

DOI: 10.11766/trxb201303300151

基于 EM38 的滨海盐土剖面电导率原位测定*

李洪义¹ 史舟^{2†} 吴次芳³ 李芳颢⁴ 何方义¹

(1 江西财经大学旅游与城市管理学院, 南昌 330013)

(2 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

(3 浙江大学公共管理学院, 杭州 310029)

(4 江西省国土资源勘测规划院, 南昌 330096)

EM38-BASED IN-SITU DETERMINATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF COASTAL SALINE SOIL IN PROFILE

Li Hongyi¹ Shi Zhou^{2†} Wu Cifang³ Li Fanghao⁴ He Fangyi¹

(1 School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

(2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

(3 College of Public Administration, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

(4 Institute of Land Survey & Planning, Department of Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang 330096 China)

关键词 土壤近地传感器技术; EM38; 剖面电导率; 原位测定; 非线性模型

中图分类号 S156 **文献标识码** A

建国以来,浙江省海涂围垦面积累计超 20 万 hm^2 , 海涂围垦造地已成为浙江省耕地占补平衡的重要手段^[1]。可靠、高效地获取剖面土壤盐分及其空间分布特征是海涂围垦区盐渍化土壤利用评估与高效改良的科学依据^[2], 特别是满足未来精确农业发展对土壤各类理化参数的实时监测要求的野外土壤信息田间原位测量对传统的土壤剖面采样方法提出了挑战。

EM38, Veris3100 等电磁型土壤近地传感器技术 (Proximal Soil Sensing, PSS) 可经济、高效地在野外测定土壤电导率, 而 EM38 在地表非接触式的测量方式引起更加广泛关注^[3]。特殊的工作原理使得它能通过测量表观电导率 (Apparent electrical conductivity, EC_a) 对 0.75 m (水平模式)、1.50 m (垂直模式) 深度范围内的土壤剖面盐分特征进行原位测定。

为更加准确地获取土壤剖面各土层的电导率,

国内外学者尝试通过建立多元回归等经验模型的方式来实现^[4-5], 但该类型方法由于推广时需要重新校正而缺乏通用性。针对上述问题, 国外有学者建立基于电磁物理学原理的 EM38 线性模型, 通过解最小二乘方程反演剖面土壤电导率^[6], 且取得了较好的预测精度。前期研究中, 本课题组引进国外学者已成功应用的线性模型, 通过 L 曲线方法自动选定 Tikhonov 正则化计算中的关键参数, 以浙江省上虞市围垦海涂为例, 较好地预测出了土壤剖面电导率^[7]。目前, 国际上对一种计算更复杂、精度更高的 EM38 非线性模型开展了应用研究^[6], 国内尚未见同类研究。国际上虽有学者对剖面预测方法进行研究探讨^[8], 但均未对模型在不同电导率水平下的剖面电导率预测精度、噪声对模型灵敏度的影响等做进一步分析。此外, EM38 在地表不同高度测量的点对数对模型预测精度的影响也还需进行探讨, 其对大规模剖面土壤盐分普查采样策略的制

* 国家自然科学基金项目 (41101197)、教育部人文社会科学研究项目 (10YJC910002) 和江西省自然科学基金项目 (20114BAB213017) 资助

† 通讯作者, E-mail: shizou@zju.edu.cn

作者简介: 李洪义 (1981—), 男, 副教授, 主要从事农业遥感与信息技术应用研究。E-mail: lihongyi1981@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-03-30; 收到修改稿日期: 2013-06-18

定具有一定的指导意义。

1 数据与方法

1.1 数据采集

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。以监测剖面为中心,EM38 按 4 个方向(南-北、东-西、西南-东北、西北-东南)在地表(0 cm),以及离地表 10、20、30、40、50、60、75、90、100、120、150 cm 等 11 个不同高度采集水平、垂直模式下的 ECa,分别记为 EC_h 、 EC_v ,即每个剖面共 96 个电导率数据,取 4 个方向的 ECa 平均值用于预测各剖面不同深度土壤的电导率(σ),共采集 9 个样点的数据。为验证模型预测精度,每个样点挖掘出 120 cm 深的剖面,WET Sensor 采集 5、15、25、35、45、55、67.5、82.5、95、110、120 cm 等 11 个土层深度处的土壤体积电导率数据(Bulk electrical conductivity, σ_b),每层采 3 个数据,最后取平均值。

1.2 电磁感应非线性模型及其反演

与线性模型一致,假设土壤被分为具有特定深度、电导率、导磁率的 M 层,最底层 M 延伸到无限深度^[6]。第 k 层的电导率为 σ_k 、磁场导磁率为 μ_k ,第 k 土层的特性导纳(Characteristic admittance)记为 N_k ,表示为:

$$N_k = \frac{\sqrt{\lambda^2 + i\sigma_k\mu_k\omega}}{i\mu_k\omega} \quad (1)$$

式中, λ 为黑格尔转换参数, $\omega = 91.7 \times 10^3 \text{ rad s}^{-1}$, r 为 EM38 线圈距离 1 m。

假定第 k 层以上土体的面导纳(Surface admittance)记为 Y_k ,底层与上一土层面导纳有以下函数关系(\tanh 为双曲正切函数):

$$Y_{M-1} = N_{M-1} \frac{Y_M + N_{M-1} \tanh(u_{M-1} d_{M-1})}{N_{M-1} + Y_M \tanh(u_{M-1} d_{M-1})}, \quad (2)$$

式中, $u_k = \sqrt{\lambda^2 + i\sigma_k\mu_k\omega}$ (3)

在高度 h 处的垂直、水平模式表征电导率预测值分别用 $m^V(h)$ 、 $m^H(h)$ 表示:

$$m^V(h) = (4/\mu_0\omega r^2) Im(1 + B^3 T_0) \quad (4)$$

$$m^H(h) = (4/\mu_0\omega r^2) Im(1 + B^2 T_2) \quad (5)$$

式中, $T_0 = \int_0^\infty R_0(gB/r) g^2 e^{-2gh/\delta} J_0(gB) dg$, (6)

$$T_2 = \int_0^\infty R_0(gB/r) g e^{-2gh/\delta} J_1(gB) dg, \quad (7)$$

J_0 、 J_1 分别为 0 阶、1 阶第一类贝塞尔函数曲线, $R_0(\lambda)$ 由下式确定:

$$R_0(\lambda) = \frac{N_0 - Y_1}{N_0 + Y_1}, \quad (8)$$

Im 为次级磁场 H_s 与初级磁场 H_p 的正交化分量; $B = r/\delta$, $\delta = \sqrt{2/\sigma_1\mu_0\omega}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, $gB/r = \lambda$ 整体作为黑格尔转换参数。

后续剖面电导率反演参照前期线性模型中的二阶 Tikhonov 正则化解非负最小二乘方程的方法,并通过 L 曲线法自动选择 Tikhonov 正则化关键参数 λ 值^[7],预测 5、15、25、35、45、55、67.5、82.5、95、110 cm 等 10 个深度的土壤电导率,记做 σ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面电导率反演及精度分析

EM38 在各校正样点地表测定的 EC_v 、 EC_h 值见表 1。样点 5 的 EC_v 值最小,为 87 mS m^{-1} ;样点 2 的值最大为 224 mS m^{-1} 。所有样点 EC_v 大于 EC_h ,依据 EM38 的设计原理,可预判所有样点的深层土壤电导率大于表层土壤电导率^[7]。

表 1 校正样点地表测定的 ECa

样点 编号	EC_v (mS m^{-1})	EC_h (mS m^{-1})	样点 编号	EC_v (mS m^{-1})	EC_h (mS m^{-1})
5	87	77	7	185	145
1	100	90	9	185	147
6	106	82	8	215	184
3	130	105	2	224	167
4	138	90			

依照表 1 的样点顺序排列各验证样点非线性模型预测的剖面电导率变化曲线,从图 1 可知,剖面 5、1、6 电导率随深度变化波动较小,且电导率值大均小于 75 mS m^{-1} ;相反,剖面 7、9、8、2 电导率随深度变化波动较大,且电导率值基本大于 200 mS m^{-1} ;剖面 3、4 电导率值也变化不大,基本保持在 100 mS m^{-1} 左右波动。

目测比较可知,剖面 5、1、6、3、4 明显较电导率值更大的剖面拟合得更好;参照前期研究中的误差评价方法^[9],上述 5 剖面的预测误差分别为 23.79%、21.59%、25.70%、24.84%、22.39% (表 2),平均预测误差约为 23.66%;预测误差相对稳定,最大值与最小值相差 4.11%;上述 5 个剖面绝大部分 EC_v 、 EC_h 均分别小于 140、100 mS m^{-1} 。剖面 7、9、8、2 的预测误差分别为 34.04%、18.01%、23.62%、24.26%,平均预测误差约为 25.00%;但预测误差波动相对较大,最大值与最小值相差 16.03%。

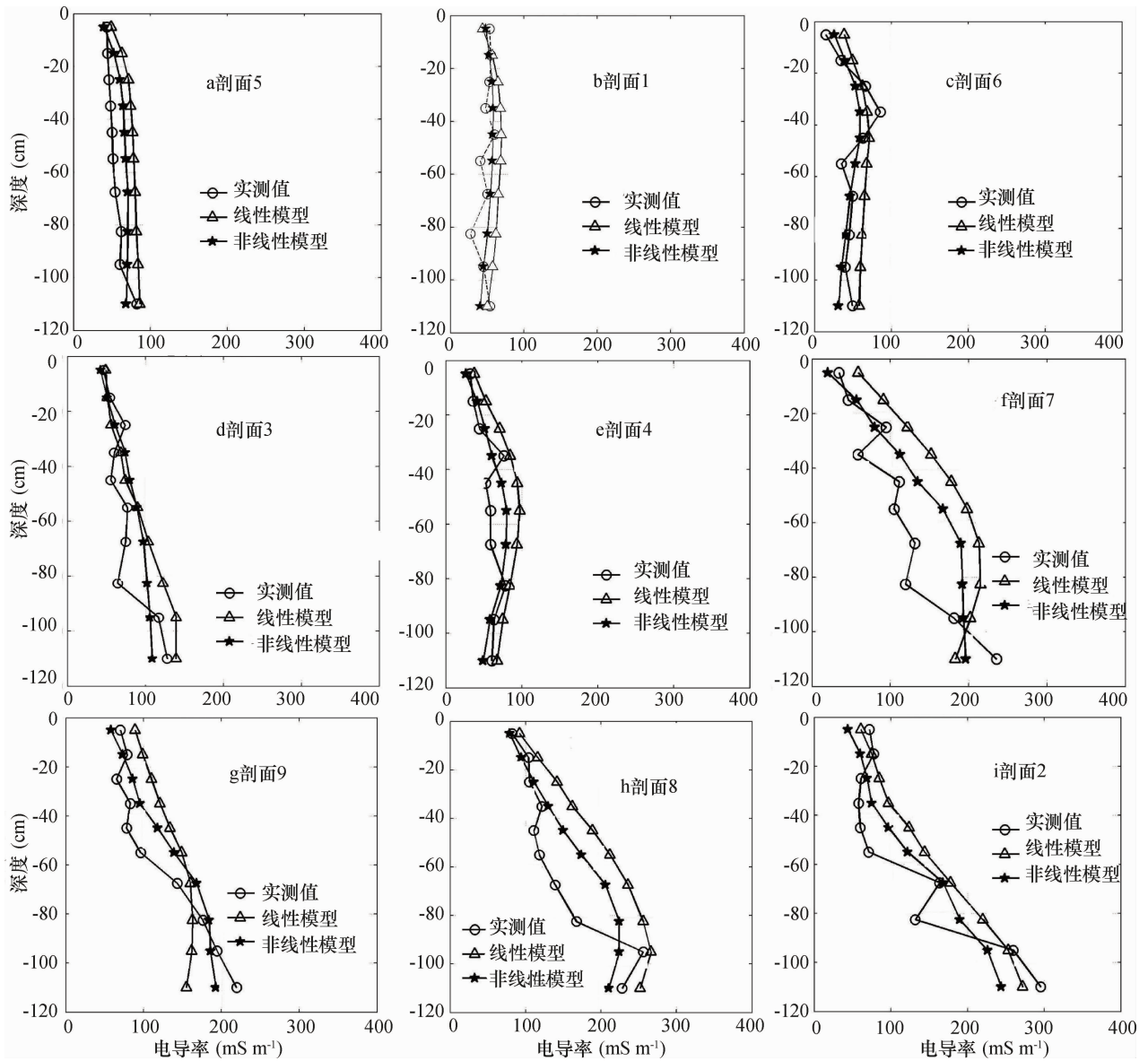


图1 剖面实测 σ_b 电导率和线性模型及非线性模型的预测电导率曲线图

表2 线性模型和非线性模型的剖面电导率预测误差

样点编号	线性模型误差	非线性模型误差
5	39.86	23.79
1	35.26	21.59
6	37.54	25.70
3	31.03	24.84
4	41.12	22.39
7	54.80	34.04
9	38.46	18.01
8	39.57	24.32
2	28.35	23.62
平均误差	38.44	24.26

目前,从9个验证剖面的反演研究结果来看,非线性模型的平均预测误差为24.26%;剖面电导率大小对非线性模型预测误差影响不大,但电导率越小及波动小的剖面的预测曲线拟合更好,且模型预测误差相对更稳定。

2.2 线性与非线性模型预测误差比较分析

将预测结果与前期线性模型的结果进行比较,从图1可知,和非线性模型一样,线性模型对前5个剖面的预测拟合度较好,且其预测值基本都大于相同位置非线性模型的预测值。从表2可知,前5个剖面的平均预测误差为36.96%,最大值和最小值相差10.09%;与相对应的非线性模型结果相比,线性模型预测误差更大,且误差波动性更大。后4个

剖面的平均预测误差约为 40.30% ;剖面 7 的预测误差最大,为 54.80% ,与最低误差的剖面相差 26.45% 。9 个剖面的平均预测误差约为 38.44% ,高于非线性模型 14.18% 。

图 2 为各验证剖面在不同深度实测值 σ_b 与预测值 σ 的散点图,从图可知,线性模型和非线性模

型的实测值与预测值的复相关系数分别为 0.73 和 0.84,二者相关性均较高;总体上看,线性模型的绝大多数散点明显下偏于 1:1 直线,非线性模型预测值拟合曲线的曲率更大,预测值更接近电导率实际值,也进一步验证了非线性模型的预测精度更高。

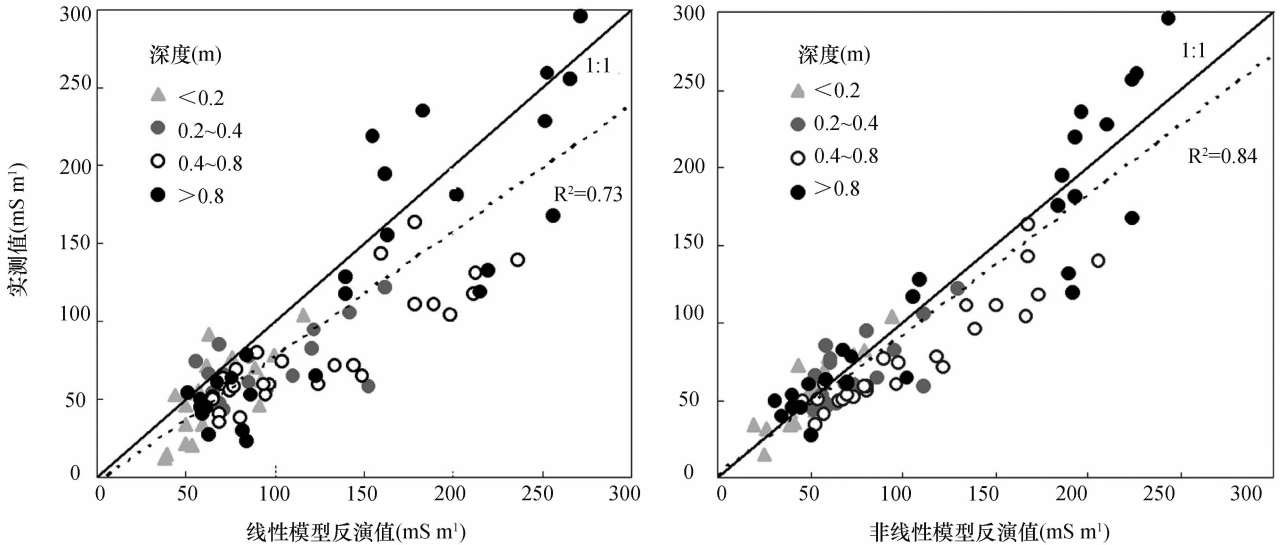


图 2 剖面实测电导率(σ_b)和线性模型(左)及非线性模型(右)反演电导率散点图

表土层(0~0.2 m)和耕作层(0.2~0.4 m)的实测值与预测值的散点分布于 1:1 直线附近,非线性模型的散点相对分布更均匀,基本沿 1:1 直线两侧分布;这些点的电导率绝大部分小于 100 mS m^{-1} 。从深土层(>0.8 m)的预测情况来看,线性模型的预测值出现高估情况,特别是大于 200 mS m^{-1} 的点明显偏离 1:1 直线;相对非线性模型的预测值基本均匀分布于 1:1 直线两侧,但 200 mS m^{-1} 的点出现预测值低估的情况。中间层土壤(0.4~0.8 m)的样点均出现了预测值高估的情况。因此,从总体上可见,两模型的预测精度均表现为近地层高于深土层,随土层深度增加而降低。国际同行也证实 EM38 在 0.6 m 深度范围内获取的电导率较可靠^[10]。

2.3 实测点对数对模型精度的影响分析

将 9 个样点中非线性模型预测精度最高的剖面 1(电导率 <100 mS m^{-1})和剖面 9(>200 mS m^{-1})作为实验样点,并将原来 0、10、20、30、40、50、60、75、90、100、120、150 cm 等 12 个高度点对逐渐减少到 8 个点对,即依次减少 20、40、60、100 cm 高度处的点对,采用非线性模型预测剖面电导率,预测误

差变化曲线见图 3。从图 3 可知,随着实测点对数的减少,模型的预测误差逐步增大,其中剖面 1、9 分别增加了 12.86%、18.31% ;剖面 9 的斜率明显大于剖面 1,即剖面 9 的预测误差增加得较剖面 1 快。由此可知,电导率小(<100 mS m^{-1})的剖面较电导率大(>200 mS m^{-1})的剖面受实测点对数影响较小。因此,在实际野外采样中,可以通过适当增加不同高度实测 EC_a 点对数来提高剖面电导率的预测精度。

由于线性、非线性模型采用的数据采集方法较繁琐,严重影响数据采集的效率。而根据本研究的结果,减少采样点对将降低预测精度。因此,剖面电导率预测方法还有待改进。目前,一种基于单频、多线圈设计的电磁感应仪(DUALEM-421)只需在地表快速测定 EC_a 数据,并可通过反演算法预测剖面土壤电导率^[11],将大大提高土壤盐分制图的效率和精度。

2.4 模型灵敏度分析

偏差变化法是局部灵敏度分析参数选择的一个方法^[8],以剖面 8 为例,通过对 EM38 实测 EC_a 数据人为添加噪声,即随机产生 20 组以剖面不同高度

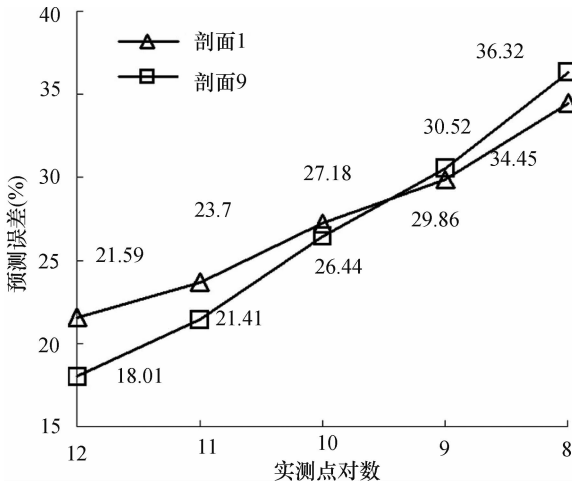


图3 剖面电导率预测误差随实测 EC_a 点对数变化折线图

EM38 实测电导率 $\pm 5\%$ 大小为标准差且服从正态分布的随机数,利用非线性模型进行电导率预测。经计算,该组数据获得的剖面电导率平均预测误差为 34.74%,与不加噪声时的预测误差 37.57% 相比有所降低,5% 标准差的噪声可能导致 2.83% 左右的预测误差变化。同条件下,线性模型造成 4.8% 的预测误差影响^[9]。因此,非线性模型相对更加稳定。在实际操作中可提高仪器归零校正的频率,通过提高 EM38 数据测量的准确性及稳定性来提高剖面电导率预测精度。

3 结论

本研究基于 EM38 电磁感应非线性模型结合二阶 Tikhonov 正则化方法反演土壤剖面电导率,实现了土壤剖面电导率的原位测定。从 9 个验证剖面的反演结果来看,非线性模型的平均预测误差为 24.26%,较线性模型有所降低。剖面电导率大小对非线性模型的预测误差影响不大,但电导率越小及波动越小的剖面 ($< 100 \text{ mS m}^{-1}$) 曲线拟合得更好,且模型预测误差相对更稳定。从总体上看,线性及非线性模型的预测精度均表现为近地层高于深土层,随土层深度增加而降低的规律性。

随着实测点对数的减少,非线性模型的预测误

差逐步增大;同等条件下,电导率小 ($< 100 \text{ mS m}^{-1}$) 的剖面比电导率大 ($> 200 \text{ mS m}^{-1}$) 的剖面的受影响更小。模型局部灵敏度分析显示,相比线性模型,非线性模型稳定性更好。本研究的方法可为土壤剖面盐分普查,以及土壤盐分三维空间变异性研究提供快捷、可靠的数据原位测定方法。

参考文献

- [1] 汪晖,陶然. 论土地发展权转移与交易的“浙江模式”——制度起源、操作模式及其重要含义. 管理世界, 2009, 8: 39—52
- [2] 姚荣江,杨劲松,韩建均. 海涂围垦区土壤盐分空间变异模拟的比较研究. 土壤学报, 2012, 49(2): 275—281
- [3] 郭燕,田延峰,吴宏海,等. 基于多源数据和模糊 k -均值方法的农田土壤管理分区研究. 土壤学报, 2013, 50(3): 441—447
- [4] Triantafilis J, Laslett G M, McBratney A B. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1008—1017
- [5] 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
- [6] Hendrickx J M H, Borchers B, Corwin D L, et al. Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements: Theory and experimental verification. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 673—685
- [7] Li H Y, Shi Z, Richard W, et al. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil. Geoderma, 2013, 195/196: 31—41
- [8] Triantafilis J, Monteiro Santos F A. Hydrostratigraphic analysis of the Darling River valley (Australia) using electromagnetic induction data and a 1D spatially constrained algorithm for quasi-three-dimensional electrical conductivity imaging. Hydrogeology Journal, 2011, 19: 1053—1063
- [9] 李洪义,史舟,程街亮,等. 基于 EM38 的土壤剖面电导率预测研究. 中国农业科学, 2008, 41(1): 295—302
- [10] Triantafilis J, Monteiro Santos F A. Resolving the spatial distribution of the true electrical conductivity with depth using EM38 and EM31 signal data and a laterally constrained inversion model. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48: 434—446
- [11] Monteiro Santos F A, Triantafilis J, Bruzgulis K E. A spatially constrained 1-d inversion algorithm for quasi-3D conductivity imaging: Application to DUALEM421 data collected in a riverine plain. Geophysics, 2011, 76(2): B43—B53