

一种土壤电导率实时分析仪的试验研究

李民赞, 王琦, 汪懋华

(中国农业大学 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 开发了一种适合我国较小地块应用的便携式土壤电导率实时分析仪, 室内性能试验表明, 探针在 Wenner 组态和 Schlumberger 组态条件下, 仪器输出电压与土壤电导率具有一致的变化趋势, 特别是在 Schlumberger 组态某结构下, 传感器获得了最高的测量精度。对实验结果进行了非线性回归建模, 采用的 3 个模型分别是幂函数模型、多项式模型和指数模型, 模型分析结果显示, 幂函数模型具有最优的预测结果, 模型测定系数达到 0.994。幂函数模型的常数项与传感器结构有关, 乘幂项则不随传感器结构参数变化, 而受土壤质地、土壤密度等因素的影响。模型还需要通过田间试验进一步验证。

关键词: 土壤电导率; 四端法; 模型分析; 精细农业

中图分类号: S24; TH7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0051-05

0 引言

土壤学的研究表明土壤电导率能不同程度地反映土壤中的盐分、水分、有机质含量、土壤质地结构和孔隙率等参数的大小^[1-3]。有效获取土壤的电导率值, 对于确定各种田间参数时空分布的差异有重大意义, 从而也为基于信息和知识的现代精细农业的普及推广打下基础。

土壤电导率的测量大致可分为实验室测量和现场测量 2 大类, 实验室测量首先要制备土壤浸提液, 然后利用电极法测量土壤浸提液的电导率, 利用土壤浸提液的测量值表征土壤电导率的变化^[4-7]。这种传统的实验室方法作为标准测量方法具有较高的精度, 也是评价土壤电导率高低的基准, 但测量过程繁琐, 且耗费较长时间, 实时性差, 不能满足现代精细农业要求在短时间内完成大批量测量的要求。现场测量则主要是将地球物理勘探中的方法引入到了农田土壤测量中, 主要有两种基本设计思路: 接触式和非接触式^[8,9]。非接触式土壤电导率传感器利用电磁感应现象检测土壤电导率, 接触式土壤电导率传感器则是一种电极式传感器, 虽为接触测量但却不需要取样, 基本不用扰动土体, 而且在作物生长前和生长期间都可以设法实现实时测量, 很适合现代精细农业对农田土壤信息获取的要求。

在国外, 已有车载接触式土壤电导率测量设备^[10], 但它只适于大块田地使用, 对于我国特有的不规则的小块农田不能发挥作用, 而且它只能在作物种植前测量, 在作物生长期机组无法进地, 也无法在温室、塑料大棚等设施中应用。

为此, 笔者开发了以接触式测量为基础的便携式土

壤电导率实时分析仪^[11], 本研究的目的是通过人为制备电导率不同的土壤样本, 对开发的仪器进行性能试验研究和精度分析, 优化仪器的结构参数, 建立土壤电导率的实时分析模型, 并对模型的实用性进行必要的分析。

1 实验材料和方法

1.1 电流-电压四端法的测量原理

接触法测量的基本结构之一是电流—电压四端法, 图 1 是这种方法的一种典型结构, 测试系统包括两个电流端 (J 和 K) 和两个电压端 (M 和 N), 作为测量激励信号的恒定电流经过两个电流端流入大地, 通过检测两个电压端的电势差, 就可换算出介电材料(土壤)的电导率^[12]。

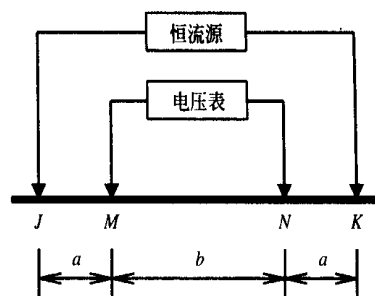


图 1 电流-电压四端法测试原理

Fig 1 Scheme of four-electrode method

对于大地这种长度与横截面积都不确定的复杂测量对象, 文献[12]给出了下述的计算公式

$$\sigma = \frac{\left(\frac{1}{d_{JM}} - \frac{1}{d_{JN}} \right) - \left(\frac{1}{d_{KM}} - \frac{1}{d_{KN}} \right)}{2\pi} \frac{I}{V_{MN}} = k(a, b) V_{MN}^{-1} \quad (1)$$

式中 σ ——电导率值, S/m; I ——恒流源提供的电流值, A; V_{MN} ——在 M 和 N 端测得的电压降, V; $k(a, b)$ ——距离 d_{JM} 、 d_{JN} 、 d_{KM} 和 d_{KN} 的函数, m, 其中 a ——距离 d_{JM} ($= d_{KN}$), b ——距离 d_{MN} 。

本研究就是以电流—电压四端法为理论基础, 开发便携式土壤电导率实时分析仪, 并根据性能试验研究和

收稿日期: 2003-06-16 修订日期: 2003-11-09

基金项目: 北京市“十五”科技攻关项目“温室生物、环境信息自动采集分析系统研究与应用”(H020720030530); 教育部留学回国人员科研启动基金联合资助

作者简介: 李民赞(1963-), 男, 河北藁城人, 教授, 农学博士, 博士生导师, 主要从事精细农业关键技术及系统集成研究。北京 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 100083。

Email: limz@cau.edu.cn

分析的结果, 提出适于所开发的仪器的分析预测模型。

1.2 便携式土壤电导率实时分析仪的开发

如前所述, 为探索适合我国的土壤电导率实时测量手段, 笔者开发了基于电流—电压四端法原理的便携式土壤电导率实时分析仪, 图 2 是该仪器的系统框图和传感器示意图。

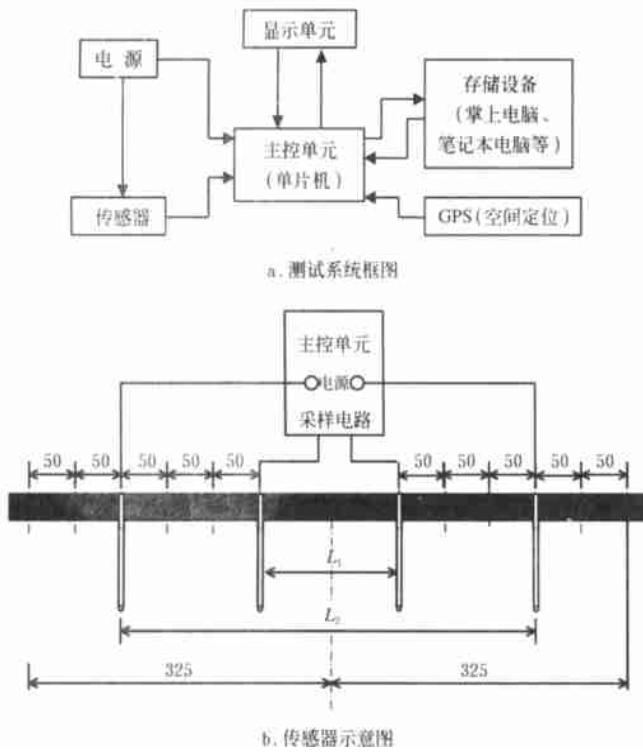


图 2 便携式土壤电导率实时分析仪

Fig 2 Portable soil EC tester

由图 2a 可以看出, 该仪器系统包括电源, 主控单元, 显示单元, 传感器, 以及存储设备(笔记本电脑或者掌上电脑等)。为了记录被测土壤的所在位置, 系统还应包括一个接收 GPS 空间定位信号的接口, 但在本次试验研究中没有使用该功能。

图 2b 传感器包含有 4 根探针和 1 根均匀开有若干个孔的绝缘棒, 孔的布置是以绝缘棒的一半长度为中心, 对称分布, 相邻孔的距离为 50 mm; 外侧的 2 根探针连接在主控单元电源端, 向大地输入恒定电流, 中间的 2 根探针连接在主控单元的采样电路, 以采集表征土壤电导率的电压降信号。均匀分布的孔可以使仪器的结构参数可调, 通过试验优化结构参数, 寻找仪器最佳的工作状态。

传感器的结构设计适于各种农田状态(包括设施栽培)的测量, 即使当农作物已生长较高时, 也可方便在垄间测量, 以监测作物生长期间土壤电导率的变化。

2 土壤电导率实时分析仪的性能试验

利用实验室里的土槽, 对开发的便携式土壤电导率测试系统进行了性能试验。由于该系统的开发目标是要实现土壤电导率的现场实时测量, 考虑到实际的农田内土壤质地、土壤容重以及固液气三相比多少都会有所差别, 为了使实验条件接近实际的农田土壤条件, 本次试验中虽然每次采样的土壤质地、容重、水分等基本不变,

但没有特意追求保持这些指标必须一致或者必须有一定的离散度。

试验研究主要由 3 部分组成, 首先, 利用所开发的仪器对土样进行测量, 记录传感器输出端的电压降, 每个测量点测量 3 次, 取中间值作为测量结果; 然后, 对测量的土样进行采样, 用电极法测量土壤浸提液电导率作为建模和标定的依据; 最后, 建立仪器系统的测量模型并进行必要的性能分析。

根据小麦等主要农作物根系的发达程度, 确定了土槽中土壤的测量深度为 20 cm, 根据预备试验结果, 兼顾信号强弱和失真程度, 调整恒流源的输入电流为 8 mA。为了优化结构参数, 确定对不同的电极间距离组合, 分别进行测量试验, 其中 $d_{JM} (= d_{KN})$ 的变化范围为 5~20 cm, d_{MN} 的变化范围为 5~30 cm。

对于一种确定的 d_{JM} 和 d_{MN} 组合, 测量过程如下:

利用本开发系统测量电压降 V_{MN} ; 采集约相当于 100 g 干土的土样密封保存, 以备分析土壤浸提液电导率之用; 采样之后, 向土槽内均匀加入一定量的氯化钾(KCl), 充分搅拌, 人为改变土壤电导率(盐分), 为下一轮的测量做准备; 开始下一轮测量。

土壤浸提液电导率的传统测量方法为: 先将土样风干, 然后向风干后的土样中, 按照 1:5 的比例加入蒸馏水, 接着充分搅拌、沉淀, 最后取出澄清液用于测量^[13,14]。但该方法在风干时, 不仅会破坏土样的结构性, 更会使土样中的离子种类和浓度发生改变, 进而会改变土壤的电导特性, 影响试验的准确性。故本研究对传统方法进行了改进, 即: 把每一份土样分为两部分, 一份首先烘干, 测量土壤的质量含水率; 然后根据含水率, 推算出另一份土样的干土质量; 向第二份土样中加入蒸馏水, 加入的水量等于 5 倍干土质量减去该份土样中已含有的水的质量差值。这样, 就可以在不破坏土样结构性质和离子浓度的前提下, 测得土壤浸提液电导率。

土壤浸提液电导率测量使用上海精密科学仪器厂生产的 DDB-303A 型便携式电导率仪, 其主要性能参数如下: 测量范围 $0 \sim 10^4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、电子单元基本误差 $\pm 1.0\%$ 、仪器基本误差 1.5%。

实验共设置了 15 个不同的电导率水平, 对每一个水平, 共进行了 13 种电极间距离组合的测量, 共得到了 $15 \times 13 = 195$ 组数据。这 13 种电极间距组合可以归为 3 种基本组态, 即当 $d_{JM} = d_{KN} = a, d_{KM} = 2a$ 时, 称为 Wenner 组态; 当 $d_{JM} (= d_{KN})$ 和 d_{MN} 取任意距离时, 称为 Schlumberger 组态; 另外还有一种 Polar dipole 组态^[12]。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

通过对传感器输出电压数据的直观考察发现, 使用 Wenner 组态和 Schlumberger 组态结构均得到了规律性变化的数据; 而 Polar dipole 组态得到的数据不够理想, 无法用于数据分析。表 1 是分析仪的性能试验结果, 这里只给出了 Wenner 组态和 Schlumberger 组态的试

验数据, 表中还列出了每种土壤条件下检测到的土壤浸提液的有关参数和土壤含水率。

表 1 土壤电导率实时分析仪性能试验结果

Table 1 Experimental result of the soil EC tester

序号	传感器的输出电压值/V									室内分析结果	
	Wenner 组态电极间距 a/cm				Schlumberger 组态电极间距 a, b/cm					电导率值 / $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	含水率 /% (db)
	5	10	15	20	a = 5, b = 10	a = 5, b = 15	a = 5, b = 20	a = 10, b = 20	a = 15, b = 30		
1	0.912	1.261	1.704	2.273	1.453	2.070	2.670	2.280	3.450	239	11.00
2	0.994	1.333	1.880	2.450	1.540	2.190	2.750	2.430	3.710	239	11.32
3	0.944	1.153	1.584	2.160	1.436	2.000	2.470	2.250	3.200	285	11.18
4	0.637	0.964	1.228	1.715	1.163	1.615	1.986	1.750	2.580	310	11.33
5	0.619	0.808	1.146	1.542	1.045	1.377	1.747	1.570	2.340	349	11.78
6	0.567	0.802	1.063	1.458	0.975	1.335	1.668	1.543	2.150	370	11.96
7	0.550	0.696	0.936	1.290	0.875	1.245	1.458	1.335	1.947	408	12.13
8	0.456	0.650	0.930	1.277	0.804	1.151	1.456	12.211	1.776	426	12.46
9	0.430	0.626	0.860	1.140	0.756	1.008	1.260	1.132	1.670	449	12.33
10	0.339	0.513	0.747	1.000	0.710	0.949	1.208	1.012	1.522	496	12.76
11	0.410	0.497	0.712	0.933	0.592	0.874	1.081	0.960	1.394	516	13.01
12	0.375	0.431	0.610	0.836	0.534	0.753	0.962	0.848	1.271	569	14.09
13	0.337	0.417	0.637	0.774	0.550	0.737	0.960	0.843	1.233	589	13.51
14	0.372	0.418	0.580	0.756	0.543	0.738	0.942	0.787	1.145	624	13.97
15	0.326	0.424	0.555	0.735	0.470	0.649	0.822	0.711	1.063	650	13.91

表 1 显示, 传感器的输出电压基本都在 0.5 V 以上, 便于电路设计和数据采集, 并可以提高数据的信噪比。随着土壤电导率的增加, 传感器输出电压有明显的减少趋势, 表明所开发的传感器可以实现测量土壤电导率的要求。

人为制备的土样的电导率变化范围为 239~ 650 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 这一范围为农田土壤基本变化区域, 且有一定的变化梯度, 因此实验结果对下一步的田间试验具有指导意义。为保证均匀, KCL 是被少量蒸馏水溶解后均匀加入土槽的, 但这样不可避免地会影响土壤含水率, 表 1 给出了干基质量含水率的测量值。研究表明, 盐分对土壤电导率的影响比土壤含水率对电导率的影响显著得多, 而且, 在土壤含水率小于 15% 时, 其对土壤电导率的影响不显著^[15-17]。由表 1 可知, 本次实验中土壤含水率大约在 11% 到 14% 之间, 而且变化较小(变异系数 0.085), 所以可以忽略含水率对土壤电导率的影响。

3.2 相关分析及建模

为了考察在不同组态不同结构参数条件下, 传感器输出电压和土壤浸提液电导率之间的关系, 绘出了两者之间的散点分布图, 图 3 和图 4 分别是 Wenner 组态和 Schlumberger 组态的散点分布图。

从图 3 和图 4 的散点分布可以看出, 2 者之间呈负相关, 不管对于哪种组态以及哪种结构, 随着土壤电导率的增加, 传感器输出电压都相当规则地沿着某一规律减小。图中还明显看出 2 者之间呈非线性关系。为揭示这种相关关系, 分别对图 3 和图 4 中的数据进行了建模和曲线拟合。

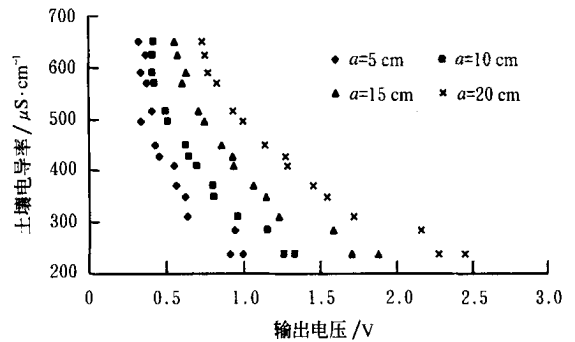


图 3 Wenner 组态下传感器输出电压和土壤电导率之间的关系
Fig. 3 Relationship between voltage drop and soil EC in Wenner structure

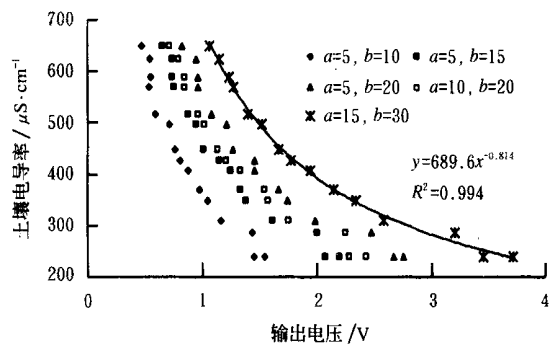


图 4 Schlumberger 组态下传感器输出电压和土壤电导率之间的关系

Fig. 4 Relationship between voltage drop and soil EC in Schlumberger structure

根据图 3 和图 4 中的数据点的变化趋势, 确定选用以下 3 种非线性拟合模型进行建模分析: 幂函数模型、多项式模型和指数函数模型, 3 种模型的表示形式分别为

$$y = k_1 x^{k_2} \quad (2)$$

$$y = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 \quad (3)$$

$$y = k_1 e^{k_2 x} \quad (4)$$

这里 k_i 为回归系数, 这 3 种模型的特点是: 模型公式都可以经过数学变换转化为线性方程, 因此可以利用

最小二乘方法进行参数估计和模型显著性分析。

表 2 给出了 3 种非线性模型的测定系数 (R^2) 和显著性检验结果, 由表 2 可以看出, 除指数模型外, 其余模型的测定系数均大于 0.9, 显示对于各种结构参数, 利用开发的实时分析仪的输出都可以很好地拟合土壤电导率。模型显著性也表明, 模型的 F 值也都远大于临界值, 显著概率都接近于零, 这表明这三种模型都可以用来估计土壤电导率。

表 2 回归模型的测定系数和显著性检验

Table 2 Determination coefficients and significance tests of models

结构参数 /cm	测定系数 R^2			模型显著性检验					
	幂函数	多项式	指数函数	幂函数 ($F^* = 4.667$)		多项式 ($F^* = 3.885$)		指数函数 ($F^* = 4.667$)	
				F 值	显著概率	F 值	显著概率	F 值	显著概率
$a = 5$	0.933	0.915	0.894	181.20	$5.21E-09$	64.640	$3.8E-07$	109.67	$1.05E-07$
$a = 10$	0.988	0.973	0.964	1037.0	$8.75E-14$	213.50	$4.2E-10$	344.74	$9.68E-11$
$a = 15$	0.990	0.987	0.954	1312.0	$1.93E-14$	443.19	$5.7E-12$	268.05	$4.67E-10$
$a = 20$	0.991	0.987	0.969	1363.7	$1.50E-14$	470.64	$4E-12$	405.16	$3.50E-11$
$a = 5, b = 10$	0.981	0.979	0.971	63.75	$1.39E-12$	277.13	$9.1E-11$	433.85	$2.27E-11$
$a = 5, b = 15$	0.987	0.985	0.969	980.36	$1.25E-13$	393.81	$1.1E-11$	405.44	$3.49E-11$
$a = 5, b = 20$	0.990	0.984	0.966	1300.8	$2.04E-14$	375.26	$1.5E-11$	363.36	$6.96E-11$
$a = 10, b = 20$	0.987	0.986	0.966	1020.2	$9.71E-14$	429.17	$6.9E-12$	371.30	$6.07E-11$
$a = 15, b = 30$	0.994	0.989	0.966	2192.1	$7.02E-16$	527.70	$2E-12$	367.93	$6.43E-11$

注: * 为检验临界值, 显著性水平 0.05, 自由度 $(n - p - 1)$, p 为自变量个数, n 为样本个数。

进一步考察表 2 发现 chlumberger 组态的 $a = 15, b = 30$ 结构条件下, 幂函数模型无论是测定系数 ($R^2 = 0.994$), 还是模型显著性检验 (显著概率 0) 都获得了最好的结果。图 3 中也给出了该模型的建模结果并绘出了拟合曲线, 样本点基本上都落在拟合曲线的附近, 进一步表明所开发的仪器不仅实用, 而且可以获得很高的测量精度。对比公式 (2)、公式 (3) 以及图 3 中给出的模型, 可以发现公式 (2) 假定公式 (2) 中的 k_1 , 但本研究显示并非如此, 图 3 中模型的 $k_2 = 0.814$, 表明 k_2 也是一个随传感器结构参数或土壤质地变化的量。为了考察公式 (2) 中 k_1 和 k_2 的变化规律, 表 3 给出了所有幂函数模型的模型参数估计结果。

图 3 幂函数模型回归结果

Table 3 Regressive result of power function model

结构参数 /cm	回归结果 ($y = k_1 x^{k_2}$)			R^2
	k_1	k_2		
$a = 5$	236.8	0.834	0.933	
$a = 10$	301.9	0.802	0.988	
$a = 15$	391.7	0.832	0.990	
$a = 20$	496.2	0.810	0.991	
$a = 5, b = 10$	355.1	0.831	0.981	
$a = 5, b = 15$	465.2	0.822	0.987	
$a = 5, b = 20$	563.9	0.835	0.990	
$a = 10, b = 20$	503.4	0.813	0.987	
$a = 15, b = 30$	689.6	0.814	0.994	

由表 3 可以看出, 对于电流—电压四端法结构的传感器和幂函数模型, 模型参数 k_1 是一个随结构参数变化的

量, 如表 3 所显示的那样, 随着电压端间距的增加, k_1 也呈现增加趋势。另一方面, k_2 没有显示出受结构参数变化的影响, 对比公式 (2) 和表 3 可以相猜, k_2 应是一个随土壤质地变化的参数, 当土壤质地变化时, 有必要通过标定实验重新确定模型参数 k_2 。

3.3 待研究的问题

本研究首先开发了一种适合我国较小地块的便携式土壤电导率实时分析仪, 并通过室内性能试验, 不仅验证了它的可行性, 而且对测量仪器进行了相关分析和数学模型, 也取得了很好的实验结果, 但归根结底室内实验不可能代替田间应用试验, 而且要使该仪器产品化, 还需要在中试阶段通过大量的实用试验确认仪器的可靠性和重复精度, 因此本研究下一步的主要工作是完成田间试验, 完善仪器的结构参数, 精确标定仪器的适用范围和测量精度, 并重点解决以下问题:

1) 检验土壤质地对模型参数的影响。前人的工作 (公式 (2)) 和本研究的结果 (表 3) 都证明了幂函数模型参数 k_1 主要受传感器结构参数的影响, 但关于模型参数 k_2 的影响因素及影响机理尚未明确, 笔者虽然提出主要受土壤地质的影响假说, 但需要田间试验加以验证和修正。

2) 对模型进行水分补偿。本研究由于含水率较低且总体变化不大, 因此没有考虑水分因素影响, 但实际田间测量时, 不同地块土壤水分将会有较大差别, 水分因素必须考虑, 因此下一步必须依靠田间实验, 进一步揭示土壤水分对传感器工作和模型参数的影响机理, 提出模型的水分补偿方法和公式。

4 结 论

1) 开发的传感器能适应多种条件下的实时测量,不仅可以满足大田裸地测量,也可以在作物生长期和设施栽培中应用。

2) 在 Schlumberger 组态的 ($a = 15, b = 30$) 结构条件下,传感器获得了最高的测量精度。

3) 幂函数模型获得了最优的预测结果,对于北京潮土,模型参数的乘幂值 (k_2) 约在 0.82 左右。

4) 在下一步研究中,需要通过田间试验检验土壤质地对模型参数的影响,确定模型的水分补偿方法和公式。

[参 考 文 献]

- [1] Li M, Sasao A, Shibusawa S, et al. Local variability of soil nutrient parameters in Japanese small size field [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery (in Japanese), 1999, 61(1): 141- 147.
- [2] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法 [J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(5): 59 - 66.
- [3] Sudduth K, Drummond S, Kitchen N. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31: 239- 264.
- [4] 尤文瑞. 土壤盐分传感器的研制 [J]. 土壤, 1990, 22(3): 105 - 112.
- [5] 李成保. 土壤电导及其应用 [J]. 土壤通报, 1987, (2): 15- 19.
- [6] Li M, Sasao A, Shibusawa S, et al. Soil Parameters Estimation with N R Spectroscopy [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery (in Japanese), 2000, 62(3): 111- 120.
- [7] 左月明, 卫 勇, 王海昌, 等. 一种智能型电导率仪的设计与研究 [J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 161- 164.
- [8] Kitchen N, Sudduth K, Drummond S. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils [J]. J Prod Agric, 1999, 12, 607- 617.
- [9] Sudduth K, Kitchen N, Bollero G, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity [J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472 - 482.
- [10] Lund E. Practical application of soil electrical conductivity [C]. Precision Agriculture '99 (Part 2), U K: Sheffield Academic Press, 1999, 771- 779.
- [11] 王 琦, 李民赞, 汪懋华. 便携式土壤电导率测试系统的开发 [J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4).
- [12] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究 [J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 20- 23.
- [13] 武得礼, 王夏仙. 电导法测定土壤全盐量应用条件的探讨 [J]. 土壤肥料, 1997(4): 37- 40.
- [14] 黄 强, 殷志刚, 田长彦, 等. 施有机肥条件下的土壤溶液盐分变化动态 [J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 53- 56.
- [15] 孙玉龙, 郝振纯, 陈启慧, 等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系 [J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 69- 73.
- [16] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39- 41.
- [17] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究 [J]. 土壤通报, 2001, 32(90): 85- 87.

Testing and modeling of soil EC sensor

Li Minzan, Wang Qi, Wang Maohua

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

Abstract: A kind of portable soil EC sensor was developed. The performance test of the sensor showed satisfactory result. Voltage drop of the sensor had the same trend as soil EC when four electrodes were set in Wenner structure and Schlumberger structure. The highest precision was obtained under the condition of Schlumberger structure ($a = 15, b = 30$). Non-linear modeling was also carried out. The 3 models used were power function, polynomial and index function. The best estimation was obtained in power function model. The determination coefficient reached 0.994. The constant of the model coefficients was depended on the sensor structure while the power of the model coefficients did not show that characteristic. It was shown that soil texture and soil density could have an effect on the power of the model coefficients. A field test is needed to verify the model.

Key words: soil electrical conductivity; four-electrode method; modeling; precision agriculture