doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2010.03.002

用大地电磁测深法探测深圳断裂带的结构特征

陈庞龙[1)] 肖骑彬[2)] 赵国泽[2)] 马浩明[1)]

1)广东省地震局,广州 510070

2)中国地震局地质研究所,北京 100029

摘 要 大地电磁测深方法应用于深圳城市活断层的探测,针对深圳断裂带进行了 4 条剖面的密集点距的大地电磁测量。采用远参考道数据观测与处理技术,尽可能地消除测点附近的电磁噪音影响,得到了较为光滑的视电阻率曲线。二维反演利用 TM 极化模式数据以及非线性共轭梯度法(NLCG)获得了地下电性结构。结合已有的区域地层、岩体及断裂构造分布等地表地质成果,对 2 000m 以上的电性剖面进行了分析,证实或发现了与电性分界带对应的 2 处区域性断裂(横岗-罗湖断裂与莲塘断裂)构造及 7 处局部断裂构造,并将测区分布的地层与电阻率变化相对应。通过 5 000m 以上不同深度的电性水平切片,进一步反映了电性剖面所展示的局部断裂构造其实是测区主干断裂(横岗-罗湖断裂与莲塘断裂)在浅表的分支,它们在深部表现出趋于统一的展布特征。

关键词 大地电磁测深 二维反演 结构特征 深圳断裂带

中图分类号: P318.6 **文献标识码**:A **文章编号**:0253-4967(2010)03-0360-12

0 引言

城市活断层探测与地震危险性评价的一项重要工作内容是深部地震构造环境探测,其目的是为了查明地壳深部,尤其是中上地壳深部范围内的断层位置及其展布形态;查明地壳结构,介质特性及深、浅构造关系(邓起东等,2003)。在“十五”和“十一五”期间开展的北京、上海、广州、兰州等 20 余个城市活断层探测项目中,几乎都采用了深地震反射探测、高分辨地震折射探测和深地震宽角反射/折射探测来完成深部地震构造环境探测工作。

作为深圳市“十一五”重点项目,深圳市活断层探测与地震危险性评价一期项目的深部地震构造环境探测采用了大地电磁测深方法在城市中心地带进行高密度点位的系统测量。实际探测中采用了先进的远参考测量技术(Gamble *et al.*,1979a,b),将记录时间延长到 20h 以上,并将测点尽可能布置在偏僻位置,减少电磁干扰源。在数据处理和反演解释等方面也采用了先进的适合城市测量的各种技术并获得了较高质量的数据,取得了令人满意的效果。本研究为应用大地电磁测深方法在复杂电磁环境下开展活断层的结构特征探测工作积累了宝贵的经验。

1 方法简介

大地电磁测深(简称 MT)的理论基础是 Maxwell 方程,它采用源自高空的天然交变电磁场作为场源来探测地下的电阻率结构(陈乐寿等,1990)。由于不需要人工建立场源,装备轻便,

〔**收稿日期**〕 2010-05-04 收稿,2010-08-25 改回。

〔**基金项目**〕 深圳市活断层探测与地震危险性评价项目资助。

尤其是它接收的频率范围宽，比其它人工源方法具有更大的探测深度，因此大地电磁测深成为当前深部结构研究中一种非常重要的手段（赵国泽等，1997，1998，2004，2008，2009；詹艳等，2004；汤吉等，2005；Zhao *et al.*，2010）。实践证明，大陆内部地块边界、深大断裂带、古缝合带往往容易受水、松散沉积物充填，导致自身电阻率的显著降低，而大地电磁测深的特点之一就是对低阻相当敏感，因此该方法对揭示断裂带结构及其延伸状态具有重要的指示意义。

在大地电磁测深中，地表测得的电场和磁场包括由空间向地下入射的初始场和由地下导电介质感应产生的二次场，因此它携带了地下电性结构的信息。电磁场的频谱直接与地下的结构信息有关，在频率域，电、磁场（E，H）和阻抗张量 Z 满足如下的关系式：

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \tag{1}$$

式（1）中，下标 x，y 指示电、磁场的方向，一般野外测量时 x 指示正北，y 指示正东方向。阻抗张量 Z_{ij}（i，j 分别为 x，y 的不同组合）可视为水平电、磁场分量之间的传输函数。通过野外测量得到各电磁场分量的时间序列，利用傅氏变换得到每个分量的频率域的谱数据，再采用最小二乘法对方程组（1）进行求解，即可获取阻抗张量的各个元素。可简写为

$$Z_{ij} = \frac{[E_i H_j^*][H_i H_i^*] - [E_i H_i^*][H_i H_j^*]}{[H_i H_i^*][H_j H_j^*] - [H_i H_j^*][H_j H_i^*]} \tag{2}$$

式（2）中 * 号表示复数的共轭，[…] 表示叠加功率谱。在式（2）利用磁场自功率谱计算传输函数的过程中存在着对磁场自身噪音无法克服的缺点，Gamble 等（1979a，b）提出了远参考道法（Remote-Reference Method，简称 RR），其基本原理是：在同步测量的情况下，利用与本地测点（基站）相隔一定距离的另一不受干扰的测点（远参考点）的电磁信号（主要是磁信号），来参与基站的传输函数的计算。

$$Z_{ij} = \frac{[E_i H_{jr}^*][H_i H_{ir}^*] - [E_i H_{ir}^*][H_i H_{jr}^*]}{[H_i H_{ir}^*][H_j H_{jr}^*] - [H_i H_{jr}^*][H_j H_{ir}^*]} \tag{3}$$

式（3）中 r 表示来自远参考点的信号（或场），参与阻抗计算的都是互功率谱，这样以求完全消除本地电、磁中不相关噪音的影响。在得到阻抗张量元素后，通过简单的计算即可得到视电阻率 ρ_a 和阻抗相位 φ。

$$\rho_a = 0.2T \mid Z_{ij} \mid^2$$

$$\varphi = \mathrm{Arg}(Z_{ij})$$

视电阻率 ρ_a 和阻抗相位 φ 都是频率的函数，是反映介质电性特征的重要物理量。

2　地质背景

深圳城市活断层的重要探测目标之一是深圳断裂带（地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组，1991；陈伟光等，2001），该断裂带主要由企岭吓-九尾岭断裂组、横岗-罗湖断裂组和莲塘断裂组组成。横岗-罗湖断裂组属于深圳断裂带的主干构造，该断裂自东北向西南经过坪山、横岗、新田、深圳水库进入深圳市区。以深圳水库为界，大致可分成东北段和西南段。其中东北段自北向南又可分成大致平行相间的 4 条断裂，依次是崔禾嶂-横岗-罗湖断裂（F_1）、清风岭-烂寨顶断裂（F_2）、炮台山-安良村断裂（F_3）和铜锣径林场-石龙肚水库断裂（F_4），4 条断裂的走向为 N40°～67°E，倾向 NW，倾角 35°～65°。而西南段进入深圳市区后则分散成数条略

向 SE 凸出的弧形断裂,走向 N50°~60°E 并逐渐弯转至 N10°~35°E,倾向 NW,倾角 45°~70°(图 1)。目标区内断裂总长度约 30km。莲塘断裂(F_5 和 F_6)由福田南一带起向西南延伸,经过盐田坳、田螺坑、莲塘、罗芳村后进入香港地区。总体走向N46°E,倾向 NW,倾角 45°,目标区内断裂长约 16km。

从图 1 中的区域地层分布、岩体及断裂构造特征也可以看出,测区主要出露的地层以晚古生代泥盆纪老虎头组($D_{2-3}l$,主要岩性:砂岩、砂砾岩、泥岩互层,夹泥质粉砂岩,总体厚度在 900m 以上)以及测水组地层(C_1c,分上、下 2 段,主要岩性:砂岩、砂岩夹板岩,总体厚度在 570m 以上)为主,部分地区为第四纪沉积物(Q)覆盖。测区的基底为中元古代大钳山组(Z_1d,主要岩性为片岩、片麻岩以及变粒岩等,总体厚度在 1 400m 以上)浅变质岩,主要出露在测区的西南侧。此外测区主要岩体为白垩纪黑云二长花岗岩体($K_1\eta\gamma$)和晚侏罗世黑云二长花岗岩($J_3\eta\gamma$),出露广泛,在测区的中偏西南部也有部分早奥陶世的二长花岗岩出露。岩体与地层之间往往呈断裂接触。断裂构造以 NE 向为主,在大型断裂带两侧出现明显的硅化/磁铁矿化,部分呈现片理化/强片理化。

野外地震地质实地考查和钻孔联合剖面探测结果显示(马浩明等,2009),横岗-罗湖断裂组各断裂在地表和近地表处表现为韧性剪切带(片理化带)中局部叠加后期的脆性变形,具体表现为顺层或小角度发育石英脉或硅化岩,并有压碎现象;脆性破裂面局部可见。莲塘断裂在地表则表现为更加明显的片理化现象,其产状近于垂直,叠加其上的脆性破裂面规模一般较小。

考虑到大地电磁测深方法本身对电磁环境干扰敏感,在实际施工中,以横岗-罗湖断裂组和莲塘断裂组为对象,寻找干扰相对小的地方进行施工以获得质量较好的观测资料。测线具体位置如下:

剖面Ⅰ:位于龙海农场内,穿过 F_1 和 F_2,累计长度约 737m,布置测点 8 个,平均点距约 92m。

剖面Ⅱ:位于横岗的黄竹坑水库与六约采石场之间,累计长度约 520m,有效测点 9 个,测点点距平均约 60m,穿过 F_3。

剖面Ⅲ:起于西风坳,SE 止于雷公坑,穿过 F_2、F_3 和 F_4,累计长度约 2 360m,有效测点 22 个,测点点距平均 108m。

剖面Ⅳ:位于安良村东南侧,累计长度约 904m,有效测点 14 个,平均点距 65m,穿过 F_5 和 F_6。

3 大地电磁资料解释

3.1 数据采集

数据采集使用多台加拿大 Phoenix 公司生产的 V5-2000 系统,野外测量电场布设为 SN 方向(E_x)和 EW 方向(E_y),依据场地条件选取测量电场的电极距;3 个相互垂直的磁场,分别是 SN 方向(H_x)、EW 方向(H_y)和垂直地面方向(H_z)。在开始数据采集前以及数据采集完成后,对大地电磁仪器都进行了标定,并进行了一致性试验。结果表明使用的仪器在整个数据采集期间性能稳定。一致性测点测量经过计算后相对误差<5%,满足要求。

深圳市是一个现代化的城市,工作区都处于工厂、超高压输电线、高速公路以及不同类型的通讯塔等的包围之中,干扰源十分复杂,近场干扰严重。通过测量试验和结果的对比分析,确定在河源市紫金县蓝塘镇西坑村七组附近布设远参考基站,以消除深圳工区局部电、磁场干扰的影响,提高资料的质量。参考站距工区测线最近的测点约 120km,附近环境安静,地形平坦,周

围 3km 范围内无厂矿企业，1km 范围内无村庄、照明线，无干扰源。远参考站采集时间与探测区同步进行，用以对深圳工区所有测点进行远参考处理。通过远参考道方法对测点进行测量和数据处理，能够较明显地改善数据的质量。经过上述处理得到的各测线的视电阻率和阻抗相位曲线尽管受到很强的工业干扰影响，但仍然能够满足进行反演解释的需要，特别是大多数测点的视电阻率曲线在频率>0.1Hz 的范围内都比较合理。图 2 为测区内 107 号测点远参考处理前

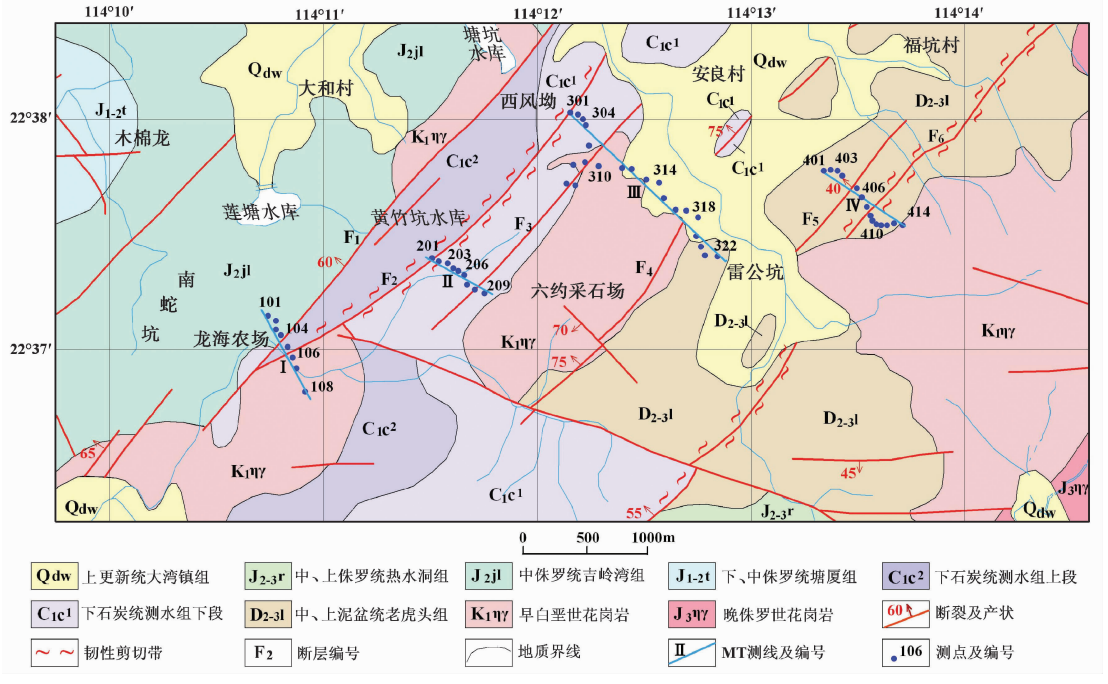

图 1　测区断裂及 MT 测线分布图

Fig. 1　Faults and magnetotelluric profiles in the survey area.

F_1崔禾嶂-横岗-罗湖断裂；F_2清风岭-烂寨顶断裂；F_3炮台山-安良村断裂；

F_4铜锣径林场-石龙肚水库断裂；F_5 和 F_6莲塘断裂

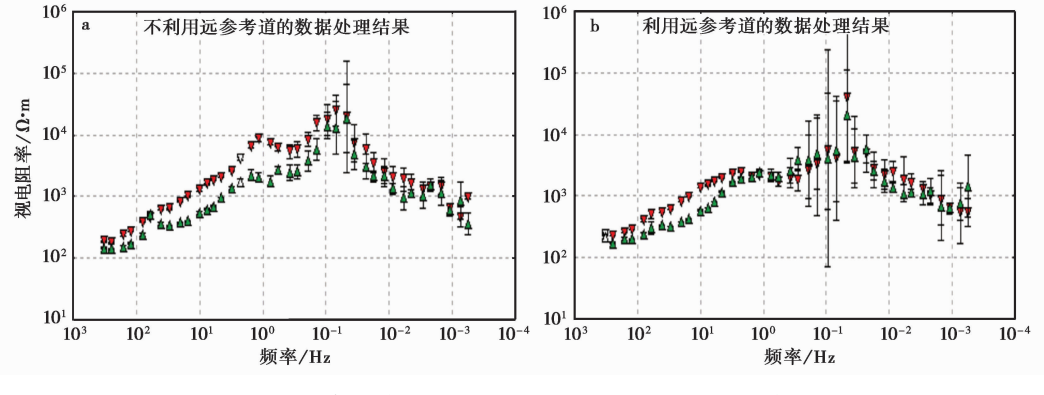

图 2　远参考道技术应用效果对比(以 107 号测点为例)

Fig. 2　Results comparison of the application of remote reference technique(with the example of site 107).

上三角表示 xy 方向的视电阻率，下三角表示 yx 方向的视电阻率

后的视电阻率对比曲线,由图可以看出,远参考处理后的曲线总体形态变化比远参考处理前的曲线明显合理,尤其对资料中高、中频段的频点由于磁场干扰产生的跳跃问题,甚至近场效应在远参考处理后皆可以得到不同程度的改善。

图 3 是 4 条大地电磁测深剖面原始视电阻率、相位数据在频率域的拟断面图,可以看出,视电阻率图像总体光滑,而相位图像在频率低于 0.1Hz 时变得比较粗糙,变化较大,这说明实测数据的视电阻率曲线在整个观测频率范围内相对光滑,而相位曲线在低于 0.1Hz 时是比较散乱的。从剖面Ⅰ的视电阻率拟断面图(图3Ⅰa,Ⅰc)可以看出在 103 和 104 号点之间以及 106 号点之下存在明显的电性过渡带。剖面Ⅱ的视电阻率拟断面图(图3Ⅱa,Ⅱc)显示在 204 号点与 205 号点之间存在明显的电性过渡带。剖面Ⅲ的视电阻率拟断面图(图3Ⅲa,Ⅲc)显示在 307 与 308 号点之下以及从 312 号到 317 号点之间(下面)存在明显的低阻带或低阻区域。剖面Ⅳ的视电阻率拟断面图(图3Ⅳa,Ⅳc)显示从 407 向 408 号点过渡,视电阻率低阻异常逐渐向低频扩展,并在 410 和 413 号点下面出现低阻中心。

视电阻率、相位数据拟断面图中的低阻异常有的只在高频段存在,反映了浅表低阻构造(或松散沉积层)的存在;有的低阻异常则贯穿了整个频段,则可能与断裂构造(或岩性边界)有关。这些定性分析将进一步在二维反演结果中加以验证。

3.2 二维电性结构模型

在对数据作反演之前需对原始数据的合理性进一步检验,对曲线中存在的飞点进行剔除。在大地电磁二维反演解释的准确性上,前人作过专门的讨论(Wannamaker *et al.*, 1984; Berdichevsky *et al.*, 1998; Leod *et al.*, 2002; Tauber *et al.*, 2003; Unsworth *et al.*, 2004; Leod, 2006)。Wannamaker 等(1984)指出在浅层三维导电结构存在时,TE 模式易受影响而在深部产生冗余低阻构造,TM 模式则相对稳定。Ledo 等(2002)则指出 3D 异常体位于剖面之下且沿走向的延伸大于趋肤深度的一半时,采用 TM 模式可以有效地确定 3D 异常体的横向特征。Ledo (2006)强调 3D 异常体相对于区域电性走向的占位关系影响 TE 或 TM 模式解释的准确性,如 3D 异常体与区域电性走向正交时不利于 TM 模式反演,而当 3D 异常体与区域电性走向平行时则更适合采用 TM 模式进行二维反演。Tauber 等(2003)指出 TE 模式易受剖面外的电性结构影响,不利于揭示细结构,得到的数据拟合效果往往无法接受,而 TM 模式数据拟合效果好,能最大程度地控制导电结构的几何形态。Unsworth 等(2004)也指出在实际应用中要谨慎使用 TE 模式数据。但 Berdichevsky 等(1998)则认为 TE 模式与 TM 模式具有互补性,采用 TE+TM 联合模式更有利于揭示地球深部的导电结构。

考虑到测区地形变化强烈,我们选择了非线性共扼梯度法——NLCG(Rodi *et al.*, 2001)反演方法,该方法的优点在于通过确定模型搜索方向达到快速稳定收敛;同时易于考虑地形条件,是一种稳定、快速的二维反演方法。我们的大地电磁剖面基本都横切主干断裂,由此将 TM 模式定义为沿测线方向,TE 模式垂直于测线。利用 NLCG 二维反演方法对测区各条测线进行反演,初步对比数据拟合效果及模型的合理性,我们最终确定以 TM 极化模式的视电阻率和相位数据作为反演的初始输入数据,反演中采用的视电阻率的误差水平为 5%,相位为 2.5%。选用的初始模型均为 100Ω·m 的均匀半空间,经过多次迭代后,模型的变化量基本趋于 0,表明模型达到稳定,最终的拟合均方根误差(RMS)都在 8.0 以下。在二维反演中,拟合 RMS 的值与给定的初始误差水平有一定的关系,当给定的误差水平较低时,则要求反演得到的模型更好地响应

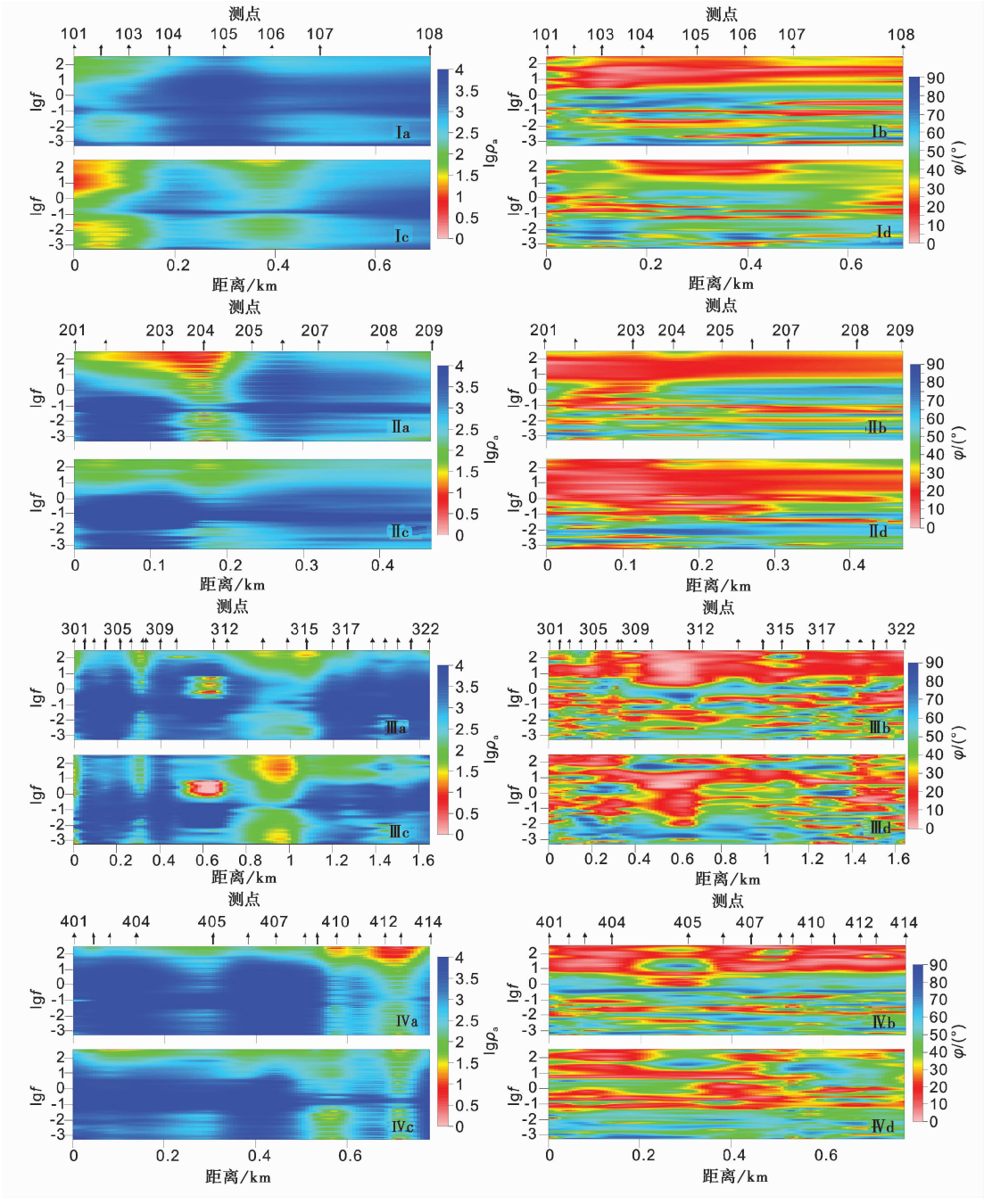

图 3　4 条测线实测视电阻率、相位拟断面图

Fig. 3　The apparent resistivity and phase pseudosections along the four survey profiles.

Ⅰa 测线Ⅰxy 方向的视电阻率；Ⅰb 测线Ⅰxy 方向的相位；Ⅰc 测线Ⅰyx 方向的视电阻率；Ⅰd 测线Ⅰyx 方向的相位；Ⅱa 测线Ⅱxy 方向的视电阻率；Ⅱb 测线Ⅱxy 方向的相位；Ⅱc 测线Ⅱyx 方向的视电阻率；Ⅱd 测线Ⅱyx 方向的相位；Ⅲa 测线Ⅲxy 方向的视电阻率；Ⅲb 测线Ⅲxy 方向的相位；Ⅲc 测线Ⅲyx 方向的视电阻率；Ⅲd 测线Ⅲyx 方向的相位；Ⅳa 测线Ⅳxy 方向的视电阻率；Ⅳb 测线Ⅳxy 方向的相位；Ⅳc 测线Ⅳyx 方向的视电阻率；Ⅳd 测线Ⅳyx 方向的相位

观测值,这时拟合 RMS 就会相对较高。

图 4a,b,c,d 是经过二维反演后得到的各条剖面 2km 深度以上的电性结构模型,分述如下:

剖面Ⅰ的二维电性结构模型如图 4a 所示,横向上在 103 与 104 号点之间以及 106 号点附近存在较为明显的电性分界;在 200m 以下层位,以 103 号点为界,西北侧的电阻率普遍在

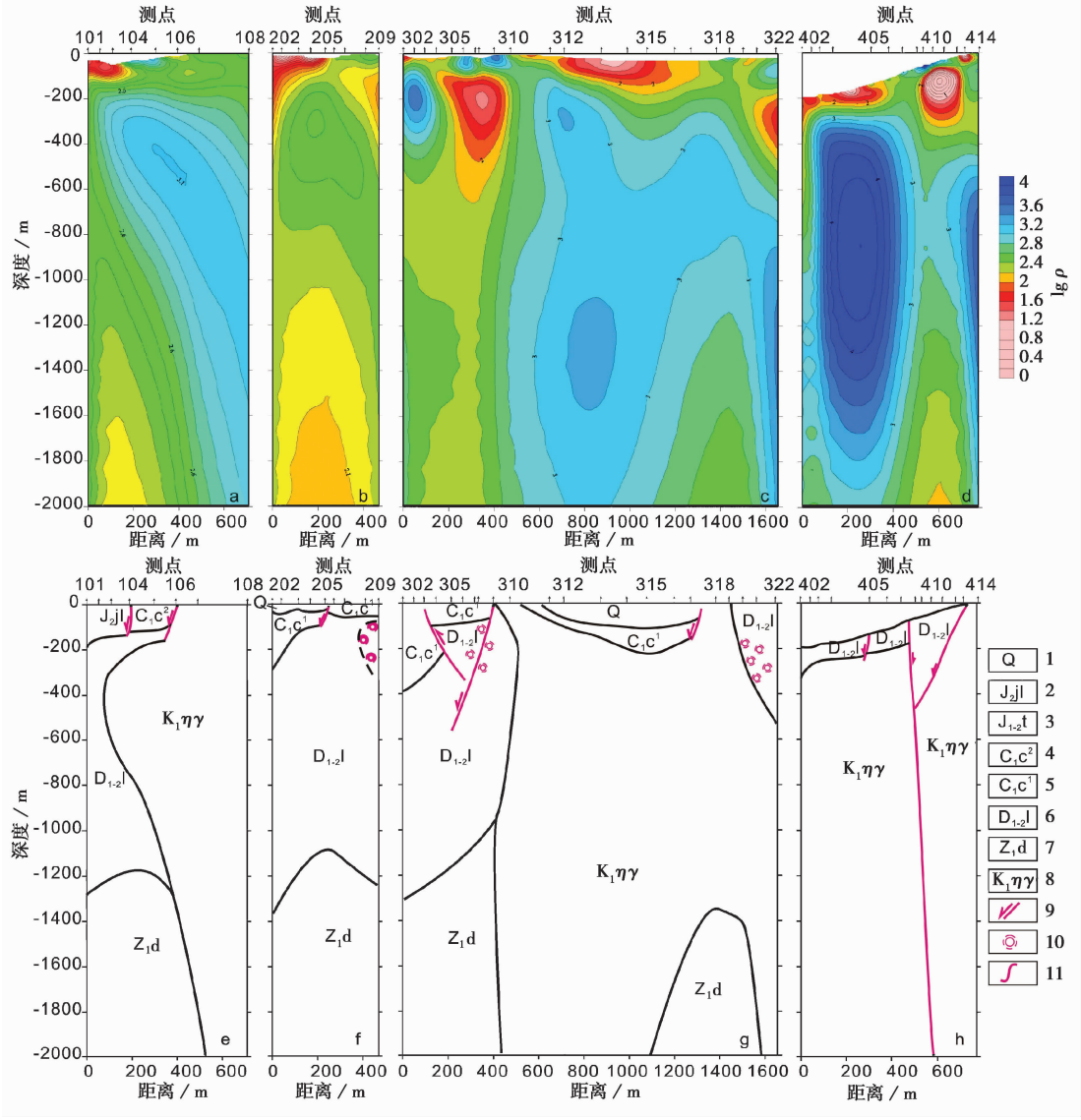

图 4 4 条大地电磁测深剖面的二维电性结构及地质解释

Fig. 4 Two dimensional electrical structures and the geology interpretation of the four MT profiles.

a 测线Ⅰ的二维电性结构, b 测线Ⅱ的二维电性结构, c 测线Ⅲ的二维电性结构, d 测线Ⅳ的二维电性结构, e 测线Ⅰ的地质解释, f 测线Ⅱ的地质解释, g 测线Ⅲ的地质解释, h 测线Ⅳ的地质解释; 1 第四纪覆盖层, 2 中侏罗统吉岭湾组, 3 下、中侏罗统塘厦组, 4 下石炭统测水组上段, 5 下石炭统测水组下段, 6 下、中泥盆统老虎头组, 7 元古宇大钳山组, 8 早白垩世黑云二长花岗岩, 9 推测断裂构造, 10 硅化、磁铁矿化, 11 硅化、强片理化

400Ω·m 以下，可能与正常古生代的沉积层有关；东南侧的电阻率则在 1 000Ω·m 左右，与中生代白垩纪花岗岩体的电阻率相当，而且东南侧的高阻构造有向西北侧斜上穿插之势。结合区域地层厚度及地表地质出露信息，对本剖面作了相应的地质解释（图 4e）。推测在 104 与 106 号点之下存在正断构造，前者是侏罗系吉岭湾组火山沉积岩与石炭系测水组上段的分界，后者是古生代地层与中生代花岗岩体的接触边界。

剖面Ⅱ的二维电性结构模型如图 4b 所示，结合区域地层厚度及地表地质出露信息，对本剖面作了相应的地质解释（图 4f）。推测在 205 与 206 号点之间的电性边界与正断构造有关，断裂延伸至泥盆系老虎头组地层的顶部。

剖面Ⅲ的二维电性结构模型如图 4c 所示，结合区域地层厚度及地表地质出露信息，对本剖面作了相应的地质解释（图 4g）。推测 307 与 308 号点之下的低阻中心与断裂构造有关，该断裂构造规模较大，在断裂两侧形成硅化/磁铁矿化，受该断裂构造的影响，在 303 号点附近可能形成小型逆冲构造。推测在 317 与 318 号点之间存在正断构造，控制西北侧的沉积构造，在 322 号点之下的低阻中心可能是泥盆系老虎头组与花岗岩体的接触部位存在硅化/磁铁矿化所致。白垩纪花岗岩体的存在同时也造成在老虎头组下部的中元古代基底构造的连续性被破坏。

剖面Ⅳ的二维电性结构模型如图 4d 所示，结合区域地层厚度及地表地质出露信息，对本剖面作了相应的地质解释（图 4h）。推测本剖面浅部地层以泥盆系老虎头组为主，受其下伏白垩纪花岗岩体（电阻率都在 1 000Ω·m 以上）侵位的影响，现有地层厚度仅 100m 左右，在 405 号点存在局部的断裂构造，它的正断效应使西北侧地层的电阻率明显下降（不到 100Ω·m）。从 413 号点向 NW 到 410 号点之下是串状低阻中心，又由于在 414 号点有白垩纪花岗岩体出露，因此，推测存在与岩体隆升有关的正断构造，该断裂构造沿早期形成的高角度韧性剪切带发育，有可能与 409 号点之下的主干断裂构造相交。

3.3　深部电性结构

根据剖面的二维电性结构，对这 4 条剖面所控制的区域作了不同深度的电阻率切片（图 5）。从测区 5km 深度以上的电阻率水平切片来看，自西而东与地表的雷禾嶂-横岗-罗湖断裂（F_1）、清风岭-烂寨顶断裂（F_2）、炮台山-安良村断裂（F_3）、铜锣径林场-石龙肚水库断裂（F_4）以及莲塘断裂（F_5 和 F_6）可以形成对应；由浅向深，断裂在切片中的显示有所差异，断裂 F_4 在 1 000～2 000m 层位电性差异显示并不明显，F_2，F_3 断裂在 2 000m 以上层位平面上的连续性并不好。但在 3 569m 层位，切片显示出 3 个明显的 NE 向斜列的电性异常带，F_2 和 F_3 断裂在该层位并为 1 条 NE 向连续的低阻带，F_4 断裂在该层位与 1 个低阻中心对应。再向更深层次，电阻率总体在 150Ω·m 左右，与断裂构造有关的电性分界面（带）显得并不明显。总体上看，电性异常带在浅层位向局部集中，可能反映了测区主干断裂在浅表分支、而深部趋于统一的展布趋势。

4　结果与讨论

在二维电性结构中推测与断裂（带）有关的电性边界都与实际地质情况吻合较好，证实或发现了 2 处区域性断裂构造及 7 处局部断裂构造，反映了断裂构造的深部信息。具体地说，在 3 569m 层位的电阻率切片图中，F_1，F_2，F_3 断裂并为 1 条 NE 向连续的低阻带，投影到地表沿 104，205，307 号测点通过；F_4 断裂相对独立，在该层位与 1 个低阻中心对应，该低阻中心在地

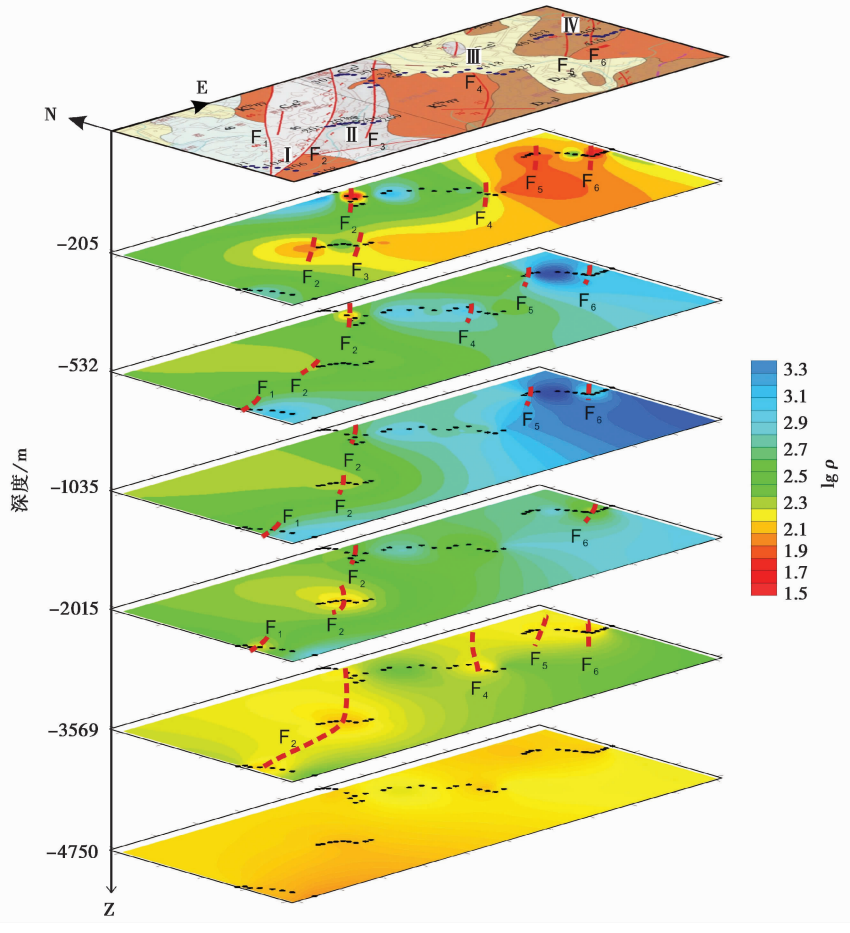

图 5 测区大地电磁测线地表地质及 5km 深度以上电性水平结构

Fig. 5 Surficial geology covering all the MT profiles and the horizontal electrical slices of depths less than 5km.

电阻率值为对数域,红色虚线为推测断裂构造

表的投影可以与 318 号测点对应; 莲塘断裂(F_5 和 F_6)在 3 569m 层位也形成 1 个低阻区域,2 个相对的低阻中心在地表的投影可以与 404 号以及 410 号测点对应。韧性剪切带及后期叠加的脆性破裂面往深部延伸,在深部呈带状展布,电性异常带在浅层位向局部集中,这些特征可能反映了测区主干断裂在浅表分支、而深部趋于统一的展布趋势。再到 4 750m 以上层位,与断裂构造有关的电性分界带已不再明显。

根据二维电性结构模型及剖面所经过处的地表地层出露情况,推测测区地层电阻率总体特征如下: 第四纪沉积物(Q)低阻(电阻率 10Ω·m 左右); 侏罗系吉岭湾组火山岩(J_2jl)中低阻(电阻率 10 ~ 100Ω·m); 石炭系测水组上段(C_1c^2)中低阻(电阻率 10 ~ 400Ω·m); 石炭系测水组下段(C_1c^1)中低阻(电阻率 10 ~ 400Ω·m); 泥盆系老虎头组($D_{1-2}l$)中高阻(电阻率总体在 100 ~ 1 000Ω·m 之间,但如果受断裂构造的影响可能低于 100Ω·m); 中元古界大钳山组(Z_2d)电阻率总体在 100Ω·m 左右; 白垩纪花岗岩体($K_1\eta\gamma$)高阻(电阻率总体在 1 000Ω·m 以上,在与其它地层的接触带或断裂构造附近电阻率有所下降)。

本次研究工作在深圳市这样一个发展程度较高的城区进行，对大地电磁测深工作来说是一次挑战，我们在实际工作中将测点尽可能地布置在山头，同时采用了先进的远参考测量技术，将记录时间也延长到了 20h 以上。尽管如此，我们获得的实际资料仍有部分点受近场干扰影响严重，多数点的低频段相位资料质量总体较差。对于进一步的工作来说，如果以了解区域性断裂构造的深部结构为目的，大地电磁测深依然是最为经济、可行的方法，因为它的频带宽，这是其它电磁方法所不能取代的。这时，应尽可能地将剖面设计在离城区有一定距离的地方，对于跨越断裂附近的地方，可以加密点距（如本次测量点距）形成局部短剖面，精细解析断裂构造的浅层信息。

致谢　感谢广东省地震局、深圳市地震局和深圳市勘察研究院有限公司的各级领导在本项目实施过程中给予的大力支持与关怀！感谢深圳市活断层探测与地震危险性评价项目组全体成员的辛勤付出！感谢江汉石油管理局地球物理勘探公司 711 队的汪卫毛、刘忠、余文斌、张钦江、陈志强、肖金林等在本次大地电磁野外资料采集与预处理过程中所做的辛苦工作！

参　考　文　献

陈乐寿，王光锷. 1990. 大地电磁测深法 [M]. 北京：地质出版社.

CHEN Le-shou, WANG Guang-e. 1990. Magnetotellurics [M]. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

陈伟光，赵红梅，李富光，等. 2001. 深圳市断裂构造的活动性及其对地质环境的影响 [J]. 热带地理，21(1)：45—50.

CHEN Wei-guang, ZHAO Hong-mei, LI Fu-guang, *et al*. 2001. Fault activities and their influence upon geologic environment in Shenzhen city [J]. Tropical Geography, 21(1): 45—50 (in Chinese).

邓起东，徐锡伟，张先康，等. 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术 [J]. 地学前缘，10(1)：93—104.

DENG Qi-dong, XU Xi-wei, ZHANG Xian-kang, *et al*. 2003. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas [J]. Earth Science Frontiers, 10(1): 93—104 (in Chinese).

地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. 1991. 深圳市区域稳定性评价 [M]. 北京：地质出版社.

Compilation Group of Ministry of Geology and Mineral Resources on Assessment of Crustal Stability of the Urban Area of Shenzhen. 1991. An Assessment of the Crustal Stability of the Urban Area of Shenzhen [M]. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

马浩明，陈庞龙. 2009. 深圳市横岗-罗湖断裂第四纪活动性研究 [J]. 震灾防御技术，4(3)：266—274.

MA Hao-ming, CHEN Pang-long. 2009. The Quaternary activity of Henggang-Luohu Fault in Shenzhen [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 4(3): 266—274 (in Chinese).

汤吉，詹艳，赵国泽，等. 2005. 青藏高原东北缘玛沁-兰州-靖边剖面地壳上地幔电性结构研究 [J]. 地球物理学报，48(5)：1205—1216.

TANG Ji, ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, *et al*. 2005. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau along the profile Maqen-Lanzhou-Jingbian [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(5): 1205—1216 (in Chinese).

詹艳，赵国泽，陈小斌，等. 2004. 宁夏海原大震区安州—韦州剖面大地电磁探测与研究 [J]. 地球物理学报，47(2)：274—281.

ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, CHEN Xiao-bin, *et al*. 2004. Crustal structure from magnetotelluric profiling in the Haiyuan earthquake area, Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(2): 274—281

(in Chinese).

赵国泽,刘铁胜,江钊,等.1997.山西阳高—河北容城剖面大地电磁资料的二维反演解释[J].地球物理学报,40(1):38—48.

ZHAO Guo-ze,LIU Tie-sheng,JIANG Zhao,*et al*.1997.Investigation on MT data along Yanggao-Rongcheng profile by two-dimensional inversion [J].Acta Geophysica Sinica,40(1):38—48(in Chinese).

赵国泽,刘国栋,詹艳,等.1998.张北-尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构[J].地震地质,21(2):155—163.

ZHAO Guo-ze,LIU Guo-dong,ZHAN Yan,*et al*.1998.The structure of the crust and upper mantle for Zhangbei-Shangyi seismic area and its neighbouring region [J].Seismology and Geology,21(2):155—163(in Chinese).

赵国泽,汤吉,詹艳,等.2004.青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究[J].中国科学(D辑),34(10):908—918.

ZHAO Guo-ze,TANG Ji,ZHAN Yan,*et al*.2004.Research on the relationship between crustal geoelectrical structure and massif deformation in northeastern Tibertan Plateau [J].Science in China(Ser D),34(10):908—918(in Chinese).

赵国泽,陈小斌,王立凤,等.2008.青藏高原东边缘地壳"管流"层的电磁探测证据[J].科学通报,53(3):345—350.

ZHAO Guo-ze,CHEN Xiao-bin,WANG Li-feng,*et al*.2008.The evidence of the crustal "pipe-flow" in eastern margin of Tibetan Plateau suggested by electromagnetic sounding [J].Chinese Science Bulletin,53(3):345—350(in Chinese).

赵国泽,陈小斌,肖骑彬,等.2009.汶川 M_S 8.0 级地震成因三"层次"分析:基于深部电性结构[J].地球物理学报,52(2):553—563.

ZHAO Guo-ze,CHEN Xiao-bin,XIAO Qi-bin,*et al*.2009 Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of M_S 8.0 inferred from EM measurements in three levels [J].Chinese Journal of Geophysics,52(2):553—563(in Chinese).

Berdichevsky M N,Dmitriev V I,Pozdnjakova E E.1998.On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings [J].Geophys J Int,133:585—606.

Gamble T D,Goubau W M,Clarke J.1979a.Magnetotellurics with a remote magnetic reference [J].Geophysics,44:53—68.

Gamble T D,Goubau W M,Clarke J.1979b.Error analysis for remote reference magnetotellurics [J].Geophysics,44:957—968.

Leod J,Queralt P,Marti A,*et al*.2002.Two-dimensional interpretation of three-dimensional magnetotelluric data:An example of limitations and resolution [J].Geophys J Int,150:127—139.

Leod J.2006.2-D versus 3-D magnetotelluric data interpretation [J].Surveys in Geophysics,26:511—543.

Tauber S,Banks R,Ritter O,*et al*.2003.A high-resolution magnetotelluric survey of the Iapetus Suture Zone in southwest Scotland [J].Geophys J Int,153:548—568.

Unsworth M,Bedrosian P A.2004.On the geoelectric structure of major strike-slip faults and shear zones [J].Earth Planets Space,56:1177—1184.

Rodi W,Mackie R L.2001.Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J].Geophysics,66(1):174—187.

Wannamaker P E,Hohmann G W,Ward S H.1984.Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earth [J].Geophysics,49(9):1517—1533.

Zhao G,Wang L,Chen X,*et al*.2010.The active fault belts in eastern Tibet margin inferred using magnetotellurics [J].Geologica Acta,8(1):103—114.

STUDY OF THE STRUCTURE OF SHENZHEN FAULT ZONE WITH MAGNETOTELLURIC METHOD

CHEN Pang-long[1)]　XIAO Qi-bin[2)]　ZHAO Guo-ze[2)]　MA Hao-ming[1)]

1) *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou* 510070, *China*

2) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*

Abstract

The magnetotelluric method was used to study the active fault in Shenzhen city. Four magnetotelluric profiles with densified sites were laid out across Shenzhen Fault zone. The remote reference technique was used in both data observing and processing to eliminate the electromagnetic noise near the survey sites, and rather smooth apparent resistivity curves were obtained finally. TM mode data and two-dimensional inversion method as NLCG were used to obtain the electrical structures underground. According to the surficial geology survey results on regional strata and distribution of magmatic bodies and faults, the electrical structures of the depth less than 2000m of each profile were interpreted firstly, two regional faults, namely, the Henggang-Luohu Fault and the Liantang Fault, and seven local faults consistent with the electrical boundaries were verified or found. The strata in the survey area were then related with the change of resistivity. The horizontal electrical slices of depths less than 5000m indicate the Henggang-Luohu Fault and the Liantang Fault bifurcate at the shallow part but tend to merge at depths.

Key words　magnetotellurics, two-dimensional inversion, structure, Shenzhen Fault zone

---

〔**作者简介**〕　陈庞龙，男，1961 年生，1982 年毕业于武汉地质学院地震地质专业，获学士学位，副研究员，主要从事震害防御管理及断层活动性研究工作，电话：13902305223，E-mail：cplong123@163.com。