

# 大地电磁地形校正

## —以镇巴区块为例

陈高<sup>1,2</sup>, 王书明<sup>1</sup>, 王家映<sup>1</sup>, 周宗良<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石油化工股份有限公司南方勘探开发分公司, 云南 昆明 650200; 3. 中国石油大港油田公司地质研究院, 天津 300280)

**摘要:**地形起伏大会严重影响大地电磁测深的解释效果, 不同的地形特征将会造成不同的影响, 可以采用一定的校正方法压制或消除这种影响。本文以镇巴区块为例研究了地形影响的特点, 实现了地形校正。解释结果清楚地显示出镇巴区块几条主要断裂以及存在推覆体, 与该区构造特征基本一致。

**关键词:** 大地电磁; 地形校正; 断裂; 推覆体; 镇巴区块

中图分类号: P631.3<sup>+</sup>25 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)01-0006-05

## Correction of Topography in Magnetotelluric Sounding

### —Taking Zhenba Area as Example

CHEN Gao<sup>1,2</sup>, WANG Shu-ming<sup>1</sup>, WANG Jia-ying<sup>1</sup>, ZHOU Zong-liang<sup>3</sup>

(1. China University of Geology, Wuhan 430074, China;

2. China Petroleum & Chemical Corporation Prospecting and Exploitation Branch, Kunming 650200, China;

3. China Petroleum Dagang Oil Field Corporation Geophysical Academe, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Topography with great rising and falling could affect the interpretation result of magnetotelluric sounding strongly, and different topographic characteristic could cause different effects. But the effects can be suppressed or eliminated by using certain correction method. In this paper, taking Zhenba area as example, characteristic of the topographic effects is studied, and topography correction is carried out successfully. The interpretation result reveals some main faults and nappe clearly, accord with the tectonic structure of this area well.

**Key words:** Magnetotelluric; Topography correction; Fault; Nappe; Zhenba area

## 0 引言

镇巴工区(图1)位于陕西省、四川省、重庆市三省市交界处,包括陕西省的镇巴县、紫阳县,四川省的通江县、万源市、宣汉县,重庆市的城口县、开县。工区地处大巴山腹地,山峦叠嶂,沟梁纵横,地形起伏较大,相对高差最大达2400 m。

镇巴区块在大地构造上属于东秦岭—大巴山逆冲推覆构造带,始于中三叠世末的印支运动。在NNE—SSW向挤压应力作用下,南秦岭拗拉槽自东向西的碰撞关闭,继而扬子陆块基底沿商丹断裂向

北滑脱、俯冲到华北陆块之下,华北陆块南缘向南仰冲,迫使南秦岭—大巴山地区盖层褶皱,并沿几个主要滑脱层反向向南逆冲到扬子克拉通之上,形成了大巴山褶皱冲断系。在其前缘(四川北部)则形成了侏罗—白垩纪的前陆盆地。

米苍山、大巴山及邻区包含了多类原型盆地的并列迭加,受不同原型盆地的时空展布控制,区内发育了多套烃源岩层系,为区内油气勘探奠定了雄厚的物质基础。通过前期的研究初步估计川东北地区

收稿日期:2005-07-25

作者简介:陈高,男(汉族),上海市人,高级工程师,现主要从事地质和地球物理综合研究。

总资源量为16 234 亿方,待发现资源量为13 275 亿方,具有巨大的勘探潜力,是南方新区勘探的有利后备基地。但大巴山、米苍山及前缘地区极为恶劣的地表条件和十分复杂的地下地质条件,使得地震资料的信噪比很低,不能满足地质解释的要求。必须结合大地电磁等其它技术方法进行攻关。

抗为<sup>[1]</sup>

$$Z = (I + P)Z_0 / (I + QZ_0) \quad (1)$$

式中  $P, Q$  为因地形影响产生的电、磁畸变张量,下标  $ij$  表示  $i$  分量地形对  $j$  方向场的影响大小; $I$  是单位矩阵; $Z_0$  是地形无起伏时区域构造的表面阻抗,即

$$Z_0 = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{vmatrix} \quad (2)$$

在均匀半空间条件下,平面电磁波向下穿透时只有水平分量,无地形起伏影响时的表面阻抗为

$$Z_0 = \begin{vmatrix} 0 & Z_{0xy} \\ -Z_{0xy} & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

因为主要讨论的是二维山谷和山峰地形,若走向和主轴方向一致,则受其影响,在主轴方向上电、磁畸变张量分别为<sup>[2]</sup>

$$P = \begin{vmatrix} P_{xx} & 0 \\ 0 & P_{yy} \end{vmatrix}, \quad Q = \begin{vmatrix} Q_{xx} & 0 \\ 0 & Q_{yy} \end{vmatrix} \quad (4)$$

把式(3)、(4)代入式(1),得

$$Z = \frac{1}{1 + Q_{xx}Q_{yy}Z_{0xy}^2} \begin{vmatrix} -(1 + P_{xx})Q_{yy}Z_{0xy}^2 & (1 + P_{xx})Z_{0xy} \\ -(1 + P_{yy})Z_{0xy} & (1 + P_{yy})Q_{xx}Z_{0xy}^2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

即

$$Z = \begin{vmatrix} Z'_{xx} & Z'_{xy} \\ Z'_{yx} & Z'_{yy} \end{vmatrix} \quad (6)$$

式中各  $Z'_i (i, j = x, y)$  不一定相同,反映出非均匀各向异性。即原来最简单的均匀半空间由于受二维地形影响变成了三维结构,这时阻抗张量的各个元素不论振幅和相位不但与地形有关,而且还随频率变化,这就是一般的地形影响特征。

若地表地形为尺度较小的局部起伏,电磁波频率相当低,致使穿透深度大于地形尺度时,畸变张量元素  $P_{ii}$  和  $Q_{ii} (i = x, y)$  将蜕变为与频率  $f$  无关的常数,而且  $Z_{0xy}^2 = \omega\mu\rho = 7.9 \times 10^{-4}f \rightarrow 0$ , 则式(5)简化为

$$Z = \begin{vmatrix} 0 & (1 + P_{xx})Z_{0xy} \\ -(1 + P_{yy})Z_{0xy} & 0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

两个极化方向的视电阻率和阻抗相位分别是

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |(1 + P_{xx})Z_{0xy}|^2 = 100(1 + P_{xx})^2 \quad (8)$$

$$\Phi_{xy} = \arg\{(1 + P_{xx})Z_{0xy}\}$$

以及

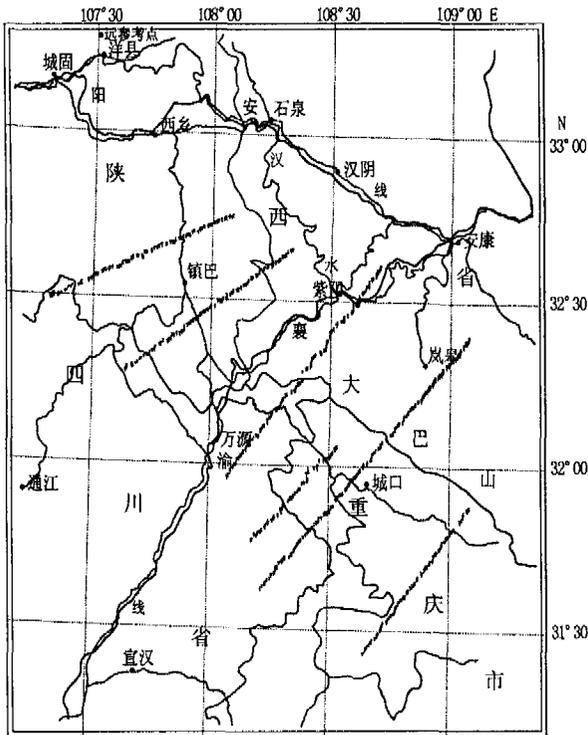


图1 镇巴工区测点位置图

Fig.1 Location map of measuring points of Zhenba area.

大地电磁测深法(MT)由于电磁场强度随深度呈指数规律衰减,其分辨率也随着深度按指数规律减小,与地震方法相比,其垂向分辨率和分层能力要低。但是频谱范围丰富的大地电磁场其穿透能力可达地下几十千米甚至几百千米,并且具有不受高阻屏蔽且对低阻层反应灵敏等特点,使其在深部构造、基底结构、火成岩分布研究方面具有优势,成为地震勘探方法的重要补充方法。但地形的起伏和表面局部三维地质体使 MT 曲线发生畸变,如果在类似本勘探区域的复杂环境中采集的数据没有得到相关处理,则最终解释结果是不可靠的,甚至有时与实际情况相差很大。

## 1 基本原理

### 1.1 地形影响

设区域构造表面水平,其电性结构和地形均为任意形态。由于地形影响使电磁场发生畸变表面阻

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |-(1 + P_{yy})Z_{0xy}|^2 = 100(1 + P_{yy})^2$$

$$\Phi_{yx} = \arg\{-(1 + P_{yy})Z_{0xy}\} \quad (9)$$

并有

$$\rho_{yx} = \left| \frac{1 + P_{yy}}{1 + P_{xx}} \right|^2 \rho_{xy}, \Phi_{xy} = \Phi_{yx} \quad (10)$$

这说明,由于局部地形影响使两种极化的视电阻率曲线在双对数坐标中平移一常数因子,而阻抗相位却保持不变,这种地形影响属于静位移畸变。

### 1.2 校正方法

可以给出与直流电阻率法相类似的地形改正公式,即

$$\rho(yx, \text{校}) = \rho(yx, \text{实测}) / [\rho(yx, \text{地形}) / \rho_0] \quad (11)$$

这里  $\rho(yx, \text{实测})$ 、 $\rho(yx, \text{地形})$  和  $\rho(yx, \text{校})$  均为复数,它们分别表示实测的视电阻率、纯地形的视电阻率和地形改正后的视电阻率;  $\rho_0$  为均匀半空间的电阻率。由上式很容易得到视电阻率幅值的地形改正公式:

$$|\rho(yx, \text{校})| = |\rho(yx, \text{实测})| / [|\rho(yx, \text{地形})| / \rho_0] \quad (12)$$

考虑到视电阻率  $\rho_{yx}$  和阻抗  $Z$  之间的关系  $\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} Z^2$ , 由式(1)很容易得到阻抗相位的地形改正公式:

$$\Phi_{\text{校}} = \Phi_{\text{实测}} - \Phi_{\text{地形}} + \pi/4 \quad (13)$$

这里  $\Phi_{\text{实测}}$ 、 $\Phi_{\text{地形}}$  和  $\Phi_{\text{校}}$  分别表示实测的阻抗相位、纯地形的阻抗相位和地形改正后的阻抗相位<sup>[3]</sup>。

Jiracek 和 Chouteau 等用畸变张量法进行 MT 地形校正<sup>[4]</sup>, 但其原理较为烦琐。

## 2 理论模拟及实例

在进行理论模拟和实际资料处理之前,首先要对勘探区域的构造特征进行分析。二维指数(称二维偏离度)  $S$  值的大小可用以度量地下电性结构近似二维的程度,计算公式为

$$S = \left| \frac{Z'_{xx} + Z'_{yy}}{Z'_{xy} - Z'_{yz}} \right| \quad (14)$$

如果地球介质是横向均匀或者是二维结构时,当阻抗张量旋转到主轴方向时,主对角元素  $Z'_{xx} + Z'_{yy}$  为零,这时二维偏离度  $S$  为零。当  $S$  较大时认为地下地质结构偏离了二维。通常当  $S < 0.3$  时,可以用二维模型较好地近似地下电性结构。本文分析了各个测点上的二维偏离度。结果表明各测点大部分频率的二维偏离度的数值都小于 0.2, 因此地下电性结

构可以用二维模型较好地近似。

研究表明<sup>[5-6]</sup>, 二维地形对  $H_x$  波的影响十分严重,对  $E_x$  波的影响却小得多。地形影响不仅与 MT 资料种类和波场极化模式有关,还受到测点位置和信号周期制约,而且不同的地形形态和尺度对 MT 资料的影响也不相同。本研究实现了带地形的正演计算及程序设计,通过理论分析和模拟计算,并以理论模型和实际资料作检验。本次勘探测点点距约 1 km, 地表处数值模拟横向网格均穿过测点位置,如两相邻网格小于 15 m, 合并为一格。纵向网格以测点位置剖分。这种网格剖分方法基本适应勘探区域复杂的地形特征。图 2 为工区 I2 测线地形模型,图中 0 表示空气层,1 表示地下介质。

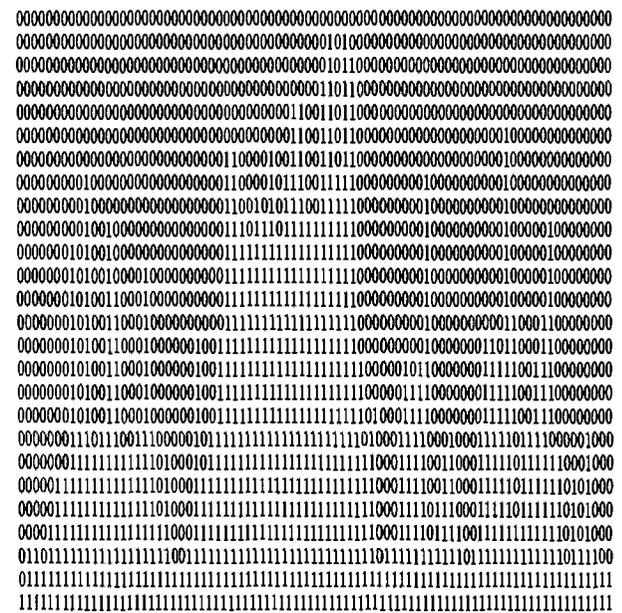


图 2 I2 测线地形模型

Fig. 2 Topography model of survey line I2.

对地形的影响可以得到以下主要认识:(1)地形不仅影响视电阻率资料,也影响阻抗相位资料,但对前者的影响比后者严重;(2)TM 极化资料比 TE 极化资料受到的地形影响更大,或者说 TM 极化资料对电性横向不均匀性变化更灵敏;(3)长周期 TM 极化视电阻率资料比短周期的更容易受地形影响,但当周期增大到某个数值时地形影响区域稳定,其后的影响属于静位移畸变。而 TE 极化视电阻率资料则是短周期容易受地形影响,在长周期地形影响消失。阻抗相位资料也是短周期容易受地形影响,而且影响的范围也大;随着周期增大,影响幅度下降,影响的范围也减小,最后影响消失<sup>[6]</sup>。

图 3 是本测区一测点 TE 和 TM 极化方式视电阻率、相位地形校正结果。图 3(a)、(b)为测点 TE

极化方式地形校正前后视电阻率值;(c)、(d)对应TM极化方式;(e)、(f)为测点TE极化方式地形校正前后相位值;(g)、(h)对应TM极化方式。总体看来,地形对视电阻率的影响强于对相位的影响。

而对各个响应函数而言,TE极化资料的影响主要表现在高频段,而TM极化资料在低频段更容易受到地形的影响。

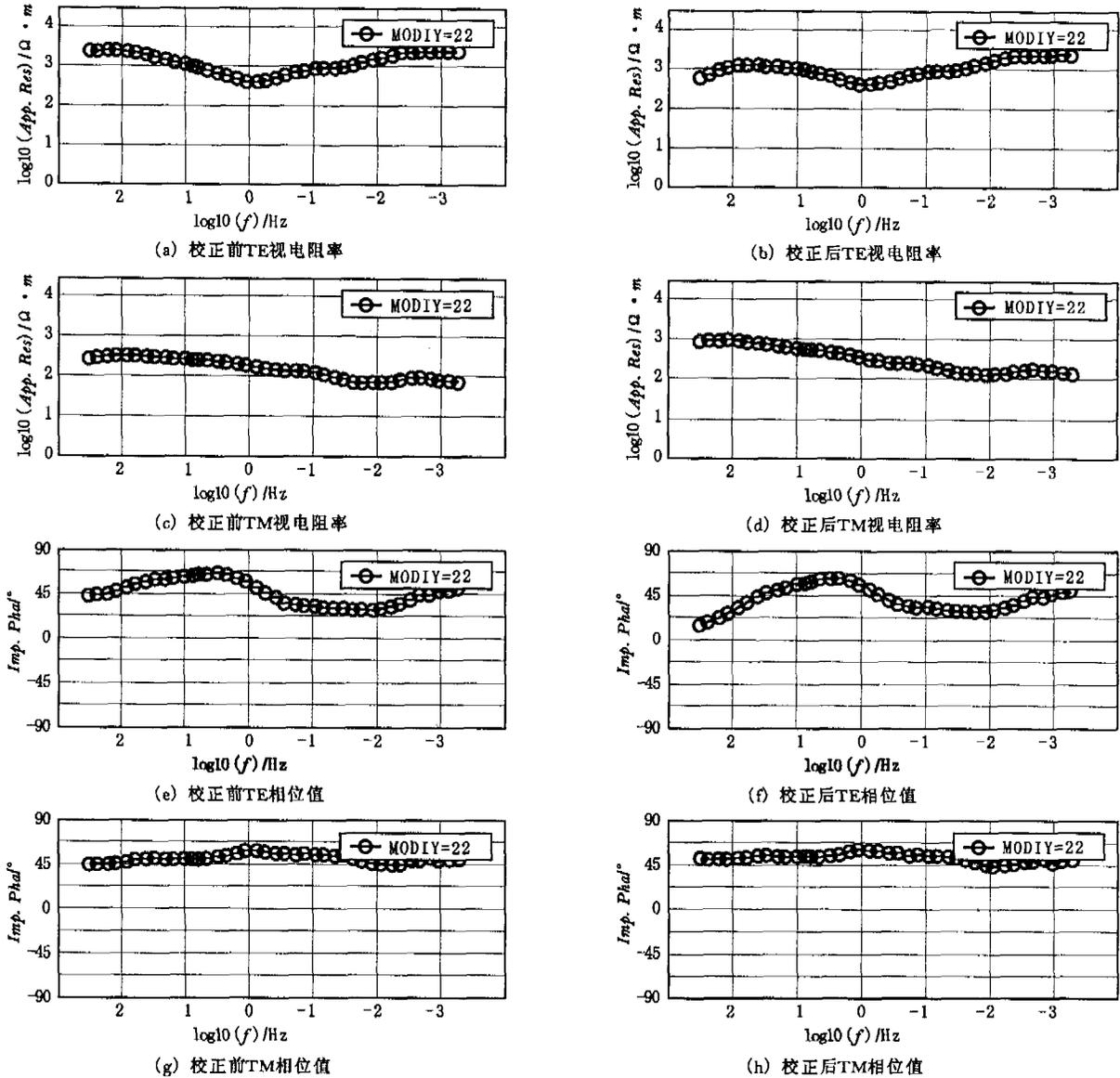


图3 MT响应曲线地形校正前、后对比图

Fig.3 Contrasts between before and after topography correction on MT response curves.

### 3 地质效果

城口断裂系扬子板块北部边界断层,总体走向北西,为向南西凸出的弧形断裂带,倾向北东。在地电断面图上表现为电性层明显错断,向下深切基底,断面较陡,倾向北东,倾角  $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ,北东盘往南西盘逆冲,断距大于2 km。由此可知城口断裂是一条较大的盆地边界断层,它对四川盆地的形成和发育起着控制作用,其形成与印支—燕山期华北板块和上扬子板块发生陆—陆碰撞造山作用有关。据深

部地质物探资料综合解释,城口断裂带层位自北向南依次抬高,即自太古界绿片岩系—震旦系—下寒武统一下志留统泥页岩至下、中三叠统的膏盐层等,变形也自性剪切带—冲断推覆构造演变为盆内薄皮构造。

镇巴断裂发育于南大巴山中部,是区域性的大断裂,走向近北北西,贯穿全区。在定量等值线图上其特征明显,北面地层向南逆冲,显示出明显的逆冲推覆构造特征。断层倾向北东,呈浅部(4 000 多米

以上)断面陡直,往下逐渐弯曲变缓切入基底,倾角在 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间,断距约2 km。在测线L1、L2上表现为北东盘往南西盘逆冲推覆,使奥陶、寒武系地层推覆到中生界地层之上。地质分析表明镇巴断层以由北东向南西的逆冲运动为主,兼具走滑运动。

由于逆冲推覆的结果,使深部的老地层覆盖在新地层之上,从而导致MT定性、定量图件在纵向上电性会有明显的显示。大量的事实证明利用MT资料研究逆冲断裂效果是十分明显的。图4是测线

L2二维反演地电剖面等值线图,等值线图清楚地反映出了主要逆冲推覆构造的存在。已有的研究成果表明,工区中部的城口断裂以北地下岩体电阻率较低,而断层以南相对较高。图4中部清楚显示较大规模低阻体覆于高阻岩体之上,揭示了扬子板块和华北板块在这一区域的耦合关系。这种扬子地块俯冲于华北板块之下的接触关系与已有的研究成果基本一致。

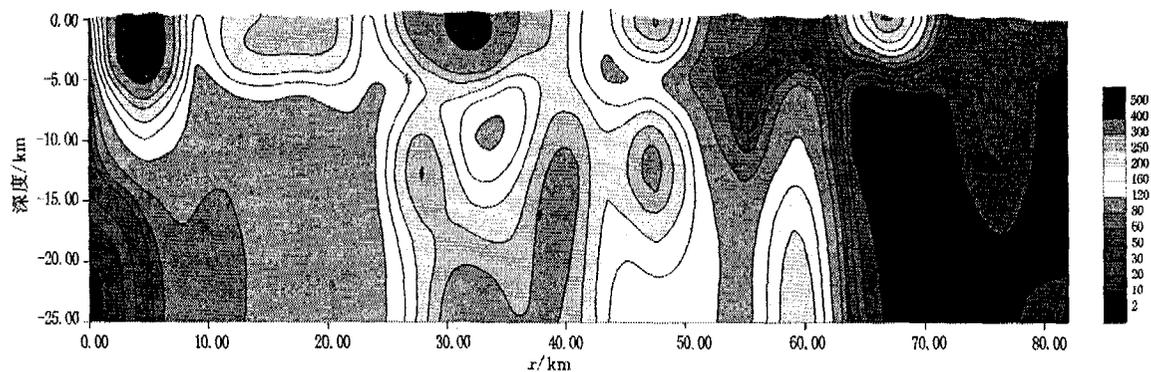


图4 测线L2二维反演地电剖面图

Fig. 4 2-D inverse resistivity section of survey line L2.

## 4 讨论

在条件不好,地震勘探难以取得良好地震记录的地区,MT可以作为地震勘探的补充。MT法在这些地区要取得满意的结果,必须根据不同的地质任务和地质条件,采取相应的技术措施以提高其纵、横向的分辨力。

本研究特别重视MT资料的前期处理,包括静校正和地形校正,得到的地质结论与前人在这一地区的研究成果较为一致,且符合该区所特有的地质构造特征。镇巴区块地球物理资料井工作的开展将提供对本研究成果的进一步的检验。根据MT电性剖面,结合地质及其它地球物理资料,圈定了研究区域由北向南逆冲推覆,冲断与褶皱并存的推覆构造的模式和分布规律,认清了测区区域电性和地质构造上由北向南逆冲推覆的这一基本特征,证实了滑脱

褶皱带等区域存在着有利的有油气远景的勘探区块。

### [参考文献]

- [1] Zhang P, Roberts R C, Pedersen L B. Magnetotelluric strike rules [J]. *Geophysics*, 1987, 52(3): 267~278.
- [2] 王家映. 石油电法勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [3] 徐世浙,李予国,刘斌. 大地电磁  $H_x$  型波二维地形改正的方法和效果[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(6): 842~846.
- [4] Chouteau M, Bouchard K. Two-dimensional terrain correction in magnetotelluric surveys [J]. *Geophysics*, 1988, 53(6): 854~862.
- [5] Wannamaker P E, Stodt J A, Rijo L. Two-dimensional topographic responses in magnetotelluric models using finite elements [J]. *Geophysics*, 1986, 51: 2131~2144.
- [6] 晋光文,孙洁,王继军. 地形对大地电磁测深(MTS)资料的影响[J]. *地震地质*, 1997, 19(4): 363~368.