doi: 10.11720/wtyht.2023.1574

杨明远,张汉雄,马超,等. AMT 在新疆三屯河地区地下赋水性研究中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(6):1441-1449. http://doi. org/10. 11720/wtyht. 2023. 1574

Yang M Y, Zhang H X, Ma C, et al. Application of audio magnetotellurics in the study of the subsurface water-bearing properties of the Santunhe area, Xinjiang J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6):1441-1449. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.1574

# AMT 在新疆三屯河地区地下赋水性研究中的应用

# 杨明远1,张汉雄2,3,马超1,杨海磊1,朱威4

(1. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第二区域地质调查大队,新疆 昌吉 831100;2. 中国 地质科学院 水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061;3. 自然资源部 地热与干热岩勘察 开发技术创新中心,河北 石家庄 050061;4. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所,河 北 廊坊 065000)

摘要:在能源、矿产等勘探领域中,因为音频大地电磁测深法(AMT)具备勘探效率高、垂向分层能力强等优点,从 而得到大范围的应用。本文采用基于数据空间的三维反演算法,对新疆三屯河地区地热勘查采集的音频大地电磁 数据进行了三维反演。反演结果表明,三维反演在该地区避免了测线上不均匀地质体的影响,取得了更为丰富和 直观的三维地电异常。结合收集的研究区地质资料,利用 AMT 数据三维反演结果,对研究区地下电性特征及和热 储有关的地层赋水性进行分析,并结合研究区地热成藏规律推断了几处地热成藏的有利区。

关键词:三屯河;AMT;赋水性地层;地热

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)06-1441-09

# 0 引言

地热资源的开发利用在经济发展和环境保护相 互协调的可持续发展战略中具有重要的地位[1],赋 水性特征是研究地热成藏的要素之一,查明其特征 对于地热勘查工作具有重要意义。音频大地电磁法 使用1Hz~10kHz天然场源信号,具有施工效率高、 勘探深度可达千米范围、垂向分层能力强等优点,特 别适用于深度在千米左右的能源、资源及地下结构 勘查,尤其是对浅部特别是低阻层具有较高的分辨 率<sup>[2-3]</sup>。数据采集方面,AMT由于其场源是天然场, 信号微弱,在矿山、城区附近极易受到环境影响,但 在地广人稀的西部地区较易获取高质量的数据。资 料处理方面,与常规 MT 处理方法并无太大区别,使 用一维或者二维反演时容易受到不均匀地质体的影 响<sup>[4]</sup>。目前随着反演技术的不断发展和进步,大地 电磁资料的反演处理进入到三维反演阶段[5-7]。传 统基于模型空间的反演算法,模型参数的数量为M,

反演计算 M×M 数量的灵敏度矩阵,当网格参数 M 很大时,计算量太大,这种情况下进行三维 MT 反演 耗时费力,不满足实用条件。采用基于数据空间的 反演算法可以解决上述问题。满足观测数据的参数 数量 N 远远小于模型参数的数量 M,这样只需要计 算 N 维矩阵,大大减少了数据计算量。Siripunvaraporn 等<sup>[8]</sup>于 2005 年实现了该方法的三维反演。同时 基于 GPU 并行计算的三维 MT 反演软件陆续出现, 大幅度提高反演速度,使大尺度模型的三维 MT 反 演成为可能<sup>[9]</sup>。本次研究是通过分析在新疆三屯 河地区地热勘查获取的 AMT 数据的三维反演结果, 对研究区地下与热储有关的地层赋水性进行了分 析,结合研究区地热成藏规律推断了几处地热成藏 的有利区。

1 研究区概况

#### 1.1 区域构造

如图1所示,研究区处于准噶尔盆地南缘的昌

基金项目:新疆地矿局自筹资金项目(XGMB202130)

通讯作者:张汉雄(1990-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为地热地质学。Email:444219401@qq.com

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-03-02

第一作者:杨明远(1989-),男,地质矿产工程师,学士,主要从事地质矿产勘查工作。Email:297229762@qq.com

吉背斜北翼。从图 1 上看,昌吉背斜位于阿克屯背 斜和齐古背斜之间,与齐古背斜呈雁列式排列,与昌 吉向斜成对发育,NWW 向为背斜轴向,东西长约 18 km,南北宽约 5 km,为短轴背斜。背斜核部出露白 垩系清水河组地层,北翼连续出露白垩系至第四系 地层;背斜南翼即为昌吉向斜的北翼,由白垩系、古 近系组成,向斜核部地层为新近系,南翼连续出露古 近系、白垩系、侏罗系和三叠系地层。 图 2 中粉色框区为剖面穿过的研究区范围,前 人研究认为<sup>[10]</sup>,昌吉背斜为不对称背斜,断层走向 平行于褶皱轴向,背斜北翼地层倾角为 50°~80°的 高陡地层,北翼的白垩系内部发育有一条高陡的北 倾逆断层,造成白垩系地层重复出露。背斜南翼倾 角较缓 40°~45°,地层倾角从北向南由-28°逐渐减 小至近水平状态,在剖面最南侧三叠系不整合覆盖 在石炭纪基底之上<sup>[10]</sup>。



图1 研究区及研究区周边地震剖面位置(黑色线为地震剖面,蓝色框为研究区范围)<sup>[10]</sup>

Fig. 1 The location of the study area and seismic profile positions in the surrounding area (black is seismic profile

location, blue is study area range)<sup>[10]</sup>



图 2 昌吉背斜地震解释剖面 C-C'<sup>[10]</sup>

Fig. 2 C-C' seismic interpretation profile of Changji anticline<sup>[10]</sup>

#### 1.2 地层岩性

准噶尔盆地最老地层为奥陶系,最新地层为第 四系未胶结黏土和砂砾堆积,南缘主要为砂泥岩互 层的陆相沉积地层<sup>[11]</sup>。其中研究区剖面穿过的露 头所见地层如下:

下白垩统呼图壁河组(K<sub>1</sub>h),主要岩性为灰绿 色泥岩、砂质泥岩与砂岩互层,夹紫色泥岩。与上覆 胜金口组(K<sub>1</sub>sh)呈整合接触。

上白垩统东沟组(K<sub>2</sub>d),主要岩性为灰棕、灰 红、砖红色砾岩夹红褐色砂质泥岩、砂岩、粉砂岩,富 含钙质及少量钙质结核。与上覆紫泥泉子组 (E<sub>1-2</sub>z)呈平行不整合接触。 古新统—始新统紫泥泉子组(E<sub>1-2</sub>z),属河湖相 紫红、褐红色为主的砂质泥岩夹灰红色砂岩,底部为 砾岩或石灰质砾岩,以底砾岩出现和颜色的改变为 划分标志,故有红色层之称。与上覆安集海组 (E<sub>2-3</sub>a)呈整合接触<sup>[12]</sup>。

始新统—渐新统安集海组(E<sub>2-3</sub>a)为一套湖湘 沉积,多为灰绿色泥岩夹泥灰岩、薄层砂岩及介壳 层,含腹足类、双壳类、介形类、鱼类化石,因多为灰 绿色岩石而有绿色岩系之称。与上覆沙湾组 (E<sub>3</sub>N<sub>1</sub>s)呈整合接触。

## 1.3 电性特征

由研究区周边喀拉扎地区部分岩石物性参数

(表1)可知呼图壁组( $K_1h$ )以灰绿色砂质泥岩、细砂岩、粉砂岩,紫红色泥岩为主,岩性相近,电阻率值处于中间,一般在46~290  $\Omega \cdot m$ ;清水河组( $K_1q$ )以灰绿色或紫红色钙质砾岩,粉砂岩为主,不含水的情况下其电阻率较高,一般在300~800  $\Omega \cdot m$ ;齐古组( $J_3q$ )以紫红色、砖红色的泥岩,砂质泥岩夹薄层砂岩为主,其电阻率最低,一般在5~40  $\Omega \cdot m$ 。含有钙质砾岩的地层电阻率最高,泥岩层电阻率最低(有些泥岩层呈现次高阻特征),砂岩层电阻率居中<sup>[13]</sup>。

表1 研究区周边喀拉扎地区岩(矿)石物性参数统计 Table 1 Statistical of rock (ore) physical property parameters in Karaza area around the study area

岩(矿)石名称	个	$ ho_{\rm s}/(\Omega\cdot{\rm m})$		
	数	最大值	最小值	几何平均值
呼图壁河组紫红色泥岩	30	143.00	22.38	54.35
呼图壁河组灰绿色砂质泥岩	24	75.91	22.47	46.61
呼图壁河组灰绿色细砂岩	36	257.67	72.53	151.59
呼图壁河组灰绿色粉砂岩	24	504.14	138.26	294.01
清水河组灰绿色钙质砾岩	36	725.02	188.20	408.32
清水河组紫红色钙质砾岩	36	347.51	100.23	255.21
清水河组灰绿色砾岩	36	855.58	221.00	455.84
清水河组灰绿色粉砂岩	36	251.73	66.03	102.14
齐古组紫红色泥质粉砂岩	24	22.88	5.38	12.6
齐古组紫红色砂质泥岩	24	43.05	5.74	18.55

## 2 数据采集与处理

#### 2.1 数据采集

音频大地电磁法(AMT)是基于大地电磁法(MT)发展起来的,是以地下地质体的电性差异为基础,在地面接收天然电磁信号经过地下地质体与地质结构耦合之后的电场和磁场信号,并通过对其规律变化来研究地下结构,从而探测地下目标地质体。本次研究工作(图3)野外数据采集使用加拿大凤凰地球物理公司生产研制的 V8 多功能电法仪,使用AMTC-30 磁传感器,野外测量点距 50 m,采集 4 分量数据( $E_x$ , $E_y$ , $H_x$ , $H_y$ ),测站的布极方式主要采用"十"字型,部分测点因地形等原因,有时也采用 T"字型或"L"字型(图 4)。南北、东西向电极距均为40 m。结合研究区地层情况,采集时间 30 min,观测的有效频率为 10 000~1 Hz,根据趋肤深度公式计算后,勘探深度能够达到探测目标深度的要求。

由于天然电磁场信号较弱,为获取高信噪比的 野外测量数据,尽量选在地形开阔、平整的地方布设 测站,两个电道方向之间的地面相对高差与电极距 之比小于10%,远离电磁干扰源<sup>[14]</sup>。电极埋设应避 开岩体、深挖极坑、浇灌盐水增强极罐接地的耦合能 力等方法,使接地电阻不大于2kΩ。电极线选用屏



图 3 研究区地质及 AMT 测线位置(黑框为 AMT 三维反演范围)

Fig. 3 The study area geology and AMT survey line position map(black box is the range of three-dimensional inversion of AMT)



Fig. 4 AMT data acquisition and distribution mode

蔽线,同时防止其悬空切割磁感线产生感应电流,造成干扰。探头保持水平,两水平分量的探头相互垂直,间距大于10m,探头的埋深大于40cm,用土埋实,正北方向为x轴,正东方向为y轴。

#### 2.2 数据处理

首先对采集到的时间域数据进行频域变换处理 后得到  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ,  $Z_{yy}$  这 4 个复阻抗元素以及两种 极化方式(TE 和 TM)的视电阻率和相位数据等,在 三维反演过程中实际上主要用到的数据为  $Z_{xy}$ 、 $Z_{yx}$ 复阻抗元素, TE 和 TM 两种不同极化方式得到的视 电阻率  $\rho_{\text{TE}}$ 、 $\rho_{\text{TM}}$ 和相位  $\varphi_{\text{TE}}$ 、 $\varphi_{\text{TM}}$ 数据。同时可根据 反演需要视情况选用测点的其他参数数据。

图 5 为 2 个测点的实测视电阻率及相位曲线,7 线 50 测点位于紫泥泉子组地层中,由图中可见,TE 与 TM 两种极化方式的视电阻率曲线基本重合,说 明该测点基本没受到不均匀地质体带来的静态偏移 的影响。虽然由于天然场信号噪声洞的影响高频部 分数据连续性较差,但中低频部分数据的连续性尚 可,使用 EMD、人机联作等时间域信号去噪处理后 仍能得到高信噪比数据<sup>[15]</sup>,从而获得更科学准确的 反演结果。其中 5 线 250 测点处在背斜核部,TE 与 TM 两种极化方式的视电阻率曲线呈平行分开态势,说明该点的视电阻率可能受浅部、受局部电性非均匀体的静态偏移或测点附近的区域性断裂、各向异性地质体等具有明显的的三维特征地下电性结构的影响。在这种情况下,一维、二维反演结果与实际地下地质结构存在着较大的出入,影响推断解释结果。采用三维反演将静态偏移效应涵盖在三维正演响应中,同时拟合 TE 和 TM 极化方式的阻抗值,可以对地表局部非均匀体进行正确反演,从而获得更为准确的三维反演结果,更好地进行地质解释。

研究区测点点距较小,三维模型剖分的网格数为75×70×17=89250。电磁响应正演过程中,为了减小边界效应带来的影响,反演模型设置过程中向外扩展一定的距离,实际建立的反演初始模型的范围 x和 y方向上扩展为6~7km,z方向上按海拔高度扩展为1.5~3km。选用59个频点中的50个频点数据,频率范围为1.72~10400Hz。



# 3 地层电性特征

结合图 1 中黑色线所示地震剖面的拟三维形态 (图 6),昌吉背斜总体呈 NWW—SEE 向展布。从剖 面上看由浅到深呈现出为三级构造层次,近地表主 要发育断层传播褶皱及其次级断层形成的北翼陡、 南翼缓的不对称背斜,深部主要发育较低幅度的断 层转折褶皱,主要受深部来自于天山山前并在侏罗 系西山窑组(J<sub>2</sub>x)煤层发生滑脱的逆冲断层控制。 背斜的北翼部分,地层整体挤压发生形变,但未出现 明显的错动,由南向北地层形变逐渐变缓<sup>[16-17]</sup>。

使用经过去噪处理后的 AMT 数据进行了二维 和三维反演(图7、图8),其中图8a为3、5、7号测线 二维反演结果的栅栏图显示,浅部存在诸多凸起状 小异常的同时整个电性特征形态同已知的地质及构 造形态信息差别较大,不能准确地反映地下结构及 其赋水性对电性特征的影响。AMT 三维反演的电 性特征更符合已知地下构造形态及赋水地层对电阻 率的影响(图7、图8b),AMT 测线南西至北东穿过 出露四套地层是呼图壁河组(K<sub>1</sub>h),东沟组(K<sub>2</sub>d)、 紫泥泉子组(E<sub>1-2</sub>z)和安集海河组(E<sub>2-3</sub>a),从昌吉 背斜的核部向北翼方向延伸。结合前文对区内地层 电阻率值特征的分析,AMT 剖面穿过的地层电阻率 值特征应为,呼图壁河组为中低阻、上白垩统东沟组高阻、紫泥泉子组中高阻、安集海组低阻的电性特征。但地层的电阻率值又同地层含水饱和度有着密切的关系,实际上研究区内AMT 剖面的电性特征表现为,呼图壁组(K<sub>1</sub>h)处于测线西南端,总体表现为高阻层,电阻率相对高是由于该地层多为压实的泥岩,孔隙度较小,含水饱和度低,相对于其他砂岩和含水砾岩地层,电阻率值显示为相对高值;东河组(K<sub>2</sub>d)下部的电阻率低值可能是其中孔隙度较大的砾岩、砂岩中水饱和度高引起的,为储水的有利层位;紫泥泉子组(E<sub>1-2</sub>)电阻率总体为相对高值,部



图 6 昌吉背斜的拟三维形态及展布特征<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Quasi-three-dimensional morphology and distribution characteristics of Changji anticline<sup>[15]</sup>



图 8 剖面反演结果

Fig. 8 Profile inversion results

分低阻区域可能是由孔隙度大的砾岩充填水引起 的,局部的高阻可能是孔隙度较大的砾岩层钙化形 成的质密的不均匀地质体引起的电阻率值变高;北 东端安集海河组(E<sub>2-3</sub>a)在测线末端,电阻率阻值较 大,但测线覆盖范围较小,不具有代表性。从三维电 阻率反演结果上看,整体上是一个低电阻率背景,与 地质情况相符,但电阻率值又呈现明显的非均匀性。 存在多处低阻、高阻异常区,未有明显的水平层状结 构,同图 6 展示的同研究区距离最相近的 CJ9909 剖 面中粉色框区所示的昌吉背斜地层产状较陡,倾向 NW 向构造样式吻合,与野外实际调查情况相符。

#### 4 赋水性特征

研究区内地层电性特征不仅受到岩石风化程度 和岩石破碎程度的影响,还受赋水性的影响,随含水 率的增加电阻率值降低,这是利用电法资料推测研 究区地层赋水性的重要依据。研究区地处三屯河流 域,且附近修建有大型水库等蓄水水利设施,地表径 流是地下水补给的重要水源之一。地下水研究资料 显示,区内地层受单斜控制,三屯河流域及其地下水 随地层倾斜由南向北径流,由背斜核部向背斜的北 翼汇聚(图9)<sup>[18]</sup>。

研究区中电性特征展布形态与地层的赋水性及 水流体的连通性息息相关:首先是压实的泥岩地层 由于孔隙度低、阻水性好,成为挡水层;松散的砂岩、 砂砾岩地层由于孔隙度大,在良好的水源补给情况 下,大量的水充满在孔隙之中,这种背景下,原本高 阻特征的地层反而呈现出较泥岩地层更低的电阻 率。在三维反演结果中也很明显的展现这个特征; 图7中的凹陷区为低于阀值的区域(低电阻率地 区,主要是东沟组高阻、紫泥泉子组地层),凹陷区 的南部和东部低电阻率区深度更深,西南和东南部 电阻率呈现高阻特征(主要是呼图壁河组、安集海 河组地层)。





三维反演的电性特征和研究区的赋水性特征有 很好的对应关系。同一地层由于赋水性的强弱展现 出不同的电性特征,在切片图(图 8b)的地层中有明 显显示,两条红色虚线中间为研究区断层分布密集 的区域,属于小范围断裂带,因此其所属的紫泥泉子 组(E<sub>1-2</sub>z)地层中高阻特征是由于断裂带低水饱和 度高引起的。压实的泥岩地层阻挡了地表水向下渗 透及地下水由南向北的连通,研究区西南和东南部 因其主要为呼图壁河组、安集海河组压实泥岩地层, 在三维反演结果中电阻率呈现高阻特征。研究区中 南部主要为东沟组高阻、紫泥泉子组砂岩、砂砾岩地 层,在三维反演结果中电阻率呈现浅部极低阻、深部 低阻特征,浅部极低阻是由于其浅部地层水主要由 地表径流直接补给,水量充分、矿化度高引起的。从 图 7 可以看出研究区 S 向和 ES 向各有一个地下水 的补给通道,地下水向北传递流通时,遇北部和东北 部的安集海河组泥岩地层阻隔,因此地下水更多的 聚集在研究区中南部。同时 F<sub>3</sub> 断裂的存在,高倾斜 地层中的破碎带具有加速地表水和深部地下水向东 沟组高阻、紫泥泉子组砂岩、砂砾岩地层的流通作 用。受研究区所处的构造和地层的控制,在浅部含 水的砂岩、砂砾岩地层范围又向 WN 方向延伸趋势, 在深部呈现出向 WS 向延伸趋势,这同研究区所在 的昌吉背斜的展布方向具有高度的一致性。在电阻 率等深图上(图 10)西南和东北部存在两个高低阻 转换区域,基本和区内断裂在走向上重合,断裂两侧 的电阻率值差异较大,不完全重合说明地下水的补 给通道主要为断裂,但在具有不同孔隙度的地层中, 水的流通性差别较大,因此反映出来的地下赋水性 的强弱差别也较大。

水源沿断裂破碎带循环于地下深处,经大地热 流或深部热源直接加热,深大断裂是导水通道同时 也是导热通道<sup>[19-21]</sup>;沉积河道由南向北延展,上白 垩统东沟组—下第三系紫泥泉子组砂岩、砂砾岩层 是良好的流体储集层,连通性也好,规模也大,是地 热水聚集的主要层位<sup>[22-24]</sup>。结合上述研究区的地 热成藏有利条件,存在热红外地温异常叠加断裂及 东沟组或紫泥泉子组地层可作为研究区的地热有利 区圈定要素。在4号测线的南端、5号测线的北端 均有断裂穿过,且存在热红外地温异常的东沟组和 紫泥泉子组地层中的高低阻转换带附近推断了两处 地热有利区(图10中蓝色虚线圈范围)。





# 5 结论与建议

研究结果表明 AMT 三维反演结果能够准确地 探测存在电性差异的地层结构,结合前人的研究成 果取得了对研究区地下电性和赋水性之间相关性的 认识:东沟组及紫泥泉子组等孔隙度较大的砂岩、砂 砾岩地层在高含水饱和度情况下赋水性更强,其电 性特征表现为低电阻率值:致密的泥岩地层由于其 隔水性导致其赋水性弱,表现出相对高阻特征。在 此认识基础上进而得到了区内地下赋水性特征:地 下水的补给通道主要为断裂,具有不同孔隙度的地 层中水的流通性差别较大,因此反映出来的地下赋 水性的强弱差别也较大,研究区中南部地下赋水性 强,在浅部含水的砂岩、砂砾岩地层范围有向 WN 向 延伸趋势,在深部呈现出向 WS 向延伸趋势,同研究 区所处的昌吉背斜的展布方向具有高度的一致性。 受制于物性资料的限制,本次研究未考虑地层含水 矿化度对电阻率的影响,在浅部电阻率值发生急剧 变化的部位是否是由于含不同矿化度的水所引起的

值得进一步的研究。

# 参考文献(References):

[1] 徐世光,郭远生. 地热学基础[M]. 北京:北京科学出版社, 2009.

Xu S G, Guo Y S. Geothermal blood foundation [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2009.

- [2] 王佳龙,邸兵叶,张宝松,等. 音频大地电磁法在地热勘查中的应用以福建省宁化县黄泥桥地区为例[J]. 物探与化探,2021,45(3):576-582.
  Wang J L,Di B Y,Zhang B S, et al. The application of audio frequency magnetotelluric method to the geothermal exploration: A case of Huangniqiao area, Ninghua County, Fujian Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(3):576-582.
- [3] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及瞻望[J]. 地球物理学进展,2002,17(2):245-254.
   Wei W B. New progress and prospect of magnetotelluric sounding in China[J]. Progress in Geophysics,2002,17(2):245-254.
- [4] 严良俊,胡文宝,杨绍芳,等. 电磁勘探方法及其在南方碳酸盐 岩地区的应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
  Yan L J, Hu W B, Yang S F, et al. Electromagnetic prospecting method and its application in carbonate rock areas in the south [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2001.

[5] 冯思臣,王绪本,阮帅.一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J].石油地球物理勘探,2004,39(5):594-599,498-628.

Feng S C, Wang X B, Ruan S. Comparative study of several inversion algorithms for one-dimensional magnetotelluric sounding [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5):594–599, 498–628.

- [6] 胡祖志,胡祥云,吴文鹂,等.大地电磁二维反演方法对比研究
  [J].煤田地质与勘探,2005,33(1):64-68.
  Hu Z Z,Hu X Y,Wu W L, et al. Comparative study of two-dimensional magnetotelluric inversion methods[J]. Coal Geology & Ex-
- [7] 胡祖志,胡祥云.大地电磁三维反演方法综述[J].地球物理学 进展,2005,20(1):214-220.

ploration, 2005, 33(1):64-68.

physics, 2015, 12(3); 288-293.

Hu Z Z,Hu X Y. Review of 3D magnetotelluric inversion methods [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1):214-220.

- [8] Siripunvaraporn W, Egbert G, Lenbury Y, et al. Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-spale methed [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2005, 150(1/3):3-4.
- [9] 黄登,胡文宝,王仁虎,等. AMT 三维反演在浅部岩体勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(3):288-293.
  Huang D, Hu W B, Wang R H, et al. Application of AMT 3D inversion in shallow rock exploration[J]. Journal of Engineering Geo-
- [10] 邱建华. 准噶尔南缘新生代逆冲褶皱带构造几何学和运动学 [D]. 杭州:浙江大学,2017.

Qiu J H. Tectonic geometry and kinematics of the Cenozoic thrust fold belt in the southern margin of Junggar [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[11] 罗寿兵. 准噶尔盆地南缘昌吉背斜构造建模与构造解释研究 [D]. 成都:西南石油学院,2004.

Luo S B. Structural modeling and interpretation of Changji anticline in the southern margin of the Junggar Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.

[12] 杨景林,沈一新. 准噶尔盆地南缘紫泥泉子组的时空展布及成因解释[J]. 地层学杂志,2004,28(3):215-222.
 Yang J L, Shen Y X. Temporal and spatial distribution and genetic

interpretation of Ziniquanzi Formation in the southern margin of the Junggar Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28 (3): 215 – 222.

[13] 陈晓冬,苗辰若,贾为卫.可探源音频大地电磁测深在新疆喀 拉扎地区含铀砾石层勘探中的应用[J].科技视界,2016(18): 237-239.

Chen X D, Miao C R, Jia W W. Application of soundable source audio magnetotelluric sounding in the exploration of Uranium – bearing gravel strata in Kalazar, Xinjiang[J]. Scientific and Technological Horizon. 2016(18):237-239.

[14] 孙洁,晋光文,白登海,等.大地电磁测深资料的噪声干扰[J].
 物探与化探,2000,24(2):119-127.

Sun J,Jin G W,Bai D H,et al. The noise interference of magnetotelluric sounding data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2000,24(2):119-127.

[15] 王大勇,朱威,范翠松,等.矿集区大地电磁噪声处理方法及其应用[J].物探与化探,2015,39(4):823-829.

Wang D Y,Zhu W,Fan C S, et al. Noise processing methods and application study of MT in the ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4):823-829.

- [16] 陈伟,郝晋进,张健,等. 昌吉背斜构造浅析[J]. 天然气勘探与 开发,2010,33(4):25-28,93.
  Chen W, Hao J J, Zhang J, et al. Analysis of Changji anticline Structure[J]. Natural Gas Exploration and Development,2010,33 (4):25-28,93.
- [17] 谷阳,丁文龙,陈伟. 准噶尔盆地南缘齐古背斜构造分析及三 维建模[J]. 科技通报,2017,33(12):60-64.
  Gu Y,Ding W L,Chen W. Structural analysis and 3D modeling of Qigu anticline in the southern margin of the Junggar Basin[J]. Science and Technology Bulletin,2017,33(12):60-64.
- [18] 张开军,张强,魏迎春,等. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区水文地 质特征及其对煤层气富集的影响[J]. 煤田地质与勘探,2018, 46(1):61-65.

Zhang K J,Zhang Q,Wei Y C, et al. Hydrogeological characteristics and its influence on coalbed methane enrichment in the southern margin of the the Junggar Basin [J]. Coal Geology & Exploration,2018,46(1):61–65.

- [19] 魏迎春,张强,王安民,等. 准噶尔盆地南缘煤系水矿化度对低煤阶煤层气的影响[J].煤田地质与勘探,2016,44(1):31-37.
  Wei Y C,Zhang Q,Wang A M, et al. The influence of the salinity of groundwater in coal measures on low rank coalbed methane in the south margin of Junggar basin[J]. Coal Geology & Exploration,2016,44(1):31-37.
- [20]周三栋,刘大锰,孙邵华,等.准噶尔盆地南缘硫磺沟煤层气富 集主控地质因素及有利区优选[J].现代地质,2015,29(1):
   179-189.

Zhou S D, Liu D M, Sun S H, et al. Factors affecting coalbed methane enrichment and CBM favorable area of Liuhuanggou area in the southern Jungger basin [J]. Geoscience, 2015, 29(1):179–189.

- [21] 张岩,董维红,李满洲,等. 河南平原浅层地下水总溶解固体和水化学类型的分布特征[J]. 水文,2011,31(2):79-83.
  Zhang Y, Dong W H, Li M Z, et al. Study on distribution characteristics of TDS and hydrochemical type of shallow groundwater in Henan plain[J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(2):79-83.
- [22] 陈锋,刘涛,顾新鲁,等. 新疆地热水分布与地质构造的关系
  [J].西部探矿工程,2016,28(2):144-148.
  Chen F,Liu T,Gu X L, et al. Relationship between geothermal water distribution and geological structure in Xinjiang[J]. West-China Exploration Engineering,2016,28(2):144-148.
- [23] 陈锋. 新疆维吾尔自治区地热资源调查与评价报告[R]. 新疆 地矿局第二水文工程地质大队,2011. Chen F. Investigation and evaluation report on geothermal resources in Xinjiang Uygur autonomous region [R]. The Second Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources,2011.
- [24] 徐世光,郭远生. 地热学基础[M]. 北京:科学出版社,2009: 103-113.

Xu S G, Guo Y S. Fundamentals of geothermal science [M]. Beijing:Science Press, 2009:103-113.

# Application of audio magnetotellurics in the study of the subsurface water-bearing properties of the Santunhe area, Xinjiang

YANG Ming-Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Han-Xiong<sup>2,3</sup>, MA Chao<sup>1</sup>, YANG Hai-Lei<sup>1</sup>, ZHU Wei<sup>4</sup>

No. 2 Regional Geological Survey Team of Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Changji 831100, China;
 Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;
 Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China;
 Institute of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China;
 Institute of Geothermal and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

**Abstract**: Audio magnetotellurics (AMT) is widely used for energy and mineral explorations because of its high exploration efficiency and high vertical resolution. Using a three-dimensional (3D) inversion algorithm based on data space, this study performed 3D inversion of the AMT data collected from geothermal exploration in the Santunhe area of Xinjiang. As indicated by the inversion results, the 3D inversion avoids the influence of inhomogeneous geobodies on the survey lines in the study area and yielded very rich and intuitive 3D geoelectric anomalies. In combination with the geological data and the 3D inversion results, this study analyzed the subsurface electrical properties of the study area and the formation water-bearing properties related to geothermal reservoirs, and finally inferred several favorable areas for geothermal reservoirs from the geothermal accumulation patterns of the study area.

Key words: Santunhe; AMT; water-bearing strata; geothermal

(本文编辑:王萌)