

基于 EM38 的土壤剖面电导率预测研究

李洪义¹, 史舟¹, 程街亮¹, 李艳²

(¹浙江大学环境与资源学院农业遥感和信息技术应用研究所, 杭州 310029; ²浙江大学东南土地管理学院, 杭州 310029)

摘要: 【目的】以海涂围垦区盐碱土为研究对象, 利用 EM38 大地电导率仪在地表不同高度测量的土壤表征电导率预测土壤不同深度土层剖面的电导率。【方法】利用 EM38 电导率线性响应模型结合 Tikhonov 正则化能较好解决病态矩阵的线性反演问题。利用该方法来预测土壤剖面电导率, 并对预测结果进行误差分析, 最后通过偏差变化法增加噪声利用局部灵敏度分析法来评价模型的灵敏度。【结果】研究发现, 土壤剖面平均电导率和地表不同高度平均表征电导率具有极显著相关性, 能利用表征电导率较好的预测剖面平均盐分。线性模型不仅能较好的预测土壤剖面电导率的变化趋势, 而且在数值上也能较好的预测电导率的大小, 平均预测误差在 40%左右。相对预测误差较大的土层, 模型灵敏度越大, 因此可通过提高 EM38 数据测量的稳定性来提高预测精度。【结论】利用 EM38 表征电导率采用线性模型结合 Tikhonov 正则化的方法能够较好的反演土壤剖面电导率, 预测结果可以为样区土壤管理提供科学的决策依据。

关键词: EM38; 电导率; 线性模型; Tikhonov 正则化

Inversion of Soil Conductivity Profiles Based on EM38 Apparent Electrical Conductivity

LI Hong-yi¹, SHI Zhou¹, CHENG Jie-liang¹, LI Yan²

(¹Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029;

²College of Southeast Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

Abstract: 【Objective】In this paper, apparent electrical conductivity(EC_a) measured by EM38 at different heights above the soil was used to determine lateral variations of apparent electrical conductivity at different depths in a coastal saline field. 【Method】Tikhonov regularization is an effective technique for the solution of ill-posed linear inverse problem. Electrical conductivity profiles were inverted through solving a nonnegative least squares problem by combining the McNeil's linear model theory of EM38 with Tikhonov regularization. The prediction error of the depth profile of electrical conductivity was analyzed. Finally, sensitivity of the model was assessed by adding noise to the observed data from a normal distribution. 【Result】There was a significant correlation between mean of electrical conductivity for the whole soil profile and mean of EC_a measured at different heights above the soil. Moreover, the inverted data of soil electrical conductivity using linear model can characterize well the changing trend of electrical conductivity for the whole soil profile. It is noteworthy the average prediction error of this model is about 40%, and the model was more sensitive to the layers which having larger prediction error. It suggested that the accuracy of prediction can be improved by strengthening the measurement stability of EM38 equipment in field. 【Conclusion】The results demonstrated that an integrated approach of the linear model and Tikhonov regularization can be used to inverse EM38 data to the electrical conductivity profile quantitatively, which presented a great potential way for soil investigation and management.

Key words: EM38; Electrical conductivity; Linear model; Tikhonov regularization

收稿日期: 2007-02-28; 接受日期: 2007-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(40001008, 40571066), 中国博士后科学基金(20060401048)

作者简介: 李洪义(1981-), 男, 江西萍乡人, 博士研究生, 研究方向农业遥感与信息技术、地统计学。E-mail: lihongyi1981@zju.edu.cn。通讯作者史舟(1970-), 男, 浙江舟山人, 副教授, 研究方向农业遥感与信息技术、地统计学。Tel: 0571-86971831; E-mail: shizhou@zju.edu.cn

0 引言

【研究意义】盐分是土壤质量和作物产量的重要影响因子,严重时导致农用土壤的荒弃^[1]。为了有效的管理和利用围垦的滨海盐土,为土壤管理提供科学的决策依据,需要对土壤盐分进行频繁监测。类似挖掘、钻孔和锥形透度计等侵入式的采样模式是土壤剖面采样最常用的方法,但由于费时且费用高等不利因素限制,此类方法只能采集有限的样点^[2]。因此,急需一种非侵入式的廉价而且便捷的剖面探测技术。利用大地电导率仪在地表测量的土壤表征电导率(apparent electrical conductivity, EC_a)来预测剖面电导率是最有潜力的技术之一^[3]。【前人研究进展】通过非侵入式电导率仪能高效地获取期望密度的空间分布数据来描述土壤属性的空间变异,这项技术已经在土壤电导率、自然资源储量预测、土壤和潜层蓄水层的污染物探测、土壤含水量监测、渗流层特性探测等方面进行了大量研究和应用,且证实为一门可行的技术^[4]。其中 EM38 是该技术的代表性仪器之一,能直接通过电磁感应非接触式的快速获取土壤电导率,并据此来预测土壤盐份含量。但是,EM38 每次测量只获得垂直或水平模式下的一个代表剖面综合电导率特征的土壤表观电导率数据,而要获取土壤剖面各土层电导率数据必须要研究建立各种推算模型。目前,一些研究人员在线性假设的基础上利用地上不同高度测量的电导率来经验地推导土壤剖面垂直方向上的电导率^[5,6],或者利用多元线性回归的方法建立表征土壤电导率与剖面电导率实测值之间的线性经验方程^[7-9]。但是上述方法证实只能用于特定地块剖面电导率的预测,即只能应用于建立该模型的地块或具有相似土壤特性的地块,一旦推广到其他具有不同土壤性质的区域时,剖面电导率预测模型需要重新建立或校正。针对这个问题, Cook^[5]、Corwin 等^[6]提出在 McNeil 的 EM38 电导率线性响应模型^[2]基础上,采用解最小二乘问题来预测土壤剖面电导率。而在解最小二乘问题时,因为预测电导率矩阵为病态矩阵,对 EM38 实测数据极其敏感,较小的 EM38 电导率误差可能导致较大的预测误差。因此,有人引入 Tikhonov 正则化,并很好地解决了病态矩阵的线性反演问题^[2,4,10]。与经验线性模型相比,这种基于电磁物理学原理,并通过求非负最小二乘问题来推导剖面电导率的方法,可以省去进一步的野外校正,更具有优势。目前,采用非线性电磁感应模型预测土壤剖面电导率在国外有一些

研究^[4,11],但在国内开展得很少。确定土壤电导率后,可对室内测定的电导率(如 EC1:5)与土壤全盐含量进行校正或者根据前人研究获得的通用经验模型^[12,13]来快速获取土壤盐份含量空间分布。【本研究切入点】通过 EM38 不同高度测量的表征电导率预测剖面电导率,这种从一种土壤类型推导出来的线性或非线性模型都能有效应用于不同的土壤类型的剖面电导率预测中,具有很高的应用价值。一般来说,利用线性或非线性模型来预测剖面电导率没有发现非常大的差别^[4],但线性模型较简单,计算相对非线性模型来说少很多,也能较好地预测土壤剖面电导率。【拟解决的关键问题】本研究分析了 EM38 电导率测量的基本原理及 EM38 线性响应模型,利用 EM38 在不同高度获取的表征电导率采用 EM38 电导率线性响应模型结合 Tikhonov 正则化反演土壤剖面电导率,并通过偏差变化法增加噪声利用局部灵敏度分析法来评价模型的灵敏度。

1 材料与方法

1.1 数据采集

本研究的采样时间为 2006 年 12 月 20 日,采样地点位于浙江省上虞市西北地区、杭州湾南岸的海涂实验农场,数据采集步骤为:(1)采样前将土壤表面的杂草、干枯的覆盖物等去除,并对采样表面进行平整;(2)EM38 按 4 个方向(N, NE, S, SE)在 0、10、20、30、40、50、60、75、90、100、120 和 150 cm 等 12 个不同高度各采集水平、垂直模式下的电导率,即每个剖面共 96 个电导率数据。本研究共采集 9 个土壤剖面,最后取每个高度的电导率 4 个方向的平均值;(3)按步骤 2 中的任一方向挖掘 120 cm 深的剖面, WET Sensor 采集 5、15、25、35、45、55、67.5、82.5、95、110 和 120 cm 等 11 个土层深度处的土壤体积电导率数据(bulk electrical conductivity, EC_b),每层采 3 个数据,最后取平均值;(4)采集步骤 3 中各土层土壤,室内土水比 1:5 电导率法测定 EC1:5。

1.2 研究方法

1.2.1 EM38 线性响应模型 McNeill^[3]提出 EM38 在深度 z 处水平、垂直模式下的灵敏度 ϕ 模型:

$$\phi^H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{1/2}} \quad (1)$$

$$\phi^V(z) = \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{3/2}} \quad (2)$$

Borchers 等^[2]在该模型的基础上通过土壤表面不

同高度 h 获取的电导率 $\sigma^H(h)$ 来预测土壤不同深度的电导率, 在水平方向:

$$\sigma^H(h) = \int_0^\infty \phi^H(z+h)\sigma(z)dz \quad (3)$$

式中, $\sigma(z)$ 表示在深度 z 处的土壤电导率, 灵敏度函数 $\phi^H(z)$ 如公式 (1) 所示。同理, 在垂直方向上不同高度的表观电导率 $\sigma^V(h)$:

$$\sigma^V(h) = \int_0^\infty \phi^V(z+h)\sigma(z)dz \quad (4)$$

式中, 灵敏度函数 $\phi^V(z)$ 如公式 (2) 所示。采集不同高度 h_1, h_2, \dots, h_n 处的表观电导率, 利用方程 (3)、(4) 提供的线性正向反演模型预测土壤剖面电导率。向量 σ 表示土壤各层的电导率, 向量 $m(\sigma)$ 表示预测的土壤电导率:

$$m(\sigma) = [m^V(h_1), m^V(h_2), \dots, m^V(h_n), m^H(h_1), m^H(h_2), \dots, m^H(h_n)]^T \quad (5)$$

则模型 (1) 到 (4) 可简化为:

$$m(\sigma) = K\sigma \quad (6)$$

式中,

$$K = \begin{bmatrix} \int_0^{t_1} \phi^V(z+h_1)dz \cdots \int_{t_1+t_2+\dots+t_{M-1}}^\infty \phi^V(z+h_1)dz \\ \dots \dots \dots \\ \int_0^{t_1} \phi^V(z+h_n)dz \cdots \int_{t_1+t_2+\dots+t_{M-1}}^\infty \phi^V(z+h_n)dz \\ \int_0^{t_1} \phi^H(z+h_1)dz \cdots \int_{t_1+t_2+\dots+t_{M-1}}^\infty \phi^H(z+h_1)dz \\ \dots \dots \dots \\ \int_0^{t_1} \phi^H(z+h_n)dz \cdots \int_{t_1+t_2+\dots+t_{M-1}}^\infty \phi^H(z+h_n)dz \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.2.2 EM38 剖面电导率反演及实现 通过 EM38 不同高度水平、垂直模式下测得的电导率 (向量 d) 来预测土壤剖面不同深度电导率 (向量 σ), 向量 d 中 m^V_i, m^H_i 表示不同高度水平、垂直模式下测量得到的电导率。

$$d = [m^V_1, m^V_2, \dots, m^V_n, m^H_1, m^H_2, \dots, m^H_n]^T \quad (8)$$

根据公式 (1) ~ (6), 预测的目标是使预测值 $m(\sigma)$ 和实际测量值 d 的差异最小, 考虑到电导率不能为负值, 因此, 可简化为解非负最小二乘问题。本问题的特殊之处在于病态矩阵 K 对于向量 d 的细小误差相当敏感, EM38 在实际测量时容易受到噪声的影响^[2]。而 Tikhonov 正则化^[2,4]是克服向量 d 误差敏感度的有效方法, 调整后如公式 (9) 所示。

$$\min \|K\sigma - d\|^2 + \lambda^2 \|L\sigma\|^2 \quad (\sigma \geq 0) \quad (9)$$

为了获得一个平滑的土壤电导率预测剖面, 本研究选择 2 阶 Tikhonov 正则化。另外, L 曲线法^[11]是 Tikhonov 正则化中确定参数 λ 值的最佳方法^[2], 最后利用 Matlab 的 lsqnneg 命令解非负最小二乘问题。

上述线性模型及反演过程通过 Matlab 命令实现, 利用 EM38 在 12 个不同高度测量的水平、垂直模式下的表征土壤电导率来预测深度为 5、15、25、35、45、55、67.5、82.5、95、110、120、130、140 和 150 cm 处的土壤剖面电导率。

1.2.3 结果评价及模型灵敏度检验 利用模型预测的电导率与 WET Sensor 实测电导率根据公式 (10) 评价整个剖面预测误差^[2]:

$$\text{预测误差}(\%) = \frac{[\sum(\text{预测值} - \text{实测值})^2]^{1/2}}{[\sum(\text{实测值})^2]^{1/2}} \times 100 \quad (10)$$

采用相对误差来评价单个土层的预测误差:

$$\text{预测误差}(\%) = \frac{|\text{预测值} - \text{实测值}|}{\text{实测值}} \times 100 \quad (11)$$

灵敏度分析是模型参数化过程和模型校正过程中的有用工具, 包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析只检验单参数的变化对模型结果的影响程度, 利用线性模型预测剖面电导率主要受电导率数据输入数据的影响, 即 EM38 数据的稳定性对模型预测效果的影响。偏差变化法是局部灵敏度分析参数选择的一个方法^[14], 通过对 EM38 数据人为添加噪声的方法, 即随机产生 20 组以剖面不同高度 EM38 实测电导率为平均值, 平均值的 $\pm 5\%$ 大小为标准差且服从正态分布的随机数。采用 Matlab 的 normrnd 命令实现噪声添加, 再利用线性模型预测土壤剖面电导率, 分析不同深度处的电导率预测值波动范围来评价模型的稳定性。

2 结果与分析

2.1 EM38 野外测量数据分析

野外观测数据统计分析如表 1 所示, 从表可知, 剖面 2、7、8 和 9 土壤的标准差比其它剖面要大, 这 4 个剖面上下层电导率变化明显, 其它剖面电导率变化更平滑。从整个研究区来看, 0.05~1.2 m 深度土壤电导率大小垂直变化明显, 最小值为 $15 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, 最大值为 $296 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。所有剖面 EM38 在不同高度测量的水平、垂直模式下的电导率平均值 ($EM38^{mean}_V$ 、 $EM38^{mean}_H$) 和 WET Sensor 测量的不同深度的 EC_b 平均值 (EC^{mean}_b), 而这些数据具有明显的相关性, 复

相关系数达到 0.97 以上, F 值也较高, 具有极显著相关性。

$$EC_b^{mean} = 0.948 \times EM38_V^{mean} \\ (R^2 = 0.978; F = 398.85, P < 0.0001)$$

$$EC_b^{mean} = 1.625 \times EM38_H^{mean} \\ (R^2 = 0.976; F = 362.35, P < 0.0001)$$

浙江滨海盐土区, 0~20 cm 土壤平均含盐量变化较大, 如果作为耐盐指标, 在生产实践中难以掌握, 而 0~100 cm 土壤平均含盐量相对稳定, 可作制定种植计划时作物耐盐的土壤指标^[15]。因此, 可以根据这一研究结果在作物种植前, 通过 EM38 非侵入式的方法快速获取种植区的电导率, 再根据经验方程来预测 0~100 cm 范围深度内土壤平均含盐量, 据此来选择

适宜的作物和品种, 具有一定的应用价值。剖面室内测定 EC1:5 平均值与 EM38 水平、垂直模式下不同高度测定的电导率平均值 ($EM38_V^{mean}$ 、 $EM38_H^{mean}$) 关系如下:

$$EC1:5^{mean} = 4.80 \times EM38_V^{mean} + 74.88 \\ (R^2 = 0.87; F = 52.01, P < 0.0001)$$

$$EC1:5^{mean} = 7.25 \times EM38_H^{mean} + 131.36 \\ (R^2 = 0.85; F = 46.58, P < 0.0001)$$

从结果可知道, 而这些数据具有明显的相关性, 复相关系数达到 0.85 以上, F 值也较高, 具有极显著相关性。根据预测结果, 参考电导率 EC1:5 与土壤全盐含量的通用经验模型^[12]能快速获取土壤盐份含量。

表 1 野外观测数据统计

Table 1 Traditional statistics of field data

剖面编号 (补英文) (ID)	EM38 平均表征电导率				WET Sensor 实测土壤剖面平均 EC _b			
	Mean electrical conductivity measured soil surface using EM38 (mS·m ⁻¹)				EC _b measured by WET Sensor (mS·m ⁻¹)			
	垂直模式 Vertical mode		水平模式 Horizontal mode		平均 Mean	标准差 Std	最小值 Min	最大值 Max
	平均 Mean	标准差 Std	平均 Mean	标准差 Std				
1	60.21	29.69	38.38	26.75	48.71	9.28	27	60
2	134.69	54.21	81.31	45.85	125.00	87.90	58	296
3	77.20	34.41	42.27	30.97	75.50	26.98	46	128
4	78.13	36.21	39.73	26.54	52.42	11.81	32	78
5	52.30	24.22	30.32	24.08	51.18	23.19	43	92
6	60.43	29.62	33.97	25.06	48.21	19.78	15	85
7	109.81	46.91	65.81	42.17	111.57	61.53	34	235
8	127.60	56.17	77.22	54.90	141.24	59.73	63	256
9	123.54	56.14	72.27	48.09	114.56	58.58	65	219

2.2 Tikhonov 正则化线性模型反演结果

利用线性模型反演 WET Sensor 实测土壤剖面电导率, 本研究采集的 9 个剖面土壤上下层电导率变化大致分为 4 种情况: (1) 土壤电导率随土壤深度的增加而增加, 电导率变化范围较大, 如剖面 2 和 9; (2) 土壤电导率随土壤深度的增加变化平缓, 电导率变化不大, 如剖面 1、3 和 4; (3) 土壤电导率随土壤深度的增加而增加, 到一定深度又开始减小, 但电导率变化范围不大, 如剖面 5 和 6; (4) 土壤电导率随土壤深度的增加而增加, 到一定深度又开始减小, 但电导率变化范围较大, 如剖面 7 和 8。

根据计算 $\lg \|K\sigma - d\|$ 与 $\lg \|L\sigma\|$ 的二阶导数得到 L 曲

线拐点, 拐点对应的 λ 值为 Tikhonov 正则化的最佳参数, 各剖面 λ 值如表 2 所示, 从表可知, 每个剖面的 λ 值不一定相同。图 1 为剖面的 L 曲线及预测值与实测值对比剖面电导率图, 图中只列出本研究中 4 种剖面类型预测结果的一个代表剖面, 分别为剖面 2、4、5、8。从图 1 可以看出, 预测的电导率和不同深度测量获得的 EC_b 剖面电导率变化趋势相同, 吻合较好。

表 2 为各剖面按照公式 (11) 评价的预测误差, 从表可知, 本研究的几个剖面中, 剖面 8 的预测误差最大, 为 54.80%; 剖面 2 的预测结果最小, 为 28.35%, 9 个剖面的平均预测误差为 38.44%。

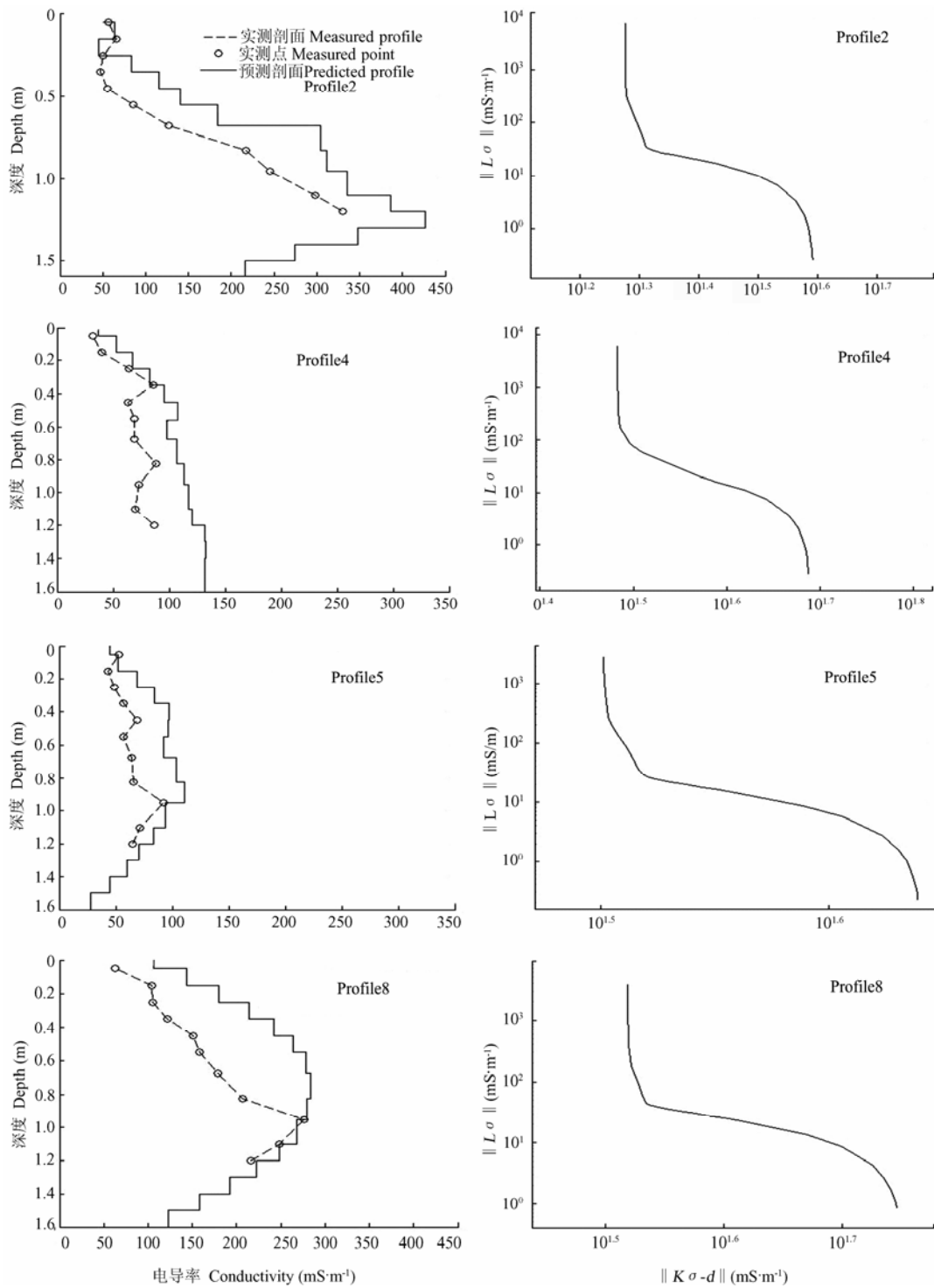


图 1 剖面 L 曲线，不同深度测量的土壤电导率值和 Tikhonov 正则化预测的土壤剖面电导率

Fig. 1 L-Curves and depth profiles of mean electrical conductivity EC_b measured by WET Sensor, and the predictions from the inverse procedures with the linear model predicted by Tikhonov regularization

图 2 表示 9 个土壤剖面各不同深度土层电导率相对预测误差 (公式 11) 的平均值、最大值和最小值。

从图可知，如果只看预测误差的最大值或最小值不能判定模型对那个土层电导率的预测精度最高，如某

表 2 各剖面 λ 值及预测误差

Table 2 λ value and prediction error of profiles

	编号 ID									平均误差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean of error
λ	0.01	0.05	1.2	0.5	0.8	1.5	0.05	1.1	0.8	
误差 Error(%)	35.26	28.35	31.03	41.12	39.86	37.54	54.80	39.57	38.46	38.44

剖面第 4 层的预测误差最大达到 77.40,但又有某剖面第 4 层的预测精度很高达到 4.22%。结合各层预测误差的标准差分析发现:地表最上 3 层的预测误差在 20%左右,预测误差的平均标准差为 13.56,相对来说这 3 层的预测精度最高且预测稳定性最高;最底下 4 层的预测误差在 30%左右,预测误差的平均标准差为

24.79,预测精度次之,预测稳定性也次之;中间 4 层的预测误差在 40%~50%,预测误差的平均标准差为 31.57,预测精度最低,预测稳定性也最低。

从分析结果来看,利用线性响应模型结合 Tikhonov 正则化反演土壤剖面电导率的方法,不仅能较好的确定土壤地层剖面电导率增加、减小或者是一致的变化趋势,而且在数值上也能较好地预测剖面电导率,预测精度和 Hendrickx 等的研究结果 $\pm 40\%$ 结果大体吻合^[2]。

2.3 模型灵敏度检验

对 20 组随机产生的数据利用线性模型进行电导率预测,各土层深度电导率预测值的平均值、最大值和最小值如图 3 所示(以剖面 8 为例)。比较剖面各土层的相对预测误差,结合图 3 可知,相对预测误差越小的土层预测电导率的最大值与最小值的变化范围越小,即相对预测误差越小的层模型预测灵敏度越稳定;反之。

随机产生的 20 组数据的平均预测误差为 34.74%,与不加噪声的 EM38 表征电导率原始值的预测误差 39.57%相比有所降低,5%为标准差的噪声导致了 4.8%

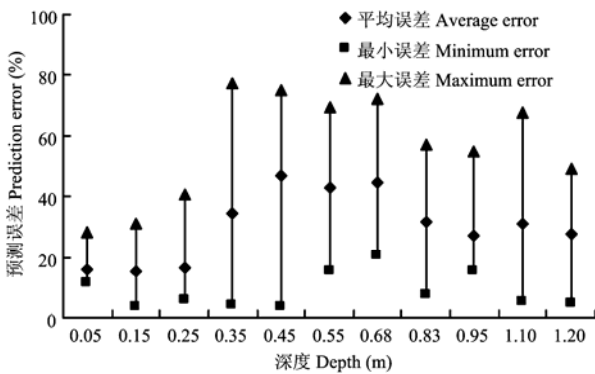


图 2 各土层电导率平均估计误差

Fig. 2 Depth profile of mean prediction error of electrical conductivity

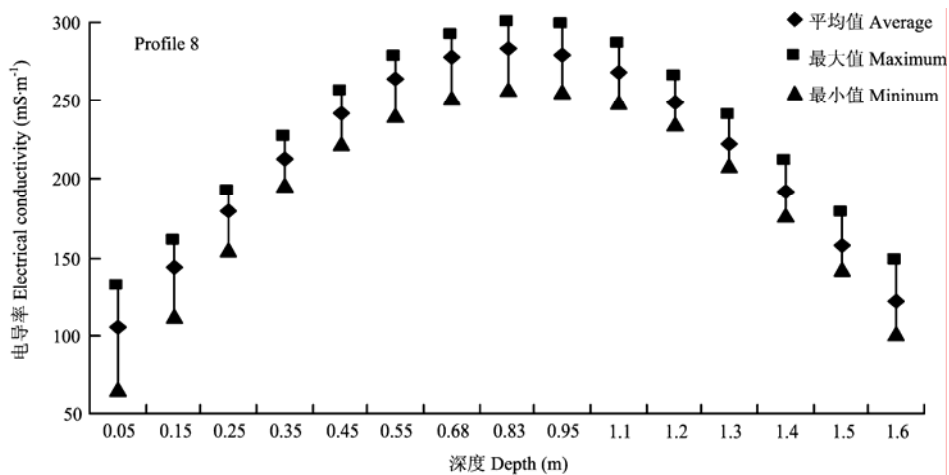


图 3 添加噪声后不同深度电导率预测范围

Fig. 3 Depth prediction range of profile 8 after adding noise artificially

左右的预测误差变化。从这个结果可知, 可以通过提高 EM38 数据测量的准确性及稳定性来提高电导率预测精度, 由于 EM38 测量时受温度、湿度等多因素影响, 因此在测量时应等 EM38 稳定后再读数, 最好进行多次测量取平均值。

3 讨论

本研究建立的电导率预测模型能较好的预测剖面电导率的趋势, 在数值上也有一定的精度。这种基于电磁感应原理的模型具有较好的适用性, 可以应用于不同土壤性质的田块的剖面电导率预测中。由于反演过程中矩阵的病态问题, 原始数据采集的准确性显得非常重要, 可以设计一个用于不同高度电导率采集的绝缘装置, 以减小由于仪器数据稳定性带来的操作误差。本研究根据国外同行采集的12个不同高度的表征电导率来预测剖面电导率, 如果能减少采样层数而不影响电导率预测精度, 那么大面积野外采样就能大大提高效率。因此, 还可以就最优电导率测定层数和高度选择做一些探讨。

4 结论

EM38 大地电导率仪是快速获取土壤电导率的有效工具, 已经在土壤盐分、水分监测等方面取得了广泛应用。土壤剖面电导率实测值与土壤表观电导率 ECa 的平均值相关性较好, 可较好的预测一定深度土层平均电导率值, 指导种植规划。

利用线性响应模型结合 Tikhonov 正则化反演土壤剖面电导率的方法, 不仅能有效的预测土壤上下层电导率变化的趋势, 而且在数值上也有较好的预测精度, 达到 40%左右。模型对不同深度土层的电导率预测精度不同, 地表最上 3 层的预测误差在 20%左右, 预测误差的平均标准差为 13.56, 相对来说这 3 层的预测精度最高且预测稳定性最高; 最底下 4 层的预测误差在 30%左右, 预测误差的平均标准差为 24.79, 预测精度次之, 预测稳定性也次之; 中间 4 层的预测误差在 40%~50%, 预测误差的平均标准差为 31.57, 预测精度最低, 预测稳定性也最低。经模型灵敏度检验发现, 预测相对预测误差较小的层, 模型表现得越稳定。EM38 电导率数据的稳定性对于提高预测误差有重要作用, 因此在野外作业时等 EM38 稳定后再读数, 最好进行多次测量取平均值。

这种不破坏土壤表层结构, 借助模型来预测土壤剖面电导率的方法对于含盐量变化较大的浙江滨海盐

土区在生产实践中有重要意义, 为样区土壤管理提供科学的决策依据。为了进一步提高预测精度, 可继续开展非线性模型预测方面的研究工作。

References

- [1] Amezketa E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 594-606.
- [2] Borchers B, Uram T, Hendrickx J M H. Tikhonov regularization of electrical conductivity depth profiles in field soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 1004-1009.
- [3] McNeill J D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6. Geonics, ON, Canada, 1980.
- [4] Hendrickx J M H, Borchers B, Corwin D L, Lesch S M, Hilgendorf A C, Schlue J. Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements: theory and experimental verification. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 673-685.
- [5] Cook P G, Walker G R. Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1015-1022.
- [6] Corwin D L, Rhoades J D. An improved technique for determining soil electrical conductivity—Depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 517-520.
- [7] Rhoades J D, Corwin D L. Determining soil electrical conductivity—Depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 255-260.
- [8] Slavich P G. Determining ECa-depth profiles from electromagnetic induction measurements. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28: 443-452.
- [9] 姚荣江, 杨劲松, 姜 龙. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异及其剖面分布特征研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, 33(2): 207-216.
Yao R J, Yang J S, Jiang L. Study on spatial variability and profile distribution characteristics of soil salinity by Kriging with an electromagnetic induction. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life science)*, 2007, 33(2): 207-216. (in Chinese)
- [10] Deidda G P, Bonomi E, Manzi C. Inversion of electrical conductivity data with Tikhonov regularization approach: some considerations. *Annals of Geophysics*, 2003, 46(3): 549-558.
- [11] Hilgendorf A C. Linear and nonlinear models for inversion of

- electrical conductivity profiles in field soils from EM-38 measurements. M.S. thesis. New Mexico Institute of Mining and Technology Socorro, New Mexico, 1997.
- [12] 吴玉卫, 陈通权. 浙江省滨海盐土电导法测定全盐量的实验式. 浙江农业大学学报, 1981, 7(2): 125-128.
- Wu Y W, Chen T Q. Empirical formulae for the determination of total salt content by electrical conductivity of coastal saline soils in Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1981, 7(2): 125-128. (in Chinese)
- [13] 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.
- Liu G M, Yang J S, Yao R J. Chemical factors to electrical conductivity of soil extract and their intensity. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 247-252. (in Chinese)
- [14] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 姜艳, 李秀珍, 布仁仓, 贺红土. 生态模型的灵敏度分析. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056-1062.
- Xu C G, Hu Y M, Chang Y, Jiang Y, Li X Z, Bu R C, He H S. Sensitivity analysis in ecological modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1056-1062. (in Chinese)
- [15] 董炳荣. 浙江新围海涂农业综合开发技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1996.
- Dong B R. *Agricultural Synthesis Exploiture Techniques of New Inning Coastland in Zhejiang Province*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1996. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)