MT 与 WFEM 二维联合反演在山西大同地热区的应用

谢子豪[1,2,3]，陈宇峰[3,4]，刘磊[3,4*]，周文龙[1]，廖卫阳[1]，杨鑫[1]

1. 中国地质大学（武汉）地球物理与空间信息学院，武汉 430074；
2. 安徽省地勘局第一水文工程地质勘查院，安徽 蚌埠 233000；
3. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室，武汉 430034；
4. 湖北省地质局地球物理勘探大队，武汉 430056

第一作者，E-mail：931036711@qq.com

* 通信作者，E-mail：23632956@qq.com

2025-02-06 收稿；2025-06-02 修回；2025-06-09 接受

基金项目：湖北省地质局地质科研项目“地下空间地质结构与资源探测技术应用研究”（KJ2023-37）；资源与生态环境地质湖北省重点实验室开放基金资助项目（HBREGKFJJ-202310）

中图分类号：P631.3　　文章编号：2096-8523(2025)04-0368-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250048

摘　要：地热能凭借其稳定性、经济性等优势已成为新型清洁能源体系构建的关键方向。电磁法作为解析地热系统电性结构的核心地球物理手段，其方法体系呈现显著互补特征：大地电磁法（magnetotelluric，简称 MT）利用天然交变电磁场，具有探测深度大、对深部低阻异常体灵敏等特点，但极易受到电磁环境噪声的影响；广域电磁法（wide-field electromagnetic method，简称 WFEM）采用人工场源，抗干扰性能强、对浅部异常体及细小断裂分辨率较高。为充分发挥 MT 和 WFEM 的优势互补效应，采用二维联合反演方法，探讨了 MT 与 WFEM 联合反演在地热勘探过程中的可行性和有效性。理论模型合成数据测试表明，相比于单独反演结果，MT 与 WFEM 二维联合反演能够更为清晰地刻画地热系统的盖层及热储层分布特征。最后，对山西大同地热区实测 MT 及 WFEM 数据分别单独反演和联合反演，并进行了对比分析。研究结果显示联合反演结果要显著优于 MT 或 WFEM 单独反演结果，有助于圈定出地热系统的重要组成部分。根据联合反演所得的电阻率分布结构，结合测区地质及其他资料，推断出了该地区地热系统的概念模型。

关键词：地热勘探；地热系统；大地电磁法；广域电磁法；二维联合反演；山西大同

近年来，由于传统能源开采利用引起的环境污染、生态破坏等问题日趋严重，清洁能源的重要性日益凸显。地热资源储量约占全球 1/6[1]，开发潜力显著。在全球能源结构向太阳能、风能及地热能等清洁能源转型的背景下[2-4]，地热能以其供能稳定性强、碳排放量低等特征，成为缓解能源供需矛盾、降低传统能源环境污染的战略性选择。

针对不同地区地热资源赋存条件，地热勘探需通过地质条件和资源类型选择合适的方法[5]，以实现热储层岩性-孔隙率-分布及其与常温层水力联系、盖层特征、地温场增温率、热流体动力场特征和资源储量评估等核心目标[5-6]。地球物理勘探通过测量温度、电阻率、波速等物理性质参数揭示地热系统特征[7-8]，其中电磁法因热储-盖层-热通道的电性差异[9] 及电阻率与温度-孔隙度[10-14] 的强相关性成为关键手段。电磁法分为天然源与人工源 2 类：MT 和音频大地电磁法（audiomagnetotelluric，简称 AMT）利用低频天然场源实现深部热储探测，尤其适用于

著录信息：谢子豪，陈宇峰，刘磊，等. MT 与 WFEM 二维联合反演在山西大同地热区的应用［J］. 地质科技通报，2025，44(4)：368-378.
XIE Zihao，CHEN Yufeng，LIU Lei，et al. Application of MT and WFEM two-dimensional joint inversion in Datong geothermal area，Shanxi Province［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(4)：368-378.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

火山地热区研究[15-22]；而 WFEM[23-27] 和可控源音频大地电磁法（controlled-sourse audio-frequency magnetotelluric，简称 CSAMT）[28-30] 通过人工场源克服天然场信号弱的缺陷，其中 WFEM 融合非远区测量优势，在探测精度和效率上得到显著提升，体现了电磁法在地热勘查中方法基础与工程实践的统一性。

MT 虽然探测深度大，对低阻异常体灵敏，但是极易受到电磁环境噪声影响；与之相比，WFEM 由于采用大功率人工场源，抗干扰能力强，对地下浅部异常体及细小断裂分辨率更高。为了同时发挥二者的优势，通常采用联合反演的方法来弥补单一方法的不足，获得更准确的反演结果，常用于海洋油气勘探等方面[31]，现在也越来越多地用于陆地复杂地质勘探等[32-33]。采用一种高斯-牛顿算法用于 MT 和 WFEM 的二维联合反演，并设计一种简化地热地电模型来验证该方法的可行性和有效性。在此基础上，将该方法应用到山西某地热区的勘探过程中，并对比单独反演和联合反演的结果。最后，基于联合反演得到的二维电阻率模型，提出了研究区地热系统的概念模型，并结合地质资料进行简要的地质解释。

1　MT 与 WFEM 二维反演理论

本研究正演方法采用有限体积法，而对于反演问题，由于其非唯一性，电磁反演通常转化为最优化问题。根据 Tikhonov 方法，电磁数据反演的目标函数 $\varphi(\boldsymbol{m},\lambda)$ [34] 可定义为：

$$\varphi(\boldsymbol{m},\lambda)=\varphi_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{m})+\lambda\varphi_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{m}), \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{m}$ 为模型参数，$\boldsymbol{m}=\ln\sigma$，σ 为电导率；$\varphi_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{m})$ 和 $\varphi_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{m})$ 分别为数据拟合差函数和模型正则化函数；λ 为目标函数中平衡数据拟合项和模型正则化项权重的 Tikhonov 正则化参数。

其中数据拟合差函数 $\varphi_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{m})$ 通常可以表示为：

$$\varphi_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}[\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})-\boldsymbol{d}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{d}}[\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})-\boldsymbol{d}], \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})$ 为模型参数 $\boldsymbol{m}$ 对应的正演响应；$\boldsymbol{d}$ 为观测数据；$\boldsymbol{W}_{\mathrm{d}}$ 为数据权重矩阵，定量刻画了观测数据的噪声水平。

通常假定观测数据中的噪声是不相关的，并且遵循高斯分布。因此权重矩阵 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{d}}$ 可表示为对角线形式，并有如下结构：

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{d}}=\mathrm{Diag}\left(\frac{1}{\epsilon}\right), \tag{3}$$

式中：ϵ 为每个观测数据估计误差的标准偏差。

一般来说，在数据中添加标准偏差等于数据幅度的百分之几的高斯噪声来模拟测量误差。而对于实测数据应用来说，误差通常由数据观测估计得到。但是，通常采用数据误差下限来防止反演对观测数据过拟合，也就是说，小于给定的数据误差下限的估计数据误差将增加到数据误差下限。

模型正则化函数 $\varphi_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{m})$ 表示用于稳定反演的先验模型约束。本研究选择了常用的平滑泛函，其表达式如下所示：

$$\varphi_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{m}_{\mathrm{ref}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{m}_{\mathrm{ref}}), \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{m}_{\mathrm{ref}}$ 为参考模型，参考模型通常由地质构造信息、钻井数据等多种先验信息来构建；$\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}$ 为二维模型正则化函数，可表示为：

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{m}}=\omega_y\boldsymbol{D}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_y+\omega_z\boldsymbol{D}_z^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_z, \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{D}_y$，$\boldsymbol{D}_z$ 分别为 y,z 方向上的一阶差分矩阵；ω_y，ω_z 分别为控制模型在 y,z 方向上的平滑程度。

2　联合反演理论

由于反演问题的非线性，本研究采用高斯-牛顿（Gauss-Newton，简称 GN）方法来迭代求解反演目标函数。在每次迭代中，对非线性目标泛函相对于当前模型进行线性化，并使得目标函数局部最小化，就可以得到高斯牛顿法的法方程，表达式如下：

$$\boldsymbol{H}_k\delta\boldsymbol{m}_k=-\boldsymbol{g}_k, \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{H}_k$，$\boldsymbol{g}_k$ 分别为目标泛函的正则近似海森矩阵和梯度矩阵；δ 为比例系数；k 为当前目标。

在联合反演中，数据拟合项包含了 MT 和 WFEM 各自的数据拟合项，表达式如下：

$$\varphi_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{m})=\alpha\varphi_{\mathrm{d}}^{\mathrm{MT}}+\beta\varphi_{\mathrm{d}}^{\mathrm{WFEM}}, \tag{7}$$

式中：α，β 分别为 MT 和 WFEM 的数据权重；$\varphi_{\mathrm{d}}^{\mathrm{MT}}$，$\varphi_{\mathrm{d}}^{\mathrm{WFEM}}$ 分别为 MT 和 WFEM 的数据拟合项。

为平衡联合反演中大地电磁和广域电磁各自的权重，本研究采用自适应数据权重调整方法，每次 GN 迭代中，α 和 β 分布由如下公式[35] 确定：

$$\alpha=\frac{\left\|\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}\right\|}{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{MT}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{MT}}\right\|}=\frac{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{MT}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{MT}}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{WFEM}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{WFEM}}\right\|}{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{MT}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{MT}}\right\|}, \tag{8}$$

$$\beta=\frac{\left\|\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}\right\|}{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{WFEM}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{WFEM}}\right\|}=\frac{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{MT}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{MT}}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{WFEM}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{WFEM}}\right\|}{\left\|\boldsymbol{J}_{\mathrm{WFEM}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{\mathrm{WFEM}}\right\|}, \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{J}$ 为总的灵敏度矩阵；$\boldsymbol{r}$ 为数据集总的归一化残差。

灵敏度矩阵 $\boldsymbol{J}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{J}_{ij}=\frac{\partial d_i}{\partial m_j},\ i=1,\ 2,\cdots,N_{\mathrm{d}},j=1,\ 2,\cdots,N_{\mathrm{m}},\quad(10)$$

式中：d_i (i=1, 2, ⋯, N_{d}) 为正演数据 $\boldsymbol{d}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})$ 的分量；m_j (j=1, 2, ⋯, N_{m}) 为反演的模型参数；N_{d}, N_{m} 分别为观测数据个数和模型参数个数。

而正演需要求解控制方程离散化后产生的大型线性系数方程组：

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{e}=\boldsymbol{b},\quad(11)$$

式中：$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{e}$, $\boldsymbol{b}$ 均为大型线性方程组的子项，无实际意义。

不失一般性，考虑到单个频率单个场源的情况，测点处的电磁场可表示为：

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m})=\psi(\boldsymbol{e}(\boldsymbol{m}),\boldsymbol{m}),\quad(12)$$

式中：$\Psi(\cdot)$ 为插值函数。

根据链式法则，灵敏度矩阵可表示为：

$$\boldsymbol{J}=\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\boldsymbol{m}}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{L}+\boldsymbol{Q},\quad(13)$$

其中

$$\boldsymbol{F}=\frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{e}},\boldsymbol{L}=\frac{\partial \boldsymbol{e}}{\partial \boldsymbol{m}},\boldsymbol{Q}=\frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{m}},\quad(14)$$

式中：$\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{L}$, $\boldsymbol{Q}$ 的阶数分别为 $N_r\times N_e$，$N_e\times N_m$，$N_r\times N_m$。

利用隐式微分方法对公式(11)等号左右两边求模型参数 $\boldsymbol{m}$ 的导数：

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})}{\partial \boldsymbol{m}}\boldsymbol{e}+\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\frac{\partial \boldsymbol{e}}{\partial \boldsymbol{m}}=\frac{\partial \boldsymbol{b}}{\partial \boldsymbol{m}}。\quad(15)$$

写成矩阵形式为：

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\left(\frac{\partial \boldsymbol{b}}{\partial \boldsymbol{m}}-\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})}{\partial \boldsymbol{m}}\boldsymbol{e}\right)=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\boldsymbol{G}(\boldsymbol{m},\boldsymbol{e})。\quad(16)$$

由于大地电磁是天然场源，$\frac{\partial \boldsymbol{b}}{\partial \boldsymbol{m}}=0$，即公式(16)整理得：

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\left(-\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})}{\partial \boldsymbol{m}}\boldsymbol{e}\right)=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\boldsymbol{G}(\boldsymbol{m},\boldsymbol{e}),\quad(17)$$

式中：$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{m},\boldsymbol{e})$ 包括了右端项以及系数矩阵对模型参数的导数信息。

由公式(13)到公式(16)综合可以得到灵敏度矩阵 $\boldsymbol{J}$，如公式(17)所示：

$$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{F}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\boldsymbol{G}+\boldsymbol{Q}。\quad(18)$$

根据公式(8)和公式(9)，通过计算总梯度范数与单个梯度范数的比值，自适应调整 MT 和 WFEM 数据的相对权重，使 MT 和 WFEM 数据在反演过程中的重要性相当。

联合反演过程中，数据拟合差的均方根(*RMS*)可表示为如下形式：

$$RMS=\sqrt{\frac{1}{\sum_{v=1}^{M}N_v}\sum_{v=1}^{M}\sum_{u=1}^{N_v}\left(\frac{\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})-d_u}{\epsilon_u}\right)^2},\quad(19)$$

$$u=1,\cdots,N_v,v=1,\cdots,M,$$

式中：M 为不同数据类型的数量，本研究中 M 值为 2；N_v 为 MT 和 WFEM 数据集的数量。

3　理论模型

本研究旨在系统对比评估大地电磁法与广域电磁法的深部地热构造探测能力，并深入探讨联合反演的综合优势，根据典型高温地热系统概念模型(图 1a)设计了一个简化的二维地热电模型(图 1b)。

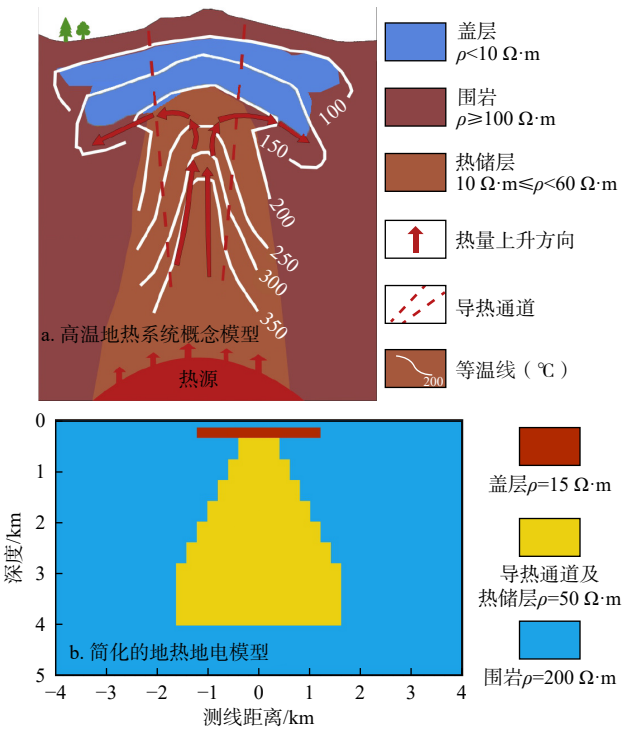


图 1　高温地热系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of high-temperature geothermal system

该地电模型中，浅部低阻薄层为地热系统的盖层，其尺寸为 2 400 m×200 m，电阻率值设为 15 Ω·m，盖层下方的相对高阻异常体作为地热系统中的导热通道及热储层，电阻率值设为 50 Ω·m。大地电磁测线上布置 11 个测点，测点间距 800 m，频率范围 0.05 ~ 320 Hz，对数等间隔选择 12 个频点；广域电磁测线上布置 15 个测点，测点间距 500 m，频率范围

0.01 ~ 1 000 Hz, 对数等间隔选择 12 个频点, 广域电磁的发射源为水平电偶极子, 其中心位置距离测线垂直距离为 11 km, 2 条测线均位于二维模型正上方。

初始模型设置为 200 Ω·m 的均匀半空间, 为了获得合成数据, 设计模型网格时, 在核心区域使用了 42×50 的网格单元, 网格单元尺寸为 200 m×100 m。整个正演区域共划分为 58×59 的网格单元。对于正演得到的大地电磁和广域电磁合成数据添加 5% 的随机高斯噪声模拟观测误差来得到反演数据, 整个反演区域划分为不同于正演建模网格的 48×54 个网格单元, 模型核心区域为 8 km×5 km。

图 2 为单独反演与联合反演的数据均方根(*RMS*)收敛曲线。其中, MT 单独反演的 *RMS* 从初始的 25.133 经过 5 次迭代降到了 1.288, WFEM 单独反演的 *RMS* 从初始的 30.699 经过 5 次迭代降到了 1.079, 而联合反演的初始 *RMS* 为 28.914, 经过 5 次迭代降到了 1.048。单独与联合反演测试展示了本研究所使用反演方法的快速收敛能力。

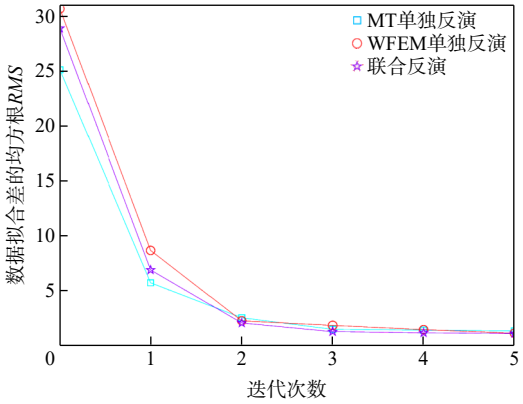


图 2　单独反演与联合反演的数据 *RMS* 收敛曲线

Fig. 2　*RMS* convergence curve of data for individual inversion and joint inversion

图 3 为大地电磁与广域电磁单独反演及两者联合反演所得到的电阻率结构分布。从图 3a 中可以看出, MT 单独反演结果很好地恢复了深部储层结构, 但对浅部盖层的横向连续性和边界刻画不足; 与之对比, 图 3b 中 WFEM 单独反演可以很好地分辨出浅部盖层的完整结构, 但是对深部 2 km 以下的储层结构分辨率较差; 图 3c 给出 2 种方法的联合反演结果, 可以看出联合反演结果不论是对浅层异常体还是对深部异常体都有较好的刻画, 并且可以更准确地解析地热模型中盖层和热通道的位置, 证明 MT 和 WFEM 二维联合反演方法在地热勘探中是行之有效的。

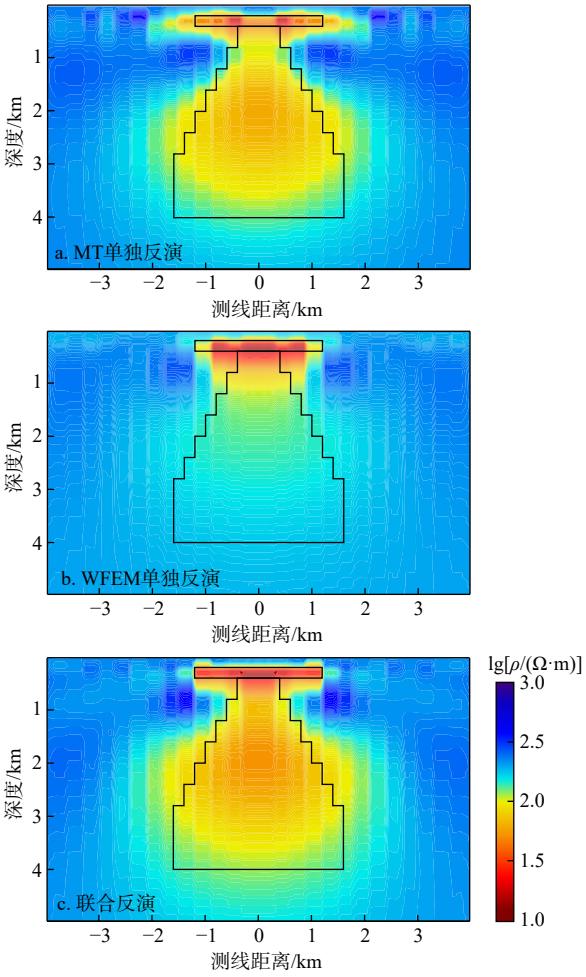


图 3　单独反演与联合反演结果（黑线为真实模型边界）

Fig. 3　Individual inversion and joint inversion results

4　实测数据反演与解释

4.1　研究区地热地质背景

研究区位于中国山西大同地热区, 地层发育比较完整, 并在第四纪经历了发展演化以及控盆断裂活动。在古生代时, 构造活动相对平稳, 经历了寒武纪、奥陶纪、石炭纪和二叠纪演化; 在中生代侏罗纪和白垩纪开始进行强烈的构造活动, 地区基本构造格局形成于此, 以逆冲推覆、NW 向正断层和 NE 向逆断层为主; 新生代时则是以继承性断裂活动为主。受边界断裂影响, 形成地堑或者半地堑, 构造走向主要为 NE 向[36]。

地热资源往往分布在深大断裂交汇的区域, 断裂构造在地热资源的形成中起着非常重要的作用[37]。研究区断陷构造呈伸展垂向剪切状态, 断陷断裂浅部发育大量侵入火成岩。深大断裂提供了连接浅层和深层热源的通道, 位于深层的高温熔融物质可以通过大型构造断层进行输送, 直接加热地层中的冷

水形成高温地热异常，此外，深部岩浆的侵入还会将断裂破碎带内赋存的地下水加热，加热后的地下水将会沿着断裂通道再次上涌，并且与浅地表的冷水混合形成地热系统。当上盖层满足地热资源形成条件时，在地表形成良好的热储层[38-39]。

研究区地表有许多温泉出露，表明该地区存在热异常[40]。以往的探测也发现研究区有几个高热流值的地区，同时该地区也是山西高温地热田的重点找矿区之一。

4.2　实测数据采集与处理

获得该地区一条测线的实测数据，测线方向为 NE 向。使用 Phoenix MTU-5A 仪器采集大地电磁数据，采集频率 0.001 ~ 320 Hz，采集时长约为 20 h，使用 4 分量和 5 分量相结合的方式进行采集。4 分量采集 2 个电场分量 E_x，E_y，以及 2 个磁场分量 H_x，H_y，5 分量则是在 4 分量的基础上，多采集了 1 个磁场分量 H_z。测线上共有大地电磁测点 19 个，点距 500 m；使用 JSGY-2 广域电磁仪采集广域电磁数据，采集频率 3/256 ~ 8 192 Hz，共有 40 个频点，广域电磁测点 101 个，点距为 100 m，野外数据采集时使用 E-E_x 方式进行测量。测点位置如图 4 所示。

采集原始数据后需要进行处理与分析。对大地电磁数据进行傅里叶变换、Robust 处理、远参考处理等预处理过程，其中理想远参考点应具备周围干扰信号小、数据质量佳、数据曲线平滑等特性，远参考点需与工作区同时进行数据采集，以此来改善工作区数据质量。对广域电磁数据进行数据去噪处理，以达到平滑数据曲线、减少飞点的目的。图 5 为部分代表性大地电磁数据点的视电阻率和相位曲线图，图 6 为部分代表性广域电磁数据点的振幅-频率曲线图。

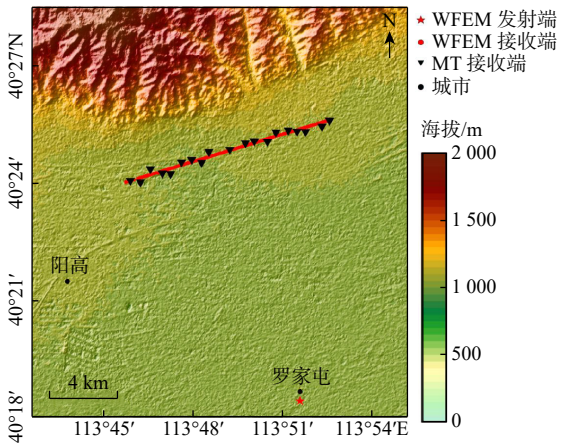


图 4　大地电磁与广域电磁测点布置图

Fig. 4　Position map of MT and WFEM survey points

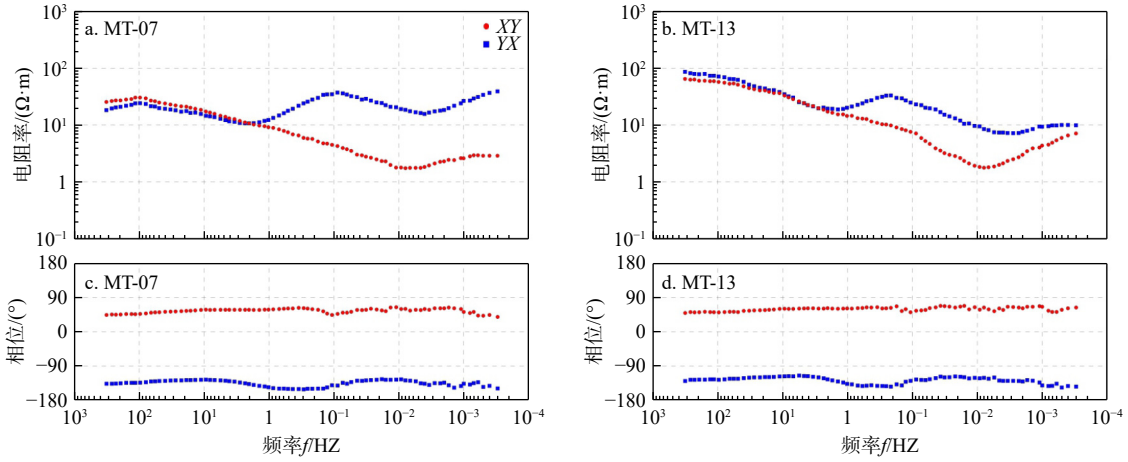


图 5　2 个代表性点的大地电磁观测数据视电阻率和相位曲线

Fig. 5　Apparent resistivity and phase curve of MT observation data from two representative points

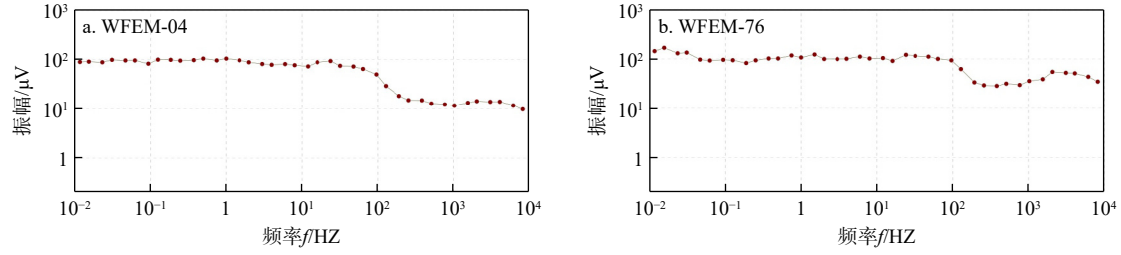


图 6　2 个代表性点的广域电磁观测数据振幅–频率曲线图

Fig. 6　Amplitude-frequency curve of WFEM observation data from two representative points

在对实测数据进行反演前，首先进行维性分析，在这里采用相位张量法。为了方便高效地进行联合反演，本研究将大地电磁测点和广域电磁测点统一到相同的坐标系下，即将坐标系旋转到以广域电磁测线方向作为 x 方向。因为旋转了坐标系，所以在新的坐标系统中对大地电磁数据进行分解。

图 7 是所有测点在不同频率下的相位张量椭圆图。以二维偏离角度 $|\beta|$ 来确定地下电性结构的维性。一般来说，二维偏离角度 $|\beta|$ 不大于 5°时就表明目标区域的地下电性结构符合二维反演的要求，而二维偏离角度 $|\beta|$ 越大，则地下电性结构越接近三维结构。从图 7 中可以看出大部分测点的二维偏离角度 $|\beta|$ 都不大于 5°，所以是符合二维反演的要求的，尤其是当频率在 1 Hz 以上时，基本上所有的点都符合二维反演要求。当频率在 10 ~ 100 Hz时，二维偏离角度 $|\beta|$ 很小，每个测点的相位张量椭圆都趋近于圆形，说明在该周期范围内，测线范围内的地下电性结构的维性趋近于一维，造成该现象的原因可能是由于地表覆盖层的影响，并且椭圆的长轴指向基本都为 NE 向，这也就说明这条测线的电性主轴方向为 NE 向。

4.3 实测数据处理与解释

为获得更精确地反演结果，本研究测试了多个初始模型，最终选择 200 Ω·m 的均匀半空间模型作为反演的初始模型。

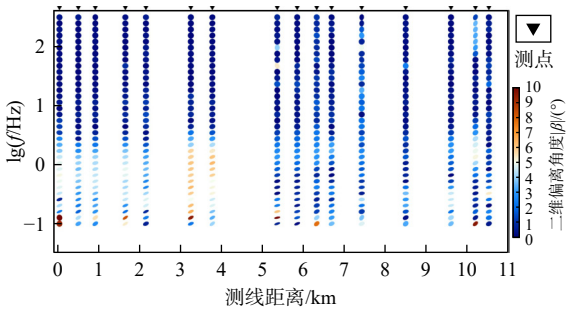


图 7　相位张量椭圆剖面图

Fig. 7　Phase tensor elliptic profile

图 8 和图 9 给出了大地电磁单独反演时的 TE 和 TM 极化模式视电阻率拟断面图，图 10 给出了广域电磁单独反演时的电场数据拟断面图，可以看出，反演结果均很好地拟合了大地电磁和广域电观测磁数据。

图 11 给出了 MT 和 WFEM 所有测点单独反演与联合反演各测点的平均拟合误差分布图，可以看出除了少数测点外，大多数测点的数据拟合程度整体较好。

图 12 给出了实测数据单独反演与联合反演所得到的电阻率分布图。由图 12a MT 单独反演结果可以看出，在测线在右侧下方深部 1 ~ 3 km 存在着较大范围的低阻区域，一直向上延伸到约0.5 km，并与此处地层中部的相对低阻区域相连接。由此可以推断，导热通道自深部 4 ~ 5 km 开始向上侵入，在

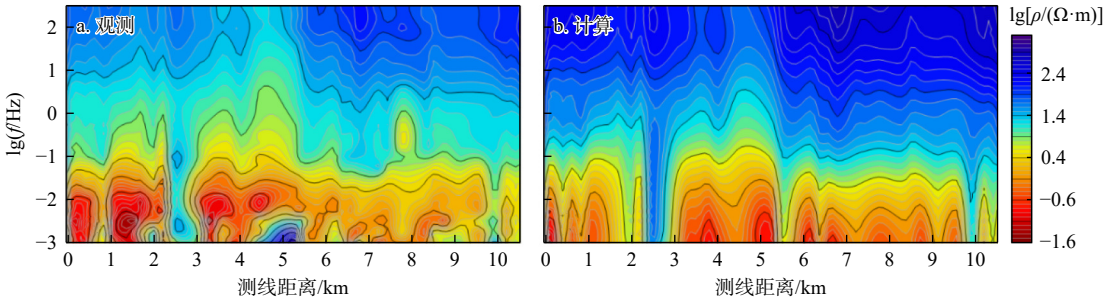


图 8　大地电磁单独反演时 TE 极化模式视电阻率拟断面图

Fig. 8　Apparent resistivity pseudo section of TE polarization mode during MT individual inversion

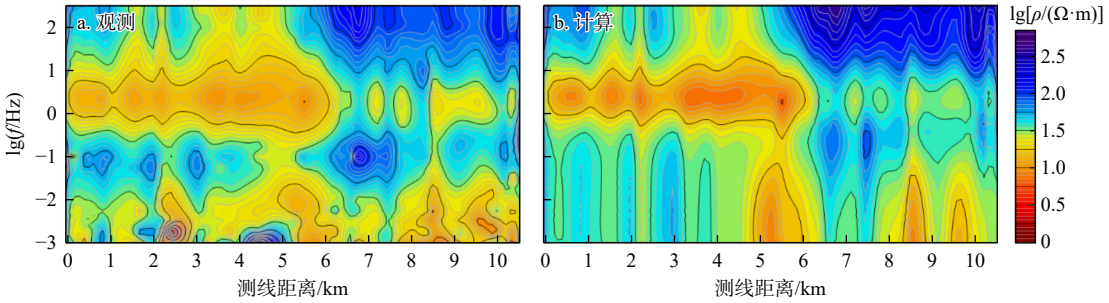


图 9　大地电磁单独反演时 TM 极化模式视电阻率拟断面图

Fig. 9　Apparent resistivity pseudo section of TM polarization mode during MT individual inversion

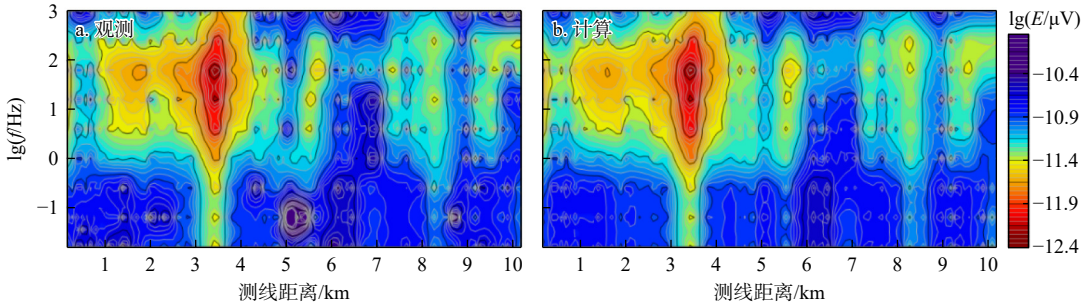


图 10　广域电磁单独反演时电场数据拟断面图

Fig. 10　Pseudo section of electric field data during WFEM individual inversion

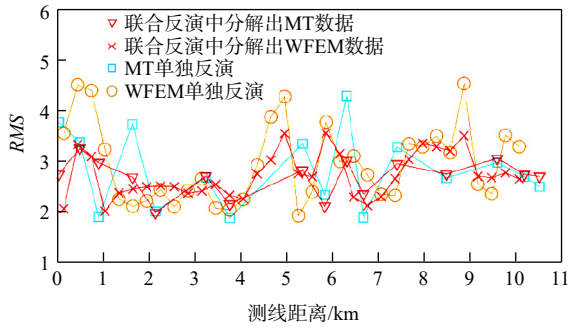


图 11　实测数据单独反演与联合反演平均拟合误差分布曲线图

Fig. 11　Distribution curves of average fitting error for individual inversion and joint inversion of measured data

1.5 ~ 3 km 形成了热储层。此处存在的低阻异常体，推断为高温异常区，并且低阻异常体附近有断裂响应，是连接热储层和地表浅层的通道。然而，MT 单独反演的结果在分辨前部信息方面存在一定的局限性。具体来说，反演结果在浅层部位未能精细地反映出一些细小的低阻块状体，热储层和盖层之间的分界线不够清晰。

由图 12b 的 WFEM 单独反演的结果可以看出深部导热通道的相对低阻区未能明显反映出来，而对浅部热储层中的低阻异常体则有较为显著的反映，主要集中在地表到地下 2 km 范围内。此外，浅部的块状低阻异常体也具有较好的反映，异常体位于相对低阻区域上方。同时，能清晰地识别出多条浅层断裂，相对低阻的热储层与相对高阻的基岩分界面也区分十分明显。然而，剖面中深部结构的刻画相对较差，表现为相对高阻，并未展现出导热通道相对低阻的电性特征。

图 12c 为 MT 与 WFEM 联合反演结果，联合反演的参数与单独反演相同，图中剖面右侧的相对低阻区域从深部 3 km 向上延伸至 1 km，并且在 0.5 ~ 2 km 深度范围内低阻异常体响应明显，精细刻画了浅部分布的次级断裂体系，低阻的盖层与相对低阻的热

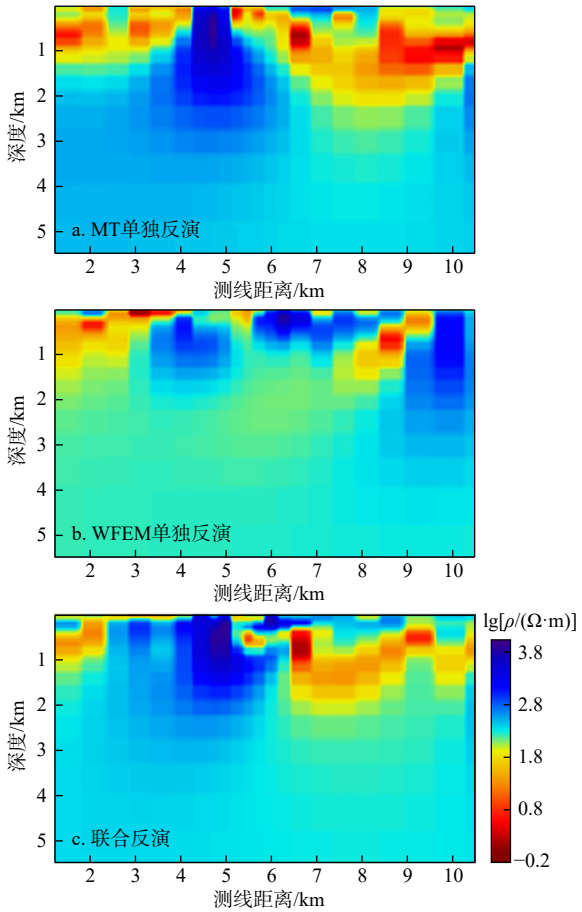


图 12　实测数据反演结果

Fig. 12　Inversion results of measured data

储层能够很好地分辨，说明联合反演综合了 MT 和 WFEM 的优势，对浅部和深部的电性结构都有着较为准确的刻画。

结合研究区的地质资料，表面的低阻层为第四纪松散沉积层，同时表面存在的高阻对应为新太古界变质岩基底。中间从表面向下呈现一段高阻，这是由于测线靠近左侧山脉基岩层。浅层地表存在许多低阻块状体，并在地表下方 1.5 ~ 3 km，存在一大片的低阻异常体，推测可能为热储层。在该低阻体上方与表面低阻块状体之间存在许多次级断裂，正

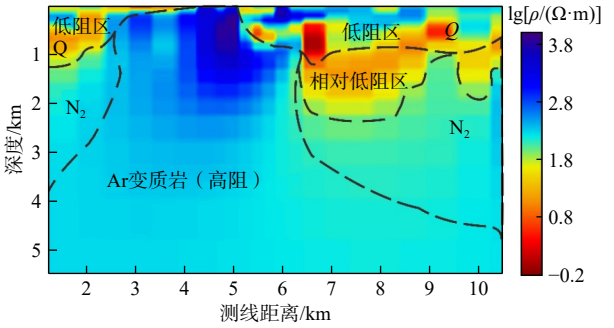
是由于这些次级断裂的存在，它们的断裂构造作用造成了岩石破碎，透水性增大，使得该低阻区域向着东部拓展，同时这些断裂也为浅地表层与热储层之间提供了通道。断裂与周围岩体的电阻率值比较来说较低，这可能是由于通道处岩石发生破碎，岩脉发生了侵入所导致，并且深部的大片低阻异常体通过断裂与表面低阻块状体相连接。在测线附近揭露的地层中，主要的岩性组成为片麻岩、砂岩、砂质黏土、岩浆岩脉等。

4.4 研究区地热系统分析

通过研究实测数据的联合反演结果，了解了区内确定反演深度范围内高分辨率的电性结构；经地质资料、地球物理资料验证，该模型符合对流型地热系统地电模型。

对流型地热系统以地热流体和水为主要介质，通过热对流方式进行热传递，断裂构造是主要热对流通道。在电磁法勘探中，地下岩层的电阻率是反映地热环境的重要参数，流体电阻率和基岩电阻率受到温度的影响，电阻率值一般比基岩更低。除此之外，对流型地热系统中发生的水热过程还会引起黏土矿物蚀变，呈现出低电阻率的特征。浅表层的低电阻率层为黏土层，主要成分包括由水热蚀变形成的蒙脱石和伊利石；往下则是由高温条件下形成的绿泥石，这些共同构成了地热系统的保温盖层；热储层则位于保温盖层下方并表现出相对高阻特征。根据联合反演结果以及对该地区资料分析调研，研究区地电模型如图 13 所示，地热系统概念模型如图 14 所示。

结合联合反演结果可以看出研究区的地热系统表现出比基岩更低的电阻率值，位于地壳浅部（0.5 ~ 5 km），并且岩石含水少、热导率高，地热流体通过与浅层连接的断裂影响浅地表的电性结构。在反演区域内，中间部分由于靠近山脉基岩层表现为高阻。浅地表存在低阻层作为盖层，低阻层覆盖在相对低阻区域上方，以黏土为主，同时还包括砾石、亚砂土和粗砂等，电阻率值为 0.5 ~ 5 Ω·m。下方相对低阻区域电阻率升高，电阻率为 10 ~ 50 Ω·m，推测为热储层，岩性主要表现为太古宙变质岩，盖层与热储层之间有许多次级断裂作为连接的通道。相对低阻层下方相对高阻区域推测有连接热源的导热通道，但因反演精度及深度有限，反演结果中未明确刻画出来。地表水进入地下后，会循环下渗到达热储层，在那里受热并发生水热蚀变，形成了黏土层。当冷水进入热储层时被加热并形成了对流。更深部热



Q. 第四系；N_2. 上新统；Ar. 太古宇；下同

图 13 研究区地电解译模型

Fig. 13 Geoelectric and geological model of the study area

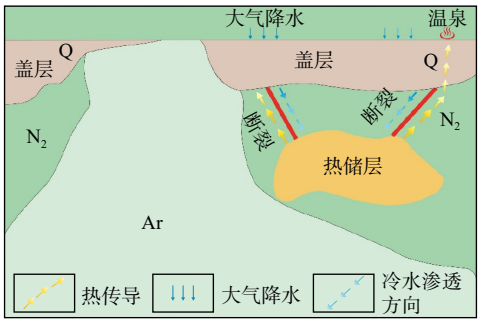


图 14 基于联合反演结果推断的简易地热概念模型

Fig. 14 A simple geothermal conceptual model based on joint inversion results inference

源不断向热储层供热，而热储层则通过导热通道不断向上传热，这显示出该区域具有明显的对流型高温地热系统的电性结构特征。

5 结 论

（1）地球物理电磁法的灵敏度和分辨率存在方法差异，单一数据反演易产生电阻率结构多解性。MT 和 WFEM 的二维联合反演结合它们对电阻率结构的敏感性，不仅很好地表征地下特征，同时更加准确地分辨出浅部异常体及一些细小断裂等，将其应用于地热资源的勘探过程中，可以更好地区分地热系统的几个重要组成部分，包括热源、热储、热通道和盖层等。

（2）通过将 MT 和 WFEM 的二维联合反演应用到山西大同地热区的地热勘探过程中，得到了该地区地热系统更清晰的电阻率结构。与单一反演相比，联合反演可以提高模型对导电和电阻结构的分辨率。从联合反演结果中，可以清楚地区分地热系统的重要组成部分，包括盖层、储层和热通道，进一步地验证了该联合反演方法在地热勘探过程中的可行性和有效性。此外，结合研究区的地质资料，对区

域地下电性结构和地质构造有了一个大致的了解，在此基础上建立了研究区地热概念模型，可以为今后地热资源开发利用提供依据。

所有作者声明不存在利益冲突。
The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 李德，郭妙连. 中国地热资源现状与未来发展趋势 [J]. 化工设计通讯，2021，47(5)：149-150.
LI D, GUO M L. Current situation and future development trend of geothermal resources in China[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2021, 47(5): 149-150. (in Chinese with English abstract)

[2] 毕玉荣. 地热资源开发应用现状及前景综述 [J]. 石油石化节能，2011，1(10)：7-10.
BI Y R. Application and prospect of geothermal resource development[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2011, 1(10): 7-10. (in Chinese with English abstract)

[3] 王贵玲，刘彦广，朱喜，等. 中国地热资源现状及发展趋势 [J]. 地学前缘，2020，27(1)：1-9.
WANG G L, LIU Y G, ZHU X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[4] 李文，孔祥军，袁利娟，等. 中国地热资源概况及开发利用建议 [J]. 中国矿业，2020，29(增刊 1)：22-26.
LI W, KONG X J, YUAN L J, et al. General situation and suggestions of development and utilization of geothermal resources in China[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S1): 22-26. (in Chinese with English abstract)

[5] 吴佳文，胡祥云，黄国疏，等. 地热资源电磁法勘探现状及展望 [J]. 地球学报，2023，44(1)：191-199.
WU J W, HU X Y, HUANG G S, et al. Status and prospects of electromagnetic method used in geothermal resources exploration[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 191-199. (in Chinese with English abstract)

[6] 吴强. 地球物理方法在地热勘探中的应用研究 [D]. 成都：成都理工大学，2018.
WU Q. Application of geophysical methods in geothermal exploration[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)

[7] ATHENS N D, CAERS J K. Gravity inversion for geothermal exploration with uncertainty quantification[J]. Geothermics, 2021, 97: 102230.

[8] 陈昌昕，严加永，周文月，等. 地热地球物理勘探现状与展望 [J]. 地球物理学进展，2020，35(4)：1223-1231.
CHEN C X, YAN J Y, ZHOU W Y, et al. Status and prospects of geophysical method used in geothermal exploration[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1223-1231. (in Chinese with English abstract)

[9] 张文科，徐玺萍，李聪. CSAMT 及 MT 在寻找城市地热资源中的应用 [J]. 青海大学学报，2019，37(4)：77-82.
ZHANG W K, XU X P, LI C. The application of CSAMT and MT in searching for urban geothermal resources[J]. Journal of Qinghai University, 2019, 37(4): 77-82. (in Chinese with English abstract)

[10] MUÑOZ G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(1): 101-122.

[11] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.

[12] BERKTOLD A. Electromagnetic studies in geothermal regions[J]. Geophysical Surveys, 1983, 6(1): 173-200.

[13] FLÓVENZ Ó G, GEORGSSON L S, ÁRNASON K. Resistivity structure of the upper crust in Iceland[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 1985, 90(12): 10136-10150.

[14] ANDERSON E, JOHNSTONE R, HARVEY C, et al. Understanding the resistivities observed in geothermal systems[C]//Anon. Proceedings of the 2000 World Geothermal Conference. [S. 1.]: [s. n.], 2020.

[15] 孙海川. CSAMT 和 MT 在兰州新区地热勘查中的应用探讨 [J]. 地下水，2020，42(1)：24-27.
SUN H C. Application of CSAMT and MT in geothermal exploration in Lanzhou New District[J]. Ground Water, 2020, 42(1): 24-27. (in Chinese with English abstract)

[16] 朱悦，彭荣华，胡祥云，等. 基于变维度贝叶斯反演的地热黏土盖层音频大地电磁探测能力研究 [J]. 地质科技通报，2024，43(3)：341-350.
ZHU Y, PENG R H, HU X Y, et al. Research on audio-frequency magnetotelluric detection capability of geothermal clay cap based on trans-dimensional Bayesian inversion[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 341-350. (in Chinese with English abstract)

[17] 王方，熊杰，田慧潇，等. 基于深度学习的大地电磁二维反演方法 [J]. 地质科技通报，2024，43(2)：344-354.
WANG F, XIONG J, TIAN H X, et al. Two-dimensional magnetotelluric inversion method based on deep learning[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 344-354. (in Chinese with English abstract)

[18] CHERKOSE B A, MIZUNAGA H. Resistivity imaging of Aluto-Langano geothermal field using 3D magnetotelluric inversion[J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, 139: 307-318.

[19] ARAYA VARGAS J, MEQBEL N M, RITTER O, et al. Fluid distribution in the central Andes subduction zone imaged with magnetotellurics[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2019, 124(4): 4017-4034.

[20] OMOLLO P, NISHIJIMA J, FUJIMITSU Y, et al. Resistivity structural imaging of the Olkaria Domes geothermal field in Kenya using 2D and 3D MT data inversion[J]. Geothermics, 2022, 103: 102414.

[21] AHUMADA M F, GUEVARA L, FAVETTO A, et al. Electrical resistivity structure in the Tocomar geothermal system obtained from 3D inversion of audio-magnetotelluric data (central Puna, NW Argentina)[J]. Geothermics, 2022, 104: 102436.

[22] MARYADI M, MIZUNAGA H. Subsurface temperature estima-

tion in a geothermal field based on audio-frequency magnetotelluric data[J]. Exploration Geophysics, 2022, 53(3): 275-288.

[23] MEJU M A. Geoelectromagnetic exploration for natural resources: Models, case studies and challenges[J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23(2): 133-206.

[24] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE J S. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)

[25] 危志峰, 陈后扬, 吴西全. 广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1009-1018.
WEI Z F, CHEN H Y, WU X Q. The application of wide field electromagnetic method to geothermal exploration in Yichun[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1009-1018. (in Chinese with English abstract)

[26] 古志文, 田红军, 王安平, 等. 广域电磁法在川南地区温泉勘查方面的应用 [J]. 四川地质学报, 2021, 41(4): 662-666.
GU Z W, TIAN H J, WANG A P, et al. The application of wide-area electromagnetic method to the hot spring exploration in South Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2021, 41(4): 662-666. (in Chinese with English abstract)

[27] 邵炳松, 阮传侠, 赵苏民, 等. 广域电磁法在郑州地区深部地热资源勘查中的应用 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(2): 316-327.
SHAO B S, RUAN C X, ZHAO S M, et al. The application of wide field electromagnetic method to deep geothermal resources exploration in Zhengzhou area[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(2): 316-327. (in Chinese with English abstract)

[28] 崔健, 邓荻, 张海东, 等. 广域电磁法在苏北盆地厚覆盖区地热勘查中的应用 [J]. 地质与资源, 2023, 32(1): 70-78.
CUI J, DENG D, ZHANG H D, et al. Application of wide field electromagnetic method in geothermal exploration of thick covered area in northern Jiangsu Basin[J]. Geology and Resources, 2023, 32(1): 70-78. (in Chinese with English abstract)

[29] WU G J, HU X Y, HUO G P, et al. Geophysical exploration for geothermal resources: An application of MT and CSAMT in Jiangxia, Wuhan, China[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(5): 757-767.

[30] BRETAUDEAU F, DUBOIS F, BISSAVETSY KASSA S G, et al. Time-lapse resistivity imaging: CSEM-data 3D double-difference inversion and application to the reykjanes geothermal field[J]. Geophysical Journal International, 2021, 226(3): 1764-1782.

[31] ZHAO G, LIU Y G, HU L H, et al. Inversion of the temperature and depth of geothermal reservoirs using controlled source audio frequency magnetotellurics and hydrogeochemical method[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 858748.

[32] ZERILLI A, LABRUZZO T, BUONORA M P, et al. Joint inversion of marine CSEM and MT data using a "structure"-based approach[C]//Anon. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Tulsa, Oklahoma, United States: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 604-608.

[33] MILLER R V, MEJU M A, SALEH A S, et al. Structure-guided 3D joint inversion of CSEM and MT data from a fold-thrust belt[C]//Anon. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. Tulsa, Oklahoma, United States: Society of Exploration Geophysicists, 2019: 1115-1119.

[34] 彭荣华, 胡祥云, 韩波. 基于高斯牛顿法的频率域可控源电磁三维反演研究 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3470-3481.
PENG R H, HU X Y, HAN B. 3D inversion of frequency-domain CSEM data based on Gauss-Newton optimization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3470-3481. (in Chinese with English abstract)

[35] LIAO W Y, PENG R H, HU X Y, et al. 3D joint inversion of MT and CSEM data for imaging a high-temperature geothermal system in Yanggao region, Shanxi Province, China[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5925813.

[36] 岑敏, 董树文, 施炜, 等. 大同盆地形成机制的构造研究 [J]. 地质论评, 2015, 61(6): 1235-1247.
CEN M, DONG S W, SHI W, et al. Structural analysis on the formation mechanism of Datong Basin[J]. Geological Review, 2015, 61(6): 1235-1247. (in Chinese with English abstract)

[37] 周文龙. 大同盆地东北部地热区电性结构探测研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
ZHOU W L. Electrical structure of geothermal area in northeast of Datong Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2021. (in Chinese with English abstract)

[38] 刘德民, 韦梅华, 孙明行, 等. 干热岩控热构造系统厘定与类型划分 [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3723-3735.
LIU D M, WEI M H, SUN M H, et al. Classification and determination of thermal control structural system of hot dry rock[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3723-3735. (in Chinese with English abstract)

[39] 潘良云, 孟令箭, 孙福利, 等. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力 [J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1632-1645.
PAN L Y, MENG L J, SUN F L, et al. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J]. Geology in China, 2023, 50(6): 1632-1645. (in Chinese with English abstract)

[40] ZHANG H Q, HUANG Q H, ZHAO G Z, et al. Three-dimensional conductivity model of crust and uppermost mantle at the northern Trans North China Orogen: Evidence for a mantle source of Datong volcanoes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 453: 182-192.

Summary for “MT 与 WFEM 二维联合反演在山西大同地热区的应用”

Application of MT and WFEM two-dimensional joint inversion in Datong geothermal area, Shanxi Province

XIE Zihao[1,2,3], CHEN Yufeng[3,4], LIU Lei[3,4*], ZHOU Wenlong[1], LIAO Weiyang[1], YANG Xin[1]

1. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. First Hydrogeological Engineering Geological Exploration Institute, Anhui Provincial Geological Exploration Bureau, Bengbu Anhui 233000, China;
3. Hubei Provincial Key Laboratory of Resources and Ecological Environment Geology, Wuhan 430034, China;
4. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, China

First author, E-mail: 931036711@qq.com

* Corresponding author, E-mail: 23632956@qq.com

Abstract: [**Objective**] Geothermal energy, owing to its stability and economic advantages, has become a crucial direction in the construction of new clean energy systems. [**Methods**] Electromagnetic methods are core geophysical techniques for resolving the electrical structure of geothermal systems and exhibit distinct complementary features. The magnetotelluric (MT) method uses natural alternating electromagnetic fields with the advantages of high detection depth and sensitivity to deep low resistance bodies, but it is susceptible to the influence of electromagnetic environmental noise. Wide-field electromagnetic method(WFEM) utilizes artificial field sources, exhibiting strong anti-interference capabilities and showing higher resolution for shallow anomalous bodies and small fractures. This study explores the complementarity and effectiveness of MT and WFEM in geothermal exploration through a two-dimensional joint inversion method. [**Results**] Theoretical models and synthetic data tests have shown that two-dimensional joint inversion combines the respective advantages of MT and WFEM, and can more clearly characterize the cap rock and thermal reservoir structure of geothermal systems. This paper conducted a joint inversion study on the measured data of MT and WFEM in a geothermal area in Datong, Shanxi, China. The results showed that the resistivity distribution obtained from the joint inversion clearly characterized shallow fault channels and deep thermal reservoirs. [**Conclusion**] Based on the resistivity structure model obtained from joint inversion and other geological data, a conceptual model of the geothermal system in the region was constructued, providing a reference basis for the precise exploration of geothermal resources in the future.

Key words: geothermal exploration; geothermal system; magnetotellurics (MT); wide-field electromagnetic method (WFEM); two-dimensional joint inversion; Datong, Shanxi Province

Received: 2025-02-06; Revised: 2025-06-02; Accepted: 2025-06-09

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250048