# 据一维正反演分析广域电磁法 $E$–$E_x$ 方式的分辨能力

王顺国[1]，熊彬[2]，戴世坤[1]

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院，湖南 长沙，410083;
2. 桂林理工大学 地球科学学院，广西 桂林，541004)

**摘要**：为了研究广域电磁法 $E$–$E_x$ 方式的分辨能力，编制广域电磁法一维正反演程序，对不同地电模型进行模拟和反演计算。正演模拟从层厚变化和电阻率变化 2 方面讨论。研究结果表明：随着中间薄层层厚的增大及围岩与薄层电阻率差异的增大，视电阻率曲线中异常与假极值越来越明显；当收发距为 4 km 时，对埋藏 100 m 深、与围岩电阻率 10 倍差异的薄层，厚度为 4 m 的低阻层可有效探测，厚度为 33 m 的高阻层可有效探测；当薄层埋藏深度为厚度 2.5 倍时，围岩电阻率为低阻层电阻率的 2.0 倍时才可以有效探测，高阻层电阻率为围岩电阻率 4.0 倍时可以有效探测，显然广域电磁法对低阻体的分辨率要高于对高阻体的分辨率；广域电磁法一维视电阻率反演结果与 CSAMT 采用卡尼亚电阻率的结果相比，广域电磁法的反演收敛过程快速、稳定，反演分辨能力比 CSAMT 的强。

**关键词**：广域电磁法；分辨能力；数值模拟；反演；薄层
**中图分类号**：P631 **文献标志码**：A **文章编号**：1672−7207(2013)09−3766−10

# Analysis of resolution ability to $E$–$E_x$ arrangement wide field electromagnetic method using 1-D modeling and inversion

WANG Shunguo[1], XIONG Bin[2], DAI Shikun[1]

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The caculation results with different models were analyzed using one-dimesional modeling and inversion of wide field electromagnetic method to research the resolution ability, and the results caused by changes of thickness and resistivity to thin layer were studied. The results show that with the increase of the thickness of thin layer and difference between the surrounding rock and it, the curve abnormality and false extreme become more and more obvious, so the area with large lithology difference should be paid more attention to. The resolution of low-resistivity is superior to the high one，and dectecting depth of this method is decided by surface risistivity and frequency. In addition, for the layer buried in the depth of 100 m and with difference between the layer and surrounding rock equals 10 times, the layer with 4 m thick can be detected when its resistivity is lower than that of surrounding rock, and with 33 m when its resistivity is higher than that of surrounding one. For the layer buried in the same depth as above with 40 m thick, when resistivity of layer accounts for less than and equals 50% of the surrounding rock, it can be detected. However, when resistivity of layer is 4.0 times larger than that of the surrounding rock, it can be detected. Additionally, compared with CSAMT which applies the cagniard resistivity, the inversion processing of WFEM is faster and steadier.

**Key words:** wide field electromagnetic method; resolution ability; numerical simulation; inversion; thin layer

**收稿日期**：2012−08−23；**修回日期**：2012−10−28
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(40974077，41164004，41227803)；广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFA018003)
**通信作者**：熊彬(1974−)，男，湖北仙桃人，教授，从事电磁法数值模拟和反演成像研究；电话：0773-5897006；E-mail: xiongbin@glite.edu.cn

在电磁勘探方法中，分辨能力是一个重要参数。安志国等[1]利用一维有限元 CSAMT 数值模拟，计算了 3 种模型变化情况下 TE 和 TM 模式的视电阻率曲线，归纳出 CSAMT 法对低阻薄层的分辨能力。薛国强等[2]设计不同模型，通过瞬变电磁正演对有无薄层存在时的视电阻率曲线进行对比，分析了瞬变电磁对薄层的分辨能力。吴英隆[3]利用水平层电测深程序研究了 3 层大地中的中间薄层探测能力。朱仁学等[4]用 MT 方法对一维地质体的探测能力进行了研究，提出异常体规模越大、异常体与围岩的电性差越大，可探测深度越大。朱庆俊等[5]利用二维有限元数值模拟，提出 AMT 对导电薄层的垂向分辨力与围岩比值有关。席振铢等[6]的研究表明：有低阻覆盖层时，高频大地电磁探测能力下降；在同一探测能力条件下，高频大地电磁测深可探测异常体上覆围岩厚度与异常体厚度的比值和围岩与异常体电阻率比值呈线性关系。在地震勘探方法中，汪恩华等[7]通过研究地层厚度变化对地层本身的反射系数谱及反射波频谱的影响规律，提出一种新的计算薄层厚度的方法。刘百红等[8]总结了一套针对鄂尔多斯某工区上古生界储层预测的技术方法，实际钻探结果表明该方法为该区寻找新的含气区以及天然气储量的计算提供了重要依据。柏冠军等[9]利用三种线性预测原理，经数学变换为属性参数，采用非线性 BP 网络，有效解决了预测薄层厚度问题。孙思敏等[10]将地质统计学反演方法应用于薄层砂体预测方面。蔡希玲等[11]从薄层顶、底界面反射波的走时入手，研究了薄层反射波在非零炮检距上出现的干涉现象。Li 等[12]结合某地中浅层薄层识别难的问题，研究了用宽频带高分辨率地震预测薄层储层分布的方法。广域电磁法(wide field electromagnetic method，简称 WFEM)由何继善院士提出并大力发展[13−14]，其中，$E$–$E_x$ 方式为电性源供电，观测电场水平分量 $E_x$。该方法与当前常用的频率域电磁勘探方法相比，不但摆脱了 MT 和 AMT 法天然场源信号微弱和随机变化的不利因素，而且克服了 CSAMT 只在“远区”观测的不利因素；此外，它采取测量人工源电磁场的 1 个电(磁)分量的作法，方便快捷，并且利用 $a^n$ 编码信号，同时发送和接收强度大体相当的多个不同频率的信号，实现了 1 台发送、阵列接收，大大提高了野外勘查工作的效率。广域电磁法虽然得到了广泛应用，但其分辨能力有待进一步研究。为此，本文作者将广域电磁法 $E$–$E_x$ 方式和 CSAMT 法的常规方式(采用卡尼亚视电阻率)进行对比研究和分析。

# 1　基本理论

## 1.1　水平层状地表电偶极子响应

水平层状模型坐标系如图 1 所示。水平电偶极子位于地表，选取偶极子中心为坐标原点，$x$ 轴与偶极矩方向相同，$z$ 轴垂直向下。谐变电偶极子在均匀水平层状大地表面时，电场水平分量的表达式为[15−16]：

$$E_r=\frac{IdL}{2\pi}\cos\varphi\left[\frac{\mathrm{i}\omega\mu}{r}\int_0^{\infty}\frac{1}{m+m_1/R^*}\mathrm{J}_1(mr)\mathrm{d}m-\rho_1\int_0^{\infty}\frac{mm_1}{R}\mathrm{J}_0(mr)\mathrm{d}m+\frac{\rho_1}{r}\int_0^{\infty}\frac{m_1}{R}\mathrm{J}_1(mr)\mathrm{d}m\right] \tag{1}$$

$$E_\varphi=\frac{IdL}{2\pi}\sin\varphi\left[\frac{\rho_1}{r}\int_0^{\infty}\frac{m_1}{R}\mathrm{J}_1(mr)\mathrm{d}m-\mathrm{i}\omega\mu\int_0^{\infty}\frac{m}{m+m_1/R^*}\mathrm{J}_0(mr)\mathrm{d}m+\frac{\mathrm{i}\omega\mu}{r}\int_0^{\infty}\frac{1}{m+m_1/R^*}\mathrm{J}_1(mr)\mathrm{d}m\right] \tag{2}$$

$$E_x=E_r\cos\varphi-E_\varphi\sin\varphi \tag{3}$$

式中：

$$\begin{cases}R_n=1\\ R_j=\dfrac{m_j\rho_jR_{j+1}+m_{j+1}\rho_{j+1}\mathrm{th}(m_jh_j)}{m_{j+1}\rho_{j+1}+m_j\rho_jR_{j+1}\mathrm{th}(m_jh_j)}\end{cases};\quad j=n-1,n-2,\cdots,1 \tag{4}$$

$$\begin{cases}R_n^*=1\\ R_j^*=\dfrac{m_jR_{j+1}^*+m_{j+1}\mathrm{th}(m_jh_j)}{m_{j+1}+m_jR_{j+1}^*\mathrm{th}(m_jh_j)}\end{cases};\quad j=n-1,n-2,\cdots,1 \tag{5}$$

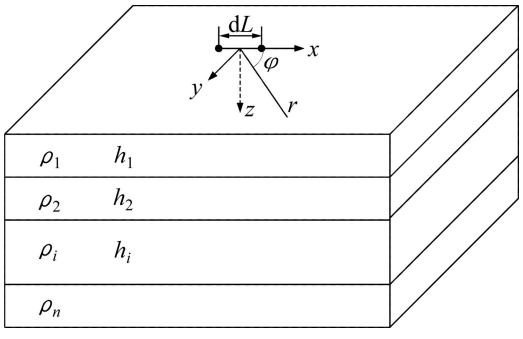



**图 1**　水平层状模型坐标系

**Fig.1**　Coordinate system on horizontal layer-earth model

$I$ 为通入偶极源的电流；d$L$ 为偶极子长度；$r$ 为收发距；$\varphi$ 为收发距和偶极子方向的夹角；$k=\sqrt{\mathrm{i}\omega\mu\sigma}$ 为波数；$\mu\approx\mu_0$ 为磁导率；$\omega$ 为角频率；$m$ 称为空间频率，具有距离倒数的量纲，$m_i=\sqrt{m^2-k_i^2}$；$\mathrm{th}x=\dfrac{\mathrm{e}^{x}-\mathrm{e}^{-x}}{\mathrm{e}^{x}+\mathrm{e}^{-x}}$；$\rho_i$，$i$=1, 2, …, $n$，表示第 $i$ 层电阻率；$h_i$，$i$=1, 2, …, $n$−1，表示第 $i$ 层厚度。在具体的计算中，由于表达式中含有零阶或一阶贝塞尔函数的无穷积分，需要用快速汉克尔变换数值滤波求解。

### 1.2 广域视电阻率

谐变电偶极子在均匀地表时，电场水平分量的表达式如下[13−16]：

$$E_x=\frac{I\mathrm{d}L\rho}{2\pi r^3}f_{E-E_x}(\mathrm{i}kr) \tag{6}$$

其中：

$$f_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)=3\cos^2\varphi-2+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1+\mathrm{i}kr) \tag{7}$$

由式(6)可得 $E-E_x$ 方式广域视电阻率：

$$\rho_a=K_{E-E_x}\frac{\Delta V_{\overline{MN}}}{I}\frac{1}{f_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)} \tag{8}$$

其中：$K_{E-E_x}=\dfrac{2\pi r^3}{\mathrm{d}L\cdot\overline{MN}}$；$\Delta V_{\overline{MN}}=E_x\cdot\overline{MN}$，为测量电压；$\overline{MN}$ 为测量电极间的距离，本文取 1 m。从式(8)可以看出：在实际观测中，只需观测电场水平分量 $E_x$，就可以计算出广域视电阻率。但在野外工作中，由于只记录 1 个分量，所以，要严格保证电流、装置参数和记录值的观测精度，否则，视电阻率会出现无法消除的误差。

### 1.3 最小二乘反演

广域电磁反演中的线性方程组为

$$\sum_{j=1}^{nm}\boldsymbol{J}\Delta m_j=\rho_{\mathrm{si}}-\rho_{\mathrm{ci}} \tag{9}$$

其中：$i$ 为频率的编号；$j$ 为模型参数的编号；$\rho_{\mathrm{si}}$ 为第 $i$ 频率对应的视电阻率观测值；$\rho_{\mathrm{ci}}$ 为第 $i$ 频率对应的视电阻率正演值；$\Delta m_j$ 为第 $j$ 个模型修改量；$\boldsymbol{J}$ 为偏导数矩阵。假设有 $nf$ 个频点，$nm$ 个模型参数，用式(9)直接进行反演时，收敛过程慢，而且电阻率、厚度之间的差异较大，还存在量纲不统一问题。为了提高反演稳定性和收敛速度，可以进行以下处理[17−18]：用取对数的方式求取数据差矢量，使得数据差$\Delta d$ 为实际观测数据的对数值与模型正演数据对数值的差，

$$\Delta d_i=\ln(\rho_{\mathrm{si}})-\ln(\rho_{\mathrm{ci}}) \tag{10}$$

经过这种处理后，数据差$\Delta d$ 中元素的差别就不会太大，从而使得模型的初始值选取不会受到很大限制。偏导数矩阵的形式也相应地改为

$$\boldsymbol{A}=\left[a_{ij}\right],\quad a_{ij}=\frac{\partial\ln\rho_{ci}}{\partial\ln m_j}=\frac{m_j}{\rho_{si}}\frac{\partial\rho_{ci}}{\partial m_j} \tag{11}$$

其中：$\rho_{ci}$ 为预测模型的正演视电阻率；$m_j$ 为第 $j$ 个模型参数，为电阻率或层厚。考虑到电阻率的变换范围过大，对视电阻率和模型参数电阻率都取对数。这种处理与数据矢量差的处理相一致。

采用奇异值分解法，可以求得方程的解$\Delta m$。此时，模型修改量也应该是对数形式：

$$\Delta m_j=\ln(m_j')-\ln(m_j) \tag{12}$$

其中：$m_j'$ 为新的预测模型参数。新的预测模型参数可以用如下公式求取：

$$m_j'=m_j\mathrm{e}^{\Delta m_j} \tag{13}$$

这样就避免了模型参数被修改为负值的麻烦。而且在模型修改过程中，为了使模型参数修改量不过大，以保证求解过程稳定，可以进行如下限制：当 $\Delta m_j<0.5$ 或 $\Delta m_j>0.5$ 时，令 $\Delta m_j$=0.5。

## 2 广域电磁法薄层正演

分辨能力是指对于目标层的勘探深度及分辨层参数的能力，它受多种因素的影响，如目标层的厚度、电性、埋深、信噪比、电磁噪声电平等[2−3, 19]。讨论方法的分辨能力时，首先必须确定异常与背景之间的分离程度的标准，文中取 $\rho_a$ 曲线与均匀半空间的 $\rho_0$ 之间的最大相对误差 $\eta$ 作为标准：

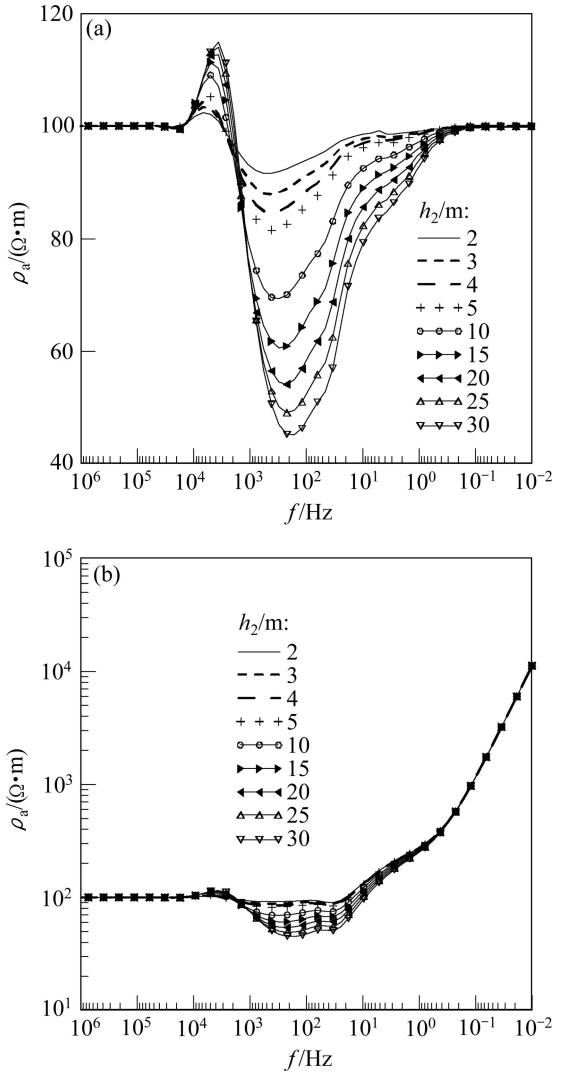
$$\eta=\max\left\{\frac{\left|\rho_a^i-\rho_0\right|}{\rho_0}\times100\%\right\};\quad i=1,\ \cdots,\ 60 \tag{14}$$

式中：$i$ 为频率编号。由于在薄层所对应异常段位置的视电阻率相对误差一般超过 15%，本文将 15%作为分辨率的下限，即 $\eta$=15%就认为该层可以被有效分辨。

### 2.1 薄层厚度变化

#### 2.1.1 低阻层

对于如图 1 所示的模型，偶极距 d$L$=1.5 km，偶极子到测线垂直距离 $\overline{OS}$ =4 km，层厚 $h_1$=100 m，背景电阻率 $\rho_1$=100 Ω·m，薄层电阻率 $\rho_2$=10 Ω·m，夹角 $\varphi$ 满足 $\tan\varphi=2$，电流 $I$=10 A，频率 $f_{\min}=10^{-2}$ Hz，$f_{\max}=10^{4}$ Hz。以等对数间隔取 60 个值，中间层厚 $h_2$=2, 3, …, 30 m。




(a) WFEM；(b) CSAMT

**图 2**　低阻层层厚对视电阻率的影响

**Fig.2**　Effect of thickness of low-resistivity layer on apparent resistivity

低阻层厚度对视电阻率的影响见图 2。从图 2 可以看出：对 2 种方法所得曲线，随着中间薄层层厚的增大，曲线异常越来越明显；同时，由于积累面电荷造成的假极值也相应地增大，而 CSAMT 曲线在低频段明显有畸变。低阻层厚度引起的最大相对误差见表 1。从表 1 可以看出：当中间层厚 $h_2$=4 m 时，曲线最大相对误差超过了分辨率的下限，所以，广域电磁法对埋藏 100 m 深、与围岩电阻率相差 10 倍、厚度为 4 m 的低阻薄层可以有效探测。

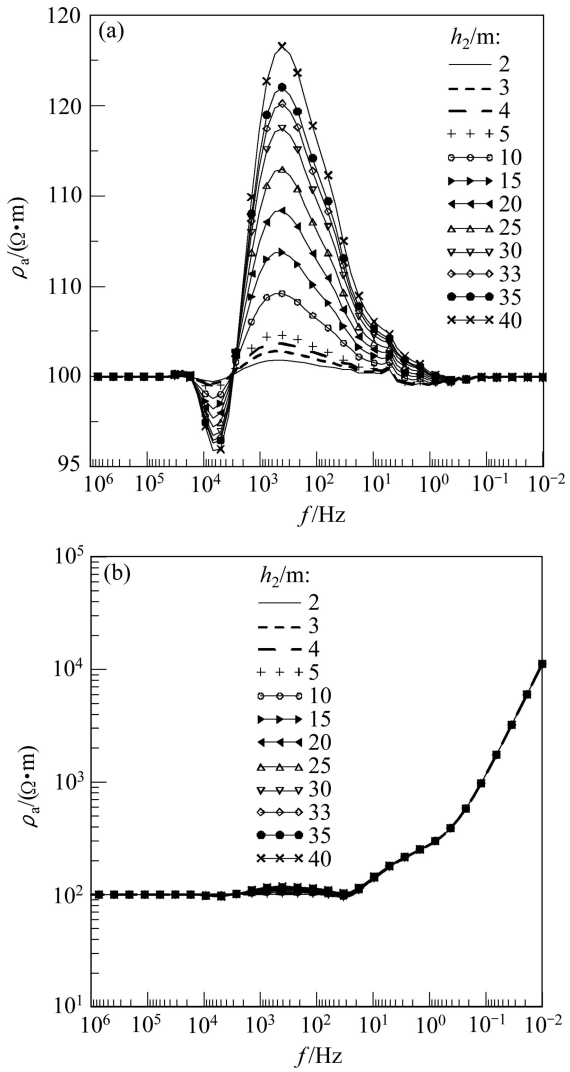
2.1.2　高阻层

计算中，薄层电阻率 $\rho_2$=1 000 Ω·m，$h_2$=2, 3, …, 40 m。其他参数均与 2.1.1 中的相同。高阻层层厚对视电阻率的影响见图 3。

**表 1**　低阻层厚度变化引起的最大相对误差

**Table 1**　Maximum relative error caused by thickness of low-resistivity layer

| 序号 | $h_2$/m | WFEM 最大相对误差/% |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 8.41 |
| 2 | 3 | 12.07 |
| 3 | 4 | 15.43 |
| 4 | 5 | 18.50 |
| 5 | 10 | 30.70 |
| 6 | 15 | 39.38 |
| 7 | 20 | 45.87 |
| 8 | 25 | 50.93 |
| 9 | 30 | 54.86 |




(a) WFEM; (b) CSAMT

**图 3**　高阻层层厚对视电阻率的影响

**Fig.3**　Effect of thickness of high-resistivity layer on apparent resistivity

从图 3 也可以看出：对 WFEM 曲线，随着中间薄层层厚的增大，曲线异常越来越明显，同时，假极值也相应地增大，这一特点与低阻层的相同，在资料解释中需注意；CSAMT 曲线在低频段明显有畸变，曲线不好辨识。高阻层厚度变化引起的最大相对误差见表 2。从表 2 可以看出：当中间层厚 $h_2$=33 m 时，曲线最大相对误差超过了分辨率的下限，所以，广域电磁法对埋藏 100 m 深、厚度为 33 m、与围岩电阻率 10 倍差异的高阻薄层可以有效探测。对比表 1 与表 2 可见：广域电磁法对低阻薄层的分辨率要高于高阻薄层的分辨率，这与电磁法对低阻体的分辨率高的事实相符。由于 CSAMT 在低频段明显出现畸变，导致分辨能力下降，可见 WFEM 的分辨能力要高于 CSAMT 的分辨能力。

**表 2** 高阻层厚度变化引起的最大相对误差

**Table 2** Maximum relative error caused by thickness of high-resistivity layer

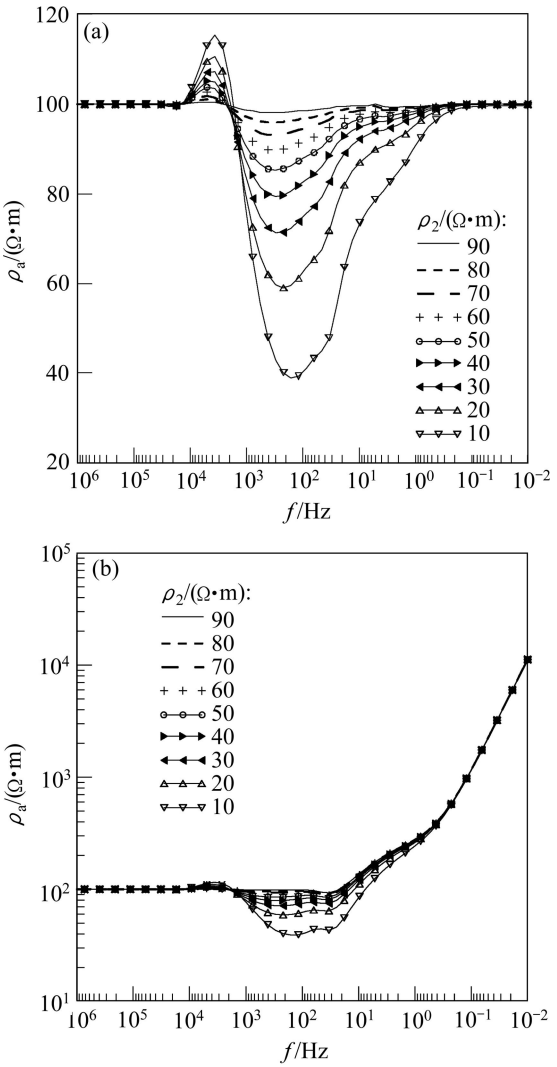
| 序号 | $h_2$/m | WFEM 最大相对误差/% |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.93 |
| 2 | 3 | 1.39 |
| 3 | 4 | 1.85 |
| 4 | 5 | 2.31 |
| 5 | 10 | 4.60 |
| 6 | 15 | 6.89 |
| 7 | 20 | 9.19 |
| 8 | 25 | 11.47 |
| 9 | 30 | 13.75 |
| 10 | 33 | 15.11 |
| 11 | 35 | 16.02 |
| 12 | 40 | 18.28 |

## 2.2 薄层电阻率变化

### 2.2.1 低阻层

对于如图 1 所示的模型，偶极距 d$L$=1.5 km，偶极子到测线垂直距离 $\overline{OS}$ =4 km，层厚 $h_1$ = 100 m，厚度 $h_2$ = 40 m，电流 $I$=10 A，夹角 $\varphi$ 满足 $\tan\varphi = 2$，频率 $f_{min}$=$10^{-2}$ Hz，$f_{max}$=$10^4$ Hz，以等对数间隔取 60 个值，背景电阻率 $\rho_1$=100 Ω·m，薄层电阻率 $\rho_2$=10, 20, …, 90 Ω·m。低阻层电阻率对视电阻率的影响见图 4。

从图 4 可以看出：对 2 种方法所得视电阻率曲线，随着中间层电阻率与围岩电阻率差异增大，曲线异常也越来越明显，同时假极值也逐渐变大，而 CSAMT 曲线在低频段明显有畸变。低阻层电阻率变化引起的最大相对误差见表 3。从表 3 可以看出：当$\rho_2$ = 50 Ω·m




(a) WFEM; (b) CSAMT

**图 4** 低阻层电阻率对视电阻率的影响

**Fig.4** Effect of risistivity of low-resistivity layer on apparent resistivity

**表 3** 低阻层电阻率变化引起的最大相对误差

**Table 3** Maximum relative error caused by resistivity of low-resistivity layer

| 序号 | $\rho_2$/(Ω·m) | WFEM 最大相对误差/% |
|---|---|---|
| 1 | 90 | 1.87 |
| 2 | 80 | 4.12 |
| 3 | 70 | 6.87 |
| 4 | 60 | 10.31 |
| 5 | 50 | 14.74 |
| 6 | 40 | 20.60 |
| 7 | 30 | 28.69 |
| 8 | 20 | 40.97 |
| 9 | 10 | 60.99 |

时，低阻层可以被有效探测，所以，广域电磁法对埋藏 100 m 深、厚度为 40 m、与围岩电阻率相差 1/2 倍的低阻薄层可以有效探测。

2.2.2　高阻层

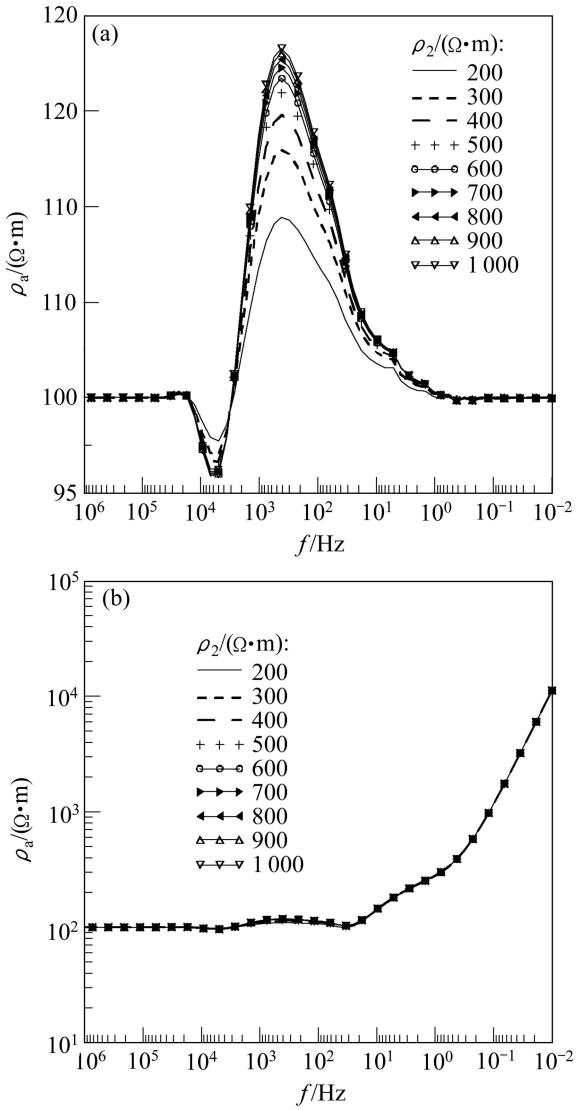
计算中，中间层电阻率 $\rho_2$=1 000, 900, …, 200 Ω·m。其他参数均与 2.2.1 中的相同。高阻层电阻率对视电阻率的影响见图 5。

从图 5 也可以看出：对 WFEM 曲线，随着中间薄层与围岩电阻率差异的增大，曲线异常越来越明显，同时假极值也相应的增大，而 CSAMT 曲线在低频段明显有畸变，不易辨识。高阻层电阻率变化引起的最大相对误差见表 4。从表 4 可以看出：当中间层电阻率$\rho_2$ = 400 Ω·m 时，高阻层可以被分辨，所以，广域电磁法对埋藏 100 m 深、厚度为 40 m、与围岩电阻率相差 4 倍的高阻薄层可以有效探测。从表 3 与表 4 也可看出广域电磁法对低阻薄层的分辨率要高于高阻薄层的分辨率；此外，WFEM 的分辨能力要高于 CSAMT 的分辨能力。

**表 4**　高阻层电阻率变化引起的最大相对误差

**Table 4**　Maximum relative error caused by resistivity of high-resistivity layer

| 序号 | $\rho_2$/(Ω·m) | WFEM 最大相对误差/% |
|---|---|---|
| 1 | 200 | 9.41 |
| 2 | 300 | 12.94 |
| 3 | 400 | 14.80 |
| 4 | 500 | 15.94 |
| 5 | 600 | 16.71 |
| 6 | 700 | 17.26 |
| 7 | 800 | 17.68 |
| 8 | 900 | 18.01 |
| 9 | 1 000 | 18.28 |




(a) WFEM; (b) CSAMT

**图 5**　高阻层电阻率对视电阻率的影响

**Fig.5**　Effect of risistivity of high-resistivity layer on apparent resistivity

### 2.3　围岩电阻率变化

对于如图 1 所示的模型，偶极距 d$L$=1.5 km，偶极子到测线垂直距离 $\overline{OS}$ =4 km，层厚 $h_1$=100 m，层厚 $h_2$=4 m，夹角 $\varphi$ 满足 $\tan\varphi = 2$，电流 $I$=10 A，频率 $f_{\min}$=$10^{-2}$ Hz，$f_{\max}$=$10^4$ Hz，以等对数间隔取 60 个值，背景电阻率 $\rho_1$=50, 100, 500, 1 000, 5 000, 10 000 Ω·m，薄层电阻率依次对应 $\rho_2$=5, 10, 50, 100, 500, 1 000 Ω·m，二者保持 10 倍差异。围岩电阻率的影响见图 6，围岩电阻率变化引起的最大相对误差见表 5。

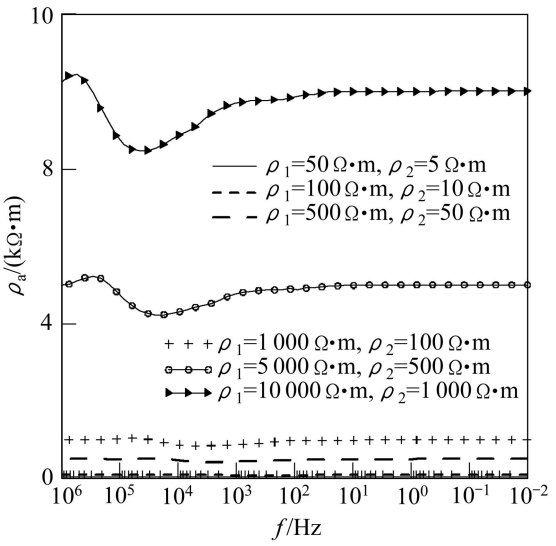



**图 6**　围岩电阻率对视电阻率的影响

**Fig.6**　Effect of resistivity of surrounding rock on apparent resistivity

**表 5** 围岩电阻率变化引起的最大相对误差

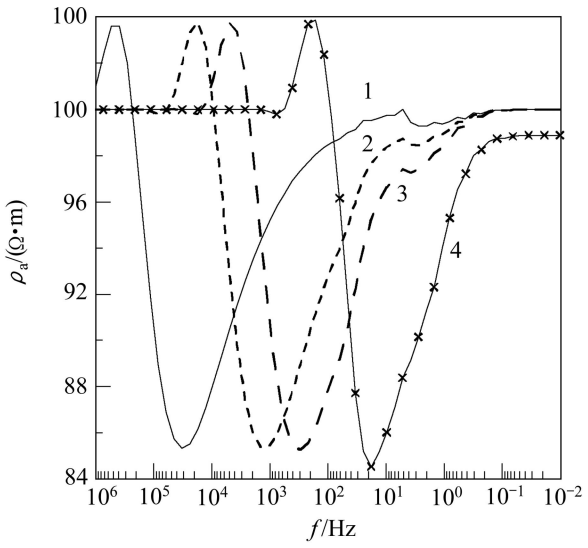
**Table 5** Maximum relative error caused by resistivity of surrounding rock

| 序号 | 对应频率/Hz | $\rho_1$/(Ω·m) | 最大相对误差/% |
|---|---|---|---|
| 1 | 218 | 50 | 15.42 |
| 2 | 408 | 100 | 15.43 |
| 3 | 1 941 | 500 | 15.42 |
| 4 | 3 625 | 1 000 | 15.37 |
| 5 | 23 598 | 5 000 | 15.38 |
| 6 | 44 062 | 10 000 | 15.42 |

从图 6 和表 5 可以看出：当模型层厚、围岩与薄层的电阻率差异保持不变时，广域电磁法对薄层的分辨能力基本不变，但是，探测到薄层所对应的频率将随围岩电阻率的增大而相应增高。高阻薄层情况下的特点与此相同。

### 2.4 薄层埋深变化

对于如图 1 所示的模型，偶极距 d$L$=1.5 km，偶极子到测线垂直距离 $\overline{OS}$ =4 km，围岩电阻率 $\rho_1$=100 Ω·m，薄层电阻率 $\rho_2$=50 Ω·m，夹角 $\varphi$ 满足 $\tan\varphi=2$，电流 $I$=10 A，频率 $f_{\min}=10^{-2}$ Hz，$f_{\max}=10^{4}$ Hz，以等对数间隔取 60 个值，层厚 $h_1$=10, 50, 100, 500 m，中间层厚 $h_2$=4, 20, 40, 200 m，二者保持 2.5 倍差异，结果见图 7 和表 6。




1—$h_1$=10 m, $h_2$=4 m; 2—$h_1$=50 m, $h_2$=20 m; 3—$h_1$=100 m, $h_2$=40 m; 4—$h_1$=500 m, $h_2$=200 m

**图 7** 薄层埋深对视电阻率的影响

**Fig.7** Effect of buried depth of thin layer on apparent resistivity

**表 6** 薄层埋深变化引起的最大相对误差

**Table 6** Maximum relative error caused by buried depth of thin layer

| 序号 | 对应频率/Hz | $h_1$/m | 最大相对误差/% |
|---|---|---|---|
| 1 | 32 246 | 10 | 14.67 |
| 2 | 1 421 | 50 | 14.63 |
| 3 | 298 | 100 | 14.74 |
| 4 | 18 | 500 | 15.45 |

从图 7 和表 6 可以看出：在探测深度以内，当围岩与薄层的电阻率不变、埋深与薄层厚度比值保持不变时，广域电磁法对薄层的分辨能力基本不变，但是，探测到薄层所对应的频率将随埋深的增大而相应降低。高阻薄层情况下的特点与此相同。可见：广域电磁法的探测深度与地下介质的电阻率和电磁场频率有关，频率越低，探测深度越大，地下介质表层电阻率越大，探测深度越大。

## 3 广域电磁法薄层反演

反演过程如 1.3 节所述。每次新的模型修改量求出之后，要进行再次正演，然后，用该正演结果和原始数据进行拟合，若拟合误差达到精度要求，则所得模型即为最终反演结果，此处拟合误差 $r_{\text{ms}}$ 计算公式为

$$r_{\text{ms}}=\sqrt{\Delta\boldsymbol{d}^{\text{T}}\Delta\boldsymbol{d}/n_f} \tag{15}$$

其中：$\Delta\boldsymbol{d}$ 为实际观测数据的对数值与模型正演数据对数值的差；$\Delta\boldsymbol{d}^{\text{T}}$ 为$\Delta\boldsymbol{d}$ 的转置；$n_f$为频点个数。

### 3.1 低阻层

对于如图 1 所示的模型，偶极距 d$L$=1.5 km，偶极子到测线垂直距离 $\overline{OS}$ =4 km，夹角 $\varphi$ 满足 $\tan\varphi=2$，电流 $I$=10 A，频率 $f_{\min}=10^{-2}$ Hz，$f_{\max}=10^{4}$ Hz，以等对数间隔取 60 个值。表 7 所示为正演模型以及 WFEM 和 CSAMT 反演的结果，反演初始值只有 $\rho_2$ 与正演模型的不一致。这 2 种方法采用的反演步骤完全一致，反演设定的最大迭代次数为 20，当拟合均方根误差小于 0.05 时迭代终止。从表 7 可以看出：当 $\rho_2$=5 Ω·m 和 $\rho_2$=15 Ω·m 时，初值与真值相对误差为 50%，这 2 种情况的反演结果都接近于真值；CSAMT 的反演结果略好于 WFEM 的反演结果，但迭代次数多；当 $\rho_2$=20 Ω·m 时，反演初值为真值 2.0 倍，WFEM 的反演结果明显比 CSAMT 的反演结果好，且反演收敛速度快；当 $\rho_2$=22 Ω·m 时，初值为真值的 2.2 倍，CSAMT 的反演严重失真，WFEM 的反演结果依旧接近真值。

图 8 所示为 $\rho_2$=5 Ω·m 时，这 2 种方法的反演拟合误差曲线。从图 8 可看出：CSAMT 的拟合误差要大于 WFEM 的拟合误差；广域电磁法的反演收敛速度快、稳定，并且能反映 CSAMT 不能反演出的特征。

### 3.2 高阻层

计算中，薄层电阻率 $\rho_2$=1 000 Ω·m。其他参数均与 3.1.1 中的一致。2 种方法采用的反演步骤也完全一致，最大迭代次数和迭代终止条件与前述的一致。从表 8 可以看出：二者反演结果都正确反映了地下真电阻率，但广域电磁法反演收敛要比 CSAMT 收敛快。$\rho_2$ 初值选取离真值远，迭代次数增多。高阻薄层反演拟合误差见图 9。图 9 所示为 $\rho_2$=200 Ω·m 时，这 2 种方

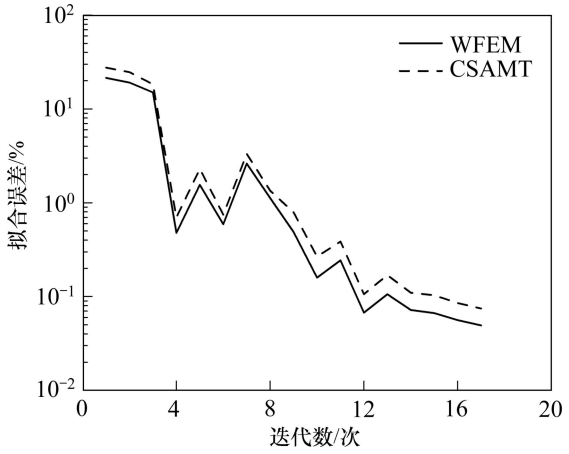



**图 8**　低阻薄层反演拟合误差

**Fig.8**　Root mean square error of inversion for low resistivity layer

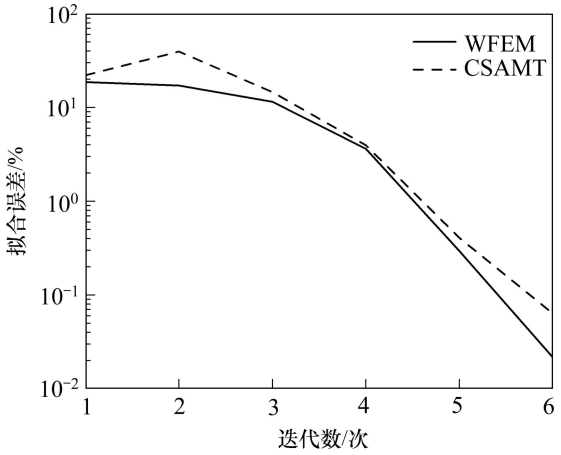



**图 9**　高阻薄层反演拟合误差

**Fig.9**　Root mean square error of inversion for high resistivity layer

**表 7**　低阻层的反演结果

**Table 7**　Inversion results of low-resistivity layer

| 参数 | $\rho_2$ 初值 | $\rho_2$=5 Ω·m | | $\rho_2$=150 Ω·m | | $\rho_2$=20 Ω·m | | $\rho_2$=22 Ω·m | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT |
| $\rho_1$/(Ω·m) | 100 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 95.53 |
| $\rho_2$/(Ω·m) | 10 | 12.68 | 11.69 | 12.52 | 11.65 | 10.77 | 6.70 | 8.16 | 2.98 |
| $\rho_1$/(Ω·m) | 100 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 97.12 |
| $h_1$/m | 100 | 99.48 | 99.67 | 99.51 | 99.68 | 99.84 | 100.62 | 100.37 | 653.40 |
| $h_2$/m | 4 | 5.24 | 4.77 | 5.17 | 4.76 | 4.34 | 2.58 | 3.20 | 0.54 |
| 迭代数/次 | | 17 | 20 | 7 | 8 | 6 | 20 | 7 | 20 |

**表 8**　高阻层的反演结果

**Table 8**　Inversion results of high-resistivity layer

| 参数 | $\rho_2$ 初值 | $\rho_2$=5 Ω·m | | $\rho_2$=150 Ω·m | | $\rho_2$=20 Ω·m | | $\rho_2$=22 Ω·m | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT | WFEM | CSAMT |
| $\rho_1$/(Ω·m) | 100 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| $\rho_2$/(Ω·m) | 1 000 | 1 001.7 | 999.00 | 1 009.5 | 999.66 | 1 003.3 | 1 000.4 | 1 009.3 | 999.67 |
| $\rho_1$/(Ω·m) | 100 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| $h_1$/m | 100 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 99.99 | 99.95 | 100.00 |
| $h_2$/m | 33 | 32.98 | 33.00 | 32.92 | 33.00 | 32.98 | 32.99 | 32.94 | 33.00 |
| 迭代数/次 | | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 | 7 |

法的反演拟合误差曲线。从图 8 可以看出：CSAMT 的拟合过程中误差要大于 WFEM 的拟合误差，而且 CSAMT 误差曲线不是单调递减。从高阻层的反演结果也可以看出广域电磁的反演过程要比 CSAMT 的收敛速度快、稳定。

## 4 结论

(1) 随着中间层厚的相对增大、围岩与薄层电阻率差异的增大，视电阻率曲线异常越来越明显，与此同时，曲线中的假极值也相应地增大。在岩性差异较大的地区探测时要注意这一特点，以免造成误判。

(2) 当收发距为 4 km 时，对埋藏 100 m 深、与围岩电阻率差异为 10 倍的薄层，在低阻情况下，层厚为 4 m 可以有效探测；而在高阻情况下，层厚为 33 m 才可以有效探测。

(3) 当埋藏深度是厚度 2.5 倍时，围岩电阻率为低阻层电阻率 2.0 倍时才可以有效探测，而高阻层电阻率为围岩电阻率 4.0 倍时才可以有效探测。

(4) 在探测深度以内，围岩与薄层电阻率以相同倍数变化或埋藏深度与层厚以相同倍数变化时，不影响分辨能力，但探测薄层深度的频率会相应发生变化。

(5) 广域电磁法视电阻率曲线在低频段不会像 CSAMT 一样出现畸变现象，更加真实地反映了地下介质的地电信息，增强了解释可靠性。

(6) 广域电磁法的反演要比 CSAMT 的收敛速度快，反演过程也较 CSAMT 稳定。从薄层反演过程的拟合误差曲线来看，广域电磁的反演过程中拟合误差要比 CSAMT 的小。

(7) 在低阻层反演中，当电阻率初值为真值的 2.0 倍时，CSAMT 结果没有广域电磁法的好；当电阻率初值为真值的 2.2 倍时，CSAMT 反演结果严重失真，广域的结果仍反映了地下真实情况。在高阻层中，当电阻率初值是真值的 1/5 时，二者都反映了地下真实情况，广域电磁的反演收敛较快。

(8) 从上述正演和反演 2 个方面看，广域电磁法都具有较大的优势，可见广域电磁法是一种值得推广的电磁勘探方法。

**参考文献：**


[1] 安志国, 底青云. CSAMT 法对低阻薄层结构分辨能力的探讨[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(2): 32−38.
AN Zhiguo, DI Qingyun. Discussion on CSAMT' resolving power on the thin layer of low resistivity[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2006, 27(2): 32−38.

[2] 薛国强, 邓湘. 瞬变电磁法对薄层的探测能力[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 709−713.
XUE Guoqiang, DENG Xiang. Capacity of transient electro-magnetic method for detecting thin layer[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 709−713.

[3] 吴英隆. 直流电测深对高阻和低阻薄层的探测能力[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(2): 174−182.
WU Yinglong. Detectability of conductive and resistive thin layers by vertical electrical sounding[J]. Journal of Guilin College of Geology, 1994, 14(2): 174−182.

[4] 朱仁学, 周云轩, 孟令顺, 等. MT 方法对一维地质体探测能力的研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(3): 302−305.
ZHU Renxue, ZHOU Yunxuan, MENG Lingshun, et al. The study of detecting ability for 1D electrical body with MT method[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(3): 302−305.

[5] 朱庆俊, 李凤哲, 王璇. AMT 静态效应和对导电薄层分辨能力的正演模拟[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 207−211.
ZHU Qingjun, LI Fengzhe, WANG Xuan. Forward modeling for the static effect of AMT and the resolution of conductive folia[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(2): 207−211.

[6] 席振铢, 冯万杰, 李瑞雪, 等. 低阻覆盖层对高频大地电磁测深的影响[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 673−678.
XI Zhenzhu, FENG Wanjie, LI Ruixue, et al. Effect of a low-resistivity cover on high-frequency magnetotelluric sounding[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 673−678.

[7] 汪恩华, 贺振华, 李庆忠. 薄储层厚度计算新方法探索[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(1): 22−25.
WANG Enhua, HE Zhenhua, LI Qinzhong. An approach to the thickness determination of thin beds[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 23(1): 22−25.

[8] 刘百红, 郑四连, 关达. 拟声波宽带约束波阻抗反演在储层预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(6): 416−421.
LIU Baihong, ZHENG Silian, GUAN Da. Broadband constrained impedence inversion on pseudo-acoustic curve and it's application in reservoir prediction[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28(6): 416−421.

[9] 柏冠军, 吴汉宁, 赵希刚, 等. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 554−558.
BAI Guanjun, WU Hanning, ZHAO Xigang, et al. Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 554−558.

[10] 孙思敏, 彭仕宓. 地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(1): 41−48.
SUN Siming, PENG Shimi. Discussion on the factors of controlling the distribution of the reservior "sweet spots" of

Sulige Gasfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(1): 41−48.

[11] 蔡希玲, 刁文川, 周兴元, 等. 薄层反射波非零炮检距的属性特征[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 277−282, 321.
CAI Xiling, DIAO Wenchuan, ZHOU Xinyuan, et al. Attribute features of reflection on non-zero offsets in thin layers[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 277−282, 321.

[12] Li Z S, Guo X B. Predicting the distribution of thin bed reservoirs by broad frequency band seismic[J]. Applied Geophysics, 2007, 4(2): 118−126.

[13] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065−1072.
HE Jishan. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065−1072.

[14] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 34−87.
HE Jishan. Wide field electromagnetic method and pseudo-random signal method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 34−87.

[15] Kaufman A A, Keller G V. Frequency and time domain electromagnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 153−193.

[16] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 33−59.
TANG Jingtian, HE Jishan. Methods and applications of CSAMT[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 33−59.

[17] 阮百尧. 视电阻率对模型电阻率的偏导数矩阵计算方法[J]. 地质与勘探, 2001, 37(6): 39−41.
RUAN Baiyao. A generation method of the partial derivatives of the apparent resistivity with respect to the model resistivity parameter[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(6): 39−41.

[18] 黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑. 有限单元法三维电阻率最小二乘反演中存在问题的研究[J]. 地质与勘探, 2004, 40(4): 70−75.
HUANG Junge, RUAN Baiyao, BAO Guangshu. Research on 3-D resistivity least-square inversion using the finite method[J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(4): 70−75.

[19] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992: 18−33.
NIU Zhilian. The theory of time-domain electromagnetic methods[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1992: 18−33.

(编辑　陈灿华)