

一种土壤盐分传感器的敏感场分析及其校正研究^①

刘梅先, 杨劲松*, 李晓明, 余美

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 从基本理论出发, 计算了一种新型探针式四电极外部电势的理论分布, 通过对敏感场分析得出了该四电极的敏感响应范围为径向直径约 1.5 倍电流电极间距的椭球体。通过研究土壤表观电导率 (EC_a)、土壤盐分 ($EC_{1.5}$) 和土壤质量含水率 (θ) 之间的关系, 利用非线性回归的方法获得了精度较高的 $EC_a-EC_{1.5}$ 校正模型, 为土壤盐渍化调查和监测提供了便捷有效且费用低廉的方法。

关键词: 四电极; 敏感场分析; 土壤表观电导率; 土壤质量含水率; 校正模型

中图分类号: S151.9; S159.3

土壤盐分的测定和诊断是土壤盐渍化研究工作中的重要内容, 传统上确定土壤盐分方法为土壤浸提液法, 由于操作简单和费用低廉, 广泛应用于很多研究中^[1]。但浸提液法过程繁琐, 费时费事, 不可避免要破坏原样, 且由于土壤盐分的时空变异性, 精度有限, 不能用于原位监测, 也不适用于长期定位监测或水盐动态研究中, 所以土壤盐分原位快速测量显得十分重要。

四电极法是原位测量土壤电导率的一种简单快捷的方法, 自上世纪 70 年代以来国内外在土壤电导率、土壤含水率和土壤结构等因素之间的关系和校正应用方面进行了大量的研究^[2-10], 并研制了多种不同型号仪器, 如 TY-1 型四电极^[11]、Veris 3100 电导仪^[12]和 Yokogawa Type 3244 专用土壤阻抗测定仪等^[13]。但迄今为止鲜有关于四电极法敏感场研究报道, 四电极的敏感响应范围仍然不清楚。基于此, 本文从基本电学理论出发, 计算了一种探针式四电极^[14]外部电场的理论分布, 并利用 Matlab 偏微分方程工具箱 (PDE) 计算电极周围电势和电流密度分布, 确定了四电极的敏感响应范围。另外, 通过研究土壤电导率、土壤盐分和土壤含水率的关系, 建立了电极测量值 (EC_a) 和 1:5 土水比土壤电导率 ($EC_{1.5}$) 之间的校正模型, 为土壤盐渍化的快速诊断和监测提供了一种便捷有效的方法。

1 四电极测量原理

试验中所用探针式四电极结构如图 1 所示, 由安装在绝缘管壁上按 Schlumberger 组态^[15]排列的 4 个不锈钢环电极组成。外侧一对为电流电极, 中间一对为电压电极; 工作方式是采用直流电流激励, 电压测量。在土壤含水率或土壤含盐量发生变化时, 导致土壤表观电导率产生变化, 电压电极检测到变化信号并以电压形式输出, 电极部分结构如图 2 所示。

因电极采用直流电作为激励电源, 可以认为测量时电极周围电场是稳定的, 其电场 μ 可用 Laplace 方程来描述, 在三维柱坐标系下可以表示为:

$$\nabla^2 \mu = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mu}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial \psi^2} \right) + \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

显然, 电极周围电场分布相对于 z 轴对称, 故式 (1) 可以简化为:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

为更直观地理解激励电极所产生的电场, 暂且认为在电极周围 $r = R_0$ 处绝缘, 即 $r = z = R_0$ 时, $\mu = 0$; 四电极内部电势为 0, 即 $r < r_0$ 时, $\mu = 0$ 。假设土壤各向同性, 电导率为 σ ; 电流电极 (J, K) 宽度为 s , 激励电流强度为 i , 环上电流强度分布均匀 ($i/2\pi r_0 s$);

^①基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001)、海洋公益性行业科研专项经费项目 (201105020-3, 201105020-4)、江苏省科技支撑计划项目 (BE2010313)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-359) 和国家基金项目 (41171181) 资助。

* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘梅先 (1986—), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事土壤盐渍化及其环境效应研究。E-mail: mxliu@issas.ac.cn

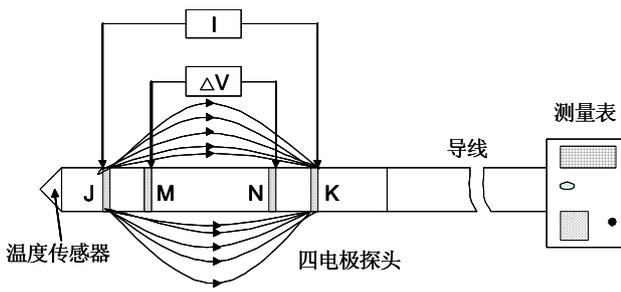


图 1 探针式四电极示意图

Fig. 1 The schematic of the four-electrode probe

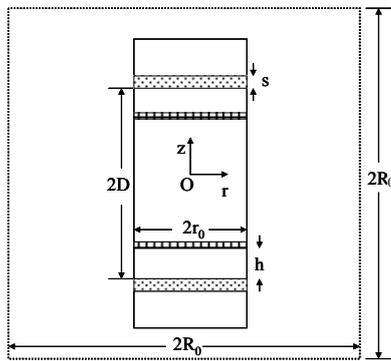


图 2 四电极传感器结构

Fig. 2 Structure of the probe

则式 (2) 的边界条件可以表示为:

$$\left. \frac{\partial \mu}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{i}{2\pi r_0 s \sigma} (D - s \leq z \leq D + s) \quad (3)$$

$$u|_{z=0} = 0, \quad u|_{r=r_0} \neq \infty, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=R_0} = 0 \quad (4)$$

根据边界条件和傅里叶级数的性质, 采用分离变量法计算得:

$$\mu(r, z) = \sum_0^{\infty} C_n I_0(\beta r) \sin(\beta z) \quad (5)$$

$$C_n = \frac{R_0 i}{\pi s \sigma r_0 I_1(\beta r_0)} \sin(\beta D) \sin(\beta s) \quad \beta = \frac{\mu_n^0}{R_0} \quad (6)$$

式中, i 为激励电流强度 (A); σ 为介质电导率 (S/m); s 为电流电极宽度 (m); I_0 为零阶第一类虚宗量贝塞尔函数; I_1 为一阶第一类虚宗量贝塞尔函数; μ_n^0 为 $I_0(\beta r)$ 所有正零点。电压电极间电势可以表示为:

$$\Delta \mu = \mu(r_0, h - D) - \mu(r_0, D - h) \quad (5)$$

因激励电压 μ_0 一定, 所以测量电极间电势可以表示为 $\Delta \mu = k/\sigma$, 其中 k 为与电极尺寸和激励电压有关的参数。试验中电极直径 r_0 为 6.0 mm, 电流电极

间距为 30.0 mm, 电压电极间距为 22.0 mm, 测量土体体积约为 56 cm^3 ^[16]。由于环状电极按 Schlumberger 组态排列, 在相同的电流电极间距时有效地增大了测量土体体积, 另外, 电极小巧容易携带而便于进行土壤盐分调查, 也适用于土壤盐分的定点监测。

2 电极敏感场分析

由图 2 可知, 由于电极呈轴对称性, 电极周围电势和电流密度分布可以简化为二维偏微分方程问题, 本文采用 Matlab 偏微分方程工具箱 (PDE) 中 Conductive Media DC 方程来求解电极电势和电流密度分布 (有限元法)。首先按同等比例在 PDE Tool GUI 图形界面画出电极形状并初始化边界条件; 设定介质电导率 σ 为 1 S/m、激励电极 J 和 K 电势分别为 4.5 V 和 -4.5 V。初始化网格, 加密并优化两次后计算 $R_0 = 1D$ 和 $R_0 = 3D$ 时电势分布和电流密度分布 (电流电极间距为 $2D$, 图 2), 结果如图 3a~3d 所示。

由图 3a 和图 3b 可见, 激励电极附近电势出现畸变现象, 远离激励电极时, 电势变化平缓, 在 $z = 0$ 处电势降为 0 V。在径向距离为 $1D$ 时, 轴向方向上有较大电势降, 当径向距离达到 $3D$ 时, 介质中各处电势基本为 0 V, 更无明显电势变化。由图 3c 和图 3d 可见, 电流电极上电流密度畸高并在径向和轴向方向上迅速降低。轴向上 $z = 0$ 处电流密度分布最小但在径向方向上衰减最慢, 约在 $R_0 = 3D$ 处衰减至 0。另外, 计算发现当改变介质电导率 σ 时, 电极外部电流密度值呈现同比变化, 但电势和电流密度分布形状均不发生变化, 故可以认为电极的敏感响应范围为半径约 1.5 倍激励电极间距的椭球体。

3 $EC_a-EC_{1.5}$ 校正方程的建立

校正试验于 2008 年 8 月在新疆库尔勒巴州节水灌溉试验站 (北纬 $41^\circ 34' 40.74''$, 东经 $86^\circ 09' 57.42''$) 进行, 实验地块为面积约为 26.67 hm^2 的膜下滴灌棉田, 土壤质地为沙质壤土。预先制作一支直径为 5.0 mm 光滑钢钎在 0~10 cm 和 10~20 cm 分层钻出小孔, 将电极插入后测量电压值和地温值, 所得土壤电导率值均进行温度校正^[17]。用直径为 45.0 mm 土钻分层采出 0~10 cm 和 10~20 cm 土样, 测量土壤质量含水率和 $EC_{1.5}$ ^[18]。实验中共获得电极数据和土样各 40 个, 其中选取 8 个含水率变化较大者用作预测精度检验。所得样点土壤质量含水率和 $EC_{1.5}$ 值统计特征如图 4 所示。由图 4 可知, 土壤含水率最小值和最大值分别为 0.073 和 0.298, 平均值为 0.197, 变化范围

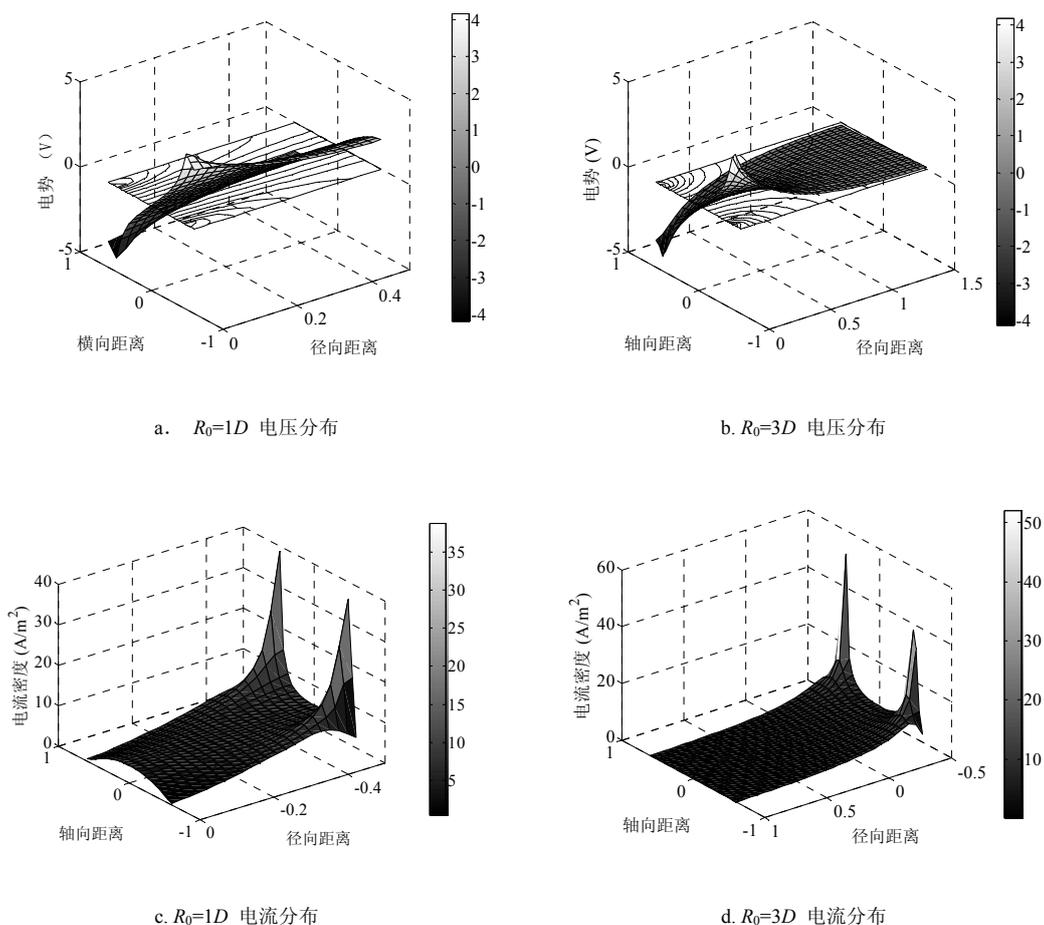


图 3 电极外部电势和电流密度分布

Fig. 3 Distributions of electrical potential and current density of the probe

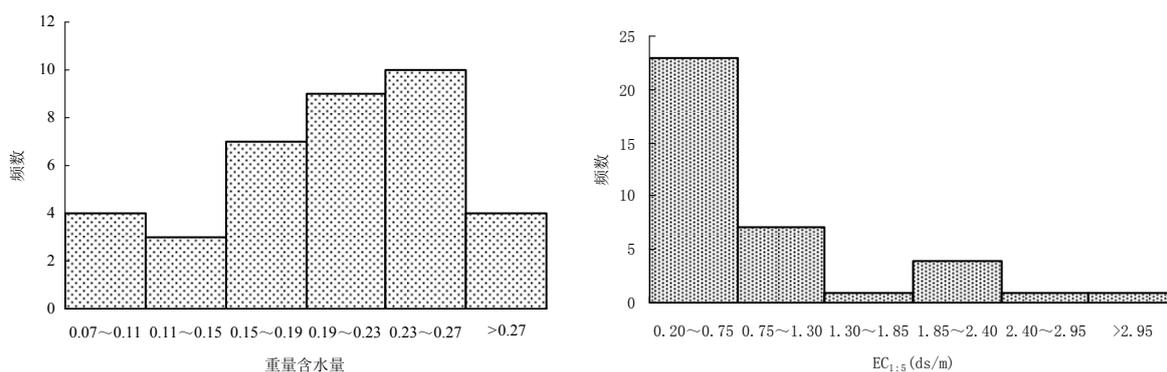


图 4 样点土壤质量含水率和 $EC_{1.5}$ 电导率统计特征

Fig. 4 The statistical characterizations of soil water content and $EC_{1.5}$ of the samples

较大，但主要分布在 0.15~0.27 之间，其中又以 0.23~0.27 区间频数最大。 $EC_{1.5}$ 最小和最大值分别为0.216 dS/m和3.46 dS/m，平均为0.870 dS/m，主要分布在0.20~1.30 dS/m之间。

影响土壤表观电导率的因素多而复杂， EC_a-EC_w (EC_e)- θ 之间关系更是用土壤表观电导率估计土壤盐分的理论基础。Rhoades等^[19]发展了较为完善的土壤-水体系的表观电导率宏观概念模型，假设土壤表观电

导率由①小孔隙液相电导，②大孔隙连续液相电导，和③固相表面电导 3 部分组成，建立了以下土壤电导模型：

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_{ss}}{(\theta_{ss} EC_{ws}) + (\theta_{ws} EC_{ss})} \right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_{wc} \quad (8)$$

式中， EC_a 为土壤表面电导率 (dS/m)； θ_{ws} 和 θ_{wc} 分别为存在于土壤小孔隙 (series-coupled pathway) 和大孔隙中 (continuous pathway) 水分的体积含量 (cm^3/cm^3)； θ_{ss} 为土壤颗粒的体积含量 (cm^3/cm^3)； θ_w 为总体积含水率 (cm^3/cm^3)； EC_{ss} 为平均表面电导率 (dS/m)； EC_{ws} 和 EC_{wc} 分别为小孔隙中和大孔隙中的水溶液电导率 (dS/m)。而较为常用的经验公式为^[20]：

$$EC_a = EC_s + T\theta EC_w \quad (9)$$

式中， EC_s 为土壤表面电导率 (surface electrical conductivity) (dS/m)； EC_w 为土壤水溶液电导率 (dS/m)； θ 为土壤体积含水率 (m^3/m^3)； T 为传输系数，一般可表示为 $T = a\theta + b$ ， a 和 b 为常数。显然，式 (8) 需测定的参数庞杂，工作量大；式 (9) 中的参数 EC_s 和 EC_w 也较难获得，这在一定程度上限制了它们的推广应用。本文根据分析发现，当令 $EC_a/EC_{1.5}$ 为应变量，土壤质量含水率为自变量时， $EC_a/EC_{1.5}$ 和土壤含水率的关系可以用一元多次方程或指数方程来表述 (图 5)，遂建立经验公式：

$$\frac{EC_a}{EC_{1.5}} = f(\theta) \quad (10)$$

通过 SPSS15.0 非线性回归分析分析后得式 (11) 和式 (12)：

① 当 $f(\theta) = a\theta^{b0} + c$ 时：

$$EC_{1.5} = \frac{EC_a}{6.98 \times 10^{-14} e^{150.037\theta} + 0.246} + 0.450$$

$r = 0.84^{**}(n = 32)$ (11)

② 当 $f(\theta) = a\theta^3 + b\theta^2 + c\theta + d$ 时：

$$EC_{1.5} = \frac{EC_a}{1513.202\theta^3 - 563.114\theta^2 + 68.1\theta - 2.5232} + 0.325$$

$r = 0.88^{**}(n = 32)$ (12)

可见，式 (11) 和式 (12) 均可以很好地描述 EC_a 、 θ 和 $EC_{1.5}$ 之间的关系，相关系数分别达到 0.84 和 0.88， $F > F_{0.05}$ 。当然，有研究结果表明 EC_e 或 $EC_{1:1}$ 来表征土壤盐分时可获得更好的结果，原因是水土比增大时浸提液将溶解更多的难溶性盐分，而此部分盐分在土壤含水率较低时为结晶态，不能由表观电导率的形式体现。

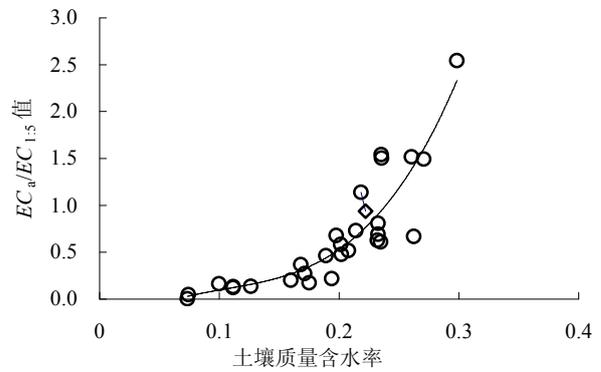


图 5 $EC_a/EC_{1.5}$ 和土壤质量含水率的关系

Fig. 5 The relationship between $EC_a/EC_{1.5}$ and soil water content by weight

4 回归模型预测精度与误差分析

为了检验回归模型的精度，在样品种选取了 8 个含水率差异较大 (0.096 ~ 0.297) 的样点进行模型预测精度分析。为了直观表述，本文引用相对误差概念，即：相对误差 = $[(EC_{1.5} \text{预测值} - EC_{1.5} \text{实测值}) / \text{实测值}] \times 100\%$ ，结果如表 1 所示。

表 1 回归模型预测精度分析

Table 1 Accuracy of the calibration model for the probe

样点	EC_a (dS/m)	$EC_{1.5}$ (dS/m)	含水率	式 (11) $EC_{1.5}$ 预测值	式 (12) $EC_{1.5}$ 预测值	式 (11) 相对误差 (%)	式 (12) 相对误差 (%)
1	0.446	0.442	0.297	0.450	0.379	1.8	-14.2
2	0.075	1.270	0.096	0.755	0.743	-40.6	-41.5
3	0.084	1.006	0.152	0.791	0.756	-21.4	-24.8
4	0.421	1.320	0.176	2.030	1.488	53.8	12.7
5	0.204	0.579	0.202	0.612	0.557	5.7	-3.7
6	0.287	0.410	0.234	0.452	0.455	10.3	10.9
7	0.473	0.488	0.242	0.451	0.501	-7.6	2.8
8	0.468	0.402	0.277	0.450	0.407	11.9	1.4

表1显示,式(11)相对误差为-40.6%~53.8%,总体上大于式(12)相对误差(41.5%~12.7%)。当 $\theta < 17\%$ 时,两式预测值均有较大偏差且相对误差基本为负;当 $\theta > 17\%$ 时,式(11)和式(12)预测值相对误差均基本低于10%,具有较高的精度。本文认为,在土壤含水率偏低时误差偏大的主要原因是土壤中的部分盐分产生结晶而不能由土壤电导率体现出来,所以预测结果往往比实际小(表1);另外,研究区域面积大,土壤质地的差异也是误差的主要来源。

5 结论

本文从理论出发,计算了一种探针式四电极外部电场的分布,运用Matlab偏微分方程工具箱(PDE)计算电极外部电势和电流密度分布,发现当 $R_0 = 3D$ 时,电势和电流密度基本衰减至0;另外,电极外部电流强度与介质电导率成呈正比关系,但电势和电流密度分布形状与介质电导率无关,所以认为,探针式四电极的敏感响应范围约为 $R = 3D$ 的椭球体。

通过分析 EC_a 、 θ 和 $EC_{1:5}$ 之间的关系,发现应变量 $EC_a/EC_{1:5}$ 和 θ 可以通过一元三次方程或指数方程来表述,应用非线性回归方法建立了土壤条件下 $EC_a-EC_{1:5}$ 校正模型,当 $f(\theta)$ 分别取指数和一元三次方程关系时,相关系数分别达到0.84和0.88,均通过了 $F_{0.05}$ 检验,说明两个回归方程均能很好地描述此土壤条件下 EC_a 、 θ 和 $EC_{1:5}$ 之间的关系。预测精度结果表明,总体上 $f(\theta)$ 取一元三次方程时回归方程具有更好的预测精度;当土壤含水率 $\theta > 17\%$ 时,式(11)和式(12)预测值的相对误差均基本低于10%。

需要特别指出的是,影响土壤表观电导率的因素众多,影响机理也十分复杂,文中所得校正模型均为经验公式,只能在研究区的土壤条件下适用,当土壤质地、结构和有机质含量等因素发生变化时, EC_a 、 θ 和 $EC_{1:5}$ 之间的关系必将发生变化。因此,土壤表观电导率的影响因素及其影响机理和程度亟需进一步深入的研究。

参考文献:

[1] Zhang H, Schroder JL, Pittman JJ, Wang JJ, Payton, ME. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extract. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69: 1146-1151

[2] Sudduth, KA, Kitchen NR, Bollero GA, Bullock DG, Wiebold WJ. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 472-482

[3] Gupta SC, Hanks RJ. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1972, 36: 855-857

[4] 毛久庚, 李成保. 土壤直流电导率与含水率和容重的关系. *土壤*, 1990, 22(5): 241-244

[5] 李成保. 土壤-天然水电导的现场检测及其影响因素. *化学传感器*, 1997, 17(1): 34-42

[6] 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. *土壤通报*, 2001, 32(专辑): 85-87

[7] Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Apparent Soil Electrical Conductivity Measurements in Agriculture*, 2005, 46:11-43

[8] Shmulik FP. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 45-70

[9] Shainberg I, Rhoades JD, Prather RJ. Effect of ESP, cation exchange capacity, and soil solution concentration on soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44: 469-473

[10] McCutcheon, MC, Farahani HJ, Stednick JD, Buchleiter GW, Green TR. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(1):19-32

[11] 石元春, 李韵珠, 陆锦文. 盐渍土的水盐运动. 北京: 北京农业大学出版社, 1986

[12] Lesch SM, Corwin DL. Predicting EM/soil property correlation estimates via the Dual Pathway Parallel Conductance model. *Agron. J.*, 2003, 95: 365-379

[13] Sakamoto S, Sekiguchi T. Spatial distribution of near-surface soil resistivity in the cerro chase on science preserve. *ALMA Memo*, 2001, 346: 1-9

[14] 杨劲松. 四电极土壤盐分传感器. 中国: ZL2006201265014. 2007-11-7

[15] 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. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 20-23

[16] Rhoades JD. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements. *FAO Soils Bulletin*, 1976, 31: 159-186

[17] Sheets KR, Hendrickx JMH. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.*, 1995, 31: 2 401-2 409

[18] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究. *土壤学报*, 2005, 42(2): 247-252

[19] Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ. Soil electrical conductivity and soil salinity: New Formulations and calibrations. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 433-439

- [20] Rhoades JD, Raats PAC, Prather RJ. Effects of liquid-phase, bulk soil conductivity. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1976, 40: 651-655
electrical conductivity, water content and surface conductivity on

Sensitivity Distributions and Calibration of A Sensor of Soil Slinity

LIU Mei-xian, YANG Jing-song, LI Xiao-ming, YU Mei

State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: The mathematical model for a ring-shape four-electrode probe was established and the sensitivity distributions of the electrical potential and the current density in radial and axial directions were calculated by using numerical method under the additional assumptions that the sensor was surrounded with a homogenous medium. By studying the sensitivity field, the measuring range of this sensor was estimated to be an ellipsoids whose radial diameter was about 1.5 times of the spacing between the two current electrodes. Moreover, for the purpose of measuring soil salinity, we studied the relationship between soil apparent conductivity EC_a , soil water content θ and soil salinity $EC_{1.5}$ and fitted an accurate empirical model for converting the EC_a detected by the probe to customary $EC_{1.5}$. This four-electrode probe would provide a simple, quick and inexpensive method to measure and survey soil salinity.

Key words: Four-electrode probe, Sensitivity field analysis, Soil apparent electrical conductivity, Soil water content by weight, Calibration model