

AMT 法在四川广元宝轮地区中 浅部地质调查中的应用

闵刚^{1,2,3}, 王绪本¹, 张迅¹, 夏时斌¹, 孔凡涛¹, 邓佳良¹

1) 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 成都, 610059;

2) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

3) 宁夏回族自治区地质矿产勘查开发局, 银川, 750021

内容提要:音频大地电磁法(AMT)作为一种中浅部勘探技术,相较于传统直流电法,具有工作效率高、不受高阻层屏蔽和对低阻层分辨率较高等优点。本文基于四川广元宝轮地区深部地质调查的需求,依托研究区物性测试成果和地质构造背景,建立包含逆冲断层、飞来峰构造和岩体构造的典型地电模型,使用正演软件开展大地电磁正演模拟,分析了方法的有效性;然后在垂直构造走向的方向开展 AMT 勘探工作,采用 NLCG 反演技术获取高精度二维电性剖面,结合研究区物性测试成果和地表地质调查成果,开展地质地球物理综合解释并建立沿剖面方向的地质模型,查明了梨树坝断层的深部展布特征、飞来峰构造及主要地质体的深部边界与规模等地质问题。研究结果表明:音频大地电磁法是开展中浅部地质调查的有效手段,能较好分辨出中浅部具有电性差异的不同规模地质要素。

关键词:音频大地电磁法;中浅部勘探;综合解释;地质模型

近年来,利用遥感和地球物理勘探资料对地质信息和地质现象本质开展的二、三维推断与描述受到一定重视(Chen Keqiang et al., 2012; Chen Jianping et al., 2014; Yang Wencai et al., 2015),地质信息和地下结构的详细描述由地表走向深部是必然要求和发展趋势,深部地质填图就是采用不同勘探调查手段,获取一定深部范围内的物质组成、结构构造等地质信息(Lü Peng et al., 2013)。重磁地震等地球物理方法在确定地下地质界线、构造和岩体分布等信息的过程中起到了重要作用,深部地质填图必然要依赖于地球物理方法(Carr, 2012; Yan Jiayong et al., 2008)。1:5万重磁资料解译成果在俄罗斯奥罗尼日结晶地块深部填图中应用效果明显,查明了基底起伏,圈定了多个具有找矿潜力的有利靶区(Ding Wanlie et al., 2003);Krupenin et al. (2004)利用区域航磁资料和区域重力资料的线性异常与断裂的正相关关系,准确地确定了俄罗斯乌拉尔山地区深大断裂延伸,为勘探靶区的圈定提供了重要依据;Peters et al. (2004)利用区域航磁资料完成了美国内华达深成花岗岩深部展布填图工作;澳

大利亚“玻璃地球计划”发挥各地球物理方法的优势确定控矿构造和围岩分层,进行立体填图,取得了良好效果;Li Yiquan et al. (2010)利用人工地震资料建立了中国龙门山前山断裂在部分区域的三维空间展布形态;国内外亦有大量利用音频大地电磁法圈定 3 km 以浅地层分布、岩体展布及构造特征的实例(Shi Mingjuan et al., 1997; Sarev et al., 2010; Dong Shuwen et al., 2012; Min Gang et al., 2014)。

音频大地电磁法勘探频率选取 MT 的声频部分(0.1~10000 Hz),以围岩与目标岩(矿)石的导电性和导磁性的差异为前提,根据电磁感应原理研究电磁场在空间、时间上的分布规律,用于探测地下目标体,解决地下地层、构造展布等地质问题(Feng Bing et al., 2014)。作为一种中浅部勘探技术,相较于传统直流电法,具有工作效率高、不受高阻层屏蔽和对低阻层分辨率较高等优点。本文基于四川广元宝轮地区深部地质调查的需求(研究区梨树坝断层深部走向不明、飞来峰构造及地质体深部规模不清等),首先开展物性资料统计与分析,论证音频大

注:本文为中国地质调查局项目“龙门山构造带深部地质调查”(编号 1212011220263)和国家自然科学基金项目(编号 41274078)资助成果。

收稿日期:2015-10-10;改回日期:2016-12-07;责任编辑:周健。

作者简介:闵刚,男,1983年生。博士,主要从事地球探测与信息技术、构造地球物理等方面的教学与科研工作。Email:mg-s1983827@163.com。通讯作者:王绪本,男,1956年生。教授,博士生导师,从事勘探地球物理研究。Email:wxb@cduet.edu.cn。

地电磁勘探的可行性;然后,在垂直构造走向的方向开展音频大地电磁测量,采用二维NLGC反演算法,选择合适的反演参数对实测数据开展反演计算,获取研究区3 km以浅的深部电性结构剖面;最后,充分利用研究区的地质构造背景资料、物性统计分析成果、AMT定性资料及定量反演资料开展综合地质地球物理解释,并建立沿剖面方向的二维地质结构模型,查明了梨树坝断裂带深部走向及飞来峰构造深部边界。研究结果表明:音频大地电磁法是开展中浅部地质调查的有效勘探手段,能较好分辨出中浅部具有物性差异的不同规模地质要素。

1 地质背景与物性特征

1.1 构造地质特征

四川广元宝轮地区在大地构造上处于松潘-甘孜造山带与扬子陆块的接合部位,地跨龙门山推覆滑覆构造带和川西前陆盆地二个构造单元。在构造位置上受到北西部松潘-甘孜造山带向南东逆冲推覆的影响,形成了区内总体呈北东-南西向展布的构造形迹。从北西到南东,褶皱构造以强岩层为基准,两翼夹角逐渐增大,表现出由紧闭的线性褶皱逐渐向平缓、开阔型短轴褶皱过渡的趋势。由于构造时代和岩性差异等复合因素的影响,研究区总体在呈北西-南东主压应力条件下,在断层构造上形成自北西至南东由中浅构造层次脆性逆冲推覆滑覆至浅表层次逆冲和宽缓褶皱变形的水平分带构造格局(图1)。

研究区构造变形强烈,类型丰富、构造行迹清楚,发育有褶皱、断层、飞来峰。变形特征以挤压变形为主,纵向由老到新,变形强度由强到弱。根据构造层特征、变形特征、变质程度及变形期次,以梨树坝断层(F_{05})、陈家山断层(F_{06})、马伏山断层(F_{10})、石山子断层(F_{11})和松林坡断层(F_{12})划分为6个变形构造单元:梨树坝推覆构造带(I)、陈家山推覆构造带(II)、马伏山推覆构造带(III)、松林坡推覆构造带(IV),另外在各个推覆构造带之上分布大量飞来峰群体,比较大的有莲花石飞来峰群(A_1)和三门垭飞来峰群(A_2)。

梨树坝断层(F_{05})为龙门山中央断裂北段(江油广元断裂)在研究区的体现,为梨树坝推覆构造带的前缘逆冲主滑断层,从梨树坝断层的变形特征分析,该断层是一条以韧性变形为主的逆冲推覆断层,早期以韧性变形为主,被后期脆性叠加改造,为形成于较新构造层次的韧性断层。断裂带内岩石强烈韧-脆性变形,主要有破劈理、构造透镜体、石英岩脉无

根钩状褶皱、密集剪切理及各种柔褶构造(图2);断层上盘志留纪茂县群黄坪组(Shp)及下盘的志留纪茂县群滑天坡组(Sh)的岩石也较破碎,节理发育,产状零乱。梨树坝断层带两侧构造变形见图3。可见,梨树坝断层在地表体现的产状不明显,深部构造走向不清楚,是研究区地质填图的一大难点。同时,通过地表地质调查也难以确定研究区莲花石飞来峰群(A_1)、三门垭飞来峰群及寒武纪、侏罗纪、志留纪等主要地层单元的深部结构样式。

1.2 物性特征

本区主要勘探目标梨树坝断层(F_{05})因断层上覆地层及下伏地层变形都很剧烈,断层地表空间展布难以通过地面特征进行推断,故断层破碎带与上下盘地层的物性差异性决定了物探方法是否可行?再者,飞来峰构造与下伏地层是否具有物性差异?主要岩体与围岩是否具有物性差异?电法勘探的前提是目标地质单元与围岩具有电性差异,故在进行大地电磁勘探前,有必要进行岩石及地层电阻率测试,因影响岩石电阻率因素是多种多样的,除了与组成岩石的矿物有关外,还与风化程度、裂隙、含水性等有密切的关系,岩石的电阻率不仅受本身成分的影响,同时受所处位置及地质环境的影响,故本次电阻率测试采取野外露头小四极的方式进行,岩石标本测试基本沿测线进行,能较真实的反映测线深部岩石及地层的电阻率特征。测试结果可以进一步指导电性结构剖面的地质地球物理综合解释。电阻率统计表有岩石电阻率统计表及地层电阻率统计表,分别见表1和表2。

由岩石电阻率变化特征统计表(表1)可以看出,在宝轮地区及邻域灰岩电阻率最高,平均电阻率为 $16176.87 \Omega \cdot m$;白云岩与石英砂岩电阻率次之,平均电阻率分别为 $5526.78 \Omega \cdot m$ 和 $3389.66 \Omega \cdot m$;变砂岩、板岩平均电阻率分别为 $1764.81 \Omega \cdot m$ 、 $914.40 \Omega \cdot m$;千枚岩、砂岩、泥岩平均电阻率都在 $800 \Omega \cdot m$ 以下;泥岩与碳质岩的电阻率最低,分别为 $161.04 \Omega \cdot m$ 与 $29.69 \Omega \cdot m$ 。综上所述,灰岩、白云岩及石英砂岩是引起高层电阻率的主要因素;变砂岩与板岩是引起中高阻地层电阻率的主要因素;千枚岩、砂岩是引起中低阻地层电阻率的主要因素;泥岩、碳质岩及页岩是引起低阻地层电阻率的主要因素。

由地层电阻率特征统计表(表2)可以看出,侏罗纪中上统地层主要表现为中低电阻率特征,中下统地层因含有含砾砂岩、石英砂岩而表现出高电阻

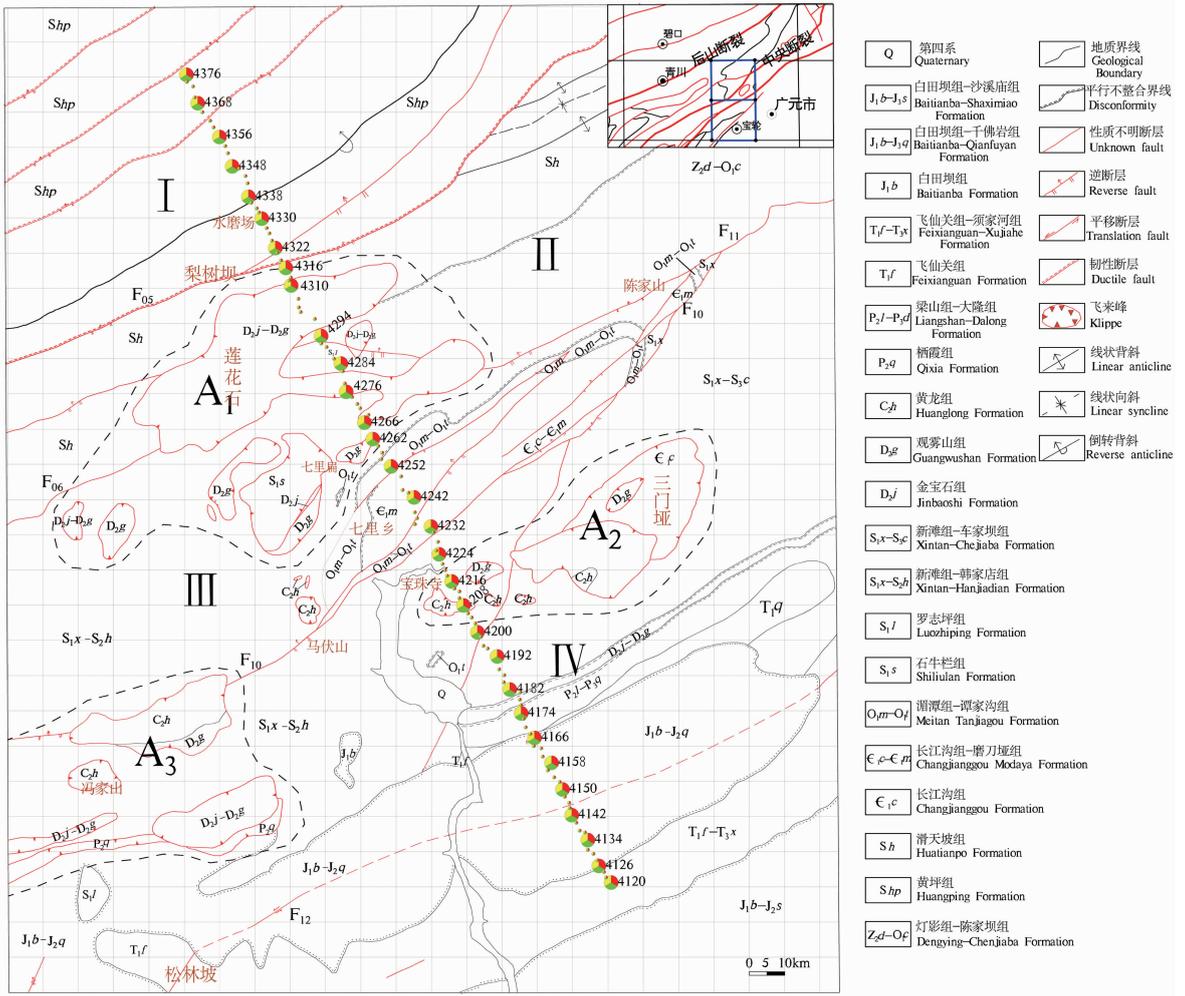


图 1 四川广元宝轮地区构造地质图及 AMT 实测点位分布图

Fig. 1 Structural geological map of Baolun region and the AMT measured point distribution

F₀₅—梨树坝断层; F₀₆—陈家山断层; F₁₀—马伏山断层; F₁₁—石山子断层; F₁₂—松林坡断层; I—梨树坝推覆构造带; II—陈家山推覆构造带; III—马伏山推覆构造带; IV—松林坡推覆构造带; A₁—莲花石飞来峰群; A₂—三门垭飞来峰群; A₃—吴家坪飞来峰群
 F₀₅—Lishuba fault; F₀₆—Chenjiashan fault; F₁₀—Mafushan fault; F₁₁—Shishanzi fault; F₁₂—Songlinpo fault; I—Lishuba thrust belt; II—Chenjiashan thrust belt; III—Mafushan thrust belt; IV—Songlinpo thrust belt; A₁—Lianhuashi clippings; A₂—Shanmenya clippings; A₃—Wujiaping clippings

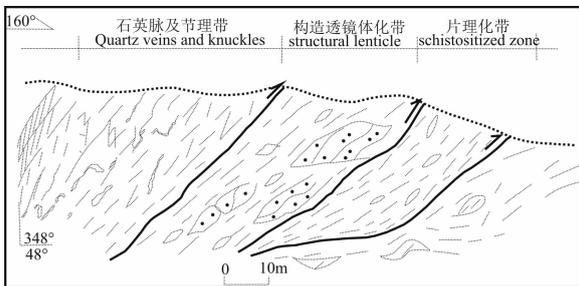


图 2 梨树坝断层带(F₀₅)构造剖面图

Fig. 2 The structural map of Lishuba fault (F₀₅)



图 3 梨树坝断层(F₀₅)地表构造变形图
Fig. 3 The surface structural deformation of Lishuba fault (F₀₅)

率特征;三叠纪地层除上统的须家河组地层表现为中阻特征外,其余地层单元都表现为中高电阻率率

表 1 四川广元宝轮地区主要岩石电阻率(露头小四极)统计表

Table 1 The rock resistivity of electrical test results by small four-pole method in Baolun region

岩性	变化范围($\Omega \cdot m$)	平均($\Omega \cdot m$)	岩石所处主要地层	样品数
板岩	47.11~1646.65	914.40	志留纪滑天坡组、黄坪组中段	78
千枚岩	48.19~2203.78	536.96	志留纪滑天坡组、黄坪组、奥陶纪陈家坝组	118
砂岩	66.1~1954.3	569.66	寒武纪磨刀垭组、侏罗纪及三叠纪地层	155
石英砂岩	1566.3~9673.6	3389.66	泥盆纪金宝石组、侏罗纪及三叠纪地层	46
泥岩	10.12~430.12	161.04	志留纪新滩组、奥陶纪涪潭组、侏罗纪中统沙溪庙组	89
灰岩	1285.4~55375.7	16176.87	志留纪石牛栏组、泥盆纪观雾山组、石炭纪黄龙组、二叠纪及三叠纪地层	141
白云岩	2159.3~6649.42	5526.78	三叠纪下统嘉陵江组、中统雷口坡组	102
变砂岩	353.9~2582.2	1764.81	奥陶纪陈家坝组、志留纪及侏罗纪地层	94
碳质岩	5.7~51.45	29.69	志留纪新滩组	54

表 2 四川广元宝轮地区地层电阻率(露头小四极)统计表

Table 2 The formation resistivity of electrical test results by small four-pole method in Baolun region

地质时代	地质单位		岩性	变化范围 ($\Omega \cdot m$)	平均值 ($\Omega \cdot m$)	样品数(块)
	组	代号				
侏罗纪	莲花口组	J ₃ l	砂岩、泥质砂岩	14.2~2638.2	847.2	16
	遂宁组	J ₃ s	泥岩、砂岩	31.0~514.9	264.2	40
	沙溪庙组	J ₂ s	砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	100.3~822.2	434.4	46
	千佛岩组	J ₂ q	石英砂岩、含砾砂岩	1113.7~9093.5	3555.6	32
	白田坝组	J ₁ b	含砾砂岩	1021.7~17107.8	5767.3	25
三叠纪	须家河组	T ₃ x	砂岩、泥质粉砂岩	218.9~1801.9	748.8	23
	雷口坡组	T ₂ l	微晶白云岩、灰岩	3679.1~13441.4	6072.4	24
	嘉陵江组	T ₁ j	白云质灰岩	1580.8~5349.1	2903.4	25
	铜街子组	T ₁ t	砂岩	383.4~2604.8	1638.9	32
	飞仙关组	T ₁ f	微晶灰岩	4421.8~37214.2	13420.1	21
二叠纪	大隆+吴家坪组	P ₃ d+w	灰岩、细-微晶灰岩	5168.4~47466.6	27185.5	28
	茅口组	P ₂ m	瘤状微晶灰岩、泥质灰岩、生物碎屑灰岩	5079.5~34711.5	14943.9	23
	梁山+栖霞组	P ₂ l+q	灰岩、夹方解石	1316.2~36653	14147.7	21
石炭纪	黄龙组	C ₂ h	微晶与生物碎屑灰岩、碎屑灰岩	9326.5~33999.1	17945.1	35
泥盆纪	观雾山组	D ₂ g	细晶-粉晶白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩	2198.5~58787.1	16938.9	36
	金宝石组	D ₂ j	石英砂岩、粉砂质泥岩	1869.3~8973.4	3589.9	20
志留纪	滑天坡组	Sh	板岩,局部发育千枚岩,泥质粉砂岩	102.14~2482.5	986.12	63
	黄坪组	Shp	千枚岩、夹泥质粉砂岩,千枚岩夹杂板岩,石英等	30.12~1056.23	610.12	76
	石牛栏组	S ₁ s	灰岩	2198.5~58787.1	16938.9	36
	罗惹坪组	S ₁ l	粉砂质泥岩、局部夹灰岩	102.2~1043.6	820.9	29
	新滩组	S ₁ x	粉砂质泥岩、碳质页岩等	10.69~483.2	147.9	54
奥陶纪	谭家沟组	O ₁ t	泥质粉砂岩、夹生物碎屑岩、泥质灰岩	72.8~9205.2	1747.87	26
	涪潭组	O ₁ m	粉砂质泥岩	78.36~8962.7	1762.0	25
寒武纪	磨刀垭组	C ₁ m	粗砾岩、含砾砂岩、砂岩	3277.7~9459.0	4099.6	40

特征;二叠纪地层岩性主要为灰岩、泥质灰岩、生物碎屑灰岩及方解石,表现为高电阻率特征;石炭纪地层主要发育微晶灰岩、碎屑灰岩等,表现为高电阻率特征;泥盆纪地层主要发育白云岩、白云质灰岩及灰质白云岩,表现为高电阻率特征;志留纪地层中发育梨树坝断层,断层上盘发育志留纪黄坪组,岩性主要为千枚岩,部分区域发育板岩及泥质粉砂岩,物性测试显示黄坪组地层电阻率为中阻,下盘发育志留纪滑天坡组,岩性主要为板岩,夹千枚岩、泥质粉砂岩等,物性测试显示黄坪组地层电阻率为中高阻;奥陶

纪地层主要发育泥质粉砂岩、泥质灰岩等,表现为中地层电阻率特征;寒武纪地层主要发育磨刀垭组粗砾岩、含砾砂岩、砂岩,物性统计结果显示其呈现高电阻率特征。

根据物性测试结果,将沿测线出露的岩石/地层电阻率分为 3 个层次:中高阻地层为侏罗纪莲花口组、三叠纪须家河组、志留纪滑天坡组与黄坪组、志留纪罗惹坪组,电阻率值在 610.12~986.12 $\Omega \cdot m$ 之间;中低阻地层有侏罗纪遂宁组与沙溪庙组、志留纪新滩组,电阻率值在 147.9~434.4 $\Omega \cdot m$ 之间;

高阻地层主要有侏罗纪中下统、三叠纪中下统、二叠纪中统、泥盆纪中统、石炭纪中统、志留纪石牛栏组、奥陶纪及寒武纪上统地层,电阻率值大于 $1638.9 \Omega \cdot \text{m}$ 。可见,测区地层的电阻率差异性明显,如志留纪新滩组地层表现为低阻,其下伏地层为寒武纪—奥陶纪的高阻地层,上覆地层为志留纪罗惹坪组中高阻地层;泥盆纪飞来峰为高阻特征,下伏罗惹坪组为中阻;同时,本次电性测试结果显示滑天坡组与黄坪组地层表现为中阻或者中高阻的电性结构特征,断层因破碎剧烈加上研究区水系发达应表现为低电阻率特征,断层与上覆地层及下伏地层电性差异明显。地层与地层、地层与构造之间的电阻率差异性说明广元宝轮地区符合电法勘探基本条件,通过在测区合理布置测线,获取高质量数据,开展资料处理解释能达到较好的勘探效果。

2 音频大地电磁数据采集与处理

首先通过典型地电模型的正演分析了音频大地电磁方法在宝轮地区的勘探适用性;然后介绍了音频大地电磁剖面位置及数据采集技术,并对原始数据进行了质量评价;最后,进一步介绍音频大地电磁原始数据的处理流程与技术手段,处理过程中选择的阻抗估算方法、建模方法与正反演方法均为国内外相对成熟的主流技术(Hu Xiangyun et al., 2013; Ye Tao et al., 2013)。

2.1 典型地电模型正演模拟分析

音频大地电磁(AMT)勘探方法往往识别具有一定埋深的构造或与围岩电性差异较小的地质体比较困难。对于特定条件下的构造或岩体的研究,开展典型地电模型的二维正演模拟计算,分析大地电磁场(视电阻率)的响应特征,探讨大地电磁法的分辨率,对于分析方法的适用性、合理布置勘探点距具有重要指导意义。

二维正演模拟计算在成都理工大学开发的“MTsoft2.4”MT数据处理与解释系统下进行,使用的方法为基于三角网格剖分的有限单元法(Wang et al., 2013),图4为依据宝轮地区地质构造特征及物性测试结果建立的典型地电模型,模型中含有倾斜断层(F)、飞来峰构造(B)、高阻岩体构造(A)及低阻地层(C)等地电单元。

图5为逆冲断层、飞来峰组合模型正演模拟结果(测点距设置为 0.2 km),从图中可以看出,两种参数(视电阻率和相位)的两种极化模式(TE极化与TM极化)正演结果对断层、飞来峰及高阻岩体

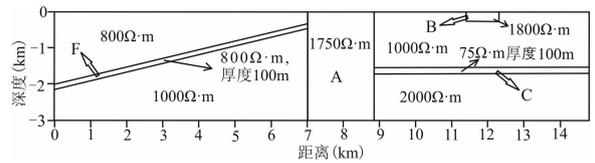


图4 宝轮地区逆冲断层、飞来峰、岩体等组合模型

Fig. 4 The model with thrust fault, rock and klippen in Baolun region

等都有相应的响应,但是从等值线效果来看,TE极化模式的视电阻率对深部地质单元的空间展布反映较好,TM极化模式的视电阻率等值线对出漏地表的地质单元横向位置反映更加精确;TM极化模式的视电阻率静态位移特征相对明显,在地表上的地层界限处高频至低频发育条带状异常,并使深部低阻层不易分辨。但是两种极化模式的相位受到浅部不均匀地电体的影响都较小,无明显静态位移现象。因此,在开展反演计算时,选择基于TE极化模式与TM极化模式的相位、电阻率联合反演,才能获得较好的反演结果。

2.2 AMT剖面位置及数据采集

测区内主要发育走向为东北向的线性构造,故沿垂直构造走向的北西向布置了一条音频大地电磁(AMT)剖面,音频大地电磁测深剖面横跨了脆韧性性质的中央断层(梨树坝断层 F_{05})、莲花石飞来峰群及奥陶纪—志留纪灰岩、寒武纪砂岩岩体等主要地质单元,剖面全长 26 km ,平均点距 150 m ,局部加密至 100 m ,音频大地电磁勘探剖面实测点分布见图1。

音频大地电磁数据采集采用加拿大凤凰公司(Phoenix)生产的V8多功能电法工作站,观测参数为 E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 。为保证数据采集质量,在正式工作前进行了仪器及磁探头的标定,以及仪器一致性试验等工作,选择重点勘查区进行了采集时间、偶极距大小、接地电阻大小、地形影响及远参考试验。通过对试验数据的分析研究,采用了 1.5 h 的采集时间、 50 m 的偶极距,接地电阻不大于 $2000 \Omega \cdot \text{m}$ 及远参考的数据采集方案,其较有效地克服了人文设施的干扰及地形的影响。质量检查统计结果视电阻率均方相对误差 $M(\rho) = \pm 2.92\%$,相位均方相对误差 $M(\Phi) = \pm 3.89\%$ 。各项质量检查结果符合相关规范,数据采集质量可靠。

2.3 音频大地电磁数据处理

首先采用V8多功能电法仪自带的SSMT2000软件开展原始数据的时-频转化和张量阻抗估算,该

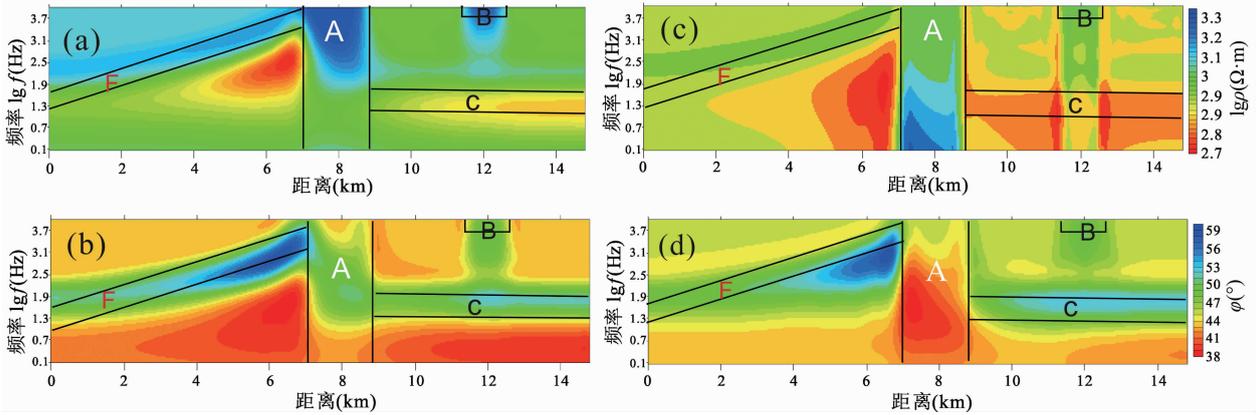


图 5 宝轮地区逆冲断层(F)、飞来峰(B)、高阻岩体(A)、低阻地层(C)组合模型正演模拟结果

Fig. 5 The FEM forward results of thrust fault (F), rock mass (A), klippe (B) and layered strata (C) in Baolun region

- (a)—TE 极化模式视电阻率等值线图; (b)—TE 极化模式相位等值线图;
- (c)—TM 极化模式视电阻率等值线图; (d)—TM 极化模式相位等值线图
- (a)—The contour map of TE apparent resistivity; (b)—the contour map of TE phase;
- (c)—the contour map of TM apparent resistivity; (d)—the contour map of TM phase

软件采用 Robust 技术(加权最小二乘法)计算出每个测点的单点视电阻率曲线(TE 极化模式和 TM 极化模式);最后采用 MTediter 软件对所单点视电阻率曲线进行评判,借助相位资料对部分测点的高频畸变和飞点进行恢复,部分不能恢复的飞点进行剔除处理。

研究区地表地形起伏剧烈,地表电性横向不均匀分布特征明显,因此,在进行二维反演之前,对全部 AMT 测点进行了 TE 与 TM 极化模式判别及静态位移分析,首先对同一地层单元内不同测点高频段视电阻率数值进行了统计分析比较(Zhan Yan et al., 2014),然后结合物性资料,判识发生静位移的测点并进行校正处理.利用相位资料不受静位移影响的特征,在反演过程中不断比较理论响应得到

的相位值与实测相位值,根据比较结果不断调整静态位移系数。

资料后续编辑处理与二维反演在成都理工大学开发的“MTsoft2.3”MT 数据处理与解释系统下进行,后续编辑处理有“飞点”编辑与空间滤波等,在“飞点”编辑过程中充分考虑“飞点”前后数值的连续性以及同一地层单元或构造单元内曲线形态的一致性。利用 NLCG(Rodi and Macie, 2001)二维反演算法开展 TM 与 TE 数据的电阻率相位联合反演,反演过程中 TM 视电阻率与阻抗相位数据选择 18%和 12%的本底误差,TE 视电阻率与相位分别使用 50%和 15%的本底误差。初始模型选择 $100 \Omega \cdot m$ 的均匀空间,分析不同正则化因子(τ)反演结果,图 6 为不同正则化因子(τ)下反演得到的模型粗糙度(Roughness)和拟合误差(RMS)的 L 曲线图,正则化因子为 10($\tau=10$)时得到的结果能最好综合拟合误差值与模型光滑程度(Prasanta and Harinarayana, 2009),使用 $\tau=10$ 反演时总体拟合误差为 1.89。

音频大地电磁勘探中原始数据质量必须保证优良,该部分在野外数据验收时得到了很好的肯定。原始数据反演计算结果的正确性是保证地质解释结果的前提条件,因此,需要对二维反演结果进行评价,本项目通过对反演结果开展正演模拟计算,分析理论响应与实测音频大地电磁视电阻率响应曲线的对比,分析反演结果的可靠性。

图 7 为 AMT 剖面二维反演得到的理论响应

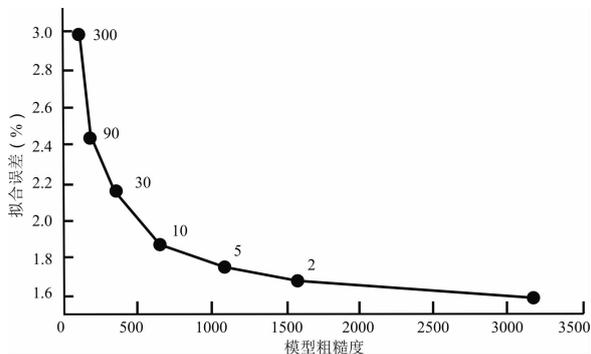


图 6 宝轮地区音频大地电磁测深剖面不同正则化因子反演得到的拟合误差、模型粗糙度 L 曲线图

Fig. 6 L-curve of RMS values and Roughness for AMT profile when τ is changed in Baolun region

(TE 极化与 TM 极化)等值线断面图与实测视电阻率影像断面图的对比,从对比图可以看出,实测的视电阻率影像断面图与二维反演得到理论响应结果拟合度较好,说明本次反演结果正确可靠,二维反演获得的 3 km 以浅电性结构图可以用于开展研究区的构造解释与地质地球物理综合解释。

3 资料定性分析与反演结果解释

原始观测计算出的视电阻率与阻抗相位是观测点下方地电结构的真实反映,在进行二维反演之前进行视电阻率与阻抗相位资料的定性分析,能基本了解勘探区深部电性纵向和横向变化特征,为反演结果的准确性评估及资料解释提供依据。因此首先对原始观测数据进行了定性分析,然后结合物性测试成果和测区地质构造特征开展地质地球物理解释。

(1)典型曲线分析:图 8 给出了具有代表意义的 5 个测深点的原始视电阻率和相位曲线,测深点位分别为 4356,4330,4310,4276,4166,分别位于志留纪黄坪组、梨树坝断层破碎带、志留纪滑天坡组、泥盆纪观雾山组及侏罗纪地层上面。结合地表地质出露情况及地层层序、产状综合分析,测点 4356 两种极化模式曲线形态基本一致,总体表现为中高—低—高的电阻率结构特征,上部高阻对应志留纪黄坪组地层,中间低阻对应梨树坝断层(F_{05})形成的破碎带,破碎带下面下伏奥陶纪—

寒武纪高阻地层;测点 4330 单点测深曲线总体表现为 A 型曲线特征,且两支曲线形态不一致,说明该区构造较破碎,总体呈现低电阻率特征;测点 4310 位于梨树坝断层下盘,主要地层为志留纪滑天坡组,电阻率整体表现为高阻特征;测点 4276 单点测深曲线两种极化模式形态基本一致,表现为高一低—高的电性结构特征,频率大于 50 Hz 的中高电阻率主要由泥盆纪观雾山组白云岩、灰岩与志留纪罗惹坪组粉砂质泥岩引起,夹在两套高阻地层中的低电阻率特征主要由志留纪新滩组碳质岩引起,碳质岩下面发育寒武—奥陶纪高阻地层;测点 4166 不同极化模式电阻率曲线基本重合(未考虑静态位移因数),说明该测点下面地层成层性较好,构造变形较弱,地质资料揭示该测点附近发育稳定的侏罗纪及三叠纪地层。以上分析结果揭示的浅部电性特征与物性测试结果及地表地质特征高度吻合,同时,深部电性结构特征又揭示了一定的未知信息。

(2)实测数据拟断面:图 9 为本次音频大地电磁 (AMT) 勘探实测数据视电阻率断面图、相位断面图以及一维 Bstick 频—深变换等值线图,可以看出,在里程 0~6 km 范围内,视电阻率断面图与相位断面图均存在呈 30°左右向地表(高频)延伸的低电阻率、高相位梯度带,结合地质现象及物性测试结果推测其为梨树坝断裂带(F_{05})的反映;在里程 7~13 km 范围内,相位断面图反映沿剖面方向深部结构

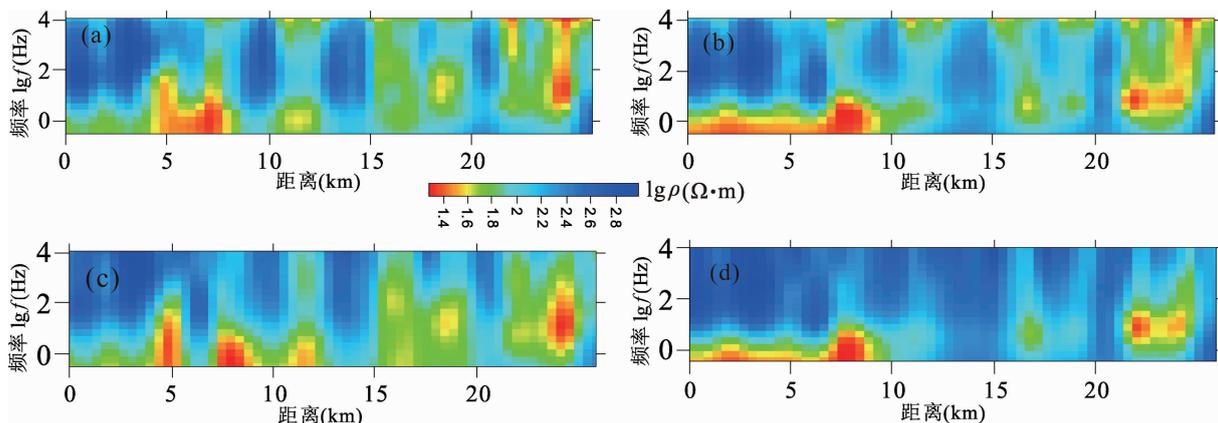


图 7 宝轮地区 AMT 勘探剖面实测与 2D 模型理论计算的 TE 和 TM 极化模式视电阻率影像图

Fig. 7 Comparison of TE and TM apparent resistivity and impedance phase of measured values and calculated values from 2-D theoretical response along the profiles AMT in Baolun region

(a)—观测的 TE 极化模式视电阻率;(b)—观测的 TM 极化模式视电阻率;(c)—计算的 TE 极化模式视电阻率;
(d)—计算的 TM 极化模式视电阻率

(a)—TE apparent resistivity of measured values; (b)—TM apparent resistivity of measured values; (c)—TE apparent resistivity of calculated values from 2-D theoretical response; (d)—TM apparent resistivity of calculated values from 2-D theoretical response

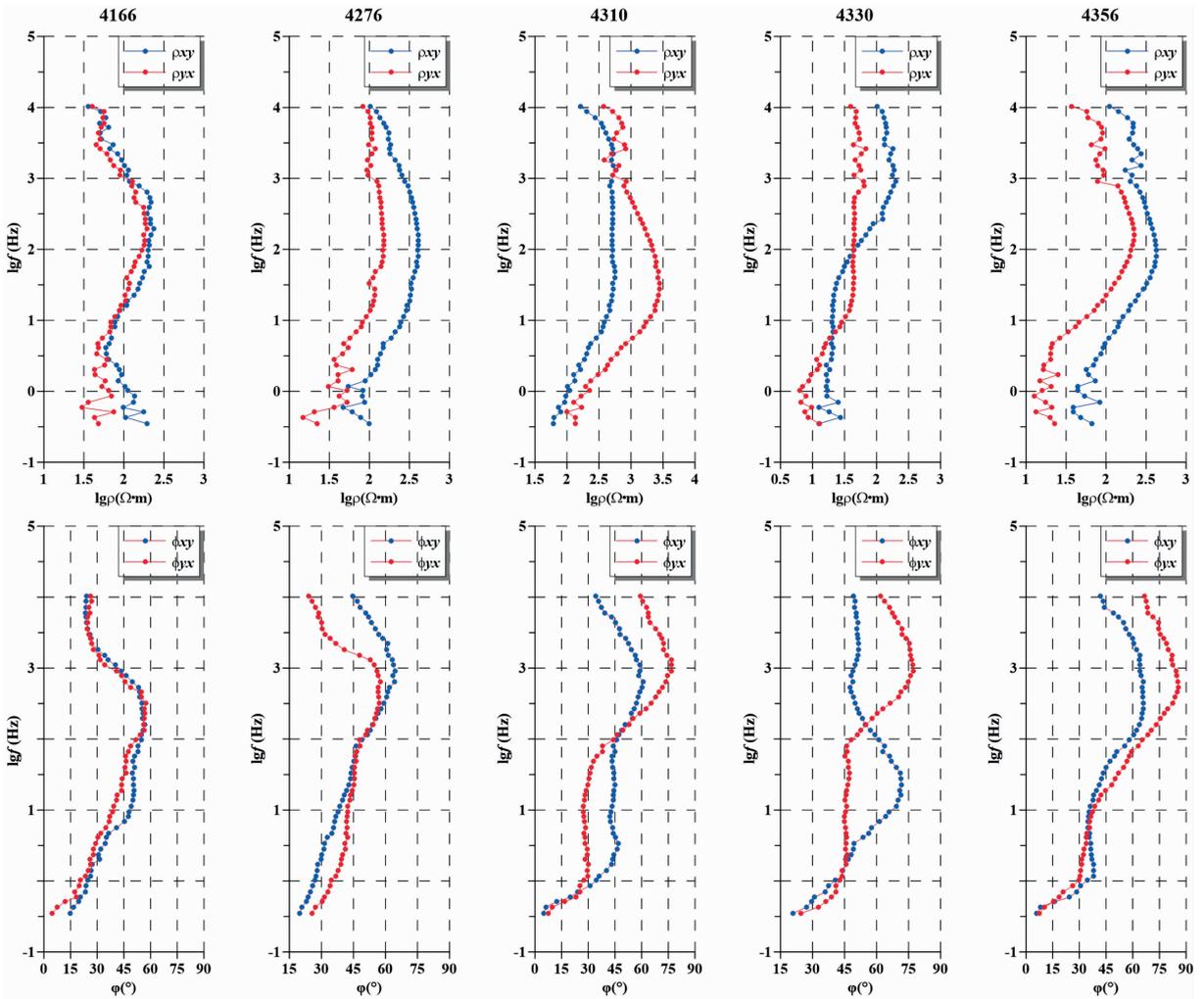


图 8 宝轮地区部分点位实测视电阻率(ρ)及相位(Φ)曲线

Fig. 8 Part of the point measured apparent resistivity (ρ) and phase (Φ) curves in Baolun region

总体为三层结构,结合电阻率断面图分析可知:50~10000 Hz 之间发育高阻地层,3.4~50 Hz 之间发育低阻地层,3.4 Hz 以下视电阻率值逐渐升高;在 20~27 km 里程范围内,视电阻率断面图及相位断面图总体呈现两层电性结构特征,上部为高一低阻相间出现的层状地层,深部为结构稳定的倾斜状高阻地层。一维 Bstick 频-深变换图及电阻率、相位拟断面图与测区地质现象基本吻合,说明本次数据质量可靠。

根据勘探区的物性测试及统计分析结果、相位与电阻率断面图分析结果可知,沿剖面方向深部结构大致可以分为 4 个电性区,每个电性区深部构造特征统计表见表 3,一维 Bostick 频-深变换结果(图 9c)断层、岩体及地层界面较清晰,与表 3 所揭示的深部结构大体一致,具有基本相同的构造特征及分层结构。

表 3 宝轮地区 AMT 测深剖面深部电性特征分区表

Table 3 The deep electrical characteristics partition of AMT profile in Baolun region

电性分区名称	深部电性结构特征	里程范围(km)
梨树坝断层区	上盘发育中高阻志留纪黄坪组地层,中间发育倾斜状梨树坝断层破碎带,断层下盘发育滑天坡组地层、奥陶—寒武纪混合中高阻地层	0~7
莲花石飞来峰区	浅部发育泥盆纪观雾山组与志留纪罗惹坪组组成的中高阻地层,中间发育志留纪新滩组低阻地层	7~12
寒武纪高阻区	地层较单一,发育一直延伸到接近 3 km 深度的寒武纪高阻地层	12~17
稳定层状地层区	地层成层性好,浅部发育高一低阻相间地层,深部发育高阻地层	17~26

(3)地质地球物理综合解释:图 10 为音频大地电磁法(AMT)测深剖面二维非线性共轭梯度

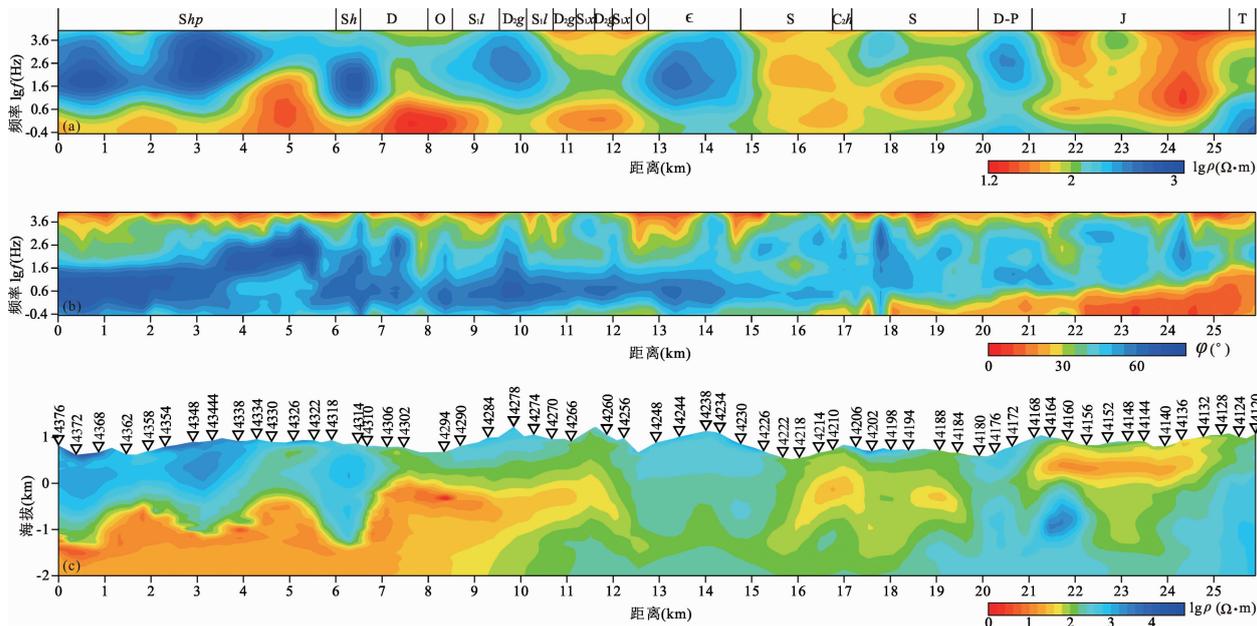


图 9 宝轮地区实测剖面数据拟断面图及一维 Bostick 变换图

Fig. 9 Measured data fake section of AMT profile in Baolun region

(a)—视电阻率;(b)—相位;(c)—一维 Bostick 频-深变换图

(a)—Apparent resistivity section; (b)—phase section; (c)—bostick frequency-deep conversion chart

(NLCG)反演结果与地表地质构造叠合显示的拟三维图,从图中可以看出,在 3 km 以浅的深度范围内次级构造边界带都呈现为明显的电阻率梯级带;地表横向的电性分布特征与物性统计分析成果一致,深部电性结构纵向特征与相应次级构造单元内的单点测深曲线分析(定性)结果一致,进一步说明本次反演结果真实可靠,反演结果可以用于开展研究区的深部结构解译、断裂体系划分等。

地质地球物理综合解释见图 11(c):① 横向里程 0~5 km 段深部电性结构特征总体表现为高一低一高一低的电性结构特征,上部高阻地层为志留纪茂县群黄坪组板岩、千枚岩等的反映;梨树坝断层带(F₀₅)所反映的中间低阻条带异常倾向北西,倾角 30°至 40°,在站湾村附近出露于地表;梨树坝断层下伏地层为奥陶纪—寒武纪地层的综合反映。② 横向里程 5~8 km 段深度 2.5 km 以浅的电性结构表现为中高阻电性结构特征,中高阻地层为奥陶纪—志留纪的灰岩、板岩等,里程 6~7.5 km 段地表发育泥盆纪观雾山组、金宝石组飞来峰,岩性为高阻的灰质白云岩、生物碎屑岩、白云质灰岩及石英细砂岩等,电性结构剖面显示在该飞来峰下面存在一横向条带低阻异常,推测其为飞来峰滑脱面。③ 横向里程在 5~8 km 之间深度在 2.5 km 以浅表现为层状电性结构特征,且呈现出“U”型向斜构造特征,泥盆

纪观雾山组飞来峰在电性结构剖面上反映明显,飞来峰与其下面的中高阻地层之间存在一个相对低阻滑脱面;滑脱面之下发育规模较大的中高阻志留纪罗惹坪组地层;中高阻地层之下为志留纪新滩组低阻地层,低阻地层下发育寒武纪—奥陶纪中高阻地层。④ 横向里程 12~16 km 之间地表出露规模较大的寒武纪中高阻地质体,电性结构显示高阻地质体被两条断层挟持,深度达 2 km 左右且规模由浅到深逐渐变小;横向里程 15~19 km 之间发育“漏斗状”志留纪低阻地层。⑤ 横向里程 20~25 km 之间电性结构表现为明显的层状构造特征,由浅部到深部分别发育侏罗纪、泥盆纪—二叠纪、志留纪地层及三叠纪地层,横向里程 25~26 km 之间发育规模较大的三叠纪飞仙关组高阻地层。

4 结论

本次试验针对中浅部地质填图中遇到的地质问题:研究区梨树坝断层(F₀₅)深部延伸情况及飞来峰构造深部样式不清楚、主要岩体及地层深部边界不明确等。在垂直构造走向方向布置 AMT 勘探剖面,开展数据采集和资料的反演计算,结合物性统计结果和区域构造特征进行地质地球物理综合解释。取得的主要认识及成果如下:

(1) 试验区露头小四级电阻率测试表明,主要探

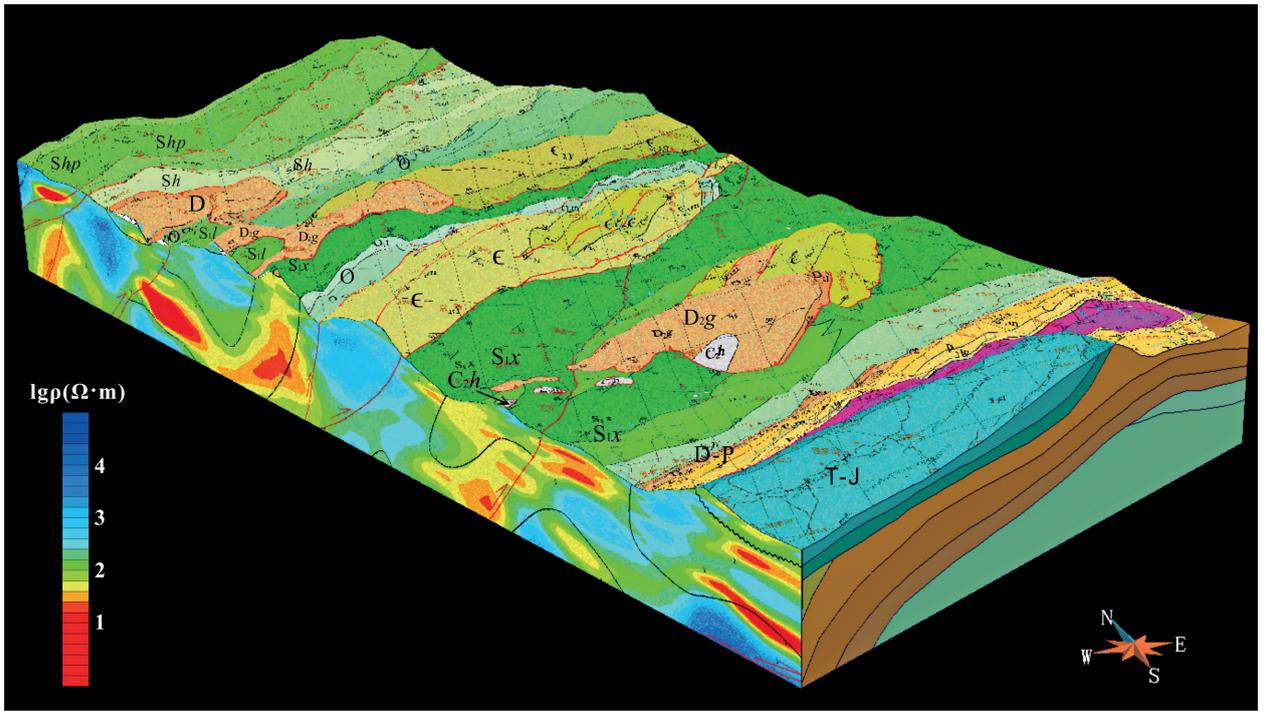


图 10 宝轮地区音频大地电磁(AMT)勘探结果拟三维显示成果图

Fig. 10 The pseudo-three-dimension resistivity structure of the inversion results in Baolun region

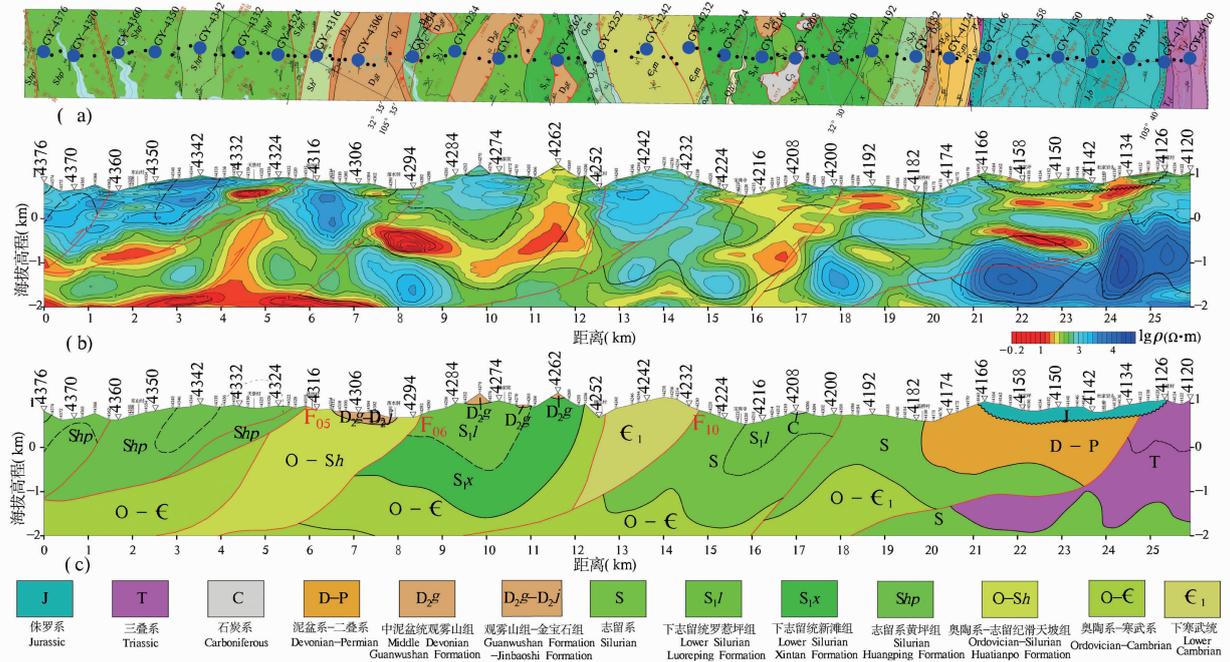


图 11 宝轮地区音频大地电磁(AMT)勘探结果地质地球物理综合解释图

Fig. 11 The geological and geophysical comprehensive interpretation map of AMT profile in Baolun region

(a)—地表地质及测点分布图;(b)—二维反演剖面图;(c)—地质地球物理综合解释图

(a)—Surface geology and survey point distribution map;(b)—the map of two dimensional inversion;

(c)—comprehensive interpretation map of geological and geophysical

测目标梨树坝断层与上覆地层志留纪黄坪组及下伏地层志留纪滑天坡组、奥陶纪地层之间的电性差异

明显,同时,不同岩体、不同地层电性差异明显,满足进行电法勘探的物性基础。典型模型的正演结果也

说明,针对广元宝轮地区的地质构造特征和物性差异特征,音频大地电磁法(AMT)理论上能较好地识别出勘探对象梨树坝断层、飞来峰构造、岩体与边界等地质要素。

(2)依据 AMT 二维反演结果及物性测试成果,结合地质剖面填图成果,解释出了梨树坝断层空间构造样式、泥盆纪观雾山组飞来峰构造、奥陶纪新滩组碳质页岩空间形态;推断了该剖面 3 km 以内的地电断面图、地层层序及岩体展布特征;实现了 AMT 资料约束下的中浅部地质建模工作。

(3)研究表明:利用 AMT 方法在地质条件复杂区探测深部构造、深部岩体、地层的分布是有效的、可行的,AMT 探测成果能为深部地质调查提供可靠参考资料,在中浅部地质调查区域开展三维网格化 AMT 测量能快速、有效地探测出深部断层构造,圈出与周围地质单元具有电性差异的岩体边界及地层边界。

致谢:成都理工大学陶晓风老师、赵兵老师在地质解释中提供了许多帮助;王建超在数据采集过程中,保证了数据质量的可靠性;匿名专家对稿件的最终完善提供了宝贵意见,在此一并表示感谢!

References

- Carr G. 2002. Glass earth-geochemical front of penet rateovercast layer. *Land and Resources Information*, 12:26~50.
- Chen Jianping, Yu Miao, Yu Pingping, Shang Beichuan, Zheng Xiao, Wang Limei. 2014. Method and practice of 3D geological modeling at key metallogenic belt eith large and medium scal. *Acta Geologica Sinica*, 88(6):1187~1195 (in Chinese with English abstract).
- Chen Keqiang, Gao Zhenjia, Li Long. 2003. Programs concerning deep geological mapping and geological stereomapping. *Geological Bulletin of China*, 22(11~12):984~990 (in Chinese with English abstract).
- Ding Wanlie. 2003. воронежскаяобласть crystal plane and uraniumcontain perspective of down Moscow lignite basin. *World Nuclear Geoscience*, 20(4):206~209(in Chinese with English abstract).
- Dong Jia, Li Yiquan, Lin Aiming. 2010. Structural model of 2008 Mw 7. 9 Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China. *Tectonophysics*, 491:174~184.
- Dong Shuwen, Li Tingdong, Chen Xuanhua, Wei Wenbo, Gao Rui, Lv Qingtian, Yang Jingsui. 2012. Progress of deep exploration in mainland China; A review. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12):3884~3901(in Chinese with English abstract).
- Feng Bin, Li Jianguo, Zhao Bin, Wang Yu, Wang Junlu, Zhang Jifeng. 2014. The application of audio magnetotelluric method (AMT) in Nanling Yudu-Gan County ore-concentrated area Yinkeng demonstration plot to survey deep mineral resources. *Acta Geologica Sinica*, 88(4):669~675 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiangyun, Huo Guangpu, Gao Rui, Wang Haiyan, Huang Yifan, Zhang Yunxia. 2013. The magnetotelluric anisotropic 2D simulation and case analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12):4268~4277 (in Chinese with English abstract).
- Li Yiquan, Dong Jia, Shaw J H. 2010. Structural interpretation of the coseismic faults of the Wenchuan earthquake; Three-dimensional modeling of the Longmen Shan fold and thrust belt. *Journal of Geophysical Research*, 115: B04317.
- Liu Yun, Wang Xuben. 2010. FEM using adaptive topography in 2D MT forward modeling. *Seismology and Geology*, 32(3):382~390(in Chinese with English abstract).
- Lu Hongfei, Wang Zhifu, Wang Heng, Lu Weiwei, Yin Changjiang, Ma Lamei, Yang Yongqiang. 2013. The application of CSAMT and GS on prospecting and evaluation in Baishan molybdenum deposit, Hami, Xinjiang. *Progress in Geophysics*, 28(3):1547~1555 (in Chinese with English abstract).
- Lü Peng, Zhang Wei, Liu Guo, Wang Shuqin. 2013. 3D geological mapping progress of important geological survey agency abroad. *Land and Resources Information*, (3):13~17 (in Chinese with English abstract).
- Mikhail T K. 2004. Y/Ho ratio as genetic indicator of sparry magnesites in south Urals, Russia. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4):803~896.
- Min Gang, Wang Xuben, Zhang Bin, Yu Qian, Wei Wei. 2014. Shale gas exploration test in the Cengong area of northeastern Guizhou based on AMT method. *Oil Geophysical Prospecting*, 49(4):815~824(in Chinese with English abstract).
- Peters S G, Ferdock G C, Woitsekhowskaya M B, Leonardson R, Rahn J. 2000. Reshoot zoning in the carlin-type betze orebody, Goldst rike mine, Eureka County, Nevada. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15(1):1~16.
- Qi Guang, Lü Qingtian, Yan Jiayong, Wu Mingan, Liu Yan. 2012. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit——a case study. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12):4194~4206 (in Chinese with English abstract).
- Sarev A K, Antaschuk K M, Nikiforov A B, Romamova N E, Denisov R V. 2010. AMT for the diamond exploration. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(3):657~675.
- Shi Mingjuan, Xu Shizhe, Liu Bin. 1997. Finite element method using quadratic element in MT forward modelin. *Chinese Journal of Geophysics*, 40(3):421~430 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongyan, Lü Junchao, Liu Guixiang, Ma Shimin, Shu Guanglong, Xi Zhenshu. 2010. Application of the AMT method to search for concealed ore bodies in southeastern Hubei Province. *Geology and Exploration*, 47(6):1133~1141 (in Chinese with English abstract).

- Teng Jiwen. 2008. The core scientific programs and development direction for the contemporary geophysical research. *Progress in Geophysics*, 23(3): 637~640 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gongwen, Zhang Shouting, Yan Changhai, Song Yaowu, Chen Tianzhen, Li Dong, Ma Zhenbo. 2011. 3D geological modeling based on geological and gravity-magnetic data integration in the Luanchuan molybdenum polymetallic deposit, China. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 360~366 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lifeng, Chen Xiaobin, Zhao Guoze, Zhan Yan, Tang Ji. 2011. CSAMT exploration to shallow electric structure beneath the Daixian Basin. *Seismology and Geology*, 33(4): 928~937 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuben, Chen Jinchao, Guo Quanshi, Liu Yun, Yu Jianbao, Zhang Bin. 2013. Research of the CSAMT exploration mode and experiment for the coalbed methane enrichment region in the north Qinshui basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4310~4323 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Teng Jiwen, Lü Qingtian. 2008. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources. *Progress in Geophysics*, 23(3): 871~891 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Xu Yixian, Zhang Luolei, Yu Changqin, Yu Peng, Zhang Binzheng, Yang Bo. 2015. Magnetotelluric investigation and 3D lithospheric structures in the Tarim Terran. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1151~1161 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tao, Chen Xiaobin, Yan Liangjun. 2013. Refined techniques for data processing and 2D inversion in magnetotelluric (MT): using the impressing method to construct starting model of 2D magnetotelluric inversion. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3596~3606 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Lifeng, Wang Jijun, Chen Xiaobin. 2014. Deep electric structure beneath the intersection area of West Qinling orogenic zone with North-South seismic tectonic zone in China. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(8): 2594~2607 (in Chinese with English abstract).
- 深部探测技术与实验研究进展综述. *地球物理学报*, 55(12): 3884~3901.
- 冯兵, 李建国, 赵斌, 王玉, 王璐璐, 张继锋. 2014. 音频大地电磁法在南岭于都-赣县矿集区银坑示范区深部矿产资源探测中的应用. *地质学报*, 88(4): 669~675.
- 胡祥云, 霍光谱, 高锐, 王海燕, 黄一凡, 张云霞等. 2013. 大地电磁各向异性二维模拟及实例分析. *地球物理学报*, 56(12): 4268~4277.
- 刘云, 王绪本. 2010. 大地电磁二维自适应地形有限元正演模拟. *地震地质*, 32(3): 382~390.
- 卢鸿飞, 王志福, 王恒, 路魏魏, 殷长江, 马腊梅, 杨永强. 2013. CSAMT 测深和重力测量技术在哈密白山铅矿深部找矿和远景评价中的应用. *地球物理学进展*, 28(3): 1547~1555.
- 吕鹏, 张炜, 刘国, 王淑琴. 2013. 国外重要地质调查机构三维地质填图工作进展. *国土资源情报*, (3): 13~17.
- 闵刚, 王绪本, 张兵, 余谦, 魏藏. 2014. AMT法在黔东南岑巩地区的页岩气勘探试验. *石油地球物理勘探*, 49(4): 815~824.
- 祁光, 吕庆田, 严加永, 吴明安, 刘彦. 2012. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例. *地球物理学报*, 55(12): 4194~4206.
- Peters S G, Ferdock G C, Woitsekhowskaya M B, Leonardson R, Rahn J. 2000. 美国内华达 Goldst rike 矿区卡林型贝茨金矿同变形的富矿分带. *地质找矿论丛*, 15(1): 1~16.
- 史明娟, 徐世浙, 刘斌. 1997. 大地电磁二次函数插值的有限元法正演模拟. *地球物理学报*, 40(3): 421~430.
- 谭红燕, 吕骏超, 刘桂香, 马诗敏, 舒广龙, 席振铎. 2011. EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用. *地质与勘探*, 47(6): 1133~1141.
- 滕吉文. 2008. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向. *地球物理学进展*, 23(3): 637~640.
- 王功文, 张寿庭, 燕长海, 宋要武, 陈天振, 李冬, 马振波. 2011. 基于地质与重磁数据集成的柴川钼多金属矿区三维地质建模. *地球科学(中国地质大学学报)*, 36(2): 360~366.
- 王立凤, 陈小斌, 赵国泽, 詹艳, 汤吉. 2011. 代县盆地可控音频大地电磁浅层电性结构探测. *地震地质*, 33(4): 928~937.
- 王绪本, 陈进超, 郭全仕, 刘云, 俞建宝, 张兵. 2013. 沁水盆地北部煤层气富集区 CSAMT 勘探试验研究. *地球物理学报*, 56(12): 4310~4323.
- 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 2008. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用. *地球物理学进展*, 23(3): 871~891.
- 杨文采, 徐义贤, 张罗磊, 于长青, 于鹏, 张秉政, 杨波. 2015. 塔里木地体大地电磁调查和岩石圈三维结构. *地质学报*, 89(7): 1151~1161.
- 叶涛, 陈小斌, 严良俊. 2013. 大地电磁资料精细处理和二维反演技术研究(三)——构建二维反演初始模型的印模法. *地球物理学报*, 56(10): 3596~3606.
- 詹艳, 赵国泽, 王立凤, 王继军, 陈小斌. 2014. 西秦岭与南北构造带交汇区深部电性结构特征. *地球物理学报*, 57(8): 2594~2607.

参 考 文 献

- 陈建平, 于森, 于萍萍, 尚北川, 郑啸, 王丽梅. 2014. 重点成矿带大众比例尺三维地质建模方法与实践. *地质学报*, 88(6): 1187~1195.
- 陈克强, 高振家, 李龙. 2002. 有关深部地质填图和立体地质填图的几个问题. *地质通报*, 22(11~12): 984~990.
- 丁万烈. 2003. 沃罗涅日结晶地块和下莫斯科褐煤盆地的含铀远景. *世界核地质科学*, 20(4): 206~209.
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 魏文博, 高锐, 吕庆田, 杨经绥. 2012. 我国

The Application of Audio Magnetotelluric Souding (AMT) Method in Mid-Shallow Geological Survey in the Baolun Region, Sichuan Province

MIN Gang^{1,2,3)}, WANG Xuben¹⁾, ZHANG Xun¹⁾, XIA Shibin¹⁾, KONG Fantao¹⁾, DENG Jialiang¹⁾

1) *Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of MOE,*

Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;*

3) *Ningxia Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Yinchuan, 750021*

Abstract

Audio magnetotelluric method (AMT), as a shallow exploration technology, is characteristic of high working efficiency and high resolution of the low resistance layer, and not affected by high resistance shielding layer, compared with the traditional direct current method. Based on geological structural background of the study area and the testing results of physical properties, a typical geoelectric model with thrust fault, rock and klippe was established to meet deep geological survey in the Baolun region in Guangyuan, Sichuan. Software (MTsoft 2D) was employed to carry out AMT forward modeling to analyze the effectiveness of the AMT method. Then audio magnetotelluric (AMT) measurements were preformed along vertical structure trend. High-resolution two-dimensional resistivity profiles were obtained using NLCG inversion. Combined with testing results of physical properties and surface geophysical survey in the study area, this study established a geological model along the profile direction by carrying out geological and geophysical interpretation, then identifying the deep distribution characteristics of the Lishuba fault, klippen structure, and deep boundary and scale of the main geologic body. The results show that Audio Frequency Magnetotelluric Souding (AMT) method is an effective tool for mid-shallow geological survey because it can distinguish the size and difference of geological parameters (sizes and resistivity) in mid-shallow areas.

Key words: AMT method; mid-shallow exploration; comprehensive interpretation; geological model