

基于音频大地电磁测深法的地下水勘探研究

——以山西省五台县斗咀村与两涧村为例

王康^{1,2,3*}, 孙彦海^{1,2,3}, 陈海江^{1,3}, 刘庆^{1,3}, 石致君^{1,3}, 詹佛祥^{1,3}

(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:本研究针对五台县斗咀村和两涧村水资源匮乏问题,采用音频大地电磁测深法(AMT)进行地下水资源探测。结合已知区域地质和水文地质资料研究,运用音频大地电磁测深法,选用GDP-32 II多功能电法仪进行数据采集,经严格测线布设和数据处理,精准预测有利含水区,有效探查了斗咀村和两涧村地表以下1000m范围内地层岩性结构、构造破碎带及地下含水区的分布特征,并对成井模式及推荐井位进行探讨。研究成果为当地水资源合理开发利用提供了关键科学依据,有效解决了用水难题。

关键词:音频大地电磁测深法;五台县;找水实践;地质分析;成井模式

中图分类号:P319 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)09-0116-7

0 引言

水是生命之源,对人类生存和发展至关重要。五台县斗咀村和两涧村地表水资源匮乏,河流径流量小且季节性变化明显,干旱季节甚至干涸。地下水资源成为当地生活和农业用水的主要依赖,但目前对其分布和储量认识不足。现有民用水井多为浅层井,出水量随用水需求增长逐渐减少,水质也存在问题,部分区域浅层地下水受到污染,影响居民健康^[1,2]。

音频大地电磁法(AMT)作为一种有效的地球物理勘探方法,在找水领域具有独特优势。它利用天然交变电磁场为场源,通过测量不同频率下的电场和磁场分量计算卡尼亚视电阻率值,以推断地下地质结构和含水层分布情况。与传统找水方法相比,AMT具有探测深度大、效率高、成本相对较低等优点,能在不破坏地下地质结构的前提下快速获取深部地质信息^[3-5]。

本次研究目的在运用音频大地电磁测深法

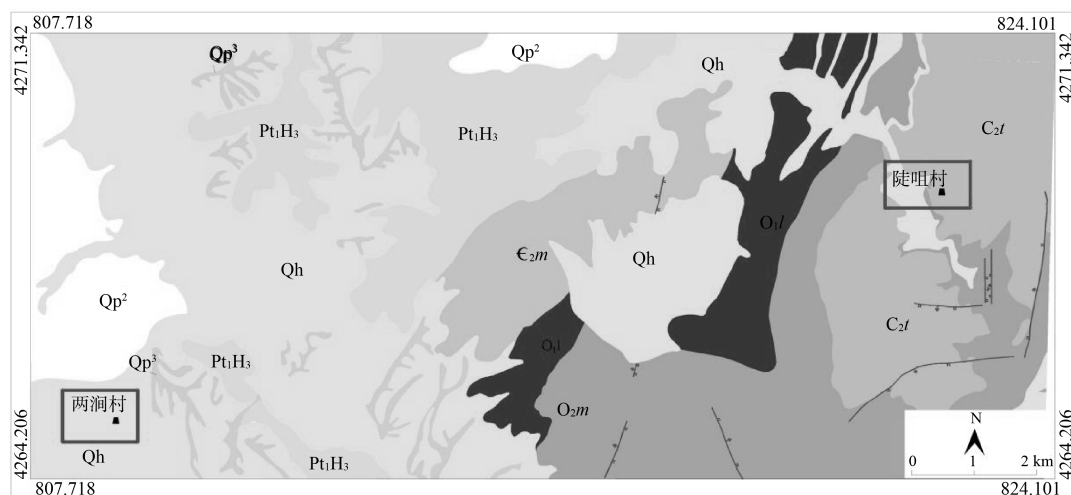
精准探测两村地下水资源分布,根据地下岩性电阻率差异,划分其富水区展布状态,为水资源合理开发利用提供科学依据。具体研究内容包括查明地下不同深度地质结构、构造,确定主要岩层分布和特征;识别含水层位置、厚度,大致了解富水性和地下水补给情况。

1 研究区概况

1.1 区域地质

五台县地处华北板块北缘,地质演化历史漫长复杂,地质构造呈现多种构造体系交织格局^[6-8]。整体处于山间谷地,地势略缓且大部分地区被植被覆盖,四周陡山环绕,靠近村镇开辟有大量农田,研究区分别处于五台县内的斗咀村和两涧村(图1)。出露地质体主要为滹沱群东治亚群板岩、白云岩,寒武系中统馒头组页岩、灰岩,奥陶系中统亮甲山组灰岩,奥陶系中统马家沟组灰岩、白云岩,石炭系上统太原组页岩、砂

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)。



图例 Qh 1 Qp³ 2 Qp² 3 C_{2l} 4 O_{2m} 5 O_{1l} 6 E_{2m} 7 Pt₁H₃ 8 $\angle 61^\circ$ 9 $\angle 31^\circ$ 10 11

1—第四系全新统;2—第四系上更新统;3—第四系中更新统;4—石炭系上统太原组;5—奥陶系中统马家沟组;
6—奥陶系中统亮甲山组;7—寒武纪中统馒头组;8—滹沱群东治亚群;9—正断层;10—逆断层;11—测区位置

图2 研究区地质简图

岩、灰岩^[9,10],第四系更新统与全新统的沉积物,主要为粘土、砂土以及砂砾等。这些沉积物的厚度与地形地貌关联紧密,在沟谷区域,其厚度能够达到数十米,而在丘陵区域,厚度则不足十米。两涧村位于五台县正南方向,处于山谷之中,区域内发育着厚层的第四纪坡积物。斗咀村地处五台县茹村乡南部,地势略有起伏,石炭系页岩在此出露,可见因构造原因破碎的基岩,第四系松散层也呈零星分布状态。历经漫长岁月的构造运动,五台县形成了一系列褶皱与断裂。古老的岩层在这一过程中发生了强烈变质,不仅导致了五台山区的隆起与拗陷,还引发了强烈的岩浆活动^[11](图2)。

1.2 水文地质

五台县斗咀村和两涧村地下水类型主要有松散岩类孔隙水、基岩构造裂隙水以及可溶类岩溶水^[12]。

松散岩类孔隙水赋存于第四系黄土层中,黄土多孔,孔隙连通,为地下水储存提供一定空间。部分区域黄土覆盖厚、降水入渗条件好,此类孔隙水有一定分布,但水量较小,水位受季节影响大,雨季上升,旱季下降。

基岩构造裂隙水存在于太古界五台群变质

岩和元古界滹沱群地层中。太古界变质岩虽致密,但构造运动形成大量节理裂隙,成为地下水储存和运移通道。

可溶类岩溶水主要分布在白云岩地层中。白云岩经长期岩溶作用,发育溶蚀裂隙和溶洞,相互连通形成复杂岩溶管道系统,为岩溶水储存和径流提供良好空间^[13,14]。

2 工作方法

2.1 原理及方法

音频大地电磁测深法(AMT)基于电磁感应原理,利用天然交变电磁场(频率范围0.1Hz-10kHz)作为场源,该场源来自地球外部电磁现象,如太阳活动、雷电活动等。场源穿透地下与地质体相互作用,携带地下地质信息^[15,16]。

实际测量时,在地面布置观测装置,利用天然场源平面波建立电磁场。观测装置由相互垂直的电偶极和磁偶极组成,电偶极测量电场 E_x 分量,通过一对电极感应地下电场变化,电位差与电场强度成正比;磁偶极测量磁场 H_y 分量,通常用感应线圈检测磁场变化。一般情况下,岩石致密程度的高低,反应在卡尼亚视电阻率上也呈现高低的变化;在相同地质背景下,地下存在含

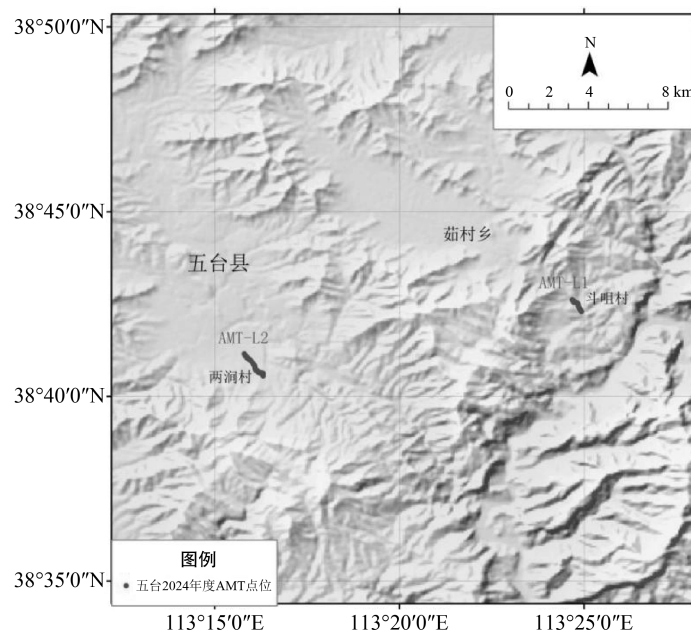


图 1 AMT 测线位置图(地形底图来自于国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>))

水层时,水导电性好、电阻率低,在卡尼亚视电阻率剖面上表现为低阻异常。通过分析解释卡尼亚视电阻率的变化,可推断地下含水层位置、厚度和大致富水性,为地下水资源勘探提供依据。

2.2 仪器装置与数据处理

本次选用美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 II 多功能电法仪,该仪器有 8 个接收通道,可同时采集分析多个电磁信号,提高数据采集效率和全面性。工作频率范围 0.75-8192Hz,能适应不同深度地质体探测要求^[17,18]。

数据处理流程为:利用 GDP-32 II 多功能电法仪采集数据;采用 MTFT 软件对原始数据预处理,去除噪声、校正;利用 SCS2D 专业反演软件反演计算,得到地下电阻率分布模型;结合地质背景和已有水文地质资料,解释分析地下地质结构和含水层分布,确定富水区域,推荐井位;不断验证优化数据和解释结果,确保研究结果准确可靠。

2.3 测线布设

根据探测目标和地形条件,在五台县斗咀村和两涧村部署测线。在五台县斗咀村西南侧沟内 1000m 以浅地下水分布,部署测线 AMT-L1。测线由北西往南东布设,走向 150°,点距 40m,剖

面长度 600m,最大探测深度约 1km。五台县两涧村北东侧部署测线 AMT-L2。测线由北西往南东布设,走向 140°,点距 50m,剖面长度 1250m,最大探测深度约 1km(图 2)。

3 成果解释应用

3.1 AMT-L1 测线分析

从 AMT-L1 反演剖面图(图 3)可见,1000m 以内由浅到深卡尼亚视电阻率可划分为 4 种类型:

(1)地表-100m,视电阻率高低混杂,横向变化大。结合地质背景推断主要岩性为砂岩、泥(页)岩,部分位置夹杂灰岩、白云质灰岩。总体较破碎,在破碎处含水性较好,含水层类型主要为裂隙水,部分砂砾岩内亦应含孔隙水。本层是研究区主要的潜水层。

(2)埋深 100-350m,总体为 200 数千 $\Omega \cdot m$ 的高视电阻率区。在测线右端存在一个倾向南东且较陡立的低阻异常,推断主要岩性为灰岩、白云质灰岩,右侧低阻带为富含水断层或裂隙岩溶。高阻区厚度大、连续性好,为本区主要隔水层。右侧陡立低阻区则为沟通上下 2 个含水层的地下水通道。

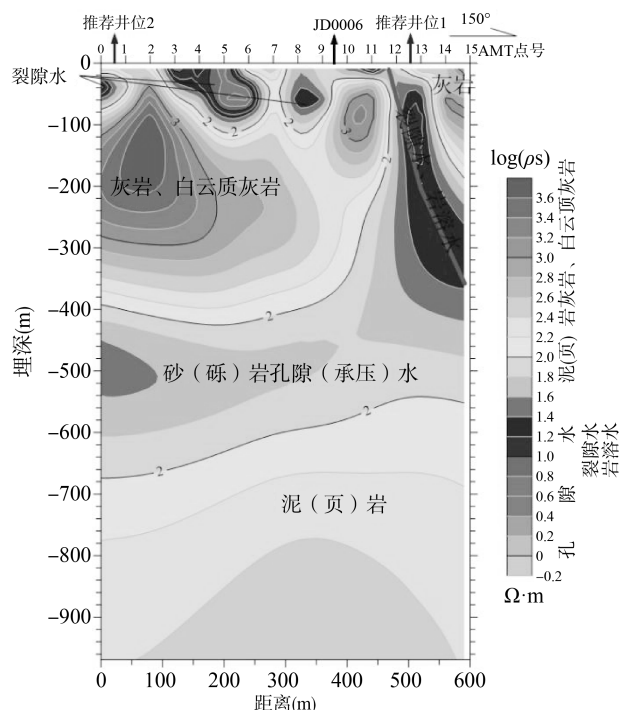


图3 AMT-L1反演与解释剖面图

(3)埋深 350-650m, 总体为 $30-100\Omega \cdot m$ 的层状中低视电阻率区。推断主要岩性为砂(砾)岩。本层地层孔隙中含水性较好,是本区主要的承压水层。

(4)埋深 650m—未见底, 总体为大于 $100\Omega \cdot m$ 的近层状中高视电阻率区。推断岩性主要为泥(页)岩,可能夹具有一定含水性相对薄层的砂(砾)岩。

3.2 AMT-L2 测线分析

从 AMT-L2 反演剖面图(图 4)可见,整个测线首先从左往右在 650-800m 处可分为 2 个类型:

(1)测线 0-800m, 整体视电阻率相对较低。推断主要岩性为砂岩、泥(页)岩。埋深 400m 以浅总体较破碎,在破碎处含水性较好,含水层类型主要为孔隙水、裂隙水,浅部 2 个封闭低阻带推测为岩溶水。大于 200m 的深部高阻区厚度大、连续性好,推测含水性较差。

(2)测线 800-1250m, 整体视电阻率相对较高,在测线右端 200m 以浅存在 2 个相对较封闭的低阻区,推断为岩溶水。200m 以下高阻区推断主要岩性为灰岩、白云质灰岩。

4 成井模式探讨及验证

根据反演结果和已知的水文地质资料推断:斗咀村主要含水层主要为 2 个:第一是埋深 100m 以内、横向变化差异大的裂隙、孔隙潜水层;第二是 350m 以深的砂(砾)岩孔隙承压水。二者以测线右端的断层或岩溶沟通。故推荐井位 1 位于测线右端 500 余米处测点 12-13 之间,地下具有丰富的裂隙,岩溶水,井深大于 100m 即可。推荐井位 2 位于测线左端测点 0-1 之间,80m 以浅有潜水,大于 350m 有较好的承压水,推荐井深大于 500m(图 3)。两涧村主要含水层主要为 2 个:第一是测线 200-800m 处,埋深 800m 左右的孔隙、裂隙水层;第二是测线右端测点 17-18 之间,和测点 20-22 之间 200m 以浅的岩溶水。故推荐井位 1 位于测线 400m 左右的测点 8 处,地下具有丰富的裂隙,岩溶水,推荐井深 80-100m。推荐井位 2 位于测线右端测点 21 处,推荐井深 250m(图 4)。

后期对两涧村井位 1 进行打孔验证,钻孔柱状图如图 5 所示,60m 以浅为粉质粘土、砂质粘土,60m 以深为风化的砂岩,含砾石。地层岩性

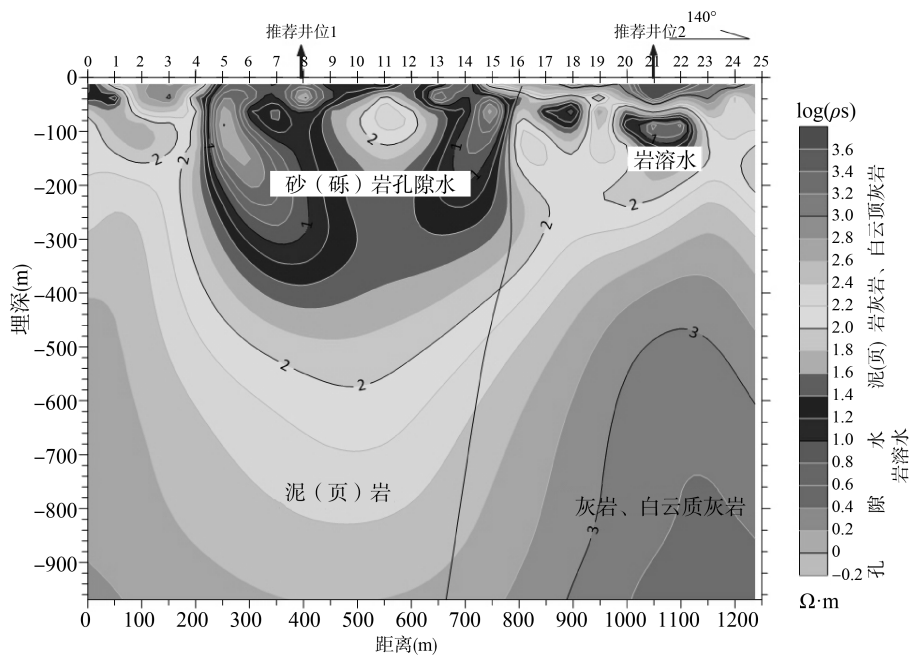


图4 AMT-L2反演与解释剖面图

深度(M)	岩性	地层	层厚(M)	底深(M)
0				
10				
20	9	粉质黏土, 土黄色, 中等硬度, 夹杂有砾石	45.6	45.6
30				
40				
50	5	灰黄色砂质黏土	13.5	59.1
60				
70				
80				
90				
100				
110		砂岩, 褐黄色含砾石	90.9	150
120				
130				
140				
150				

图5 两涧村 zk-01 柱状图

与反演结果相互吻合,井水属于孔隙水,出水量 550m³/d,解决了该村饮水困难、农作物严重缺

水减产问题。

5 结论

在五台县斗咀村和两涧村的实际作业过程中,运用音频大地电磁测深法开展寻水定井工作,取得了颇为良好的效果。通过该方法成功定位到了富含地下水的区域,为后续定井工作奠定了坚实基础。

然而,需要明确的是两涧村部分区域地势较为平坦,可能存在由河流冲积形成的松散堆积层,这类地层往往具备良好的透水性和储水性,地下水多以孔隙水的形式赋存;而斗咀村则可能存在一些丘陵地带,基岩出露相对较多,储水类型或转变为裂隙水,依赖岩石中的裂隙作为储水空间和运移通道。这种储水类型的显著差异,使得定井工作无法一概而论。

因此,在定井环节,必须结合具体地层、岩性、水文信息资料进行综合判断。与此同时,也需充分考量所选井位是否符合当地土地利用规划,避免占用农田保护区、生态敏感区等特殊用地。只有综合权衡这些因素,才能从众多候选位置中筛选出最佳井位,确保水井能够长期稳定地为当地居民提供充足、优质的水源,助力当地的

生产生活及社会发展。

参考文献(References):

- [1] 贺艳华. 五台县水资源开发利用程度分析[J]. 山西水利, 2014, 30(08): 6+8.
- [2] 李鹏强. 山西省忻州盆地地下水污染特征研究[J]. 节能与环保, 2021, 39(04): 79-80.
- [3] 李世军, 王力斌. 物探方法在找水方面的应用[J]. 吉林地质, 2008, 27(03): 110-112.
- [4] 邬健强, 甘伏平, 张伟, 等. 音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(06): 918-924.
- [5] 王家俊, 杨炳南, 朱大伟, 等. 音频大地电磁法在黔西南金矿区域地电特征研究中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(04): 611-620.
- [6] 杨振升, 耿元生, 李德伦, 等. 山西五台山地区前滹沱群变质岩构造变形史[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 1982, 26(01): 15-28.
- [7] 魏春景. 华北中部造山带五台-恒山地区古元古代变质作用与构造演化[J]. 地球科学, 2018, 43(01): 24-43.
- [8] 王兴安. 华北板块北缘中段早古生代-泥盆纪构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [9] 罗曼. 五台山元古界滹沱群沉积相与古环境演化研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [10] 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(04): 1037-1055.
- [11] 杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 等. 以地质事件性质讨论华北克拉通古元古界典型地层时代——以五台地区滹沱群为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(06): 767-787.
- [12] 卢清峰. 山西地下水类型及主要含水层特征[J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2006, 19(03): 121-122.
- [13] 王大纯. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [14] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [15] 辛会翠. 音频大地电磁远参考点信号特征及远参考大地电磁法在信号处理中的应用研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2019, 21(04): 41-46.
- [16] 渠继明. 音频大地电磁测深法在复杂地质条件下勘察的应用[J]. 山西水利科技, 2022, 52(03): 23-25.
- [17] 郭文波, 王凯, 王善勋, 等. GDP-32 II 多功能电法仪及应用效果[C]. 陕西省地球物理学会. 2003年陕西省地球物理学会年会: 陕西地球物理文集(四). 西北有色地质勘查局物化探总队, 2003: 152-155.
- [18] 郭文波, 王凯, 王善勋, 等. GDP-32 II 多功能电法仪在资源和工程勘察中的应用效果[J]. 矿产与地质, 2004, 24(06): 587-590.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 王康, 男, 1994年生, 哈尔滨人, 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。Email: wangkang@mail.cgs.gov.cn

Research on Groundwater Exploration Using Audio Magnetotelluric Sounding Method: A Case Study of Douzui Village and Liangjian Village in Wutai County, Shanxi Province

WANG Kang^{1,2,3*}, SUN Yanhai^{1,2,3}, CHEN Haijiang^{1,3}, LIU Qing^{1,3}, SHI Zhijun^{1,3}, ZHAN Fuxiang^{1,3}

(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 150086, China)

Abstract: This study focuses on the long-term water scarcity dilemma faced by Douzui Village and Liangjian Village in Wutai County, Shanxi Province. These two villages are located in a special geological area, where the main rock types are limestone and dolomitic limestone. The uneven development degree of these rocks leads to extremely complex precipitation infiltration conditions. Meanwhile, the terrain has large undulations, and the surface runoff has a high flow rate, making it difficult to retain water effectively. Moreover, there is a lack of stable conventional water sources such as rivers and lakes in the surrounding area, and the access to water is extremely limited, which severely restricts the improvement of the living quality of local residents and the development of agricultural production. Against this backdrop, this study uses the Audio Magnetotelluric Sounding (AMT) method to conduct the exploration of groundwater resources. When applying this method, the advanced GDP-32 II multi-functional electrical prospecting instrument is selected for data collection. Before the field operation, a detailed geological analysis was carried out, including research on aspects such as regional structures and stratigraphic distributions. During the preliminary field investigation, technicians comprehensively examined the topography and geomorphology and marked the factors that might affect the layout of the survey lines. The survey lines were laid out in strict accordance with scientific norms to ensure that the data could comprehensively cover the target area and be representative. After the data collection was completed, the SCS2D professional inversion software was used for inversion calculation and processing. Through a series of meticulous operations, the favorable water-bearing areas were accurately predicted, and the distribution characteristics of the stratigraphic lithology structure, tectonic fracture zones, and underground water-bearing areas within a range of 1,000 meters below the surface of Douzui Village and Liangjian Village were successfully explored. Based on the exploration results, an in-depth discussion was carried out on the well completion mode and recommended well locations, taking into comprehensive consideration factors such as geological stability, the thickness of the aquifer, and water quality. Ultimately, the research results provide crucial scientific evidence for the rational development and utilization of local water resources, effectively solve the long-standing water use problem, and contribute to the local sustainable development.

Key words: audio magnetotelluric sounding method; Wutai County; water-finding practice; geological analysis; well-completion mode