第 5 章　数值实验与实测资料的处理

近年来，大地电磁的发展非常迅速，理论研究已经比较成熟，仪器设备也有了很大的改进，实测数据的处理和反演解释也日趋完善，应用领域不断地扩大，在很多方面都得到了广泛的应用。本文所处理的实测资料是 2007 年 9 至 11 月在龙门山构造带中断所采集的大地电磁数据。本章首先简单介绍一下处理数据所用的由重点实验室所研发的大地电磁处理软件，然后用前文中二维非线性共轭梯度算法中正演部分的磁化率参数改进程序进行实测数据的反演处理，在磁参数变化的情况下研究其对大地电磁反演数据的影响程度。

5.1 MTSoft 软件简介

本文中数据资料的反演处理所用的软件 MTSoft 系列是成都理工大学教育部重点实验室自主研发的大地电磁数据处理软件（王绪本等），该软件具有松散耦合的模块化结构，在软件中采用全模块化设计制作，主要模块包括数据管理、预处理、反演、成像等。每个模块都有明确的数据流定义，每个数据可以加载到中间任意数据流过程中开始工作。充分做到了数据的可重用性和高度灵活性。而且模块化结构具备开放的接口，可以方便功能的扩充和升级，甚至加载用户自定义模块。与国外同类软件相比，具有结构简单，功能灵活的特点。

对于实测资料，它有完善的数据管理功能，软件采用数据分级分层次管理，数据以工区->测线->测点->频点分层次管理见图 5－1 和图 5－2，可以每一层次数据进行灵活编辑，既做到管理对象的层次清晰又具有灵活性。

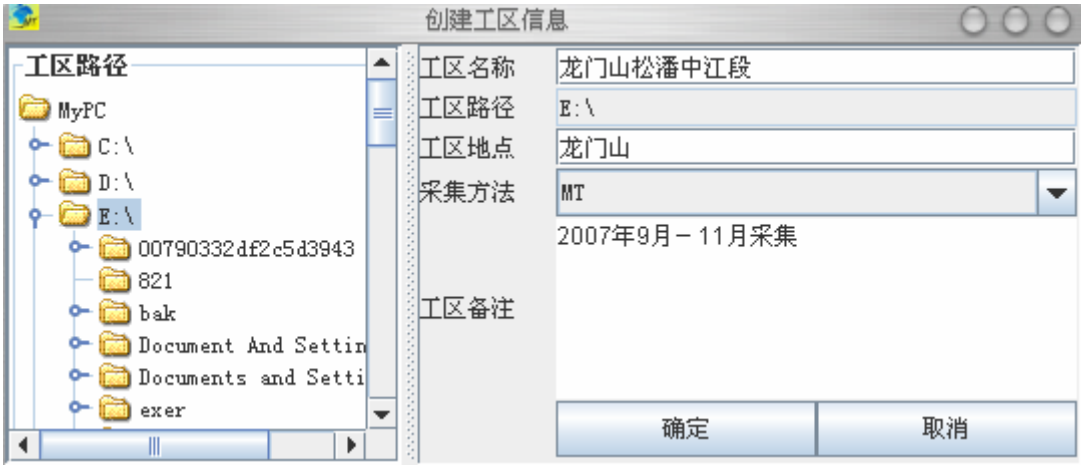


图 5-1 工区的创建

本软件拥有强大的预处理功能，可以灵活地对实测数据进行处理，包括测点

编辑、平滑、曲线拟合、极化模式识别、静态校正、滤波等。可以进行多种反演方法，软件设计了多种反演方法结合进行反演，可以通过不同反演结果的对比来对数据进行综合解释。反演算法包括 Bostick、Occam、非线性共轭梯度、快速松弛、遗传算法等。采用模块化插口和相同的数据定义，可以任意扩展加载反演算法见图 5－3。



图 5-2 软件的数据管理

就目前而言，该软件与国外软件相比，在数据管理、界面设计、预处理、反演等方面都具备较强的优势，而且软件占有资源小、功能强大，具有较强的实用性和推广应用价值。

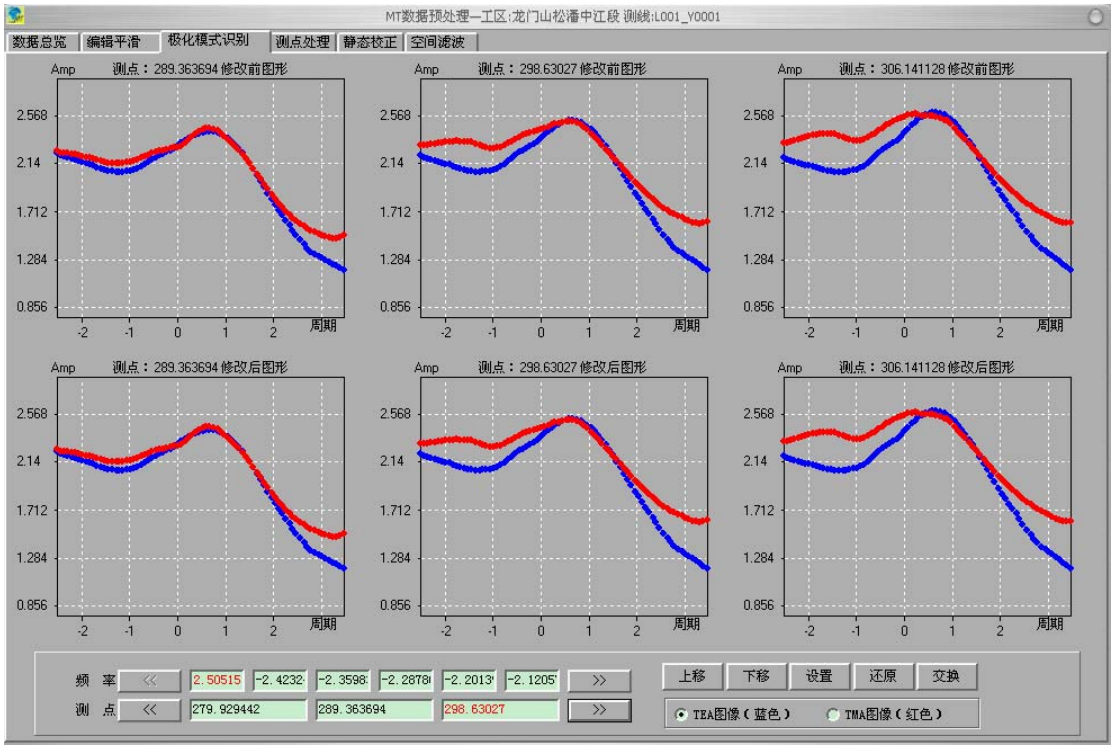
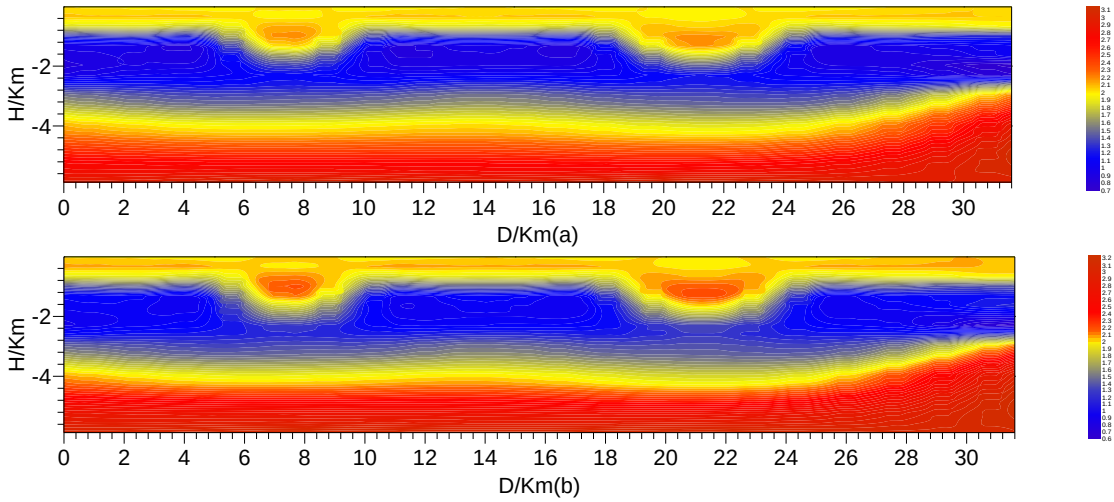


图 5-3 实测资料的数据处理

5.2 模型反演情况

对前文中所建地堑的理论模型数据进行了二维的非线性共轭梯度反演计算，分别得到磁参数为常数和变化的条件下的 TE、TM 视电阻率结果，如图 5—4 所示：



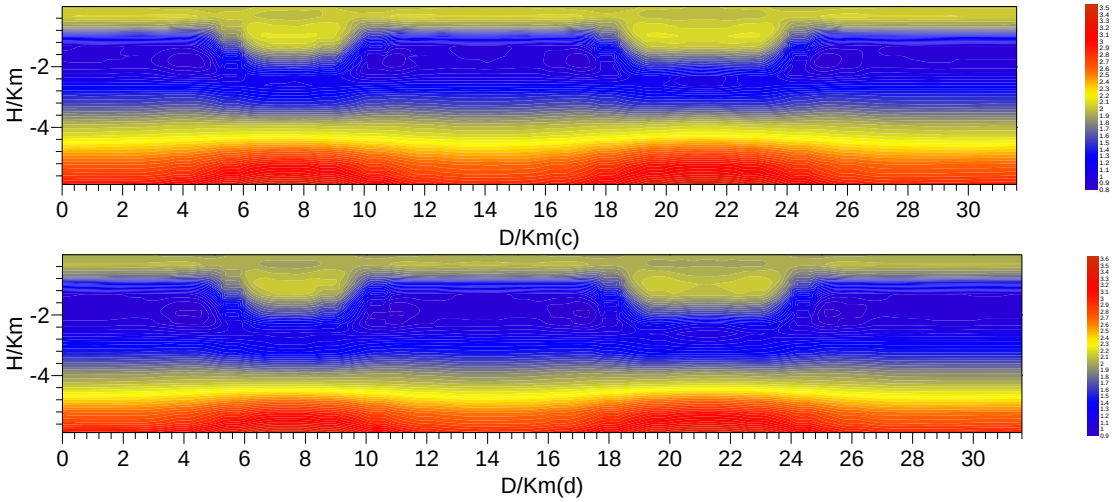


图 5-4 TE、TM 模式二维电性反演结果

（a）磁化率为常数 TE 反演

（b）磁化率为变量 TE 反演

（c）磁化率为常数 TM 反演

（d）磁化率为变量 TM 反演

图中磁化率为变量时的取值为 0.2SI，从图 5－4 中可以看出在 TE 模式下反演时，当磁化率发生改变时，对视电阻率的反演结果会有一些明显的改变，特别是在高阻部分的改变和深部的高阻部分，视电阻率有明显的增加，而 TM 模式下的表现却不是很明显。

5.3 实测数据处理与解释

为进一步研究磁参数在 MT 资料中的影响作用和验证本文正演模型试验中所得的有关结论以及修改后的二维非线性共轭梯度反演算法程序的可靠性，我们采用成都理工大学教育部重点实验室在国家自然科学基金项目《龙门山中段地壳及上地幔电性结构及动力学特征》（No.40674035）中（王绪本等）龙门山中段大地电磁测深实测数据，进行分析研究。

5.3.1 测区情况

松潘－甘孜造山带是一个倒三角形的特殊几何形态（见图 5－5），它不像地球上大多数的线性单向不对称造山带（如喜马拉雅、阿帕拉契、秦岭等），龙门山冲断带位于松潘—甘孜褶皱带与扬子板块接合部位，其构造活动强烈，地史演化多变，地壳深部结构独特，具有典型的冲断构造特征，历来为中外地质学家所注目。龙门山冲断带位于松潘—甘孜褶皱带与扬子板块接合部位。它既是青藏高原的东界，又位于中国南北地震带上，其构造活动强烈，地史演化多变，地壳深部结构独特，具有典型的冲断构造特征，历来为中外地质学家所注目。经过近二

十多年的研究，地表地质研究有长足进展。但有关龙门山的形成和演化等重大科学问题的看法，特别是龙门山形成的动力学机制、深部壳幔结构认识等问题仍然存在着很大分歧。本章利用同时反演的方法处理 2007 年在龙门山中段采集的实测数据，在已有处理结果的基础上对资料进行重新处理。

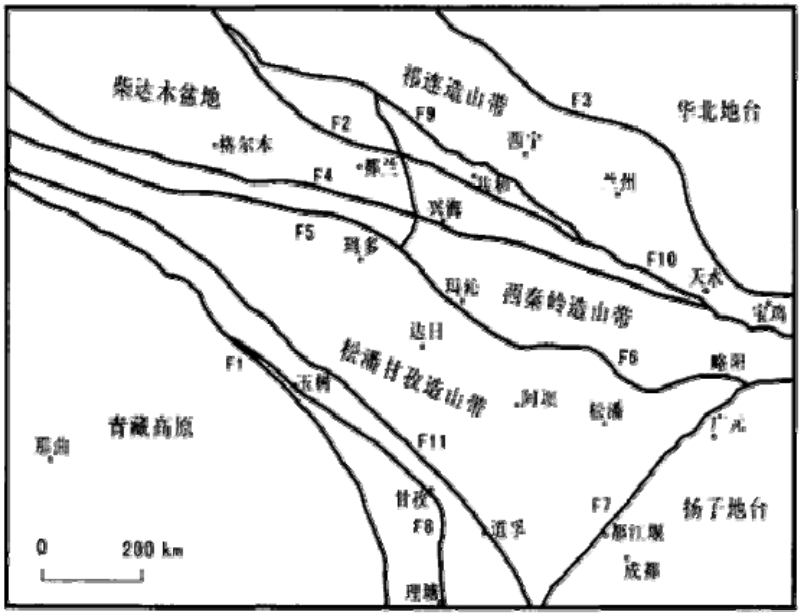


图 5-5 松潘－甘孜－西秦岭地区构造略图（据任纪舜等，1997，略图）

国家自然科学基金项目《龙门山中段地壳及上地幔电性结构及动力学特征》（No.40674035）提出沿龙门山中段设计一条大地电磁测深剖面。有鉴于此，2007 年 9 至 11 月我们使用加拿大凤凰公司的 V8 多功能电法仪和乌克兰生产的 LEMI-417 超长周期大地电磁测深仪分别进行了大地电磁测深（MT）和超长周期大地电磁（LMT）野外测量，剖面从中江，经北川、松潘、若尔盖至甘肃的碌曲，全长 480 公里，方位约为 NW30°，在地质构造上从川西前陆盆地开始，经过龙门山构造带，横穿松潘-甘孜构造带，止于西秦岭造山带。形成一条跨盆-山-盆-山的长剖面。其中大地电磁测深点共 49 个（A1~A49），平均点距约为 10 公里（见图 5－6）。

选用的加拿大 phoenix 公司 V8 多功能电法仪是目前较为先进的大地电磁测深仪，具有仪器灵活,配置可选择,工作温度范围广,并且实现网络化,站与站或发射机之间无连线,场源和接收网络均通过 GPS 同步等特点，其配置的 MTC-50 大地电磁专用磁棒频率范围为 400Hz 到 0.0002Hz。

在野外资料采集时记录大地电磁的五个分量的时间序列，所观测频率范围为 320Hz~0.000275Hz，为保证视电阻率、阻抗相位资料的周期长度，所有测点记录时间均超过 20h[58]。

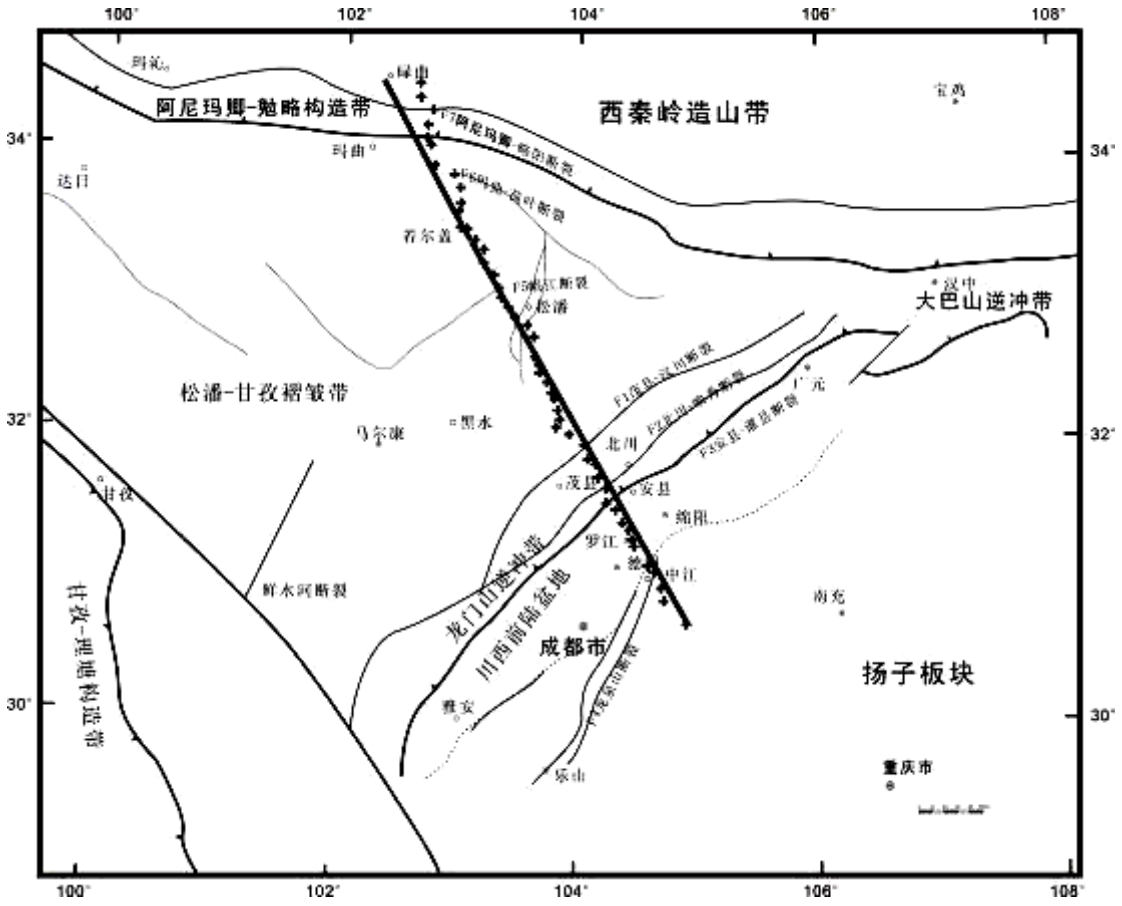


图 5-6 龙门山大地电磁测深测点位置图（据王绪本等，2007）

5.3.2 观测数据定性解释

定性解释工作是通过构制地电断面图、剖面图和平面图等图件，分析地下介质电阻率沿垂直方向和水平方向分布的一般特点，从而对测区地质构造轮廓获得一个初步的概念。剖面图或平面图反映某一电性层沿剖面或平面上的分布特点，断面图则表示不同深度岩层电阻率沿剖面分布特点。

在定性解释中，视电阻率断面图和阻抗相位断面图是大地电磁资料分析解释中最基本的一种形式，横坐标为测线方向，标出了测点位置和点号，纵坐标为频率，一般按对数坐标表示，以各测点相应频率上的视电阻率值和阻抗相位勾绘出等值线，即得到视电阻率－频率和阻抗相位－频率断面图。

视电阻率断面图给出了测线上最基本的电性分布特征，分析视电阻率－频率断面图，可以定性的了解测线上电性分布、基底的起伏、断层的分布和电性层的划分等特征。

大地电磁勘探中的相位是实测天然大地电磁场中电场信号与磁场信号之间的相位差。根据希尔伯特变换，阻抗相位与视电阻率之间具有如下关系：

$$\frac{d\log\rho_{app}(\omega)}{d\log\omega}=\frac{\phi(\omega)}{45^{\circ}}-1$$

式中，ω为观测频率，ϕ为阻抗相位，ρ_{app}为实测视电阻率。上式表明，当相位等于45°时，实测视电阻率随频率不发生变化，或者出现极值；当相位小于45°时，视电阻率随频率的降低而增大；相反，而当相位大于45°时，视电阻率随频率的降低而减小。根据相位－频率断面图等值线的横向变化可定性的确定地层起伏变化特征以及断裂分布的位置[37]。

5.4 观测数据的二维反演

本文中，作为一种对比研究，用两种方法处理龙门山大地电磁测深资料，以龙门山大地电磁测深实测资料松潘－中江段处理的反演结果为例来分析磁化率变化时对 MT 反演的影响程度。其中，第一种是在反演中不考虑磁参数变化（$\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}H/m$）来处理实际资料，反演电阻率的分布。第二种是用前文所述经过改进的正演算法，将之加入到反演算法中去，在算法中磁化率为可变参数，我们将异常体部分的磁化率κ的取值分别定为 0.005SI，0.01SI，0.15SI，0.2SI 等，将经过反演后获得的电阻率分布与第一种方法得到的反演结果进行分析对比，来评价磁化率变化对实际资料处理产生的影响。

经过处理的数据如下图所示：

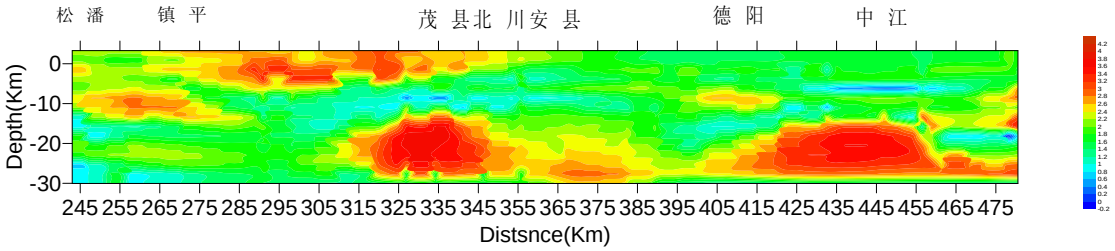


图 5-7 松潘中江段二维电性结构

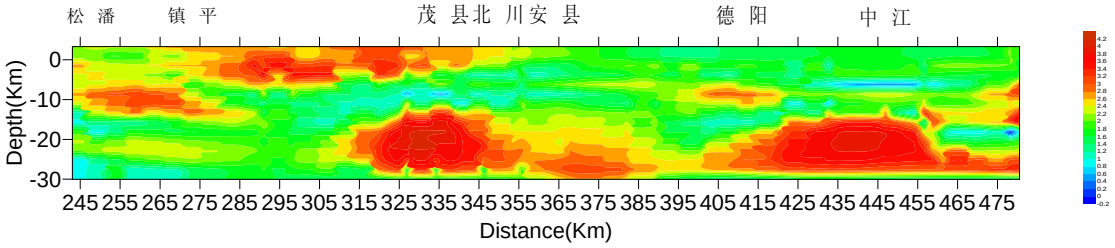


图 5-8 磁参数变化松潘中江段二维电性结构

图 5－7 是磁导率为真空中数值时（$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$）处理的视电阻率 TE、TM 联合反演结果。综合分析图 5－7 可以看出，川西前陆盆地呈现由右至左（南东-北西）逐渐增大，并与龙门山构造带之间存在电阻率上的突变，川西前陆盆地剖面所经过的范围整体可分为三层，呈现高-低-高的电性结构，与视电阻率的曲线特征相同。而龙门山逆冲带整体电阻率较高，为火成岩的特征反映，无论从电阻率还是相位特征中都对逆冲推覆构造有反映，表现为由东南向北西的逆冲推覆的构造[58]。

图 5－8 是磁化率取 0.2（SI）即磁导率大于真空中数值时 TE、TM 联合反演的二维电性结构。从两幅图的对比看来，当磁化率变化时，在实测资料的反演结果中可以看出，地下浅部电性变化不大，而在深部的电性结构则有一定的偏差，这也证明前文所归纳的磁化率变化对低频段有较大影响而对高频段影响不大的结论是正确的。

5.5 小结

本章通过使用发展了的反演方法对模型数据和实测资料进行反演处理，根据所得的结果进一步印证了磁化率参数对 MT 勘探中资料有较大的影响作用。同时也为以后将磁化率参数作为变量加入到反演程序中进行电阻率和磁化率同时反演的程序算法打下了基础，为在处理磁性体含量较高的地区进行 MT 勘探时，其实测资料数据处理解释精度的提高寻找到了一种新的研究方法。