

付长民,底青云,许诚等. 电离层影响下不同类型源激发的电磁场特征. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3958-3968, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 008.

Fu C M, Di Q Y, Xu C, et al. Electromagnetic fields for different type sources with effect of the ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3958-3968, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 008.

电离层影响下不同类型源激发的电磁场特征

付长民,底青云,许 诚,王妙月

中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院工程地质力学重点实验室,北京 100029

摘 要 大地电磁法(MT)和可控源音频大地电磁法(CSAMT)虽然在多种勘探领域均得到了广泛的应用,但是也存在着一些问题. 于是结合了这两种勘探方法的优点,一种采用固定的大功率源进行电磁波发射,在全国范围内进行电磁信号接收的人工源电磁法得到了发展. 此方法中收发距可达上千公里,在此大尺度范围内如何保证电磁信号的强度成为一个关键问题,而其中发射源的类型是决定着信号强度的重要因素. 当收发距很大时,电离层的存在将影响到电磁信号的传播,为了探讨适合于大功率固定源方法的发射源类型,本文将大功率固定源方法模型抽象为地-电离层模型,研究电离层影响下的三维积分方程法,其中地-电离层模式背景模型的格林函数用波数域中的层矩阵法获得. 利用此正演方法模拟对比了发射源分别为水平长线源、环状源和 L 型源时电离层影响下的电磁场传播特征,并初步探讨了 L 型发射源对三维异常体的分辨能力. 综合分析认为 L 型源是较优的发射源,有利于在大功率固定源方法中进行实际应用.

关键词 “地-电离层”,不同类型激发源,大功率电磁勘探,三维积分方程

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 008

中图分类号 P319, P631

收稿日期 2012-04-06, 2012-11-28 收修定稿

Electromagnetic fields for different type sources with effect of the ionosphere

FU Chang-Min, DI Qing-Yun, XU Cheng, WANG Miao-Yue

Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract MT and CSAMT methods have been widely applied in many fields such as coal, mineral, geothermal and engineering explorations, but they still have some problems. So an EM method using a fixed large power source, such as long bipole current source, large radius circle current source or two perpendicular “L” shape long bipole current source, is beginning to take shape. The strength of the electromagnetic signal doesn't totally depend on the transmitting source. The effect of ionosphere on the electromagnetic (EM) field should be considered when observation is carried out at a very far location away from the source. In order to find the characteristics of EM fields induced by different type sources, we have made some modelings of typical models, and found that the “L” shape source is flexible and reliable, and is an optimal source.

Keywords Earth-ionosphere model, Different source, Large scale electromagnetic prospecting, Integral Equation Method

基金项目 国家公益性专项 SinoProbe 子课题“地面电磁探测(SEP)系统研制”(201011079)、中国科学院工程地质力学重点实验室开放基金项目(KLEG201105)和国家自然科学基金项目(41004053)联合资助.

作者简介 付长民,男,1982年生,博士,工程师,主要从事地球物理电磁法正反演及应用等研究. E-mail: fcm168@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

天然源大地电磁测深法(MT)与可控源音频大地电磁法(CSAMT)近年来得到了大量广泛应用,但各自也存在着某些不足^[1-8]. MT法的可测范围和可测深度都很大,但由于采用天然场源,信号强度比较弱,容易受到各种干扰的影响,所以在测量时必须增加迭加次数,从而观测时间长,工作效率较低. 采用人工场源的CSAMT方法信号强度虽然较大,但在实际野外工作中源的布设比较麻烦,当工区地形复杂时,有时很难找到合适的发射源位置. 另外此方法目前的探测深度仅为1~2 km,难以满足深部勘探的需求.

于是,结合了MT与CSAMT两者方法的优点,一种称为“WEM”的大功率固定源电磁勘探方法得到了发展. 这一方法的基本思路是在高电阻区域建设一个固定的大功率电磁信号发射源,源的尺度可达上百公里,能产生覆盖全国范围的高信噪比电磁场信号. 通过多台观测设备组成二维观测剖面或三维观测阵列,在勘探区域可以获得密集的多次覆盖电磁数据,从而可在保持传统人工源电磁法分辨率的基础上,将探测深度延伸至10 km深. 方法可以应用于多种勘探领域,可服务于地震预报、资源探测、电性结构普查等^[9-14].

对于WEM方法来说,要保证大功率固定源产生的电磁信号在全国范围均有较高的信噪比,发射源类型的确定是一个重要的环节,对不同类型源所产生的电磁信号进行数值模拟分析,是确定发射源类型的有效手段.

传统的CSAMT等可控源电磁方法,源的功率相对较小,勘探的收发距一般在几十公里以内,在进行数值模拟时仅考虑空气层及大地层即可. 而对于WEM方法,由于采用大尺度大功率源,收发距离可达上千公里,在如此远距离上接收到的电磁信号将受到电离层的影响. 电离层影响下的地表电磁场的特征虽有一些相关文献发表,但多讨论的为线性发射源的情况^[15-17]. 本文将在此基础上,将发射源的类型分别设置为水平长线型、环状圆形和L型源,建立包括有电离层、空气层和大地层的“地-电离层”模型,使用层矩阵积分方程法^[18-30]进行大功率大收发距电离层影响下的电磁场特征正演模拟,对比分析各种发射类型源的优缺点,讨论有利于WEM方法发射源的类型.

2 方法原理

目前电磁场的正演方法主要有微分法和积分法,微分方法中的频域有限元和有限差分等方法需要网格化所有的研究区域,当区域不是很大,或者研究区虽然比较大,但电性结构比较接近于均匀介质的时候,可以采用粗网格的方法. 但是当研究区域很大或者研究区域的电性结构不是很均匀时,频率域中的有限元方程组或有限差分方程组的方程数目就会变得很大,以至于不能够得到理想的解.

自20世纪90年代以来,由于具有仅需在异常区进行剖分的优点,3D电磁场积分方法取得了迅速的发展. 此方法将场表示为正常场与异常场之和,如下所示:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^b + \mathbf{E}^a = \mathbf{E}^b + \mathbf{G}_E(\Delta\sigma\mathbf{E}),$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^b + \mathbf{H}^a = \mathbf{H}^b + \mathbf{G}_H(\Delta\sigma\mathbf{E}).$$

其中 $\Delta\sigma$ 是异常电导率, \mathbf{G}_E 和 \mathbf{G}_H 是电场格林算子和磁场格林算子,表示格林函数与其变量 $\Delta\sigma\mathbf{E}$ 乘积的三维积分.

在三维积分方程法中,格林函数的计算是一个关键,其计算精度影响着最终结果的精度. 本文利用了计算层状介质电磁场的层矩阵方法^[18],进行适合大功率固定源电离层、空气层、固体层耦合情况下水平层状全空间电磁波理论格林函数的计算. 层矩阵法从麦克斯韦方程组出发,利用二维傅里叶变换关系,将空间 (x, y, z) 域中的公式转换到波数 (k_x, k_y, z) 域,在波数域中进行公式的推导,建立边界条件,得到波数域电磁场值,然后通过二维傅里叶反变换得到空间域的结果,并将计算结果植入到三维积分方程中,建立起可以模拟“地-电离层”模型的层矩阵三维积分方程法.

该方法可以计算均匀层状大地背景下各种三维异常体模型的正演场,但为了简化问题,重点研究不同类型源的电磁场基本特征,本文仅主要计算给出大地为均匀介质模型时的情况,对比分析得到各种源的优缺点. 最后将针对L型源进行三维异常体数值模拟,计算给出地表接收到的卡尼亚视电阻率,对大功率固定L型发射源在大尺度收发距情况下对三维异常体的分辨能力进行初步探讨.

3 不同类型源所激发的电磁场特征

3.1 方法可靠性验证

为了确定方法程序的可靠性,将首先进行程序

计算结果与现有可靠可控源电磁法程序的对比. 正演模型采用的是电离层、空气层和大地层三层结构的地-电离层模型, 如图 1 所示. 发射源为中心位于原点的 x 方向线源, 长度为 2 km, 发射电流 100 A, 发射频率 1 Hz.

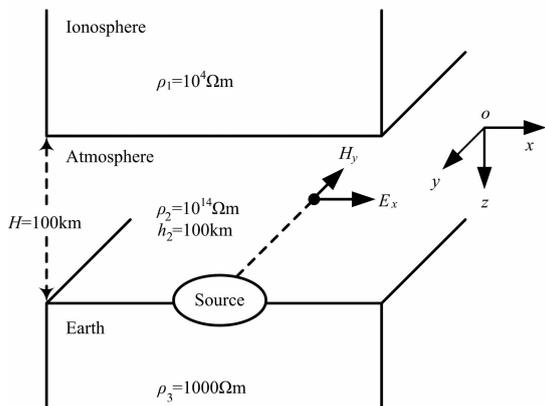


图 1 “地-电离层”模型
Fig. 1 Earth-ionosphere model

图 2 为 y 轴位置上接收到的电场 E_x 和磁场 H_y 分量曲线, 图 3 给出的是坐标为 $(0, 100000 \text{ m}, 0)$ 的接收点随频率改变的视电阻率曲线. 图中灰色实线代表的是利用经典 CSAMT 法解析公式计算所得的结果, 黑色实线和虚线为不考虑电离层和考虑电离层时用层矩阵三维积分方程法计算所得的结果. 可以看到, 在这种小收发距情况下, 由于电离层的影响可以忽略, 三维积分方程法计算的“地-电离层”模型结果与无电离层的结果及解析解基本一致. 但仔细观察也可发现在图 2 中收发距小于 5 km 左右时曲线稍有差别, 经过分析认为这是由于经典 CSAMT 法公式使用的是电偶极子源, 在收发距较小或发射

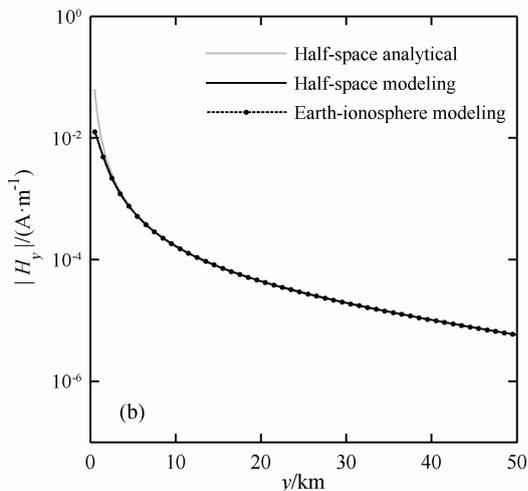
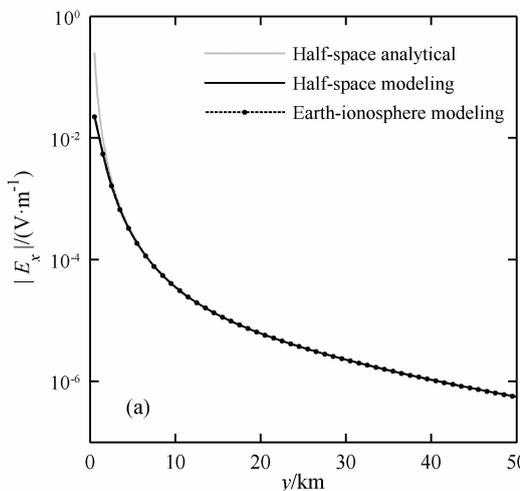


图 2 半空间模型与地-电离层模型场值对比

Fig. 2 Comparison of half-space model and Earth-ionosphere model

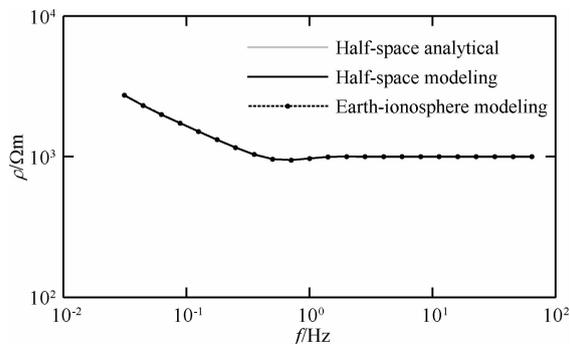


图 3 半空间模型与地-电离层模型视电阻率结果对比
Fig. 3 Comparison of apparent resistivity

源较大时会产生误差, 而三维层矩阵积分方程法严格计算了线源长度, 其场值的计算结果更加精确.

上述对比结果表明了层矩阵三维积分方程法程序对于空间尺度小的模型是可靠的. 下面将利用它进行不同类型固定源的大收发距“地-电离层”模型电磁数值计算. 在进行场强特征对比模拟的计算中均采用图 1 所示模型, 发射电流 100 A, 发射频率 0.1 Hz.

3.2 长线源电磁场衰减特征

首先进行发射源为水平长线源的数值模拟计算, 线源长度 100 km, 置于 x 轴上, 中心位于原点. 分别计算给出不考虑电离层的“半空间”模型和考虑了电离层的“地-电离层”模型时接收位置分别位于 x 轴和 y 轴上的电磁场衰减曲线. 由于两坐标轴位置为长线源激发的电场 E_y 分量和磁场 H_x 分量的低值区, 所以下面仅给出电场 E_x 分量和磁场 H_y 分量的场值曲线, 如图 4 和图 5 所示.

可以看到, 在收发距相对较近, 即在 x 轴上小于 300 km 和 y 轴上小于 500 km 的位置, 考虑和不

考虑电离层影响的两种模型计算结果基本相同,此时电离层影响可以忽略.但当再增加收发距后,计算了电离层影响的“地-电离层”模型场强开始大于无电离层时的情况,并且随着收发距的增加二者的差别也越大.这说明电离层的存在会增强较远距离的电磁场信号,使场强的衰减变慢,有利于在 WEM 方法中超远距离电磁信号的接收,这与已发表文献中的结论是一致的^[10,15,17].

3.3 环状源电磁场衰减特征

将图 1 中的源改为水平圆环形状,圆环中心位于原点,圆环面积为 100000 m^2 ,磁矩与前述长线源的电矩相等.由于在 x 轴上为环状源产生 E_x 和 H_y 场分量的低值区,在 y 轴上为 E_y 和 H_x 分量的低值区,所以图 6 给出的是 x 轴上 E_y 和 H_x 分量的对比曲线,图 7 给出的是 y 轴上 E_x 和 H_y 的衰减对比曲线.

从图 6 和图 7 中可以看到,当环状源的极矩与

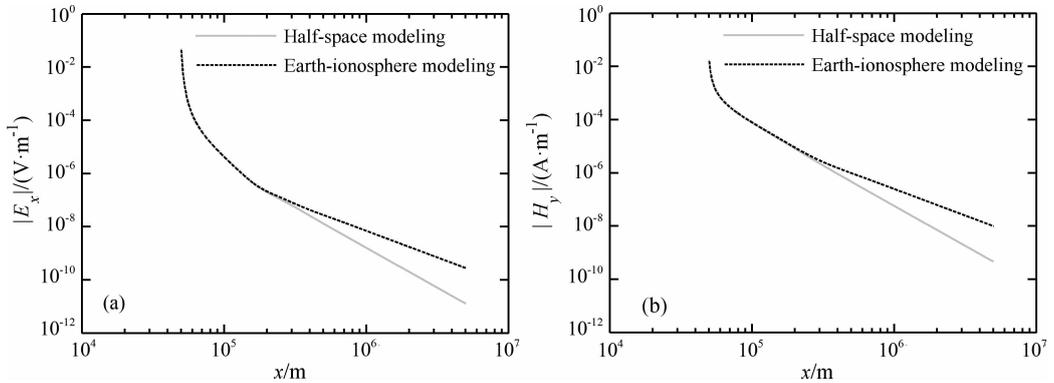


图 4 水平长线源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场 x 轴上衰减曲线

Fig. 4 Earth-ionosphere and half-space modeling results in x -axis for line source

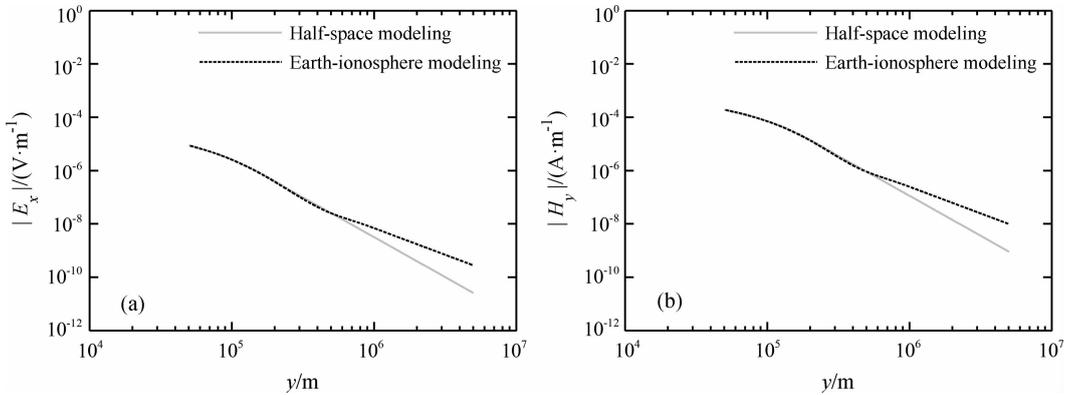


图 5 水平长线源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场 y 轴上衰减曲线

Fig. 5 Earth-ionosphere and half-space modeling results in y -axis for line source

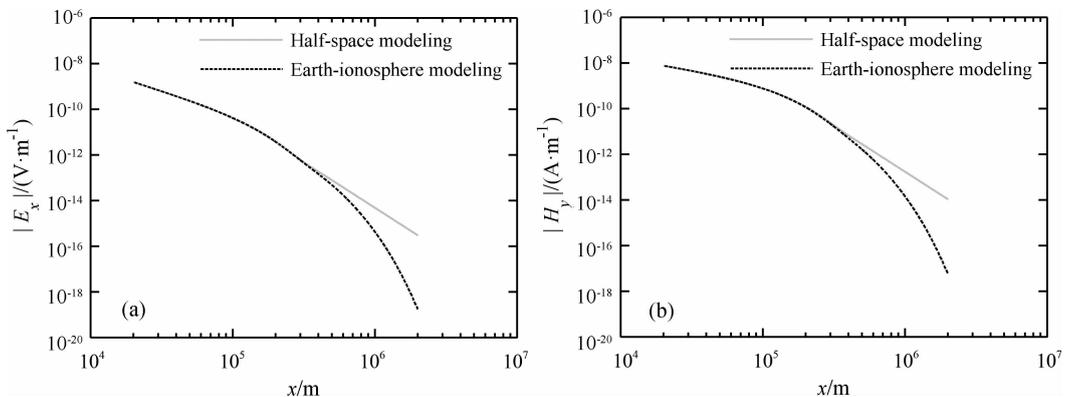


图 6 环状源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场 x 轴上衰减曲线

Fig. 6 Earth-ionosphere and half-space modeling results in x -axis for circle-line source

长线源相等时,其产生的场整体远小于前述线状源的场. 由于环形源为对称源, x 轴上的 E_y 和 H_x 分别与 y 轴上的 E_x 和 H_y 相当. 在收发距小于400 km时可忽略电离层的影响,与线状类型源不同的是,当继续增大收发距后,电离层影响下的电磁场小于无电离层时的情况,电离层的存在使环状源的场衰减加速,在远距离处环状源的场会变得很弱.

因此,在考虑电离层影响下,电性源和磁性源激发场的数值结果表明,对于水平电性源激发的场,电离层的影响是相长干涉,从而使得信号在波导区衰减很慢;而对于垂直的磁性源激发的场,电离层的影响

使得波相消干涉,从而信号大大减弱.

3.4 L型源电磁场衰减特征

将3.2中的长线发射源保持不变,并添加一条平行于 y 轴的分线源,线源长度50 km,中心坐标为 $(-50 \text{ km}, 25 \text{ km}, 0 \text{ km})$,与水平分线源组合形成L型发射源.

图8给出了L型源在 x 轴上产生的电磁场各分量值,图9给出的是 y 轴位置上的电磁场各分量值,各图均计算了L型发射源电离层存在与否时的场值结果. 从图中可以看到,由于在两坐标轴上 E_x 和 H_y 场主要由水平方向的分线源产生,垂直分线

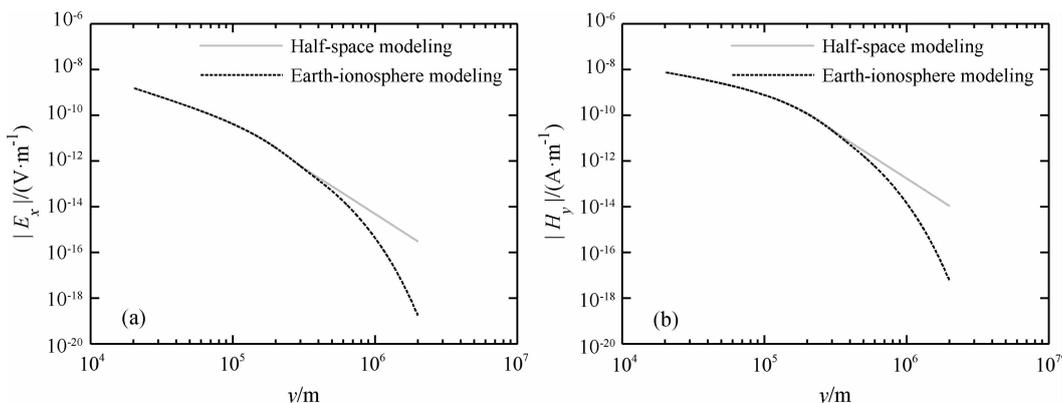


图7 环状源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场 y 轴上衰减曲线

Fig. 7 Earth-ionosphere and half-space modeling results in y -axis for circle-shape source

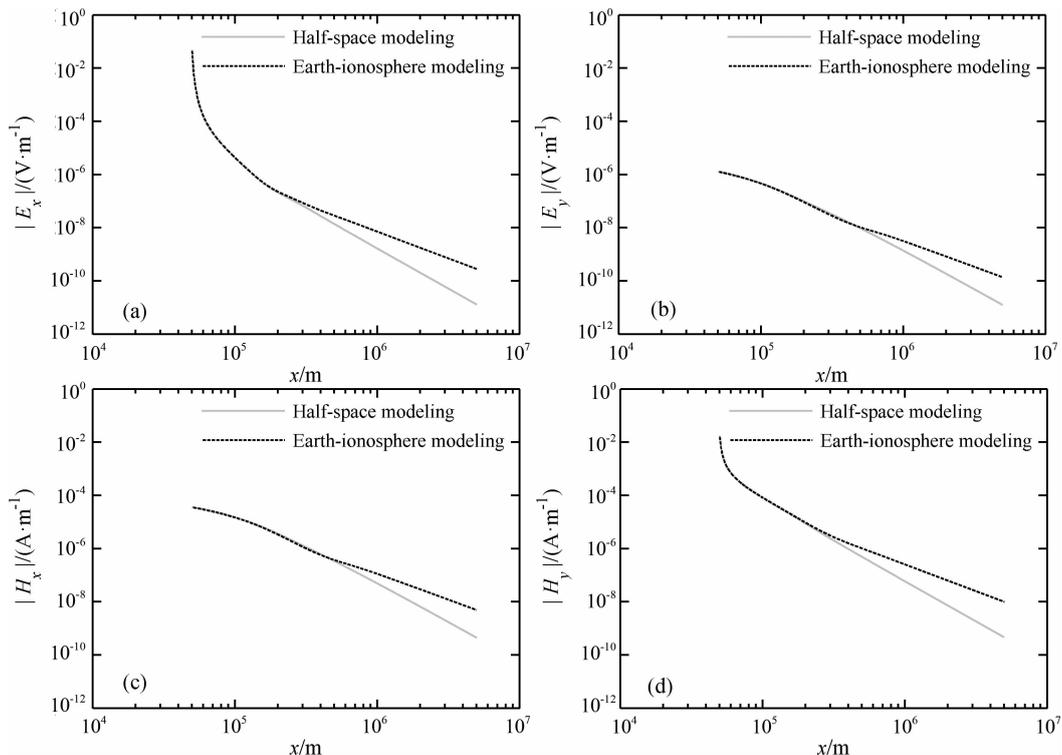


图8 L型源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场 x 轴上衰减曲线

Fig. 8 Earth-ionosphere and half-space modeling results in x -axis for L-shape source

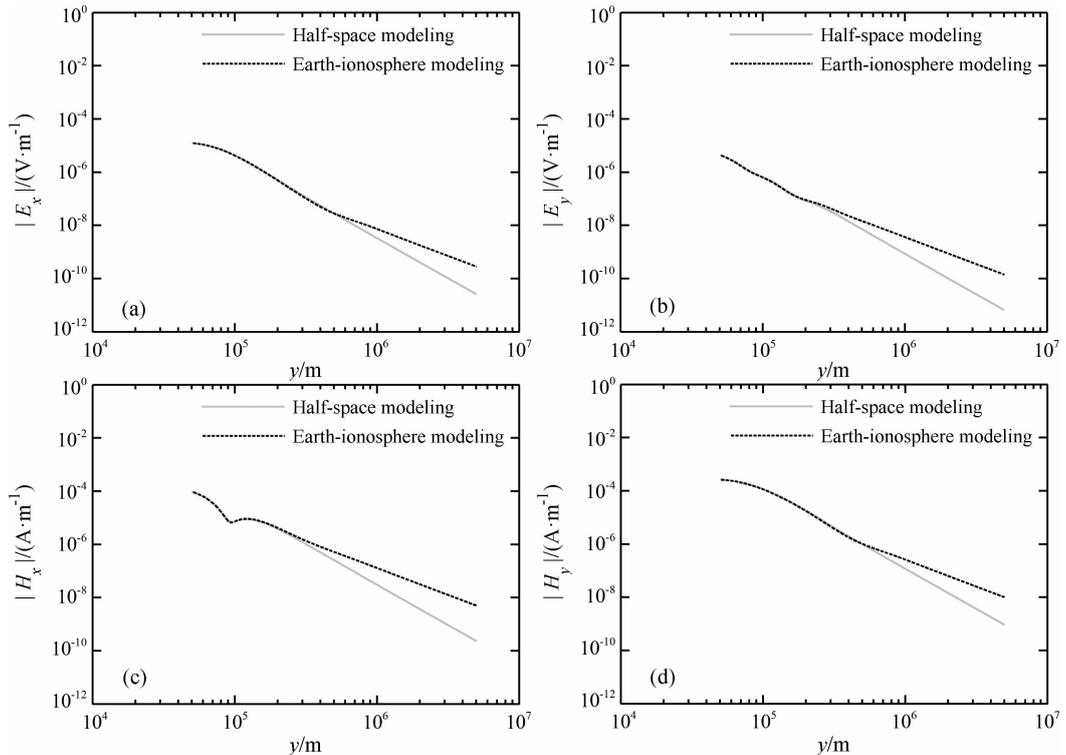


图9 L型源“地-电离层”模型与半空间模型电磁场y轴上衰减曲线

Fig. 9 Earth-ionosphere and half-space modeling results in y-axis for L-shape source

源对其贡献不大,所以L型源此两分量场强与3.2中线源的结果相差不大.而由于有了垂直发射线源的参与,L型源在两坐标轴上也出现了 E_y 与 H_x 的场分量.综合各曲线,可以看到各场值分量的特征与长线源基本相同,电离层的存在使场强各分量衰减变慢,这有利于WEM方法中的应用.

3.5 各类型源场强辐射图形

上述内容仅对某些位置的场值进行了对比,存在有一定的局限性,为了从整体上认识与分析电离层影响下的长线源、环状源及L型源的电磁场特征,下面将分别计算给出这三种源在地表上产生的电磁场 E_x 、 E_y 、 H_x 和 H_y 分量的辐射图形,如图10至12所示.

如前所述,对于水平长线源的辐射场,在 x 和 y 轴上为其场值分量 E_y 和 H_x 的低值带.在此时发射频率较低的情况下,场值 E_x 和 H_y 的低值区与两轴成 45° 斜交.对于环状源,其 E_x 和 H_y 分量关于 x 轴对称, E_y 和 H_x 分量关于 y 轴对称,各场分量随着距离的增加衰减很快,在大收发距的情况下将无法观测到有效的电磁信号.从辐射图形来看,L型源与水平长线源存在着较大的差别,虽然L型源也具有低场值带,但其产生的各场值分量整体上均优于水平线源的场.

3.6 L型源三维模型模拟

为了考察L型发射源情况下大地为三维结构时的电磁场基本特征,分析L型大功率固定源在收发距很大时对异常体的分辨能力,下面将对一个三维地质模型进行模拟,模型中L型的发射源与3.4中参数一致,将图1中的大地改为存在一个三维异常体的层状介质,如图13所示.模型中大地分为三层,从上至下电阻率分别为 $1000 \Omega\text{m}$ 、 $500 \Omega\text{m}$ 和 $4000 \Omega\text{m}$,前两层的厚度为 1000 m 和 500 m .三维异常体长和宽均为 1000 m ,厚度 100 m ,上界面距地表 1200 m ,位于大地第二层中.异常体中心投影到地表的 x 和 y 坐标均为 1000 km .

图14为地表异常体中心投影点($x=1000 \text{ km}$, $y=1000 \text{ km}$)接收到的卡尼亚视电阻率曲线.其中实线代表三维异常体的电阻率为 $500 \Omega\text{m}$,与围岩相同,即此时无异常存在,虚线代表异常体电阻率为 $100 \Omega\text{m}$,为低阻异常体,点线时异常体电阻率为 $2000 \Omega\text{m}$,为高阻异常体.可以看到当频率较高时,由于趋肤深度较小,视电阻率仅体现出了大地第一层的信息.而随着频率的降低,电磁趋肤深度增加,异常体的存在对于视电阻率的改变逐渐增强,频率越低,视电阻率的异常也就越大,而其中低阻异常体的视电阻率畸变比高阻异常体的结果更加明显.

上图仅计算了地表一个测点的结果,为了分析地表不同位置的视电阻率特征,下面将给出以异常为中心 20 km 范围内,发射频率为 0.1 Hz 和 10 Hz 时地表接收到的视电阻率分布图,如图 15 和 16 所

示.从图 15 中可以看到,三维低阻体和高阻体在地表均产生了明显的低阻与高阻异常,随着远离异常体中心在地表的投影,视电阻率均逐渐趋于层状背景的电阻率.

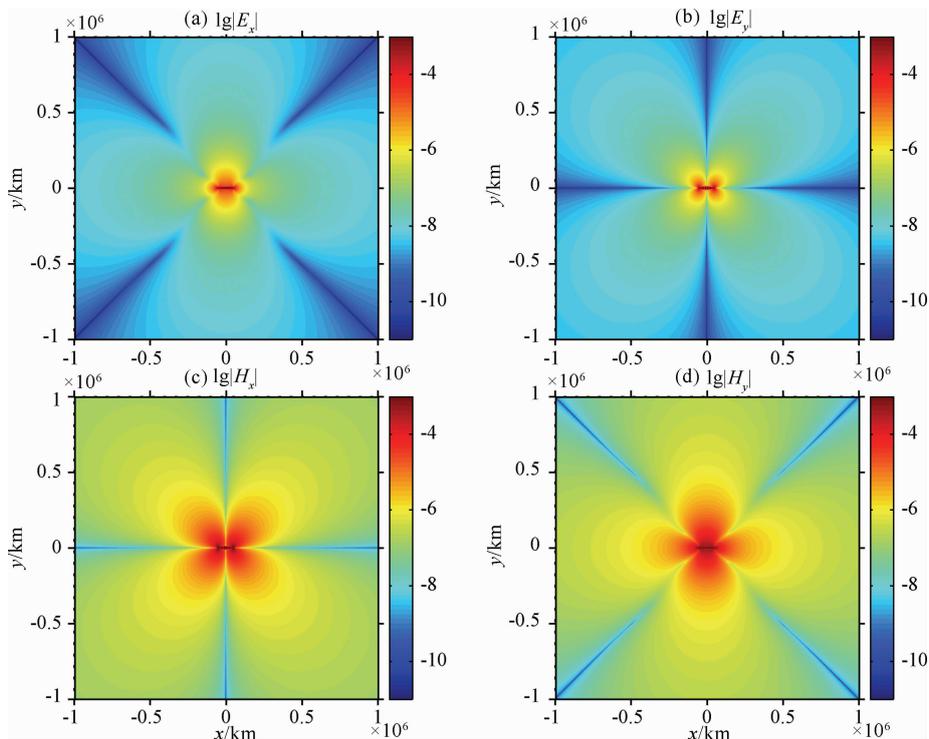


图 10 水平长线源“地-电离层”模型地表场值辐射图

Fig. 10 Radiation patterns of Earth-ionosphere model for line source

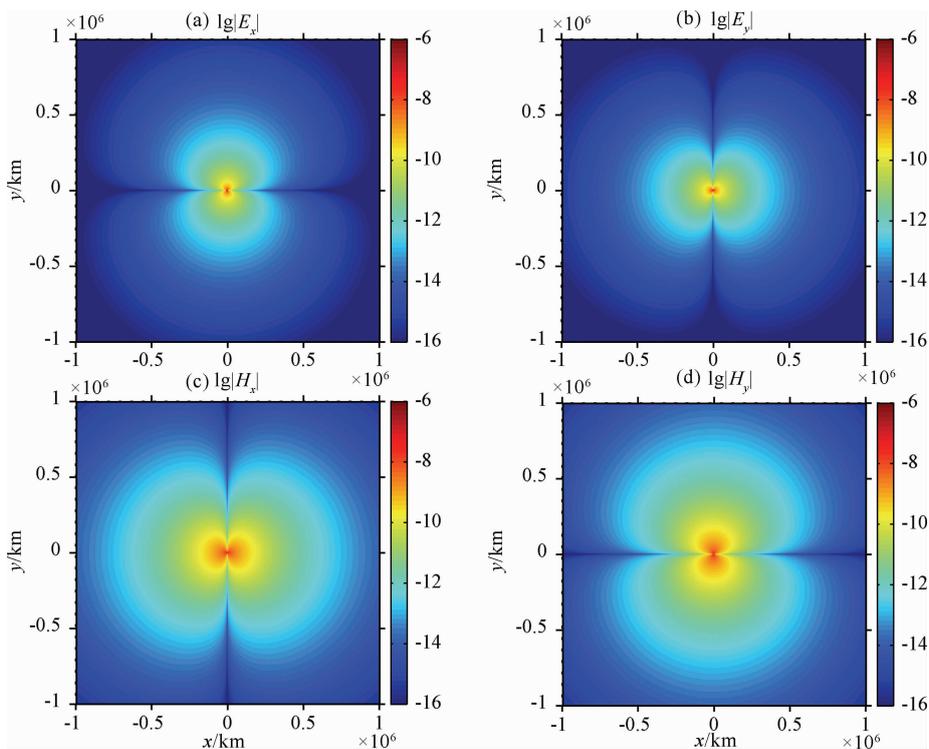


图 11 环状源“地-电离层”模型地表场值辐射图

Fig. 11 Radiation patterns of Earth-ionosphere model for circle-shape source

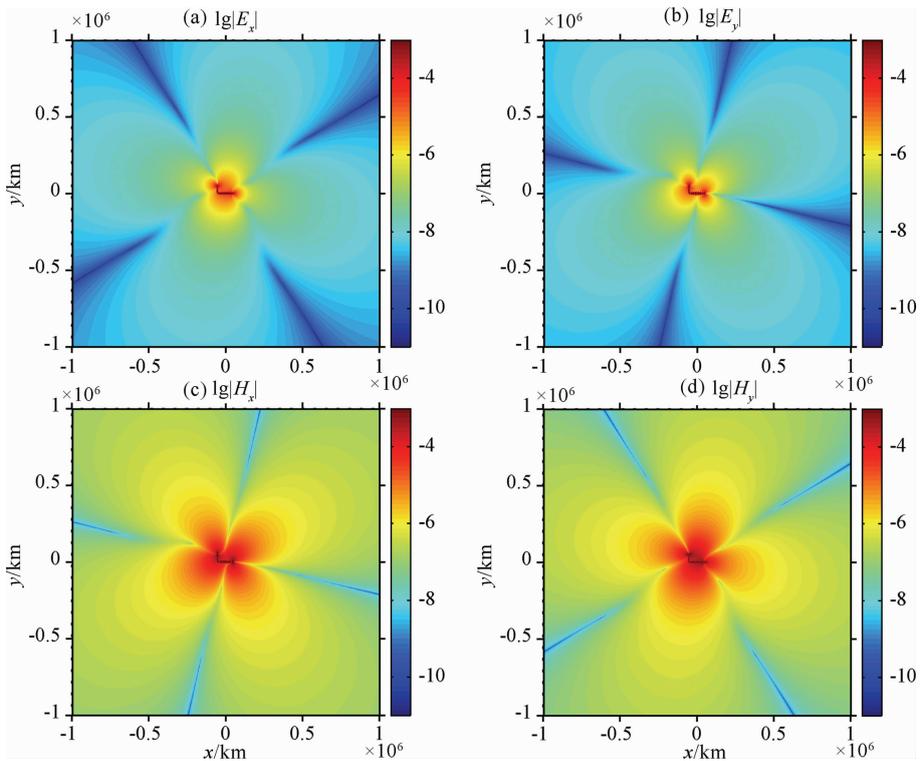


图 12 L 型源“地-电离层”模型地表场值辐射图

Fig. 12 Radiation patterns of Earth-ionosphere model for L-shape source

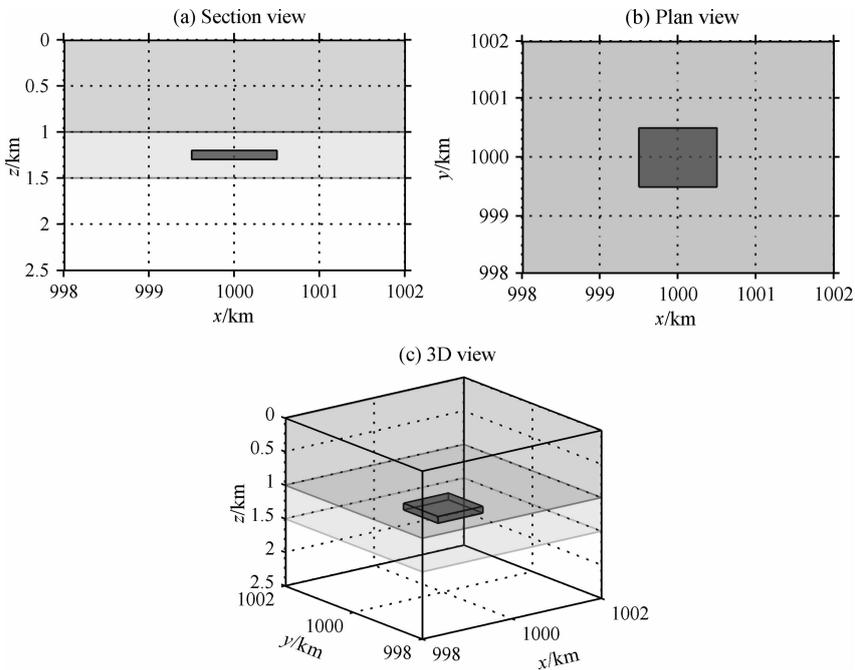


图 13 不同视角的三维大地模型

Fig. 13 3D model for forward modeling

图 16 是发射频率为 10 Hz 时的情况,此时由于频率相对较高,视电阻率代表了更浅层的地质信息,整体上视电阻率值远小于图 15 中的结果,但仍可以看出无论三维异常体是低阻还是高阻,视电阻率等值线图均对其有着较高的分辨能力。

4 讨论及结论

4.1 针对水平长线源,环状源和 L 型源三种类型的发射源,利用层矩阵三维积分方程法进行了“地-

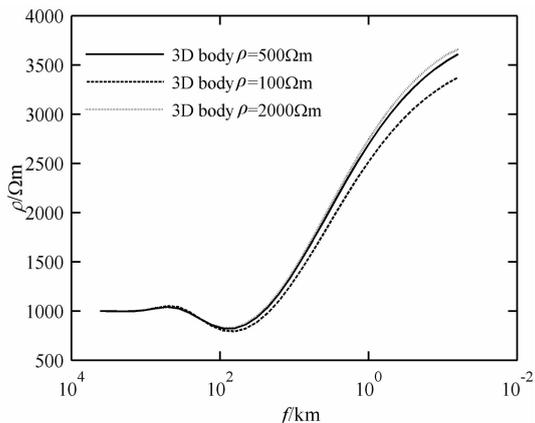


图 14 不同电阻率异常体随频率改变的视电阻率曲线

Fig. 14 Apparent resistivity for different anomalous bodies

电离层”模型的电磁场数值模拟,对比分析了 x 轴和 y 轴上三种发射源的场值曲线,并计算给出了三

种源在地表上的电磁场值辐射图。

4.2 三种发射类型源中,水平环状源无需进行接地,发射效率较高,但是当磁矩与电矩相等时其产生的电磁场较弱,并且在远距离收发距的情况下,由于电离层的影响,电磁场会大大衰减,不利于几千公里范围的电磁勘探工作。而水平长线源与 L 型发射源产生的场在近源区有较大差别,但在远区场均会由于电离层的存在衰减变慢,可在收发距很大的情况下仍能得到较强的电磁信号,其中 L 型源的场值整体上高于水平线源的场。

4.3 对 L 型发射源情况下大地存在有三维异常体的模型进行了模拟,初步分析表明在收发距为上万公里时,大功率固定 L 型源对高阻与低阻体均具有较好的分辨能力。综合分析, L 型源是较优的发射源,有利于在 WEM 方法中进行实际应用。

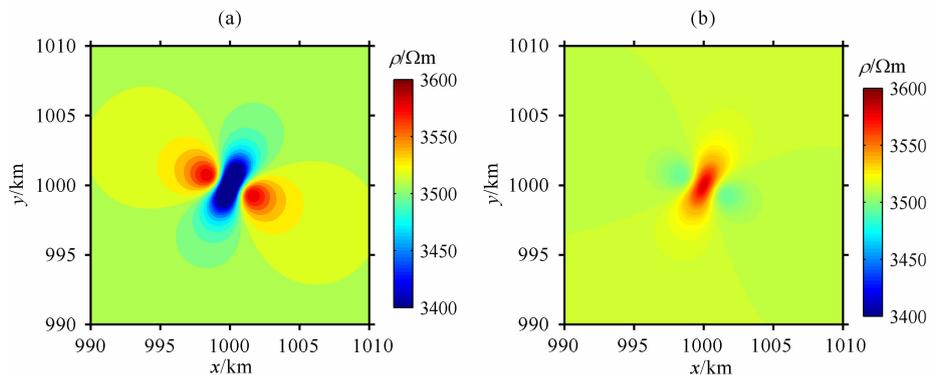


图 15 频率为 0.1 Hz 时异常体在地表的视电阻率等值线图

(a) 异常体电阻率为 100 Ωm; (b) 异常体电阻率为 2000 Ωm.

Fig. 15 3D model's apparent resistivity for 0.1 Hz

(a) Resistivity of 3D anomalous body is 100 Ωm; (b) Resistivity of 3D anomalous body is 2000 Ωm.

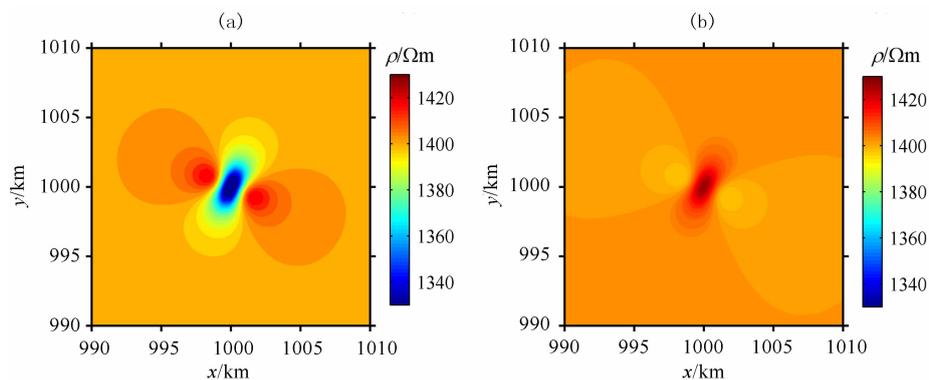


图 16 频率为 10 Hz 时异常体在地表的视电阻率等值线图

(a) 异常体电阻率为 100 Ωm; (b) 异常体电阻率为 2000 Ωm.

Fig. 16 3D model's apparent resistivity for 10 Hz

(a) Resistivity of 3D anomalous body is 100Ωm; (b) Resistivity of 3D anomalous body is 2000 Ωm.

参考文献(References)

- [1] Kaufman A, Keller G. The Magnetotelluric Sounding Method. New York: Elsevier Science Ltd, 1981.
- [2] Cagniard L. Basic Theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 1953, 18: 605-635.
- [3] 底青云, 王若等. CSAMT 数据正反演及方法应用. 北京: 科学出版社, 2008.
Di Q Y, Wang R, et al. CSAMT Forward Modeling and Inversion and Its Application (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 汤井田, 何继善著. 可控源音频大地电磁法理论及其应用. 长沙: 中南工业大学出版社, 2005.
Tang J T, He J S. Controlled Source Electromagnetic Method and Its Applications (in Chinese). Changsha: Chinese Industry University Press, 2005.
- [5] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用. 北京: 科学出版社, 1999.
Shi K F. The Theory and Applications of Control Source Audio Frequency Magnetotellurics Method (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999.
- [6] 底青云, 王妙月, 石昆法等. 高分辨 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 744-748.
Di Q Y, Wang M Y, Shi K F, et al. CSAMT research survey for preventing water flooding in mining. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(5): 744-748.
- [7] 底青云, 王光杰, 安志国等. 南水北调西线千米深长隧洞围岩构造地球物理勘探. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1836-1842.
Di Q Y, Wang G J, An Z G, et al. Geophysical exploration over long deep shield tunnel for the West Route Project. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1836-1842.
- [8] 底青云, 伍法权, 王光杰等. 地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20): 3631-3638.
Di Q Y, Wu F Q, Wang G J, et al. Geophysical exploration over long deep tunnel for the first line project of diverging water from Yangtze River to Yellow River. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2005, 24(20): 3631-3638.
- [9] 赵国泽, 汤吉, 邓前辉等. 人工源超低频电磁波技术及其应用于首都圈地震预测的测量研究. *地学前缘*, 2003, 10(增): 248-257.
Zhao G Z, Tang J, Deng Q H, et al. Artificial SLF method and the experimental study for earthquake monitoring in Beijing Area. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10(S1): 248-257.
- [10] 卓贤军. 人工超低频电磁场场强分布及测量的研究[硕士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2005.
Zhuo X J. The research of the distribution and measurement of artificial SLF field [Master's Thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2005.
- [11] 卓贤军, 赵国泽. 一种资源探测人工源电磁技术. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(增): 114-117.
Zhuo X J, Zhao G Z. A new electromagnetic method with artificial source in resources exploration. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, 39(增): 114-117.
- [12] 卓贤军, 赵国泽, 底青云等. 无线电磁法(WEM)在地球物理勘探中的初步应用. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1921-1924.
Zhuo X J, Zhao G Z, Di Q Y, et al. Preliminary application of WEM in geophysical exploration. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(6): 1921-1924.
- [13] 卓贤军, 陆建勋. “极低频探地工程”在资源探测和地震预测中的应用与展望. *舰船科学技术*, 2010, 32(6): 3-7.
Zhuo X J, Lu J X. Application and prospect of WEM to resource exploration and earthquake prediction. *Ship Science and Technology* (in Chinese), 2010, 32(6): 3-7.
- [14] 卓贤军, 张佳炜. 极低频发射天线场地等效电阻率的计算. *舰船电子工程*, 2009, 29(8): 192-195.
Zhuo X J, Zhang J W. A calculating method of the effective resistivity for the extremely low frequency(ELF) transmitting antenna site. *Ship Electronic Engineering* (in Chinese), 2009, 29(8): 192-195.
- [15] 底青云, 王妙月, 王若等. 长偶极大功率可控源电磁波响应特征研究. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1917-1928.
Di Q Y, Wang M Y, Wang R, et al. Study of the long bipole and large power electromagnetic field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1917-1928.
- [16] 底青云, 王光杰, 王妙月等. 长偶极大功率可控源激励下目标体电性参数的频率响应. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 275-280.
Di Q Y, Wang G J, Wang M Y, et al. Frequency response characteristics of target electric property with long bipole large power control source. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(1): 275-280.
- [17] 李帝铨, 底青云, 王妙月等. 电离层-空气层-地球介质耦合下大尺度大功率可控源电磁波响应特征研究. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 411-420.
Li D Q, Di Q Y, Wang M Y. Study of large scale large power control source electromagnetic with “Earth-ionosphere” mode. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(2): 411-420.
- [18] 付长民, 底青云, 王妙月. 计算层状介质中电磁场的层矩阵法. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 177-188.
Fu C M, Di Q Y, Wang M Y. Calculate electromagnetic fields in stratified medium with layer-matrix method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(1): 177-188.
- [19] Raiche A P. An integral equation approach to three-dimensional modelling. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1974, 36(2): 363-376.
- [20] Dmitriev V I, Nesmeyanova N I. Integral equation method in

- three-dimensional problems of low-frequency electrodynamics. *Computational Mathematics and Modeling*, 1992, 3(3): 313-317.
- [21] Wannamaker P. Advances in three-dimensional magnetotelluric modeling using integral equations. *Geophysics*, 1991, 56(11): 1716-1728.
- [22] Xie G, Li J, Majer E, et al. 3-D electromagnetic modeling and nonlinear inversion. *Geophysics*, 2000, 65(3): 804-822.
- [23] Zhdanov M S. *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*. New York: Elsevier Science Ltd, 2002.
- [24] Zhdanov M S. *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*. New York: Elsevier Science, 2009.
- [25] Habashy T M, Groom R W, Spies B R. Beyond the born and rytov approximations: a nonlinear approach to electromagnetic scattering. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B2): 1759-1775.
- [26] Tseng H, Lee K, Becker A. 3D interpretation of electromagnetic data using a modified extended born approximation. *Geophysics*, 2003, 68(1): 127-137.
- [27] Zhdanov M S, Fang S. Quasi-linear approximation in 3-D electromagnetic modeling. *Geophysics*, 1996, 61(3): 646-665.
- [28] Zhdanov M S, Fang S. Quasi-linear series in three-dimensional electromagnetic modeling. *Radio Science*, 1997, 32(6): 2167-2188.
- [29] Zhdanov M S, Dmitriev V I, Fang S, et al. Quasi-analytical approximations and series in electromagnetic modeling. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1746-1757.
- [30] Zhdanov M S, Tartaras E. Three-dimensional inversion of multitransmitter electromagnetic data based on the localized quasi-linear approximation. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 506-519.

(本文编辑 刘少华)