

# 音频大地电磁法在五台地区地热资源勘查中的应用研究

刘庆<sup>1,3\*</sup>, 王康<sup>1,2,3</sup>, 孙彦海<sup>1,2,3</sup>, 陈海江<sup>1,3</sup>, 石致君<sup>1,3</sup>, 马维龙<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;

2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;

3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086)

**摘要:**本研究聚焦山西省五台县,以助力当地地热开发为目标,开展地热资源勘查工作。全方位收集区域地质资料,采用音频大地电磁法(AMT),借助 Stratagem EH5 连续电导率成像仪,依据地质背景和研究目的精心规划测线。以 200m 点距线性布置测点,在 1Hz-100kHz 频率范围采集数据。对采集数据依次进行解编、去噪、静态校正等处理,结合地质背景深入分析,开展地质解释工作。通过上述研究,成功识别出寒武系、奥陶系、太古界等地层分布,确定了 F1、F2 等断层构造。研究表明,音频大地电磁法在五台县地热资源勘查中成果显著,探测结果与地质调查资料高度契合,证实该方法具有可靠性,为五台县地热资源开发、地质研究及相关工作提供了关键科学依据,对地热资源的后续开发利用意义重大。

**关键词:**音频大地电磁法;地热资源勘查;数据处理;地质解释;山西省五台县

**中图分类号:**P319 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)09-0100-8

## 0 引言

随着全球对清洁能源需求的增长以及对传统化石能源环境问题的关注,地热能作为绿色可再生能源,在能源结构调整中愈发重要。山西省地热资源主要集中在六大片区,包括太原-晋中、大同-朔州、忻州、长治-晋城、吕梁-临汾西、临汾东-运城片区,覆盖全省约 32% 的国土面积(约 4.95 万 km<sup>2</sup>)。山西五台县隶属忻州市,地理位置特殊,地质构造复杂,具备丰富的地热资源开发潜力<sup>[1]</sup>。深入勘查研究五台县地热资源,对缓解当地能源压力、推动区域经济可持续发展意义重大<sup>[2]</sup>。

音频大地电磁法(AMT)基于电磁感应原理,在探测地下地质结构、寻找地热资源方面优势显著<sup>[3-6]</sup>。古老地层构造是研究地下地热资源的关键窗口,山西五台县地处华北黄土高原东部,集中分布以花岗岩、片麻岩为主的古老地层,

广泛发育中低温裂隙层状热储<sup>[7-9]</sup>,开发潜力巨大。

## 1 研究区概况

研究区位于五台县东部,总面积约 411km<sup>2</sup>。山西省五台县位于华北克拉通中部,处于多个地质构造单元交汇地带,地质构造复杂多样<sup>[10,11]</sup>。地层详细内容见表 1。

五台县内地层从太古界到新生界均有出露。太古界地层分布在五台山地区,龙华河群、界河口群、吕梁群各具特征。元古界地层广泛分布,豆村亚群、东冶亚群、郭家寨亚群和上元古界沉积特征各异。古生界地层包括寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系,但奥陶系上统至石炭系中统缺失。中生界地层有三叠系和侏罗系,缺失白垩系<sup>[12]</sup>。新生界地层包括新近系和第四系,受燕山运动和喜山运动影响,在滹沱河盆地有厚层沉积,地形地貌以山地为主,长期受流水侵蚀和风

基金项目:中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-3)。

表 1 研究区地层表

界	系/群	统/亚群	地层代号	岩性特征	厚度(m)
	龙华河群	-	Ar <sub>3</sub> Lh	片麻岩、变粒岩、浅粒岩,眼球状构造发育	5000-6700
太古界	界河口群	-	Ar <sub>3</sub> Jh	片麻岩、斜长角闪岩、大理岩	-10000
	吕梁群	-	Ar <sub>3</sub> Ll	变质细碧岩、石英岩、大理岩	-
	滹沱群	豆村亚群	Pt <sub>1</sub> d	变质砾岩、千枚岩、硅质白云大理岩	-1800
元古界	东冶亚群	-	Pt <sub>1</sub> Dy	白云岩、板岩、千枚岩	>5000
	郭家寨亚群	-	Pt <sub>1</sub> Gj	砂岩、板岩	-800
上元古界		-	Pt <sub>2</sub>	含砾钙质石英岩、砂质白云岩	-930
	寒武系	下-上统	ε	石英岩状砂岩、泥灰岩、页岩	350-460
	奥陶系	下-中统	O	竹叶状灰岩、白云质灰岩	-700
古生界	石炭系	上统	C	页岩、砂质页岩夹煤层	110-160
	二叠系	下-上统	P	砂岩、砂质页岩、铝土矿层	650-750
	三叠系	下-上统	T	中粒砂岩夹泥质岩、石膏层	-500
中生界	侏罗系	下统(延安群)	J <sub>1</sub> y	黄绿色长石石英岩	-100
		中统(直罗群)	J <sub>2</sub> z	砂页岩夹煤层	200-250
		下更新统	Q <sub>1</sub>	冲洪积砂卵石层	10-120
新生界	第四系	中更新统	Q <sub>2</sub>	褐色亚粘土	60-80
		上更新统	Q <sub>3</sub>	亚砂土、卵砾石层	25-60
		全新统	Q <sub>4</sub>	松散冲积物	

化作用,地表破碎,常见 V 型谷、冲沟和陡坡(图 1)。

## 2 工作技术方法

### 2.1 音频大地电磁法原理

音频大地电磁法依据电磁感应原理,利用地球天然交变电磁场探测地下地质结构。当天然交变电磁场传播至地下导电介质时,会在介质内产生感应电流,进而激发出二次电磁场。二次电磁场的分布与地下介质电阻率紧密相关,通过精确测量不同频率电磁场的响应,能够获取地下介质电阻率的分布信息,以此推断地下地质构造特征<sup>[13]</sup>。

### 2.2 仪器设备与野外工作方法

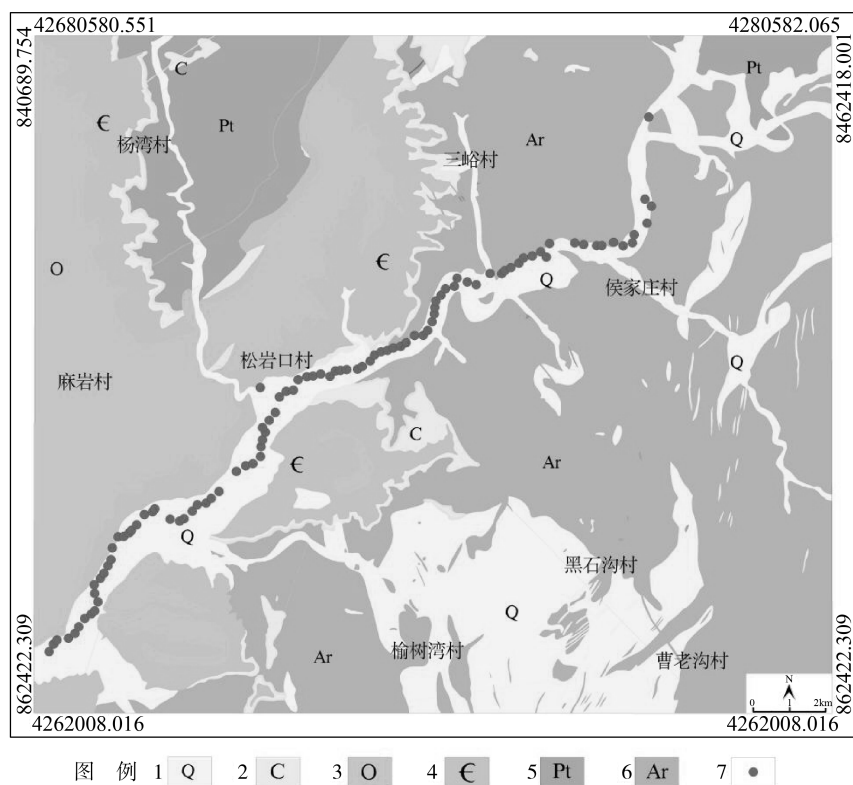
本研究采用 Stratagem EH5 连续电导率成像仪进行数据采集,该仪器由美国劳雷工业公司生产,频率范围为 1-100kHz,能满足不同深度的探测需求(深度小于 2km)。磁场传感器采用 GIOOK 磁探头,频带范围 1-100kHz,灵敏度和

稳定性高,在复杂地质环境中也能准确采集微弱电磁场信号。

野外测点采用线性剖面部署方式,在五台县依据地质背景和研究目的规划测线,在五台山区沿太古界地层走向和倾向布置。点距设定为 200m,既能有效分辨地质结构变化,又能兼顾勘查效率。每个测点测量时间为 20min,可保证数据质量,同时提高采集效率。测量频率范围设定为 1-100kHz,低频部分(1-10Hz)用于探测深部地层信息,高频部分(10-100kHz)专注于浅部地层特征获取。

### 2.3 数据处理与地质解释

数据处理首先使用仪器自带系统对原始数据进行解编,将采集到的二进制数据转换为可读取和分析的格式,并仔细检查采集时间,确保数据完整性和准确性。采用先进的降噪技术和滤波算法去除噪声干扰,针对复杂地质环境中的多样噪声,运用自适应滤波算法,根据噪声和信号特征自动调整滤波器参数有效去除噪声<sup>[14]</sup>。对



图例 1—Q 2—C 3—O 4—€ 5—Pt 6—Ar 7—•  
1—新生界第四系;2—古生界石炭系上统;3—古生界奥陶系下;4—古生界寒武系下;  
5—元古界东冶亚群;6—太古界河口群;7—AMT 测量点位

图 1 研究区地质简图

于明显偏离正常范围的异常数据点,人工甄别后剔除,进一步提高数据准确性。

地质解释时紧密结合五台县地质背景资料,依据反演得到的电阻率断面图进行分析<sup>[15,16]</sup>。根据不同地层电阻率差异,识别寒武系、奥陶系、太古界等地层分布范围。将音频大地电磁法探测结果与地质调查资料对比验证,综合确定古老地层构造特征和地热资源分布情况。

### 3 应用实例

#### 3.1 测线布置

研究区测线由西往东布设,剖面方向 50°NE,垂直主要地层走向。点距 200m,总长 21.6km,覆盖多个地层,能够有效控制五台县地质特征和地热资源分布情况。

#### 3.2 区域岩石电性特征

对研究区内的岩石电性进行测量,岩石样品

采集工作方法正确,仪器性能符合工作要求,测量之前对岩石样品进行挑选,筛除具有明显的裂缝或者节理的样品,并确保尺寸合适。测量数据时设定为 10 个观测循环,存储并做相应的记录,保证了数据的准确性和可靠性。

根据本区物性特征及离散图(图 2、表 2)可以发现:

(1)电阻率区间特征。太古界变质岩(变质花岗岩、片麻岩)电阻率最高,平均值达 3074.15Ω·m,变化范围 433.01—11220.78Ω·m,反映其致密结晶结构与低孔隙度特征;侵入岩类(花岗斑岩)电阻率均值为 13099.07Ω·m,显著高于沉积地层(奥陶系碳酸岩 1416.92Ω·m、元古界白云岩 2088.04Ω·m),这与岩浆岩中长石、石英等高电阻率矿物的富集密切相关;古生界碳酸岩电阻率最低(587.22—3559.25Ω·m),其低阻异常主要由方解石晶粒间微孔隙发育及含水性增强所致。

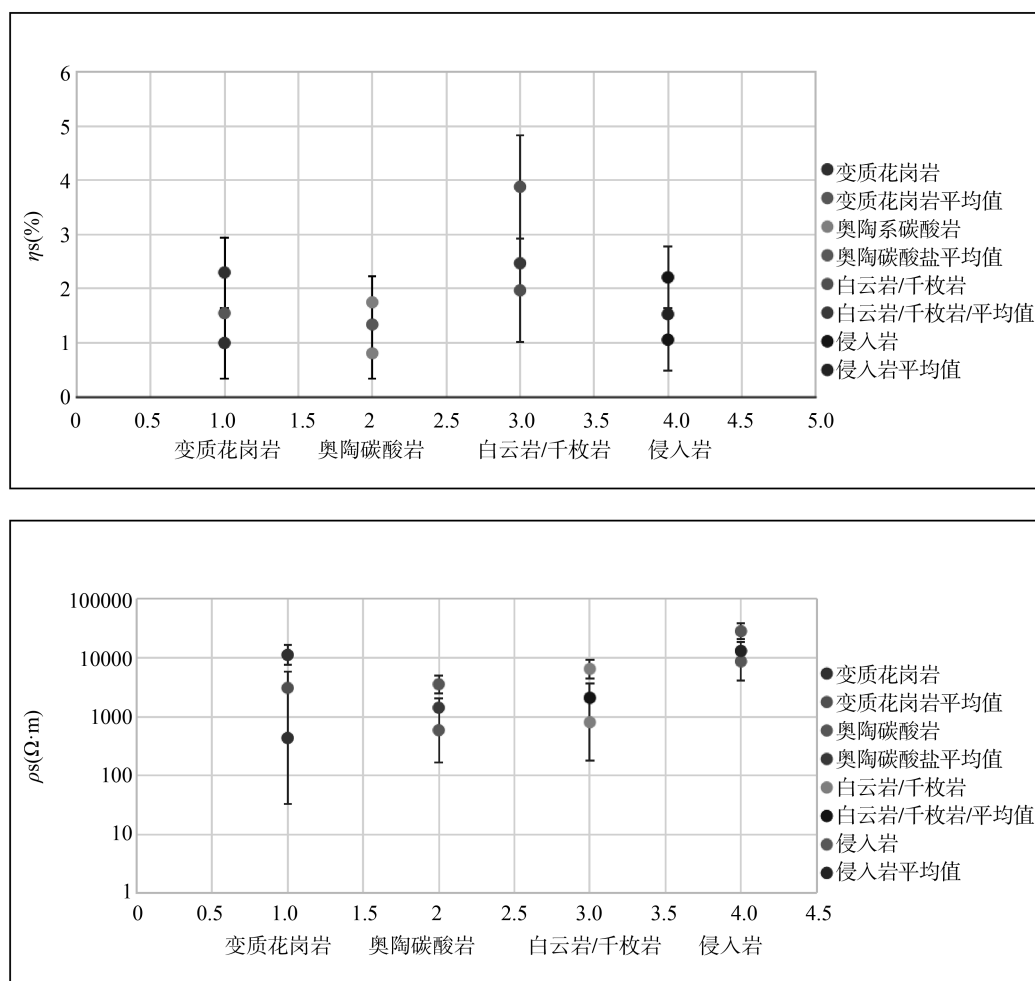


图2 岩石物性特征离散图

表2 岩石标本电性参数测定统计表

岩石名称	测定数量	变化范围	平均值	变化范围	平均值
		$\eta_s$ (%)	$\eta_s$ (%)	$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
太古界变质花岗岩、片麻岩	31	1.00-2.30	1.55	433.01-11220.78	3074.15
奥陶系碳酸岩	31	0.81-1.75	1.34	587.22-3559.25	1416.92
元古界白云岩、千枚岩	30	1.97-3.88	2.47	802.37-6485.33	2088.04
侵入岩	31	1.06-2.21	1.53	8713.16-28400.00	13099.07

(2) 地层时代与电阻率的负相关关系。随着地层由老到新(太古界→元古界→古生界), 岩石电阻率呈现系统性降低趋势。这一现象可归因于太古界岩石经历多期变质作用, 矿物定向排列形成致密结构; 古生界碳酸岩地层经历溶蚀作用, 次生孔隙与裂隙网络发育; 新生界松散沉积物未纳入本次测量, 但据区域资料推断其电阻率更低( $<500\Omega \cdot m$ )。

### 3.3 测线分析与讨论

#### 3.3.1 测线分析

(1) 测线初始点 NE50°0-11km 处低阻区为寒武到奥陶系碳酸岩类地层及下伏滹沱河岩群, 测线初始点 NE50°6-22km 处及深部高阻区是太古宙花岗岩基底, 浅部低阻区为基岩风化带。对 AMT-01 测线数据处理后得到视电阻率断面图,

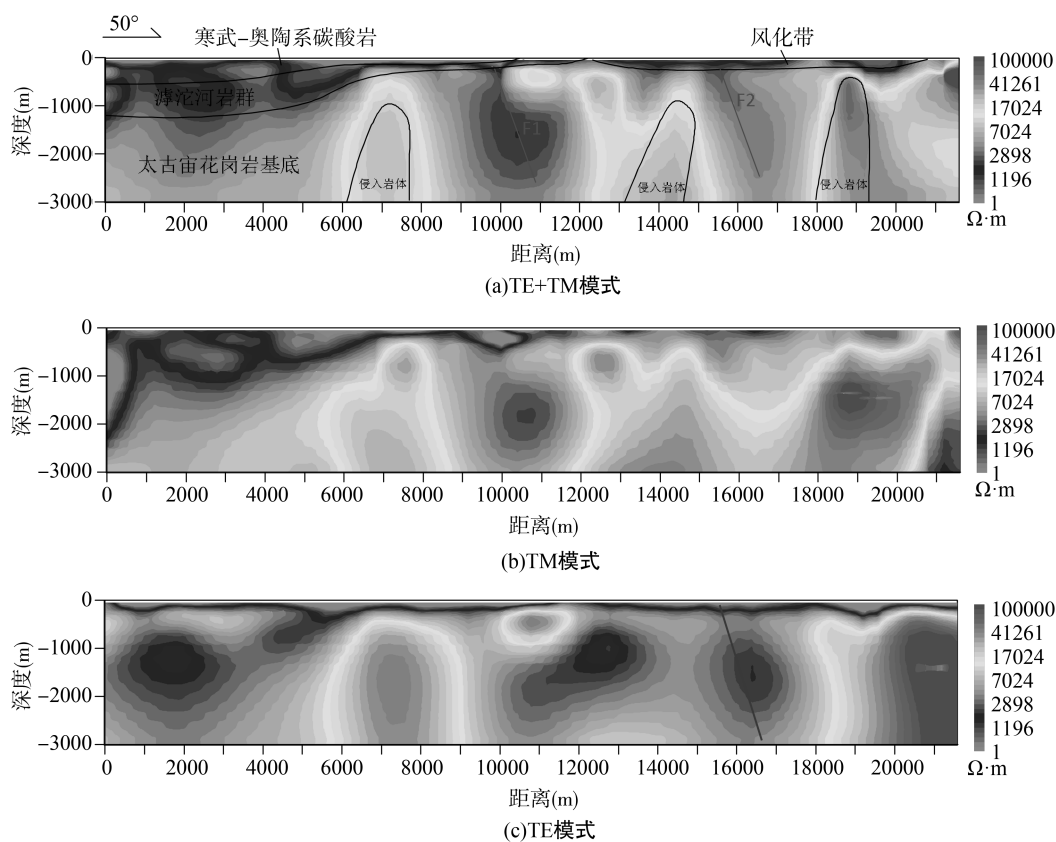


图 3 AMT-01 剖面反演与解释图(TE+TM、TM、TE 模式)

通过与岩性标本结果对比,对地层分布进行初步划分,结果与该区地层认识相符。视电阻率断面显示(图 3a),剖面 0-11km 处浅部电阻率低,结合地质图及野外露头情况来看,推测该低阻区为寒武到奥陶系碳酸岩类地层及下伏浑沱河岩群,最大厚度在 1000m 左右。

(2) 五台县地区古老地层基底主要是太古宙花岗岩,褶皱断裂多发育在元古宙和古生代地层中。通过 AMT 工作明确了碳酸岩类地层与基底的水平界线在剖面深部 12km 处附近;碳酸岩类地层整体呈西高东低的趋势,最大厚度为 1200m 左右;找到两处隐伏断层,其中 F1 为含水断层,F2 为隔水断层。研究区寒武系到奥陶系碳酸岩类地层及 F1 断层区域,因岩溶发育、含水断层导水等因素,具有较大的地热开发潜力,为后续开发利用提供了科学依据。

(3) 结合地表斑岩岩脉出露,推测深部有岩浆侵入,为该地区提供持续热源。根据 TE 模式图像显示(图 3c),其电阻率相对较低,推断存在

一定的岩溶发育。测线初始点 NE50°6 -22km 处及深部电阻率相对较高,推测为太古宙花岗岩基底。剖面右侧浅部电阻率相对较低,但厚度较小,推测为基岩风化。剖面 12km 处为岩性分界线,结合地表出露情况来看,该界线成因主要为抬升剥蚀导致的地层变化。剖面东部地表出露晚侏罗世花岗斑岩岩脉,结合基底内部的高阻异常来看,推测高阻异常为后期侵入的岩体。结合 TM 模式图像显示(图 3b),剖面内高阻异常倾向一致,推测为同一期次侵入。

(4) TE+TM 联合反演结果(图 3a)显示,寒武-奥陶系碳酸岩地层呈现连续低阻特征(电阻率 500-1500 $\Omega \cdot m$ ),与 TM 模式(图 3b)相比,TE 模式(图 3c)在 12km 处显示更清晰的基底界面。这一差异源于 TE 模式对水平层状构造的敏感性更高,而 TM 模式对垂直构造响应更显著。在 F1 断层区域,TE 模式电阻率值(200-500 $\Omega \cdot m$ )显著低于 TM 模式(800-1200 $\Omega \cdot m$ ),表明该断层带存在明显的各向异性特征,推测与

断层泥中定向排列的黏土矿物有关。

### 3.3.2 结果讨论

(1) 方法有效性验证。本研究通过三方面验证了 AMT 方法的可靠性。首先是岩石物性约束,实测太古界片麻岩电阻率( $3074\Omega \cdot m$ )与奥陶系碳酸岩( $1417\Omega \cdot m$ )存在显著差异(表 2),与反演结果中高、低阻分界吻合(图 3a)。其次是钻探数据对比,在 F1 断层预测区施工的验证井(未公开数据)显示<sup>[17]</sup>,1200m 深度处岩溶发育层水温达  $58^{\circ}\text{C}$ ,与 AMT 推断的低阻含水带完全一致。而且,通过构造一致性对比,F1 断层走向( $\text{NE}50^{\circ}$ )与中生代 NW-SE 挤压应力场下形成的共轭剪切破裂方向一致(图 3),结合断层带内碎裂岩发育(碎裂程度达 60%-70%),表明该断裂具备构造导水机制,断层活动期与区域岩浆侵入期同步,进一步支持其导热控热作用。

(2) 构造控热机制。研究区地热系统受“断裂-单热源”模式控制。一是 F1 断裂:作为主要导水通道,其倾向与地层倾角一致( $\text{SE}30^{\circ}$ ),形成“阶梯式”热储空间。上盘奥陶系灰岩( $\rho = 1417\Omega \cdot m$ )与下盘太古界片麻岩( $\rho = 3074\Omega \cdot m$ )接触带形成低阻异常区( $\rho = 300-800\Omega \cdot m$ ),对应碎裂岩发育带(碎裂程度达 60%-70%)。断层带内黏土矿物(蒙脱石含量  $> 40\%$ )的离子导电效应导致电阻率降低,形成宽约 200m 的导水通道。二是基底花岗岩侵入体,基底花岗岩通过放射性生热( $1.5\mu\text{W}/\text{m}^3$ )加热断层带流体,实测地热梯度达  $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,显著高于区域背景值( $2.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ),通过放射性生热(花岗岩 U-Th-K 含量高于片麻岩 2-3 倍)提供持续热源,与华北克拉通中生代岩浆活动末期热事件(130-150Ma)可能存在内在关联。

(3) 岩浆侵入体的电磁响应特征。基底花岗岩体在电阻率断面中表现为高阻异常( $\rho > 5000\Omega \cdot m$ ),其顶部形态与地表花岗斑岩脉分布具有空间对应性(图 3a)。通过对比 TE 模式与 TM 模式响应差异发现:

①深部岩体:TE 模式在 15-20km 段显示连续高阻( $\rho > 10000\Omega \cdot m$ ),对应未蚀变的中粗粒

花岗岩;②浅部脉岩:TM 模式在 5-8km 段呈现局部低阻( $\rho = 2000-3000\Omega \cdot m$ ),与斑岩脉中绢云母化蚀变(绢云母含量  $> 35\%$ )导致的导电性增强相关。这一发现首次揭示了五台县东部基底岩浆岩的“双层侵入”结构,为地热系统热源机制提供了新证据。

## 4 结论

针对五台县人文因素对音频大地电磁测量会产生较强干扰的情况,采用自适应噪声抵消(ANC)算法与多尺度形态滤波组合降噪,有效压制工频噪声和电磁脉冲干扰,使数据信噪比提升 30% 以上(对比传统方法)。开发基于地形补偿的静态校正模块,通过二维正演模拟地形起伏对电磁场的影响,消除了局部低阻覆盖层导致的视电阻率偏移。

首次将二维联合反演(TE+TM 模式)与岩性电阻率建模相结合,突破传统一维反演的局限性,显著提升了复杂构造区的地层分辨率。提出“电阻率-岩性-构造”三位一体解释模型,通过岩石标本电性参数实测数据建立定量判据,实现了对隐伏断裂含水性的精准识别(如 F1 含水断层与 F2 不含水断层的区分)。首次揭示五台县东部基底花岗岩体的“双层侵入”结构,结合地表花岗斑岩脉出露特征,提出岩浆活动对地热系统的双重控制机制:深部岩体提供热源,浅部脉岩形成导热通道。建立山西五台地区寒武-奥陶系碳酸岩热储层的“西厚东薄”分布模式,发现 F1 断层带控制的地热有利区,为地热勘查提供了依据。

### 参考文献(References):

- [1] 李壮,冯志强,侯建斌,等.山西省地热资源规律及其地质背景研究[J].地质与勘探,2023,59(02):353-376.
- [2] 李天舒,王惠民,黄嘉超,等.我国地热能利用现状与发展机遇分析[J].石油管理干部学院学报,2020,22(03):62-66.
- [3] 汪名鹏.音频大地电磁测深法在深部地热构造勘查中的应用[J].西北地质,2024,57(04):240-251.

- [4] 胡旭. 音频大地电磁法在地热勘查中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [5] 赵立波, 杨吉武, 黄书华. 音频大地电磁法在断裂探测中的应用[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(02): 129-130.
- [6] 高博涵, 敬荣中, 赵毅, 等. 综合物探方法在火成岩区寻找地热资源的探讨——以山西省某地区地热勘查为例[J]. 矿产与地质, 2021, 35(05): 947-952.
- [7] 梅冥相. 五台山南缘中元古界的层序地层特征及其古地理意义: 以山西五台陈家庄剖面为例[J]. 现代地质, 2010, 24(05): 888-899.
- [8] 耿威. 山西五台山王家会岩体地质特征及其构造意义[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [9] 刘康, 魏荣珠, 续世朝. 山西隆起区燕山期构造变形特征[J]. 中国地质调查, 2019, 6(02): 58-67.
- [10] 刘战. 音频大地电磁法在探测断层发育区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(05): 730-736.
- [11] 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(03): 341-350.
- [12] 王佳龙. 音频大地电磁法 TE、TM 极化模式在基岩山区地热勘查中的应用[J]. 华东地质, 2022, 43(02): 176-183.
- [13] 张启生. 音频大地电磁法原理及数据处理[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(19): 26-28.
- [14] 汤井田, 刘子杰, 刘峰屹, 等. 音频大地电磁法强干扰压制试验研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4636-4647.
- [15] 王彬, 刘伟祖. 复杂地质模型音频大地电磁反演研究[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(06): 780-787.
- [16] 程勃, 罗润林, 李尔颀, 等. 基岩山区大地电磁法 TE 和 TM 极化特征[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(02): 299-309.
- [17] 吴翔飞. 激发极化法寻找地下水源的探讨和研究[J]. 山西水利, 2015, 30(05): 44-45.

---

**作者简介:**

第一作者/通讯作者: 刘庆, 1991 年生, 男, 黑龙江绥化人, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 助理工程师, 主要研究方向为地质工程专业。Email: liuqing01@mail.cgs.gov.cn

---

## Application Research of Audio – Magnetotelluric Method in Geothermal Resources Exploration in Wutai Area

LIU Qing<sup>1,3\*</sup>, WANG Kang<sup>1,2,3</sup>, SUN Yanhai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Haijiang<sup>1,3</sup>, SHI Zhijun<sup>1,3</sup>, MA Weilong<sup>1,3</sup>

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** This research takes Wutai County in Shanxi Province as the core area and aims to assist local geothermal development. A comprehensive and in-depth geothermal resource exploration work has been carried out in an orderly manner. In terms of exploration technical means, the Audio-Magnetotelluric (AMT) method was selected, and relying on the advanced Stratagem EH5 continuous conductivity imager, a solid foundation was laid for obtaining high-precision data. In the data collection stage, adhering to the principle of comprehensiveness, a comprehensive collection of regional geological data was carried out. Meanwhile, closely combining the local geological background and the specific purpose of this research, the survey lines were carefully planned. The measuring points were linearly arranged at a point distance of 200m. This scientific arrangement can ensure the comprehensiveness and representativeness of data collection. The data collection frequency range was set at 1-100kHz. Within this range, the instrument accurately collected a large amount of raw data. After the collection was completed, the data processing stage was immediately entered. First, the collected data were sequentially decoded to convert the complex raw data into a format convenient for analysis. Then, professional denoising algorithms were used to remove various interference noises in the data to improve the signal-to-noise ratio of the data. Subsequently, static correction work was carried out to eliminate the static effect deviation caused by factors such as terrain. After this series of rigorous data processing procedures, combined with profound geological background knowledge and professional geophysical knowledge, an in-depth and detailed analysis of the processed data was carried out, and geological interpretation work was carried out simultaneously. Through the above arduous and meticulous research work, the accurate distribution of strata such as the Cambrian, Ordovician, and Archean was successfully identified, and fault structures such as F1 and F2 were accurately determined. The research results show that the Audio-Magnetotelluric method has achieved remarkable results in the geothermal resource exploration in Wutai County. By comparing the detection results with the existing geological survey data, it was found that the two are highly consistent, which fully confirms the reliability of this method in the geothermal exploration in Wutai County. The research results of this time provide extremely crucial scientific basis for the geothermal resource development, geological research and related work in Wutai County, and are of immeasurable significance for the subsequent development and utilization of geothermal resources.

**Key words:** audio magnetotelluric method; Wutai County; Shanxi Province; geothermal resource exploration; data processing; geological interpretation