</sup>, 此后 Topp、Zegelin 等学者不断完善该复合测量方法<sup>[4-5]</sup>。Hilhorst 基于 FD (frequency domain) 方法, 采用同步检波技术测量固定频率下探头端口阻抗实部与虚部, 实现土壤含水量与电导率复合测量<sup>[6]</sup>。Valente 等基于热脉冲和电流-电压四端方法, 设计了土壤含水量和电导率复合传感器<sup>[7]</sup>。

孙宇瑞等基于 FD 水分测量方法, 将环式电极

收稿日期: 2009-11-06 修回日期: 2010-01-18

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A301)和中德“精细农业中的先进传感科学与技术”合作小组专项资助(GZ494)

作者简介: 曾庆猛, 博士生, 主要从事精细农业信息采集与系统集成研究, E-mail: zengqingmeng@yahoo.com.cn

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

镶嵌在锥杆上,在车载测量中使之与土壤密切接触,试验结果表明,该结构传感器能够满足车载式土壤含水量测量要求<sup>[8-9]</sup>。

本文在环式土壤含水量与电导率测量方法的基础上,设计符合车载测量要求的四环电极结构复合传感器,在实验室环境下进行系统标定研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 传感器设计

四环复合传感器设计如图1所示,由外径为22 mm、宽度为6 mm的不锈钢电极构成,与相同宽度的PVC绝缘环相间安装在不锈钢圆锥杆上,顶部锥角为30°,电极经圆锥杆内部(直径为7 mm)的同轴传输线连接到测量电路。

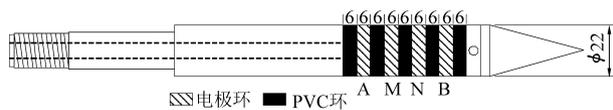


图1 四环复合传感器示意图

Fig. 1 Diagram of 4-ring combined sensor

四环传感器电极按 Wenner 组态分布,实现土壤含水量与电导率复合测量,其基本原理如图2所示。在含水量测量中,内环电极 M、N 作为阻抗电极与土壤的相对介电常数存在单值关系,通过 FD 定频阻抗法(100 MHz)可实现土壤含水量测量<sup>[9]</sup>。在电导率测量中,4 个电极按照电流-电压四端法原理定义,其中外环电极 A、B 为电流激励端(140 Hz),内环电极 M、N 为电压检测端。为了降低不同频率信号之间的耦合影响,在信号检测端分别添加了高通滤波器(HPF)和低通滤波器(LPF)。传感器的含水量与电导率输出信号分别命名为  $Y_m$  (电压, V) 和  $Y_g$  (电导, mS)。

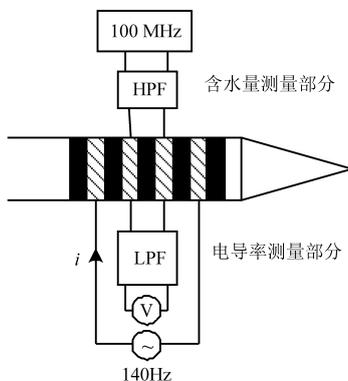


图2 四环复合传感器测量原理

Fig. 2 Measurement principle of 4-ring combined sensor

### 1.2 传感器标定室内试验

标定的目的不仅在于建立传感器输出与被测土壤属性之间的关系,更在于分析不同输出信号之间的耦合关系。复合标定试验在3类介质中进行,分

别是:①在不同 NaCl 电导率溶液中分析含水量测量对电导率的影响,同时建立  $Y_g$  与溶液电导率之间的标定方程。②在不同含水土样中建立  $Y_m$  与土壤含水量的标定方程。③在不同含水量与溶液电导率混合土样中建立传感器统计预测模型。

上述标定过程分别为:① 25°C 室温条件下,在去离子水中添加不同质量的氯化钠(NaCl),由电导率仪(DDS-307型,上海精密仪器公司)记录电导率数值,在 20 mS/cm 范围内配置了 24 个溶液样本。通过改变传感器电极的连接方式分析含水量对电导率测量的影响,当内环电极连接到含水量测量电路时为复合传感器,而断开连接时则变成了单一的电导率传感器,分别记录测量结果。每次试验重复 20 次,结果取平均值。② 在质量为 4 860 g 的干土(砂粒、粉粒和粘粒质量分数分别为 17%、67% 和 16%) 中添加不同质量的去离子水,混合均匀后按照容积密度为 1.35 g/cm<sup>3</sup> 装入体积为 3 600 cm<sup>3</sup> 容器中,制备成容积含水量为 0~0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>、按 0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 递增的 10 个标准土样。试验在传感器为复合测量条件下,每次试验重复 3 次,结果取平均值。③ 采用与不同含水土样类似的制备方法,将电导率分别为 0、0.5、1、3、5 和 8 mS/cm 的 NaCl 溶液代替去离子水,制备成 10 个含水量水平,6 个电导率水平的混合土样,试验步骤与②相同。

## 2 结果与讨论

### 2.1 溶液中标定结果

不同电导率 NaCl 溶液中的传感器电导输出如图3所示,可以看出,两种连接方式下的电导输出  $Y_g$  趋势基本一致,两者之间存在一定的偏差,这是因为连接了含水量测量电路,相当于在电导率测量电路上并联了一个阻抗负载。进一步分析可知,两种连接方式下的输出信号呈线性关系,决定系数  $R^2$  高达 0.999,表明含水量测量电路对电导率测量没有根本影响。

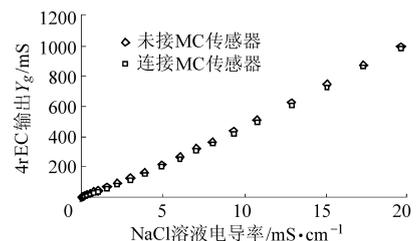


图3 两种连接方式下传感器电导输出

Fig. 3 Conductance output of sensor under two electrode connection modes

复合传感器两个输出信号在 NaCl 溶液中的输出结果  $Y_m$  和  $Y_g$  如图4所示,可以看出,  $Y_g$  与溶液电

导率之间线性拟合的决定系数  $R^2$  达到 0.996 3, 表现出高度的相关性, 由此建立电导率统计预测模型为

$$EC_a = 0.020\ 4Y_g \quad (1)$$

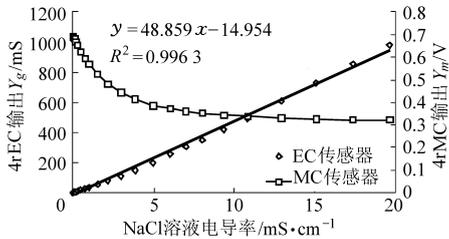


图4 复合传感器在 NaCl 溶液中的标定结果

Fig. 4 Calibration results of combined sensor in NaCl solutions

### 2.2 含水土样中标定结果

复合传感器在不同含水土样中的标定结果如图 5 所示。分别对  $Y_m$  和  $Y_g$  与含水量  $\theta$  进行二次拟合回归, 拟合决定系数  $R^2$  分别为 0.996 0 和 0.980 5, 表明传感器能够较好地响应静态土样的含水量和电导率变异。

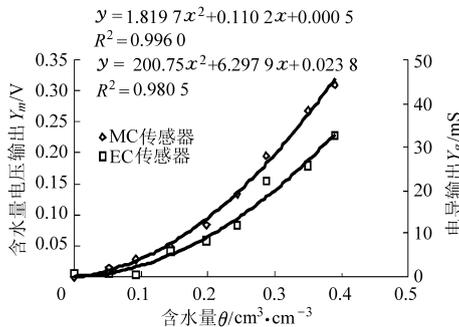


图5 复合传感器在土样中的标定结果

Fig. 5 Calibration results in soil samples

### 2.3 混合土样中标定结果

复合传感器在混合土样中不同变异水平下输出  $Y_m$  和  $Y_g$  分别如图 6、图 7 所示。图 6 中, 两个传感器输出  $Y_m$  和  $Y_g$  与含水量  $\theta$  均呈单调曲线关系, 在较低电导率水平 ( $EC \leq 1$  mS/cm) 下, 输出曲线几乎重合, 说明低电导率水平下的传感器输出主要影响因素是含水量; 当含水量大于  $0.25$   $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 电导输出  $Y_g$  曲线(图 6b)差异明显, 表明了溶液电导率的显著影响。分别对不同电导率水平下的传感器输出进行 2 次曲线拟合, 结果如表 1、2 所示, 其中  $Y_m$  和  $Y_g$  输出曲线的最小  $R^2$  分别为 0.958 和 0.983。

图 7 反映了不同含水量水平下的传感器特性, 对其进行线性拟合结果如表 3、4 所示。表 3 中在含水量为零情况下, 土样为干土, 不存在电导率变异, 因此无需对其进行回归计算。图 7a 中, 除部分水分外(如  $MC = 0.3$   $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $Y_m$  几乎为恒定值, 表明电导率对水分测量影响较小。图 7b 和表 4 均表明,

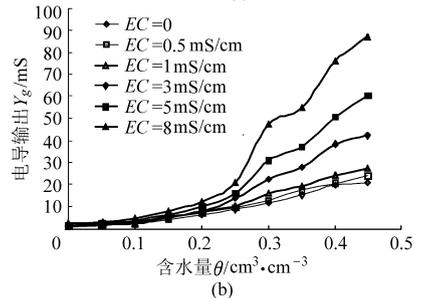
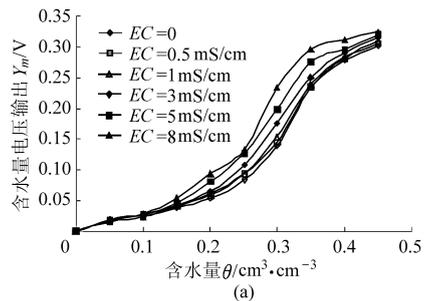


图6 复合传感器在不同溶液电导率水平下的输出结果

Fig. 6 Calibration results in different solution ECs

(a)  $Y_m$  (b)  $Y_g$

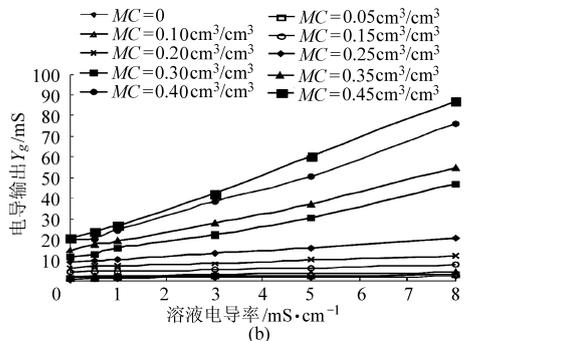
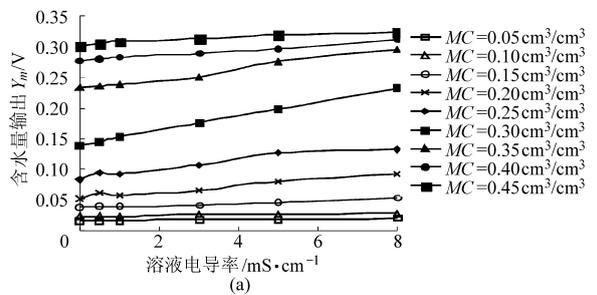


图7 复合传感器在不同含水量水平下的输出结果

Fig. 7 Calibration results in different moisture contents

(a)  $Y_m$  (b)  $Y_g$

表 1 含水量电压输出  $Y_m$  与含水量  $\theta$  二次曲线拟合系数

Tab. 1 Quadratic fit coefficients between  $Y_m$  and  $\theta$

系数	电导率/mS·cm <sup>-1</sup>					
	0	0.5	1	3	5	8
a	0.004	0.003	0.002	-0.002	-0.009	-0.014
b	-0.008	0.038	0.051	0.159	0.331	0.478
c	1.609	1.524	1.522	1.336	1.030	0.785
$R^2$	0.975	0.980	0.979	0.978	0.972	0.958

在含水量一定条件下, 电导输出  $Y_g$  与电导率呈线性

关系,与 Rhoades 模型<sup>[11]</sup>基本一致。

表2 电导输出  $Y_g$  与含水量  $\theta$  二次曲线拟合系数

Tab.2 Quadratic fit coefficients between  $Y_g$  and  $\theta$

系数	电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$					
	0	0.5	1	3	5	8
$a$	0.429	0.582	0.569	1.056	1.724	1.828
$b$	16.39	16.11	16.12	0.58	-17.09	-30.50
$c$	70.74	83.38	102.61	214.76	337.48	513.35
$R^2$	0.990	0.996	0.991	0.990	0.993	0.983

## 2.4 复合传感器统计预测模型

为了进一步描述复合传感器的水分测量特性,

表3 含水量电压输出  $Y_m$  与溶液电导率  $EC_w$  线性拟合系数

Tab.3 Linear fit coefficients between  $Y_m$  and  $EC_w$

系数	含水量/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$									
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	
$a$	0.162	0.024	0.039	0.054	0.088	0.14	0.231	0.278	0.304	
$b$	0.001	0.001	0.002	0.005	0.006	0.012	0.008	0.004	0.003	
$R^2$	0.894	0.907	0.951	0.968	0.942	0.999	0.985	0.993	0.947	

表4 电导输出  $Y_g$  与溶液电导率  $EC_w$  线性拟合系数

Tab.4 Linear fit coefficients between  $Y_g$  and  $EC_w$

系数	含水量/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$									
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
$a$	0.935	1.611	2.139	4.312	6.57	8.872	10.916	14.391	17.658	19.407
$b$	0.157	0.982	0.287	0.434	0.674	1.476	4.321	4.893	7.076	8.317
$R^2$	0.994	0.982	0.999	0.994	0.982	0.999	0.991	0.995	0.993	0.998

别为  $3.73 \times 10^{-16}$ 、 $5.73 \times 10^{-9}$ 、0.008 和 0.01,相比之下,后两个变量的显著性水平较低,这从  $d_1$  和  $e_1$  数值更接近零也反映了这一点。因此在忽略  $Y_g$  情况下,建立土壤含水量  $\theta_v$  的一元二次统计预测模型为

$$\theta_v = a_2 + b_2 Y_m + c_2 Y_m^2 \quad (3)$$

求得待定系数分别为:  $a_2 = 0.0324$ 、 $b_2 = 2.279$ 、 $c_2 = -3.426$ 、 $R^2 = 0.952$ 、 $RMSE = 0.0316 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,与式(2)中  $a_1 \sim c_1$ 、 $R^2$  及  $RMSE$  很接近。表明在忽略  $Y_g$  情况下,  $\theta_v$  预测效果依然令人满意,结果如图8所示,线性拟合方程 ( $R^2 = 0.952$ ) 与平分线 (1:1) 基本一致,对于含水量在  $0.2 \sim 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  范围预测结果分散的情况,主要原因在于电导率的影响,与图6a所示结果吻合。

对于复合传感器的电导输出,首先根据标定方程式(1)把  $Y_m$  转换成电导率  $EC_a$ ,参照 Rhoades 模型,建立电导率统计预测模型为

$$EC_{a1} = a_3 + (b_3 \theta_v + c_3 \theta_v^2) EC_w \quad (4)$$

以混合土样中标定试验两个输出  $Y_m$  和  $Y_g$  为自变量,以含水量  $\theta_v$  为因变量建立土壤含水量的二元非线性统计预测模型为

$$\theta_v = a_1 + b_1 Y_m + c_1 Y_m^2 + d_1 Y_g + e_1 Y_g^2 \quad (2)$$

式中,  $a_1 \sim e_1$  为待定系数。以均方根误差  $RMSE$  为目标函数,通过迭代算法求得最优待定系数分别为:  $a_1 = 0.0343$ 、 $b_1 = 2.775$ 、 $c_1 = -4.147$ 、 $d_1 = -0.004$ 、 $e_1 = 4.19 \times 10^{-5}$ 、 $R^2 = 0.958$ 、 $RMSE = 0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;模型显著性检验 ( $F$  检验) 的  $F$  值为 313.8,  $P$  值为  $3.72 \times 10^{-37}$ ,表明式(2)的线性关系在置信水平 (95%) 下显著成立;变量显著性检验 ( $t$  检验) 的  $t$  值分别为 11.4、-6.9、-2.8 和 2.7,对应的  $P$  值分

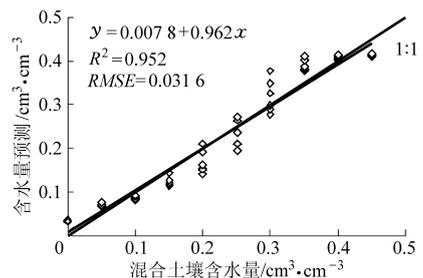


图8 含水量预测结果

Fig.8 Prediction results of MC

求得待定系数分别为:  $a_3 = 0.51$ 、 $b_3 = -0.398$ 、 $c_3 = 1.933$ 、 $RMSE = 0.12 \text{ mS}/\text{cm}$ 。

从图6b和7b可以看出,含水量  $\theta$  一定时,  $EC_a$  与  $EC_w$  呈线性关系;当  $EC_w$  一定时,  $EC_a$  与  $\theta$  呈二次曲线关系,因此在式(4)基础上建立 Rhoades 修正模型为

$$EC_{a2} = a_4 + b_4 EC_w + c_4 \theta_v + d_4 \theta_v^2 + (e_4 \theta_v + f_4 \theta_v^2) EC_w \quad (5)$$

求得待定系数分别为:  $a_4 = 0.298$ 、 $b_4 = 0.028$ 、 $c_4 =$

1.053,  $d_4 = -0.135$ ,  $e_4 = -0.49$ ,  $f_4 = 1.789$ ,  $RMSE = 0.078$  mS/cm, 可见, Rhoades 修正模型获得更高的预测精度。与标定方程式(1)相比, 预测值均匀的分布在平分线附近( $R^2 = 0.9581$ ), 特别在  $EC_a < 1$  mS/cm 范围内, 如图9所示。

### 3 结束语

基于介电方法设计了四环电极结构土壤含水量与电导率复合传感器, 在实验室环境下分别采用 NaCl 电导率溶液、含水土样和混合土样对传感器进行标定试验。结果表明, 含水量测量电路对溶液中的电导率测量没有影响, 传感器电导输出结果与溶液电导率呈线性关系; 复合传感器能够较好响应静

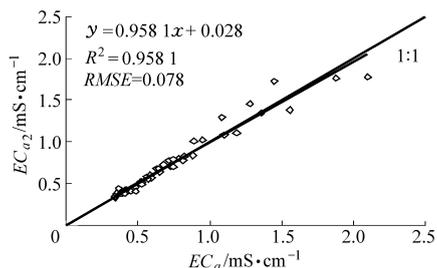


图9 Rhoades 修正模型电导率预测结果  
Fig.9 Prediction result of modified Rhoades EC model

态土样的含水量与电导率变异, 二次拟合决定系数均达 0.98 以上; 通过分析混合土样中含水量与电导率与传感器输出信号之间的相关性, 分别建立土壤含水量与电导率的非线性统计预测模型。

### 参 考 文 献

- 1 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167 ~ 173.  
Luo Xiwen, Zang Ying, Zhou Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167 ~ 173. (in Chinese)
- 2 王凤花, 张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 112 ~ 121.  
Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 112 ~ 121. (in Chinese)
- 3 Dalton F N, Herkelrath W N, Ravins D S, et al. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe [J]. Science, 1984, 224: 989 ~ 990.
- 4 Topp G C, Reynolds W D. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil [J]. Soil & Tillage Res., 1998, 47(1~2): 125 ~ 132.
- 5 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 Resour. Res., 1989, 25(11): 2367 ~ 2376.
- 6 Hilhorst M A. Dielectric characterisation of soil[D]. Wageningen: Wageningen Agriculture University, 1998.
- 7 Valente A, Morais R, Tuli A, et al. Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties water content, and electrical conductivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical 2006, 132(1): 70 ~ 77.
- 8 Sun Y, Ma D, Schulze Lammers P, et al. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(2): 209 ~ 217.
- 9 马道坤. 车载式农田土壤水分、坚实度与电导率复合测量方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
Ma Daokun. On-the-go combined measurement methods for soil water content, strength and electrical conductivity [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 10 Krishna S N, Montesano F, Dove S K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates:  $EC_2O$  and Theta probes[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2): 227 ~ 234.
- 11 Rhoades J D, Raats P A C, Prather R J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40(5): 651 ~ 655.