

doi: 10.12029/gc20240610001

汪雅菲, 薛国强, 韩江涛, 罗先中, 王帮兵, 葛粲, 徐浩, 管后春, 汪青松, 张凯, 王朝, 张笑蓉, 陶威, 张晋喆, 刘向红. 2025. 物探找水方法进展[J]. 中国地质, 52(4): 1325–1351.

Wang Yafei, Xue Guoqiang, Han Jiangtao, Luo Xianzhong, Wang Bangbing, Ge Can, Xu Hao, Guan Houchun, Wang Qingsong, Zhang Kai, Wang Chao, Zhang Xiaorong, Tao Wei, Zhang Jinzhe, Liu Xianghong. 2025. Progress in geophysical exploration of groundwater and its technical innovation[J]. Geology in China, 52(4): 1325–1351(in Chinese with English abstract).

物探找水方法进展

汪雅菲¹, 薛国强², 韩江涛³, 罗先中⁴, 王帮兵⁵, 葛粲⁶, 徐浩^{7,8,9}, 管后春¹,
汪青松^{10,11,12}, 张凯^{11,12}, 王朝^{1,13}, 张笑蓉¹, 陶威¹⁴, 张晋喆¹, 刘向红¹⁴

(1. 安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 安徽 合肥 230001; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 4. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 5. 浙江大学地球科学学院, 浙江 杭州 310058; 6. 合肥工业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230009; 7. 中国科学技术大学地球物理和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 8. 安徽省浅地表地球物理勘查工程研究中心, 安徽 合肥 230022; 9. 安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 安徽 合肥 230022; 10. 自然资源部覆盖区深部资源勘查工程技术创新中心, 安徽 合肥 230001; 11. 安徽省电法勘探重点实验室, 安徽 合肥 230031; 12. 安徽省勘查技术院(安徽省地矿局能源勘查中心), 安徽 合肥 230031; 13. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 14. 宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234099)

摘要:【研究目的】地下水资源是中国水资源的重要组成部分。尤其在干旱缺水地区,通过找水打井解决人畜饮水问题是一项关键的民生工程。本文总结物探找水方法,提高找水打井效率和成功率,以期为地下水资源勘查评价提供有效方法。【研究方法】基于水文地质特征和地球物理学理论,通过查阅文献结合作者找水经验,系统梳理了直流电法、电磁法、放射法、地震波法、核磁共振法等五类物探找水方法的基本原理及系列找水案例,分析了找水勘查物探方法的优缺点与适用条件,归纳分析了不同地质条件下有针对性的物探找水方法。【研究结果】本文提出了物探找水的基本思路,并针对岩溶发育区、花岗岩层分布区、沉积碎屑岩分布区、红层区和第四系松散层分布区等五类地质条件区,总结了有效的物探找水方法。这些成果对于指导全国地下水资源调查与找水打井工作具有参考价值。【结论】物探找水应结合勘查区的水文地质特征和场地条件来合理选择物探方法。大量应用案例表明,电阻率法、激电多参数法和地震勘探方法都是有效的找水方法,重力、磁力和放射性方法可作为有效补充。综合物探方法能够有效提高找水成功率。横向电阻法在地下水资源调查评价中具有发展潜力。为适应山区、城镇区、厚覆盖区等复杂地形地质条件区和提高找水效率的需要,物探找水技术方法还需不断创新。正在快速发展的多参数半航空电磁法和地面全息电磁法等新技术将是未来物探找水应用研究的新方向。

关键词: 地下水资源勘查工程; 地质调查工程; 地球物理方法; 找水基本思路; 应用案例

创 新 点: (1)系统梳理了 5 类物探找水方法的基本原理及其在不同地质背景区找水的成功案例; (2)归纳分析了不同地质条件下物探找水的有效方法。

中图分类号: P631; P641.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1325-27

Progress in geophysical exploration of groundwater and its technical innovation

收稿日期: 2024-06-10; 改回日期: 2024-08-15

基金项目: 安徽省自然资源科技项目(2022-K-14)、安徽省公益性地质工作项目(2024-g-1-10、2023-g-1-19、2023-g-1-17)联合资助。

作者简介: 汪雅菲, 女, 1987 年生, 高级工程师, 从事自然资源综合地质调查与研究; E-mail: ahddywyf@163.com。

通信作者: 汪青松, 男, 1959 年生, 正高级工程师, 从事地球物理和矿产勘查研究; E-mail: wqs5936@163.com。

WANG Yafei¹, XUE Guoqiang², HAN Jiangtao³, LUO Xianzhong⁴, WANG Bangbing⁵, GE Can⁶,
XU Hao^{7,8,9}, GUAN Houchun¹, WANG Qingsong^{10,11,12}, ZHANG Kai^{11,12}, WANG Chao^{1,13},
ZHANG Xiaorong¹, TAO Wei¹⁴, ZHANG Jinzhe¹, LIU Xianghong¹⁴

(1. Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230001, Anhui, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Geoexploration science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 4. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 5. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 6. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 7. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 8. Anhui Engineering Research Center for Shallow Surface Geophysical Prospecting, Hefei 230022, Anhui, China; 9. Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting Techniques, Hefei 230022, Anhui, China; 10. Engineering Technology Innovation Center for Deep Resource Exploration in Covered Area, Ministry of Natural Resources, Hefei 230001, Anhui, China; 11. Anhui Provincial Key Laboratory of Electrical Prospecting, Hefei 230031, Anhui, China; 12. Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province Energy Exploration Center, Hefei 230031, Anhui, China; 13. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 14. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234099, Anhui, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objectives] Groundwater resources is an important part of China's water resources, especially in arid and semi-arid areas. Thus, water prospecting and well drilling become a critical public welfare policy to solve the drinking water problem for humans and livestock. This study aims to summarize geophysical methods for water prospecting and propose possible pathways to improve the efficiency and success rate of finding water, thereby guiding the future exploration and evaluation of groundwater resources.

[Methods] Based on geophysical theories, this study systematically reviews basic principles and a series of case studies related to five geophysical methods for groundwater exploration under various hydrological and geological conditions: direct current electrical method, electromagnetic method, radiometric method, seismic wave method, and nuclear magnetic resonance method. Then, we compare the advantages and disadvantages of these geophysical methods for water exploration and figure out their applicable conditions. Finally, we propose effective methods for water detection under various geological settings. **[Results]** This study proposes a basic approach to prospect groundwater using geophysical techniques. Moreover, we summarize effective methods for five typical geological environments: Karst, granite, sedimentary elastic rock, semi-consolidated red bed, and Quaternary loose layers. The summary will provide useful guides for the geological survey of groundwater resources across the nation. **[Conclusions]** Geophysical methods for water prospecting should be carefully selected based on the hydrogeological characteristics of the exploration site. Based on our literature review, resistivity, induced polarization with multiple parameters, and seismic exploration are effective methods for groundwater exploration, while gravity, magnetic, and radiometric methods can serve as useful supplements. Integrated application of multiple geophysical methods can effectively improve the success rate of groundwater prospecting. Moreover, the lateral electrical resistivity method has large potentials in future evaluation of groundwater resource. However, we still call for continuous innovation in geophysical techniques for groundwater exploration given the needs in complex topographical and geological conditions such as mountainous areas, urban areas, and areas with thick coverage. In this regard, rapidly developing technologies like multi-parameter semi-airborne electromagnetic methods and ground holographic electromagnetic methods represent new directions for future water prospecting research.

Key words: groundwater resource exploration; geological survey engineering; geophysical methods; basic ideas for water prospecting; application cases

Highlights: The basic principles of five geophysical water exploration methods and their successful application cases in different geological contexts were systematically reviewed; (2) The effective methods of water exploration under complex geological conditions were summarized and analyzed.

About the first author: WANG Yafei, female, born in 1987, senior engineer, engaged in comprehensive geological survey and research of natural resources; E-mail: ahddywyf@163.com.

About the corresponding author: WANG Qingsong, male, born in 1959, professor level senior engineer, engaged in the research of geophysical exploration; E-mail: wqs5936@163.com.

Fund support: Supported by Anhui Province Natural Resources Science and Technology Project (No.2022-K-14) and Anhui Province Public Welfare Geological Work Project (No.2024-g-1-10, No.2023-g-1-19, No.2023-g-1-17).

1 引言

中国水资源匮乏,旱情频繁发生,找水勘查长期需要。2022 年中国南方地区发生了大范围旱情(图 1),持续时间长,多地出现人畜饮水困难,各地积极开展找水勘查工作。2010 年中国南方严重旱情,原国土资源部曾在昆明市召开“应对南方干旱紧急行动协调会”,成立应急抗旱找水行动领导小组,启动抗旱救灾找水应急方案,并决定集中人力物力、加快找水进度、科学找水,尽快解决灾区群众饮水问题。

地下水资源调查属于基础性、公益性和战略性地质调查工作。2023 年 11 月,自然资源部发布《关于开展水资源基础调查工作的通知》(自然资发

[2023]230 号),决定在全国开展水资源基础调查工作,明确要求“开展全国地下水资源周期和年度调查评价,掌握各省(区、市)、各流域的地下水资源量”和“全国地下水储存量”。

水资源缺乏和干旱情况在全球其他地区同样存在,非洲常年干旱,撒哈拉沙漠是世界上最干旱缺水的地区(Makhlouf et al., 2024);南美洲也有干旱情况,巴西东北部存在周期性的自然干旱现象。全球干旱缺水地区都需要地下水资源地质调查工作,物探方法在找水中发挥着重要作用:唐甫等(2023)应用高密度电法,邓在刚等(2019)应用 EH4 电磁成像法,欧阳波罗等(2022)应用直流电法,郭嵩巍和闫强(2020)应用瞬变电磁法等单一物探方法为国内干旱缺水地区找水定井位。Gomo

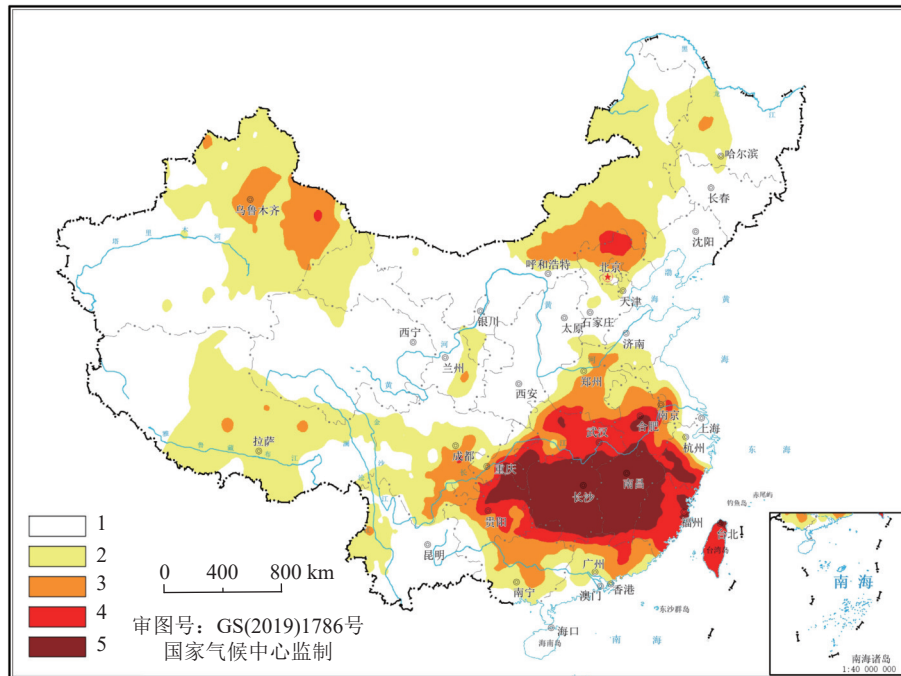


图 1 2022 年 9 月全国旱情分布图

1—无旱; 2—轻旱; 3—中旱; 4—重旱; 5—特旱

Fig.1 National drought distribution map of September 2022

1—No drought; 2—Mild drought; 3—Moderate drought; 4—Severe drought; 5—Extreme drought

(2024)在南非应用天然电场选频法(TEFSM), Bassey et al.(2024)在尼日利亚利用大地电磁法, Muhammad et al.(2022)在巴基斯坦利用电阻率测深寻找地下水。金哲洙等(2022)应用联合剖面法与激电测深法,苏永军等(2015)应用高密度电法和激发极化法,王瑞丰等(2020)应用高密度电法与瞬变电磁法,张叶鹏等(2023)基于天然电场选频法结合音频大地电磁法,廖文鹏等(2017)选用瞬变电磁法与放射性 α 测量, Fardous(2022)应用电阻率测深和瞬变电磁法, Bon et al.(2022)利用遥感和天然电磁方法, Miner et al.(2022)利用混合源大地电磁法(HSAMT)探测和重力测量, Rustadi et al.(2022)利用重力测量和电阻率测深方法等两种物探方法联合找水定井位。张晋等(2014)采用重力、高密度电法、激电测深及音频大地电磁测深。黄理善等(2022)采用可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)、土壤汞气测量、氦气测量。Erugu et al.(2022)采用电阻率中梯、电阻率测深和高密度电法等,开展多种物探方法综合找水。笔者应用反射地震法为安徽蒙城县自来水厂建设打井提供了定位。中国地质调查局在石漠化区和季节性缺水严重乌蒙山地区,大力寻找淡水资源,成功打井113口,满足人民群众的需要(Tang et al., 2020)。地球物理在地下水资源调查、抗旱、民生工程、城镇规划和经济发展中发挥了极其重要作用(姜月华等, 2018; Wang et al., 2021)。

然而,物探找水方法众多,并非任意选择物探方法找水都能有效。特别是中国国土幅员辽阔,地质条件各异,存在物探找水有效方法选择的难题。因此,选择有效的物探找水方法,提高找水打井效率和成功率是业内长期关注的焦点问题。众多学者研究物探找水方法效果,陈贻祥等(2012)系统总结了黔南碳酸盐岩岩溶发育山区的富水地段电测深视电阻率断面等值线异常特征,刘伟等(2018)正演模拟了碳酸盐岩分布区岩溶富水构造的多极距联合剖面曲线;李维等(2022)研究建立了红层含水层涌水量和物性参数之间的关系。

本文在大量收集分析物探找水成功案例的基础上,结合找水工作经验,总结了物探找水基本思路,综述了重、磁、电、震、放射性等常用物探找水方法的应用情况,分析了找水勘查物探方法的优缺

点与适用条件,讨论了碳酸盐岩分布区、花岗质岩层分布区、碎屑岩分布区、红层分布区和第四系松散层分布区等五类地质条件区及特殊地形地貌区物探找水有效方法,并展望了物探找水未来发展方向。

2 物探找水基本思路

本文中物探找水专指寻找淡水资源,涉及两个关键步骤:一是对勘探区的水文地质特征进行分析,确定地下水类型;二是依据地下水类型、场地实际情况和不同物探方法的找水原理,选择最适宜的探测技术方法。

2.1 水文地质特征

按照含水介质的不同,地下水可分为孔隙水、裂隙水和岩溶水等3种类型。孔隙水多呈层状分布;裂隙水又分为3类,分别是呈带状分布的构造裂隙水、层状分布的基岩风化裂隙水和成岩构造控制的原生裂隙水;岩溶水主要受碳酸盐岩地层分布和断裂构造控制,分布极不均匀。

分析勘查区的水文地质特征,判断地下水主要类型并将其作为优选勘查对象,即在碳酸盐岩分布区应以寻找岩溶水为主,在岩浆岩、变质岩等坚硬长英质岩分布区以寻找裂隙水为主,在碎屑岩分布区以寻找孔隙水为主。

物探找水技术人员在分析水文地质条件时,还应特别注意调查和研究当地潜水面的埋藏深度。寻找地下水的目标层必须位于潜水面以下,尤其是在有深切沟谷的区域,确保探测目标层位于谷底潜水面之下。

2.2 物探方法选择

地球物理勘探包括重力法、磁力法、电场法、地震法和放射性法等五大类方法。理论上,任何物探方法都有可能用于找水,但在实际操作中,选择物探方法的主要依据通常是工作效率高、成本低以及定位准确。此外,还应考虑勘查团队所拥有的仪器设备及其对物探方法的熟悉程度。综合这些因素,优先选择既经济实用又能准确找水的物探方法。

物探找水主要根据含水部位与围岩地层之间存在的物性差异。例如,裂隙水和岩溶水具有低阻、低速、低密度异常特征,而第四系松散层中的孔

隙水则展现出相对高电阻的异常特征。通过识别这些物理特性上的异常,物探方法能够有效定位含水层,为找水提供重要指导。

常用的物探找水方法包括直流电法、电磁法、地震波法、放射性方法、核磁共振方法以及重磁方法等。

直流电法找水主要利用含水地质体与围岩地层之间电阻率差异和激电二次场效应推断含水情况。直流电法种类繁多,主要有电阻率法和激电多参数法两大类,包括高密度电法、电测深法(电阻率、横向电阻)、联合剖面法、电阻率梯度法、充电法和激电多参数法(电阻率、极化率、半衰时 T_h 、衰减度 D 、偏离度 r)等。其中,电测深法、激电多参数法、横向电阻法常用于寻找古河道孔隙水、孔隙—裂隙水和岩溶水;联合剖面法、充电法、自然电场法和激电(IP)多参数法等常用于寻找构造裂隙水和岩溶水。

电磁法找水主要利用不同地层岩性之间电阻率差异推断岩层中断裂构造、地层分布及其含水性情况,多数用于寻找构造裂隙水和岩溶水。电磁法具有工作效率高、探测深度大的优势。根据常用物探仪器类别,习惯性划分为 EH4 电磁成像法、甚低频法(VLF)、CSAMT 法、AMT 法、自然电场选频法、TEM 法和地质雷达法(GPR)等。

放射法主要是指 α 法:利用地质体的放射性特征,通过收集氦的 α 辐射体,并根据收集量值的大小,推断构造及岩体的富水情况。氦在自然界中主要以游离原子形式沿着岩石裂隙或孔隙中迁移,因此,构造破碎带和裂隙发育带均是氦气迁移的良好通道,可用于寻找构造裂隙水。

地震波法主要依据岩层弹性参数的差异推断地质构造。包括反射地震、微动法等方法,常用于寻找覆盖区构造裂隙水、岩溶水和深层孔隙水。

地面核磁共振法是一种直接寻找水源的地球物理方法。它能够检测到水分子中的氢原子,并确定水的存在和分布。这种方法通过磁场激发地下水分子的核磁共振信号,直接反映地下水的具体位置和含量,主要用于钻井孔位地下地层含水性探测评价。

重磁方法主要利用不同地层岩性之间存在的密度和磁性差异形成的重力和磁力异常,推断解释

地质构造,主要用于寻找水源靶区优选。

物探找水要针对不同的地下水类型,合理选择物探方法,基本原则为:(1)寻找孔隙水。孔隙水多为层状分布,选用垂向分辨能力较高的物探方法,如电测深法、高密度电法、反射地震法、核磁共振法和横向电阻法等。(2)寻找裂隙水和岩溶水。该类地下水分布不均匀,需要优先选择靶区,应用工作效率高的物探方法,如高密度电法、微动法、EH4 电磁成像法、CSAMT 法、AMT 法、联合剖面法、TEM 法和自然电场选频法等,必要时配合激电多参数法等多种方法综合勘查。

3 物探找水方法、找水基本原理与成功案例

在地下水探测中,电法、地震法和放射性 α 法是最常用的方法。其中,电法种类繁多,具有定位准确、快速高效、成本低的特点,既可以进行地层划分、识别断裂构造,还能够直接评价地层含水性,是应用最多的物探方法。地震法具有地层划分和识别断裂构造的优势,而放射性 α 法主要用于寻找构造破碎带。重力法和磁法可以探测构造带和隐伏岩体等,在综合找水勘查中偶有应用。以下大致按物探方法分类介绍部分找水成功案例。

3.1 直流电法找水

3.1.1 高密度电法

高密度电法具有低成本、高效率、异常直观等特点。刘圣博等(2024)为了解决赣南地区用水难的问题,利用基础地质、水文地质资料,分别对孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水地区找水打井实例进行分析,确定地下水赋存类型,分析其赋水模式、机理及物性差异。针对白垩系红层地区,提出了重点探测断裂构造带、地层不整合面和隔水岩层部位。

根据 Archie(1942)给出的颗粒状介质地层因子与孔隙度的关系公式(1)和前人通过渗透率实际测量建立的 Kozeny-Carman(KC)模型(2),马建斌等(2013)推导建立了渗透率与电阻率之间的函数关系(3):

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \phi^{-m} \quad (1)$$

式(1)中, F 为地层因子; R_0 为 100% 含水岩石

电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R_w 为 100% 地层水电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; m 为孔隙度指数, 或称胶结系数, 通常为 1.3~2.5。

$$K = c \frac{\phi^3}{a_v^2} \quad (2)$$

式(2)中, K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ 为孔隙度, %; a_v 是暴露的表面积与固体体积的比值 ($a_v = S/V$, S 为颗粒的表面积, m^2 ; V 为颗粒的体积, m^3), c 为常量。

$$K = 10^9 \frac{cr^2}{9} \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{\frac{3}{m}} \quad (3)$$

马建斌等(2013)通过大量岩石样本实例分析, 确定 c 取值 0.25, 孔隙度指数 m 取值 2.0, r 取值

0.45~0.55 mm 时, 使用 Autoscan-Ⅱ 多参数岩心扫描仪实际测量的岩样渗透率值与计算所得值拟合最佳。

刘圣博等(2024)在赣南花岗岩、红层等贫水区找水方法研究中, 研究并应用电阻率和渗透率之间的关系, 计算渗透率剖面并进行钻探验证, 总结了高密度电法在不同岩性贫水区的孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水等不同类型的找水经验, 打井找水成功率超过 80%。图 2 为赣南小布镇花岗岩区基岩裂隙水打井找水综合反演解释成果图, 该孔主要富水段为上部花岗岩风化壳孔隙裂隙承压水及基岩裂隙水, 涌水量 $298 \text{ m}^3/\text{d}$, 高密度电法反演解释结果与钻孔资料相吻合。

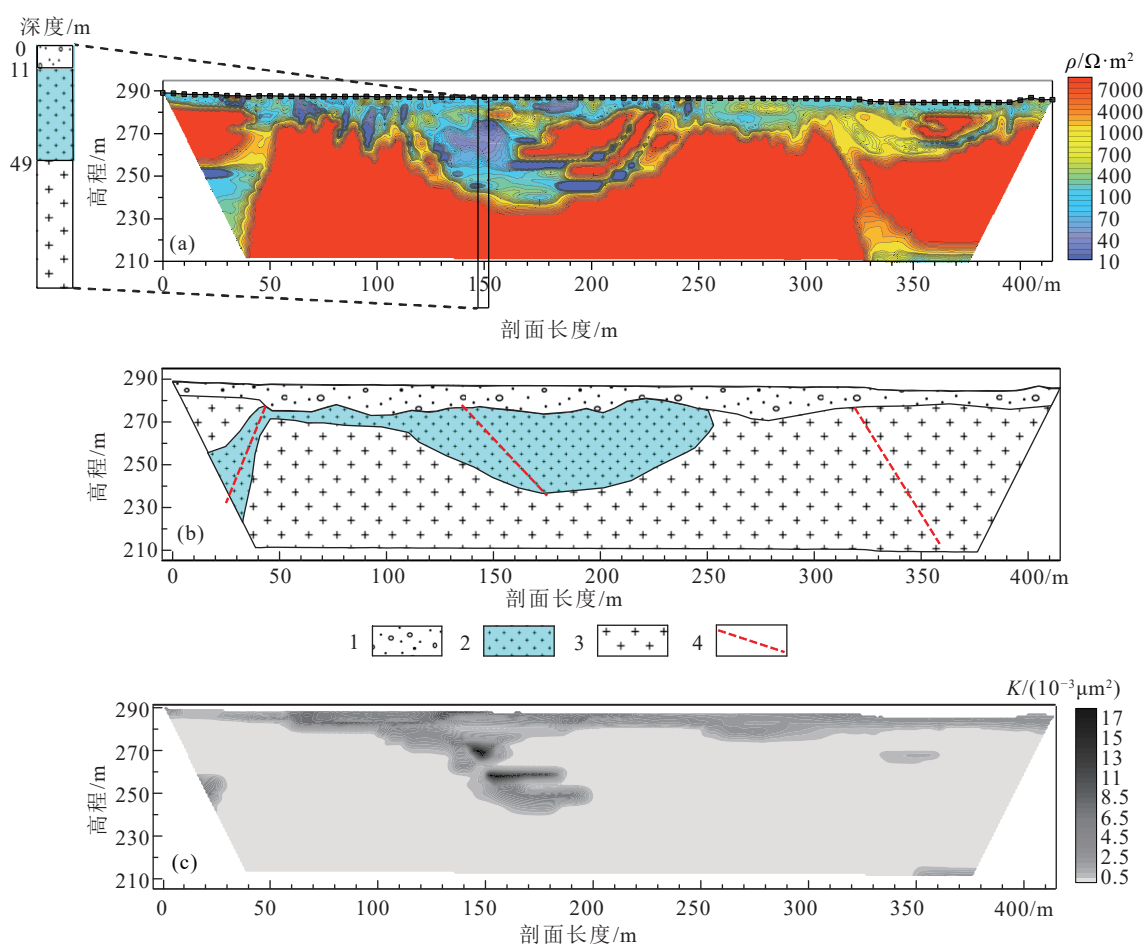


图 2 小布镇花岗岩区基岩裂隙水打井找水综合反演解释(据刘圣博等, 2024)

a—花岗岩区高密度电法反演; b—花岗岩区高密度电法解释推断; c—渗透率剖面; 1—砂砾岩; 2—含水花岗岩风化层; 3—花岗岩基岩; 4—裂隙带

Fig.2 Comprehensive inversion interpretation diagram of porewater drilling for water in bedrock fissures in the granite area of Xiaobu town (after Liu Shengbo et al., 2024)

a—High-density electrical resistivity inversion in granite areas; b—Interpretation and inference of high-density electrical resistivity in granite areas; c—Permeability profile; 1—Gravel rock; 2—Water-bearing weathered granite layer; 3—Granite bedrock; 4—Fracture zone

3.1.2 五极纵轴直流电测深法（简称五极测深法）

该方法对解决非层状地质体的探测问题有良好的效果,具有施工方便的优势。黄兰珍和方兴付(1980)最早对其进行了系统的理论研究和应用。

五极测深法的布极方法与对称四极电测深法不同(图 3)。在地面以测深点 A 极为原点设直角坐标系,供电电极位于原点 A,电流为+I。沿 X 轴在 A 点两侧布置电流均为-1/2I 的供电电极 B1 和 B2。供电电极距 $L=(2-3)h$ (h 为最大勘探深度),测量电极距 $MN=(1/30-1/40)L$ 。野外工作中测量电极 M、N 自 A 极开始沿 X 轴中垂线方向逐点等距放线进行观测,即得视电阻率 ρ_s 曲线。

何胜等(2020)认为,当层状第四系存在较明显的电性差异时,也可以应用五极测深法,查明地层结构特征及有关水文地质条件,指导水文钻孔布置。在青海茶卡碎屑沉积岩盆地区找水中应用,圈定第四系似层状含水层取得好的效果(图 4),钻探验证 TK1 号孔,32~92 m 段是地下水较富集的有利地段,涌水量达 1250 m³/d,与物探推断结果一致。

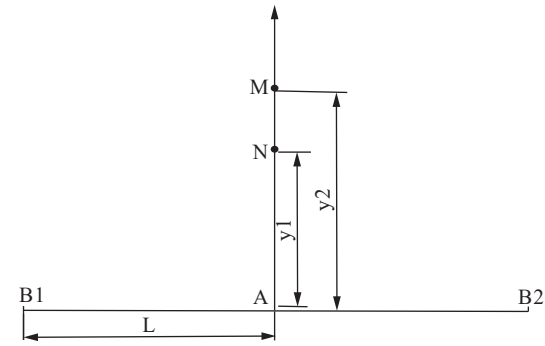


图 3 五极纵轴电测深电极布置平面图
(据黄兰珍和方兴付, 1980)
Fig.3 Five-pole electrical sounding electrode device diagram
(after Huang Lanzhen and Fang Xingfu, 1980)

3.1.3 对称四极电阻率测深法（简称电测深法）

该方法寻找低阻岩溶构造和第四系水平地层分层,具有成本低的优势。陈贻祥等(2012)总结了黔南碳酸盐岩岩溶发育山区电测深法找水经验,归纳了富水地段 4 种类型电测深视电阻率断面异常类型,分别是:(1)U 型低阻异常,呈似“U 型”分布,反映基岩由浅至深部均较破碎,主要为强岩溶发育富水带或储水构造所致;(2)O 型低阻异常,

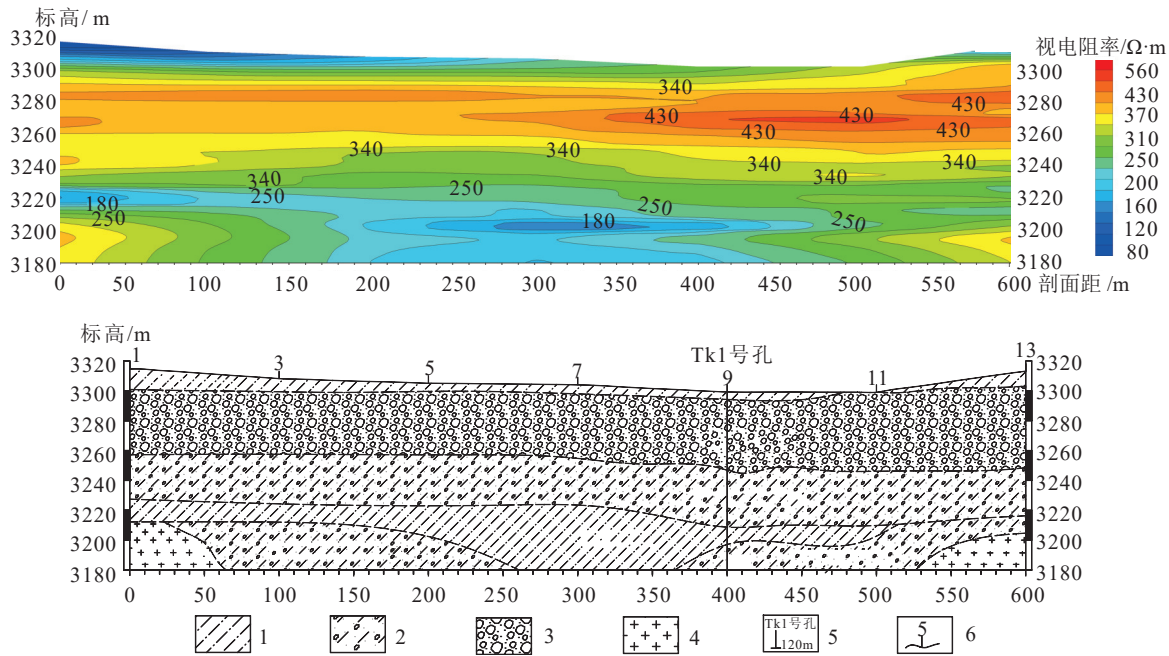


图 4 青海茶卡盆地 2 线五极测深法综合成果图(据何胜等, 2020)
1—亚砂土; 2—泥质砂砾卵石; 3—砂砾卵石; 4—花岗岩; 5—施工钻孔孔号及孔深; 6—测点号
Fig.4 Comprehensive result map of 2-line five pole electrical sounding in the Chaka Basin, Qingha (after He Sheng et al., 2020)
1—Sandy loam; 2—Silty sand gravel pebbles; 3—Sand gravel pebbles; 4—Granite; 5—Construction drilling hole number and depth;
6—Measurement point number

在视电阻率断面图中某深度上,存在局部呈圆形的相对低值异常,即基岩高阻中的相对低阻异常,一般是由断层破碎带中的强溶蚀富水区或岩溶管道水和地下暗河等相对低阻异常体引起;(3)变化带型异常,在视电阻率断面图中,存在一段电阻率异常变化带,从浅部到深部电阻率等值线或密集或稀疏变化无常,由富水断层破碎带引起;(4)台阶型异常,在视电阻率断面图中,存在高低阻异常台阶状突变带,一侧为低阻异常区,另一侧为高阻异常区,是由高阻碳酸盐岩与低阻泥质或炭泥质碎屑岩的断层接触带引起,断层破碎带及其旁侧的碳酸盐岩接触带常为相对富水区。在黔南碳酸盐岩岩溶发育山区开展抗旱打井找水中,这些物探异常验证钻孔出水率为 89%。

3.1.4 横向电阻法

横向电阻法是一种利用对称四极视电阻测深曲线评价地层富水性的方法。淮北冲洪积平原区孔隙水资源整体丰富,但各处钻井出水量差异较

大,如何查找最大出水量钻井位置是一个难题。汪青松(2004)根据含水砂层粒径越粗电阻率越高的物性特征(“K”型电阻率测深曲线)和含水砂层粒径越粗孔隙越大透水性越强的水文地质特征,提出了横向电阻参数评价松散层富水性的方法,即利用电阻率测深曲线计算横向电阻,横向电阻=测深点砂层厚度与该层电阻率乘积(含各层之和),数值越大,富水性越强,钻井出水量越大,故称之为水量因子,这是一种物探与水文地质融合的找水参数。基于横向电阻等价原理,分层拟合电阻率测深曲线时,无需追求含水砂层厚度与电阻率的客观数值,只需拟合测深曲线精准满足要求即可,横向电阻能够客观反映含水层厚度与粒径对出水量的联合贡献,消除了电测深电阻率曲线分层反演时层厚和电阻率的误差影响。横向电阻评价松散层富水性具有方便、快捷、准确可靠的优点。应用此法已在安徽蚌埠地区完成了 2 个工业园区和 1 个家业区用水评价(图 5),施工数十

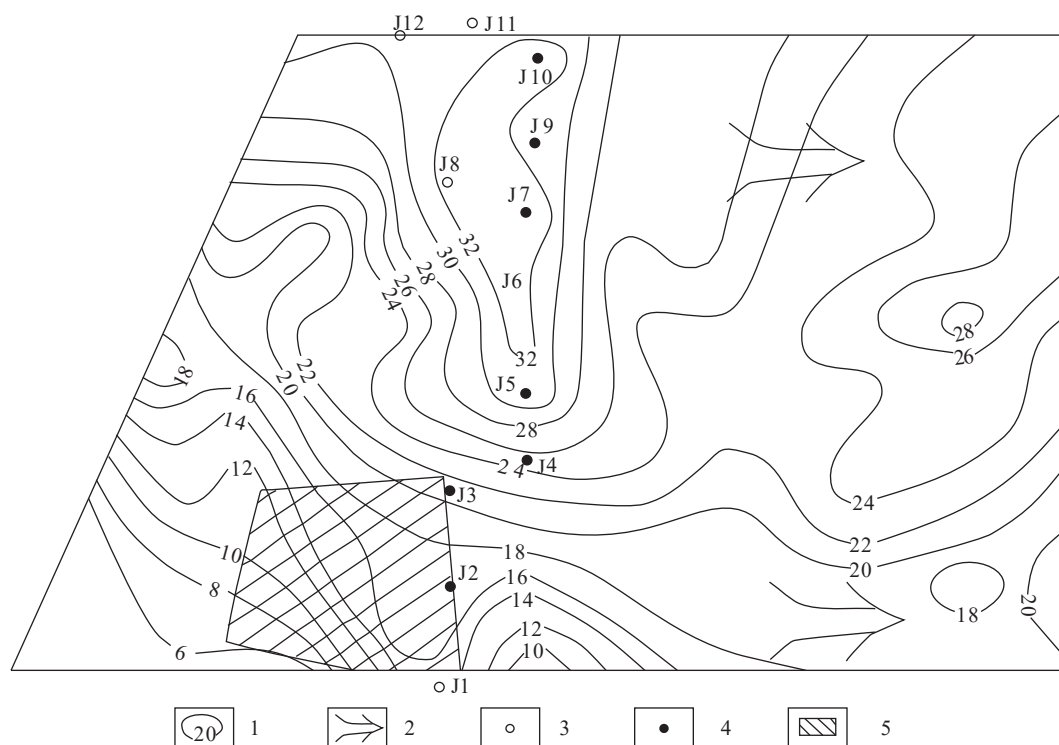


图 5 安徽怀远工业园横向电阻等值线($10^3 \Omega \cdot m^2$)与井位分布图

1—含水砂层横向电阻等值线;2—地下水流向;3—拟定井位;4—已施工井位;5—拟建厂区

Fig.5 Transverse resistance contours ($10^3 \Omega \cdot m^2$) plot and well location distribution map in Huaiyuan Industrial park, Anhui

1—Isopach map of aquifer with water content; 2—Groundwater flow direction; 3—Proposed well location; 4—Existing well location;

5—Planned factory area

个钻孔, 出水量全部达到预期效果。

3.1.5 激电多参数法

激发极化法是根据富水地层激发极化效应来寻找地下水的一种电法勘探方法。激发极化效应是在人工电流场一次场或激发场作用下, 具有不同电化学性质的岩矿石, 在电化学作用下产生随时间变化的二次电场(激发极化场)(图 6), 导致地层赋水后产生激发极化效应(李金铭, 1998)。

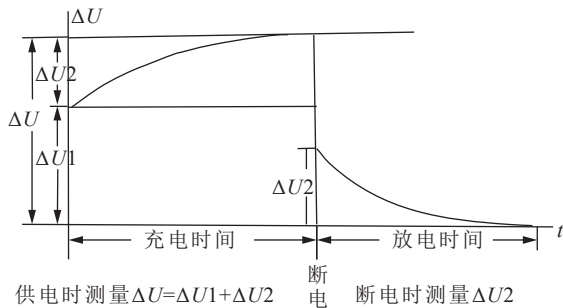


图 6 激发极化法充放电示意图(据李金铭, 1998)
Fig.6 Schematic diagram of charge and discharge by excitation polarization method (after Li Jinming, 1998)

激发极化法找水的最大特点是受地形影响小, 对岩溶裂隙水的水位埋深和相对富水带的反映都比较直观。目前应用的激电参数较多, 如表征岩石激发极化的极化率和充电率参数, 表征岩石激发极化放电快慢的半衰时和衰减度参数, 还有激发比、相对衰减时和偏离度等综合参数。这些参数的选取与不同地质体和不同的仪器有关。实验表明, 极化率(η)、半衰时(Th)、衰减度(D)对岩溶地下水勘查具有较好的效果(孟利山等, 2014)。

偏离度(r)是一种通过大量样品观测总结提出的激电找水参数(李金铭, 1993)。实验表明, 含水岩石放电曲线的数学模型可用对数直线方程 $\Delta V_2(t) = B - K \log(t)$ 进行描述。所谓偏离度, 系指实测结果与直线方程的偏离程度。当岩石含水量增加时, 偏离度(r)减小, 即含水量加大时衰减曲线偏离“理想直线”的程度变小。因此, 偏离度(r)是激电找水的有效参数之一。

2011 年河南干旱, 新乡市凤泉区严重缺水, 需要开展找水打井。区域水文地质资料显示, 地表以第四系覆盖为主, 下伏新近系潞王坟组泥灰岩和奥陶系灰岩。潞王坟组泥灰岩岩溶裂隙发育,

是区内重要的含水层; 奥陶系裂隙、岩溶地下水丰富, 富水性受地质构造影响分布不均。本次地下水勘查工作将岩溶水作为主要目标。勘查找水技术路线是依据高密度电阻率异常预选井位, 采用激发极化法多参数评价异常含水性, 取得了良好效果。预选井位高密度电阻率低异常呈背斜构造形态(图 7a), 是岩溶水发育有利部位, 激发极化多参数(图 7b)极化率(η_s)、半衰时(Th)、衰减度(D)在对应低阻异常处均有明显异常(图 7c)。钻探验证终孔深度 141.21 m, 成井深度 140.85 m。其中, 10~139 m 为裂隙岩溶发育的角砾泥灰岩、砂质泥灰岩与泥岩互层(含水), 成井后抽水试验稳定流量 69.35 m³/h。

3.2 电磁法找水

3.2.1 EH4 电磁成像法

EH4 是一种电磁法仪器型号, EH4 电磁成像结合了部分可控源与天然源的大地电磁测深系统。深部构造通过天然背景场源成像, 其信息源为 10~100 kHz。浅部构造则通过一个新型的便携式低功率发射器发射 1~100 kHz 人工电磁信号, 补偿天然信号的不足, 从而获得高分辨率的成像(李华等, 2011), 具有施工方便、探测深度较大的优势。

张彪等(2015)在湖南衡阳花岗岩严重缺水地区找水勘查中, 应用 EH4 电磁成像法调查评估深部大地构造和区域性断裂发育情况, 采用高密度电法精细勘查浅表覆盖情况, 二者互相验证, 互为补充, 成功探获岩体中断裂破碎带构造裂隙水。2011 年川南大旱, 在物探施工难度大的干旱缺水山区, 邓在刚等(2019)应用 EH4 电磁成像法找水, 以寻找碳酸盐岩类裂隙溶洞水为主要目标, 以低阻异常为找水标志, 顺利完成了—批川南古蔺县及叙永县岩溶区抗旱打井找水定井工作, 成果验收时确认古蔺县成井率达到 88%、叙永县成井率达到 95%, 钻探累计进尺 12429 m, 有 78 口单井出水量超过 50 m³, 取得了优异的找水成果。

3.2.2 CSAMT 法

该方法基本原理是通过观测与场源平行的电场水平分量 E_x 和磁场分量 H_y , 计算卡尼亚电阻率值 ρ_s 。发射频率和地层电阻率决定勘探深度, 根据电阻率推断解释岩层的完整性、破碎、裂隙情况以

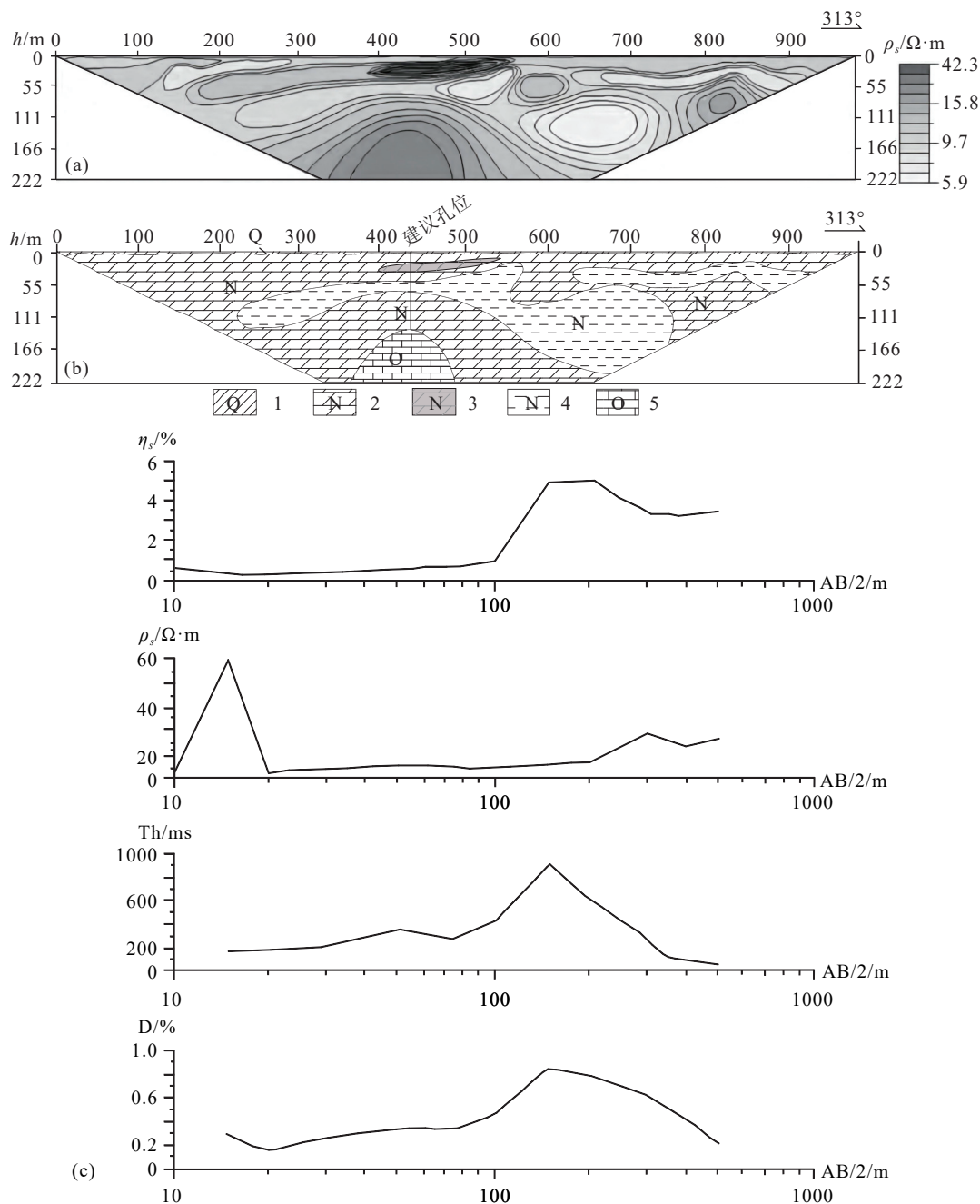


图7 河南新乡市凤泉区王门村高密度反演电阻率拟断面(a)、解译剖面(b)和预选井激电测深 η_s 、 ρ_s 、 Th 、 D 曲线(c)
(据孟利山等, 2014)

1—第四系松散层; 2—新近系泥灰岩(含水); 3—新近系泥灰岩(完整); 4—新近系泥岩; 5—奥陶纪灰岩

Fig.7 (a) High density inversion resistivity pseudo-section, (b) interpretation section, (c) η_s , ρ_s , Th , D curves of pre-selected wells in Wangmen Village, Fengquan District, Xinxiang City, Henan Province (after Meng Lishan et al., 2014)

1—Quaternary unconsolidated layer; 2—Neogene marl (containing water); 3—Neogene marl (complete); 4—Neogene mudstone; 5—Ordovician limestone

及含水量的相对大小。王会敏和宋启龙(2021)采用 CSAMT 法, 在保定市顺平县古生界碎屑岩—碳酸盐岩地层分布区进行扶贫打井定位勘查, 以寻找构造裂隙水为目标, 从构造角度分析布设了物探剖

面, 选取低阻带异常为找水打井靶区。通过水文地质钻探, 在 129.5~133.5 m 处揭露物探推测断层, 终孔孔深 213 m, 出水量达 41.42 m³/h, 彻底解决了南清醒村的饮水问题。

3.2.3 AMT 法

音频大地电磁测深法(AMT)勘探原理与大地电磁测深法相同,以天然交变电磁场为场源,勘探深度与测量频率和地层电阻率有关,频率越低,勘探深度越大,最低频率为 1 Hz 左右。该方法具有野外施工方便的优势,适合地下水埋深较大、地形条件较差的山区找水工作中使用。屈利军等(2017)在湖南省隆回县荆枝村找水,首先分析确定古生界碎屑岩—碳酸盐岩地层中的构造裂隙水为主要目标,应用 AMT 法异常结合地质资料,进行地层分层和断裂构造推断解释,针对断裂构造钻探验证,成功发现隐伏断裂和岩溶裂隙,出水量满足要求。

3.2.4 天然电场选频法

天然电场选频法简称选频法,一般认为它与大地电磁测深法相同。该方法野外数据采集工作简单方便,以大地电磁场作为工作场源,基于地下岩(矿)石之间导电性差异,通过在地面上测量 MN 电极间天然交变电磁场产生的不同频率电场水平分量的变化规律,研究地下地电断面的电性变化。

梁竞等(2016)通过对大量水井的自然电场法实测数据进行统计分析,认为自然电场剖面法可用于碳酸盐岩岩溶发育区地下水的勘查。在广西武宣县五合村自然电位测量剖面曲线上(图 8),8 号点位处,67 Hz、170 Hz 两个频率曲线同步出现一个 V 形,且都是频率曲线上的最小值;而 25 Hz 则在该处出现一个反相的峰值,高频负异常反映浅部水下渗,低频正异常反映深部地下水上升,显示承压水自然电位异常特征。测深曲线在 70~80 m 体现为一个缓坡,表明 70~80 m 深度处存在一个低阻异常体,此后该处成功钻探成井,井水喷涌出地面。

杨天春等(2018)根据广西“十二五”农村饮水安全工程找水打井项目资料,对比 131 口钻井与选频法探测成果,浅层找水(约 150 m 之内)成井命中率达到 64.9% 以上。

3.2.5 TEM 法

瞬变电磁法(TEM)找水主要适用于含水层较明显的地质背景和电阻率差异较大的地球物理条件。回线源瞬变电磁法利用不接地回线发射一次场,在一次场的间歇期间利用回线接收二次感应磁场,该二次电磁场是由地下良导体受激励引起的涡流所产生的非稳磁场。

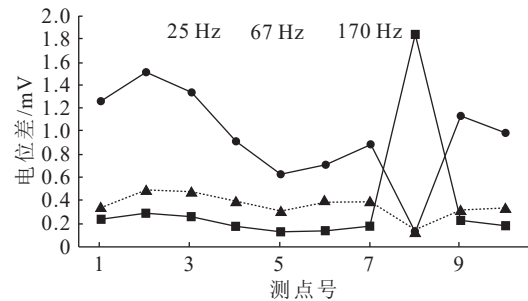


图 8 广西武宣县五合村自然电位剖面曲线
(据梁竞等, 2016)

Fig.8 Electrical profiles of Wangcun village, Wuxuan county Guangxi (after Liang Jing et al., 2016)

为调查内蒙古巴林左旗地区地下水资源,张迪硕等(2022)采用航空瞬变电磁法圈定区内第四系含水地层。使用的设备为由中国自然资源航空物探遥感中心自主研发的 CHTEM-II 型直升机时间域航空电磁勘查系统,采用随地形起伏飞行方式,测量比例尺为 1:1 万,全区平均飞行高度 41 m。该系统还集成了 CS3 型铯光泵磁力仪,用于同步收录航磁数据,协助断裂构造解释和寻找隐伏岩体。根据区内第四系坡积物、洪积物砂砾石的视电阻率最低物性特征解释地层体积,再依据水文地质资料巴林左旗富河镇地区土壤平均体积含水量 8.3% 的参数,推断本地区地下含水层顶面主要埋深在 10~30 m,含水层厚度 30~80 m,预测了地下水储量(图 9)。

近几年来,瞬变电磁技术在国内外迅速发展。在水文地质调查领域,不仅有传统的回线源瞬变电磁法,还有适应城镇有限场地条件下探测深度稍小的等值反磁通瞬变电磁法(席振铎等, 2016),以及适应复杂地形条件下探测深度更大的电性源短偏移距瞬变电磁法(薛国强等, 2023)。

3.3 地震波法找水

3.3.1 反射地震法

反射地震勘探的原理是基于地震波在不同介质中传播时,遇到弹性性质不同的地层界面会发生反射的物理现象。根据反射波特征及其连续性,可以识别地层的含水性和充水断裂构造的存在与否。笔者曾在安徽蒙城县新生界覆盖区(覆盖厚度超 400 m),利用反射地震方法寻找覆盖层下古生界基岩构造裂隙水,取得了较好的效果。新生界覆盖层主要岩性为泥岩、泥质粉砂岩及泥质灰岩等,反射波图像呈水平层状。下伏基岩地层为古生界灰

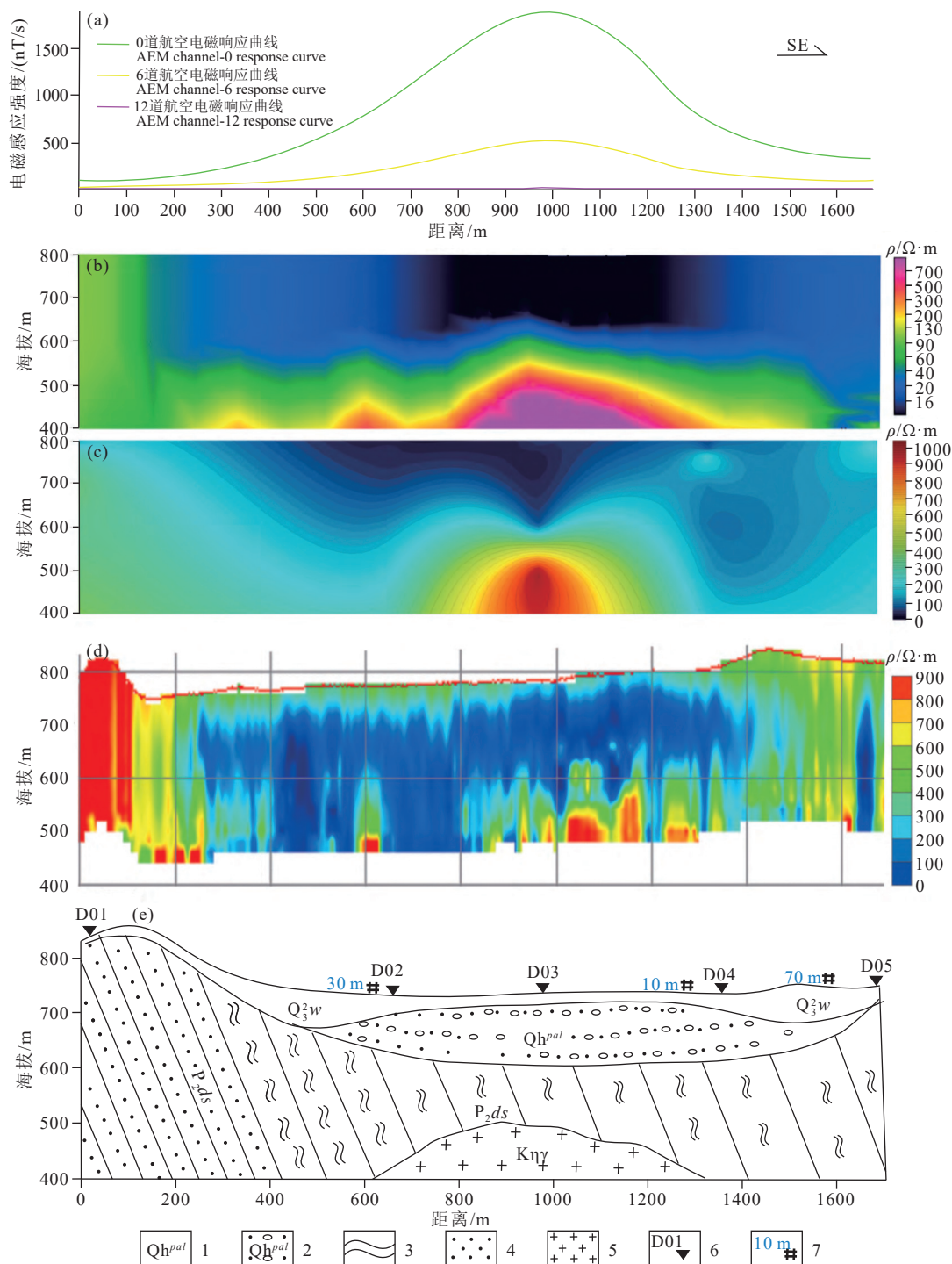


图9 巴林左旗富河镇地区第四系含水层解释(据张迪硕等, 2022)

a—航空瞬变电磁 db/dT 响应曲线; b—电阻率-深度剖面; c—双频激电法测量视电阻率分布; d—Maxwell 反演结果; e—综合地质推断结果
1—乌尔吉组黄土; 2—含水砂砾石层; 3—大石寨组板岩; 4—大石寨组粉砂岩; 5—二长花岗岩; 6—测深点位置及编号;
7—水井位置及见水深度

Fig.9 Illustration of Quaternary aquifers in Fuhe Town, Balinzuoqi (after Zhang Dishuo et al., 2022)

a—Aviation transient electromagnetic db/dT response curve; b—resistivity-depth profile; c—The apparent resistivity distribution measured by double frequency IP method; d—Maxwell inversion results; e—Omprehensive geological inference results 1—Wuerji Formation loess; 2—Water-bearing sand and gravel layer; 3—Dashizhai Formation SLATE; 4—Dashizhai Formation siltstone; 5—Monzonitic granite; 6—Location and number of sounding points; 7—Well location and water depth

岩和砂岩等,基岩面起伏不平,地震波有强反射显示。基岩面反射波同相轴发生错位即为断裂构造位置,是钻井有利区(图 10),据此成功施工了一批钻井,水量满足了自来水厂建设要求。

3.3.2 微动法

通过测量大地的三分量振动信息来分析场地的固有周期,根据单站测量分析得出的 H/V 特征频率及谱形态来推断大地的地质结构和振动状态,已广泛应用于地热和地下水勘查。李超男(2023)应用微动法在安徽宿州第四系覆盖区寻找基岩中岩溶裂隙水,避免了电法勘探覆盖层低阻屏蔽的影响,成功发现了溶洞构造。根据这一成果,施工了 24 个钻孔,全部出水,其中 22 个孔出水量超过 125 m³/h,2 个孔出水量小于 100 m³/h,达到了很好的找水效果。

3.4 核磁共振法

地面核磁共振法(SNMR)找水的基本原理是利用核磁共振现象,通过检测地下水分子中的氢原子核在磁场中的共振信号,来确定地下水的位置和含量。SNMR 法主要适用于层状地层含水性调查评价和构造裂隙、溶洞充水性识别,探测深度一般在 150 m 以内。

潘剑伟等(2018)在湖北省安陆市某地应用物探方法找水,采用高密度电法寻找低阻靶区,并使用

SNMR 方法对高密度电法发现的低阻异常进行含水性评价。SNMR 方法测量反演结果(图 11)显示,该低阻异常区的地层含水量极低,含水层的含水量最大值不超过 1%。根据 SNMR 方法的结果推测,本工区内不存在较易开采的地下水。后甲方在高密度电法 L2 号测线的低阻区域内打了一口试验井,出水量非常低,不能满足生产需要,进一步表明本区不具备寻找地下水的水文地质条件。

3.5 综合物探方法

红层贫水区、前寒武纪基岩分布区和地质构造复杂区,找水难度更大,往往需要应用综合物探方法。“红层”在四川等地多指侏罗纪—白垩纪时期形成的陆相砂泥岩地层,在风化作用下,岩层裂隙不发育,地下水资源匮乏。

在“红层”地区找水,李维等(2022)通过高密度电法、激电测深、综合测井方法与含水层之间的关系,结合抽水试验数据研究发现,随着激电测深极化率的增大,含水量增大,高密度电阻率也逐渐减小,含水层高密度电阻率与围岩高密度电阻率的差异逐渐增大,从而建立了含水层涌水量和物性参数之间的关系(表 1),提出了该区高密度电法、激电测深和综合测井组合找水方案,并在四川广安市武胜县“红层”地区取得了显著效果。

在哈瓦尔前寒武纪基岩地带,尼日利亚阿达马

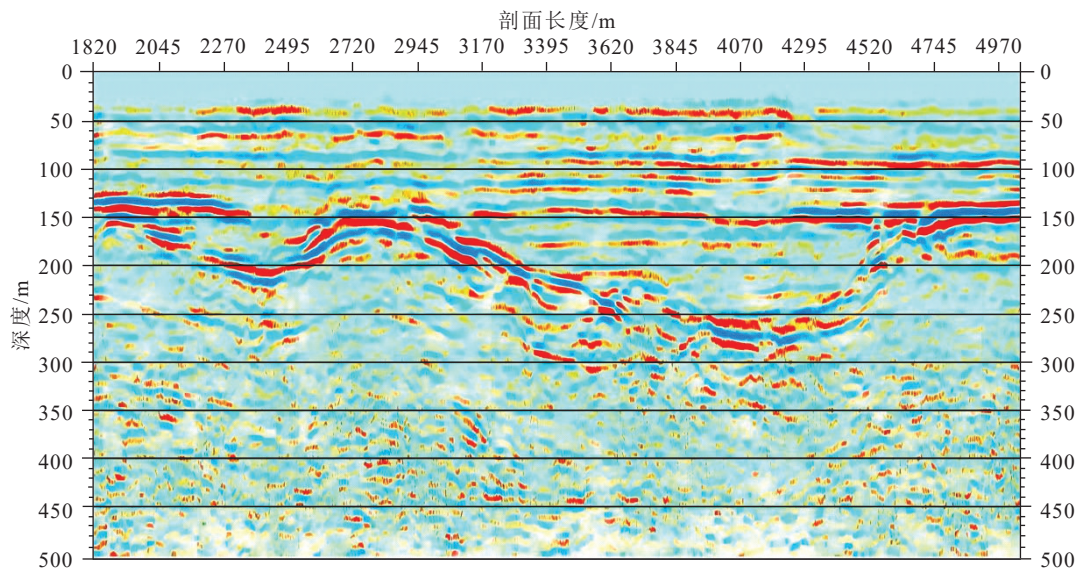


图 10 安徽省蒙城县物探找水 1 线 A 段地震映像剖面图

Fig.10 Seismic mapping profile of Section A of geophysical prospecting Line 1, Mengcheng County, Anhui Province

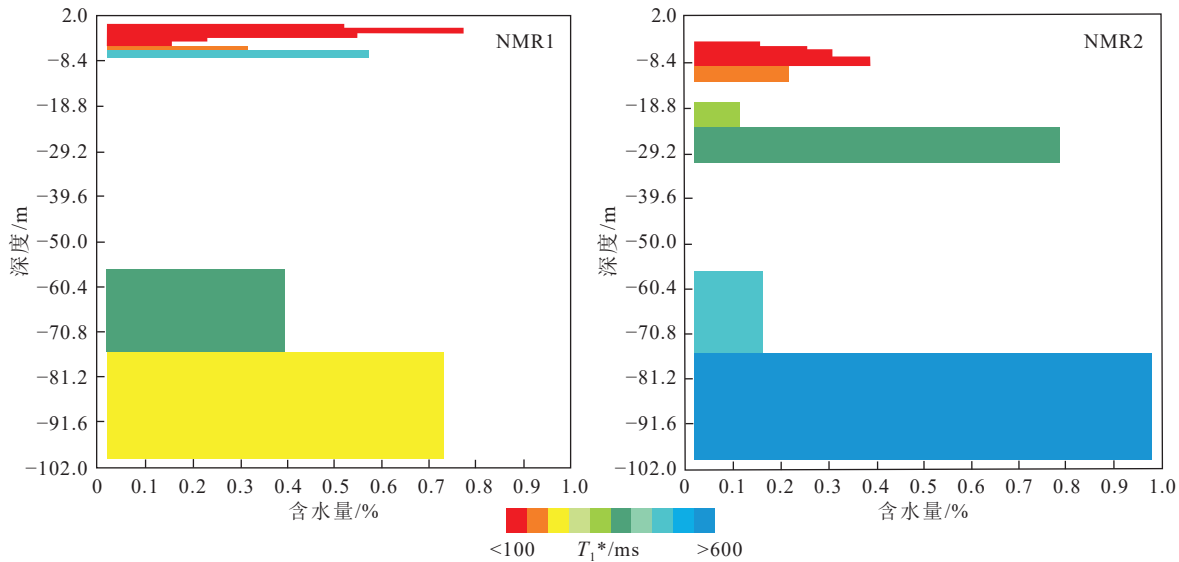


图 11 SNMR 方法反演得到的含水量直方图(据潘剑伟等, 2018)

Fig.11 Water content histogram obtained by SNMR method inversion (affter Pan Jianwei et al., 2018)

表 1 含水层涌水量和物性参数之间的关系 (据李维等, 2022)

Table 1 Relationship between aquifer water inflow and physical property parameters (after Li Wei et al., 2022)

涌水量/(m ³ /d)	高密度电阻率值/Ω·m	测井电阻率值/Ω·m	极化率/%
> 50	<21	<300	> 1.5
20~50	21~28	300~500	1.2~1.5
<20	>28	>500	<1.2

瓦州立大学由于学生人数增加,需要调查地下水潜力,之前许多钻孔已失败。Kasidi et al.(2023)应用 AMT 法和电阻率测深法组合,查明了地下 300 m 范围内地层岩性和断裂构造分布,具有水文地质意义;研究显示地下水主要由风化层和断裂带控制,共确定了 9 个潜在钻孔点,以满足校园学生的用水需求。

在湖南某贫水板岩地区找水,康方平等(2020)利用综合物探方法,首先通过视电阻率联合剖面法和高密度电法确定区内低阻异常的大致位置,再结合勘查区地质资料和激电测深极化率参数来分析判断出低阻异常到底是“水”还是“泥”,综合分析多种物探异常(图 12)得出: 500~520 号测点附近为断层构造 F₁ 的反映,其两侧地层呈断层接触关系,断层南侧为寒武纪污泥塘组,岩性主要为炭泥质板岩等,电阻率值总体很低。推测该处断层下伏富水可能性很大,钻探结果显示岩芯多处破碎,溶蚀、裂隙强烈发育,连通性好。经测试该孔自流涌水量可达 395 t/d,取得了较好找水效果,缓解了当地老百姓对

饮用水的迫切需求。

在开罗南部图拉地区找水, Fardous(2022)利用电阻率测深、瞬变电磁和高密度电法等 3 种综合物探方法,查明了区内地层分布和断层,成功识别了 2 个含水层。含水层 [A] 为泥灰质石灰岩,平均厚度为 4~12 m,深度为 1.5~13.6 m;含水层 [B] 主要为裂缝状页岩石灰岩和黏土岩层,深度在 40~75 m;解释推断的两组正断层系统被认为是研究区域始新世主要含水层局部补给的原因。研究还指出由于含水层厚度的限制和有限的地下水补给来源,这些含水层可能无法为未来工业发展用途提供可持续的供应,此建议意义重大。

4 找水效果讨论

前文梳理了物探找水常用方法,简要介绍了这些方法的基本原理。基于物探方法找水案例的代表性,并考虑到不同地质条件区的代表性和多方法组合的需要,以及方法创新应用的新成果,全文共收集了大量物探找水案例,涉及碳酸盐岩岩溶分布

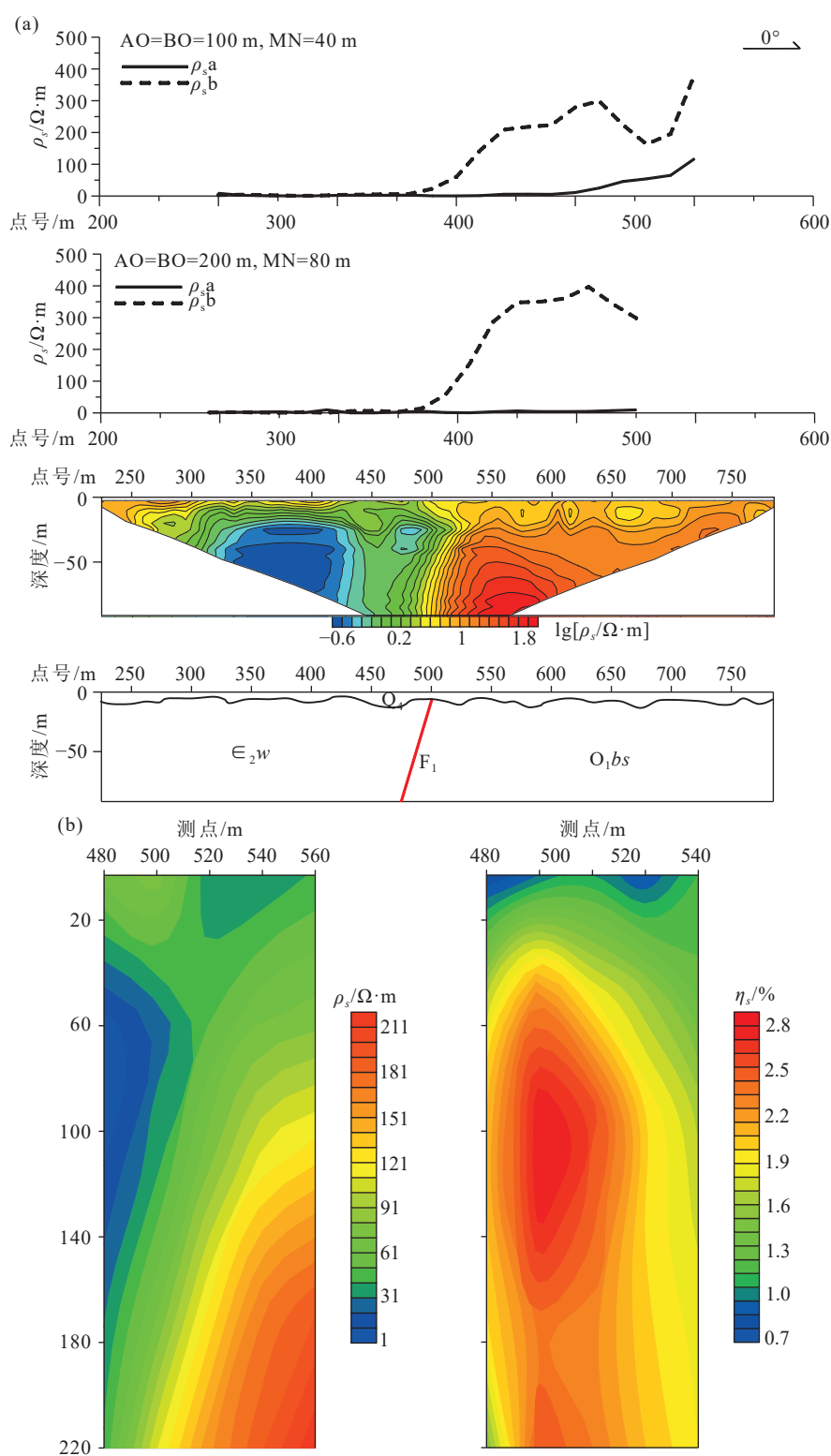


图 12 湖南某贫水板岩地区联合剖面法和高密度电法异常及推断解释剖面(a)和剖面 500 号测点激电测深等值线断面图(b)
(据康方平等, 2020)

Fig.12 (a) Comprehensive results of the geo-prospecting and inferred interpretation profiles, (b) Contour section of five measuring points IP sounding (after Kang Fangping et al., 2020)

区、花岗质岩层分布区、碎屑沉积岩分布区、红层分布区、第四系松散层分布区等地质条件区。在施工环境条件方面,涉及戈壁荒漠、复杂山区、密集建筑物城镇区等物探施工困难地区案例。只有在充分理解地质背景的基础上选择适合的物探方法,才能达到理想的找水效果。下面结合这些应用案例讨论物探找水方法的适用条件和不同地质条件区物探找水方法的选择。

4.1 物探找水方法的适用条件

本文列举了大量物探方法找水成功案例,找水勘查中既有单一方法也有组合方法,探测目标主要是碳酸盐岩岩溶水、碳酸盐岩—碎屑岩构造裂缝水和第四系松散层孔隙水。这些案例表明,大多数物探方法都可以用于找水勘查,并能取得较好的效

果。然而,物探方法众多且各具特色,有些方法野外施工便利,也有些方法野外施工复杂;有单参数方法,也有多参数方法,有交点异常精准定位方法,也有体积异常模糊定位方法。现结合文中找水案例,对主要物探方法在找水中的适用地质背景条件、方法优势和存在的不足进行简要分析,如表2所示,供读者参考。

4.2 不同地质条件区物探找水方法选择

物探找水成功案例一般是在分析勘查区地质条件、物性前提和场地施工条件的基础上,选择了正确的物探方法。其中水文地质条件分析很关键,文中也列举了一个未经水文地质条件分析的物探找水案例,直接开展核磁共振法找水工作,探测结论是无水,钻探验证也无水,说明物探方法有效,但

表2 找水勘查物探方法的优缺点与适用条件分析

Table 2 The advantages, disadvantages, and applicability of groundwater exploration geophysical methods

物探方法	适用条件	方法优势	方法弱点	主要重难点与注意事项	应用案例分析
高密度电法	适用于有电性差异的各类地质背景区,可寻找碳酸盐岩地层区岩溶水、碎屑沉积岩和岩浆岩裂隙水、松散层孔隙水。探测深度宜200 m以内	场地适应性较好、施工效率高、成本低;反演和成像能力强,异常直观,便于地质解释,分辨率高,定位准确	探测深度有限;野外施工受到建筑物和河流等地形地物的限制	重点结合地质背景和探测目标,合理设计测线长度和电极间距;采用多种装置进行重复测量,以提高数据的纵向和横向分辨率及异常可信度;注意避免环境电磁干扰,并关注数据反演的复杂性和多解性	王文杰等(2021)在包头市固阳县石家渠村侏罗系五当沟组碎屑沉积岩分布区,依据高密度电法异常进行地层电性分层及含水层、断裂构造推断解释,认为断裂附近岩石相对较破碎,且为含水层提供了补水通道,故在断裂带上盘选择推断有深部含水层部位钻探,孔深150.1 m, 84 m以下发现主要含水层,获单井涌水量15.51 m ³ /h
直流电法					
对称四极电测深法	主要适用于岩性均匀的地质背景区;可寻找含水层和充水构造裂隙、溶洞等。探测深度宜500 m以内	适用于存在垂向电性差性的地质背景,可识别含水砂层和充水溶洞构造等。施工较为便利,地形场地适应性较好	山区施工难度大,工作效率较低;存在地形起伏异常效应。	重点进行电阻率测深曲线分层定性解释,注意起伏地形会引起假异常	樊永刚等(2018)在腾格里沙漠南缘温都尔勒图镇红湾子找水,测深曲线为KHQ型,大体划分为4个电性层:浅部第一、二层电阻率较高,含砂砾壤土层和砂砾石层,潜水面15.4 m以上,无水或微含水;第三层电阻率由低到高,砂砾岩夹薄层泥岩,含水;第四层(AB/2>150 m以下),电阻率低,砂岩与泥岩互层,弱含水。钻井结果显示:涌水量670 m ³ /d; 80 m以下见第四层岩性,与上述推断解释成果一致
五极测深法	主要适用于非层状地质体的探测,也可用于电性差异明显的似层状地质体探测。可用于寻找岩溶水、裂隙水和孔隙水。探测深度宜300 m以内	施工方便,分辨率强、图像直观、解释简便,定位较准确	探测深度有限;初学者或缺乏经验的技术人员对异常的解释存在一定的难度	重点调查地质地形条件,合理布设勘探测线。在实际资料处理和解释工作中,需要注意剔除地表不均匀体造成的假异常	杨庆镰(2010)在福建龙岩市曲潭村找水,五极测深法 ρ_s 曲线逐步上升,但在 $(Y_1 + Y_2)/2$ 分别为40.5~46.5 m、58.5 m和73.5 m处 ρ_s 曲线则出现明显的低阻凹陷,并有衰减度和半衰时高值异常点与之对应,推断为二叠系下统栖霞组富含地下水的破碎带或岩溶所引起的。钻探验证孔深89.63 m,分别在孔深39.86 m、46.41 m、57.74~60.80 m、73.37~74.10 m等处共发现8层大小不一的含水破碎带或岩溶发育带,与物探解释成果十分吻合,出水量为1237 m ³ /d
联合剖面法	适用于寻找低阻脉状地质体。可寻找岩溶水、构造裂隙水。探测深度宜300 m以内	依据交点异常定位准确。施工便利,成本低,工作效率高,可进行面上普查	受低阻屏蔽的影响,探测深度有限	重点调查水文地形条件,合理布设勘探测线。需要注意识别起伏地形、不同地层界面和充水构造带等因素引起的异常	李望明等(2020)在湘西北岩溶石山地区找水,在湘西北B村开展了2条联合剖面法测量发现低阻异常后,采用三极激电测深法进行评价,有低阻高极化率异常存在,推断为倾向东南的含水断层。经钻探验证,孔深115 m,出水量200吨/天,超过设计要求

续表 2

物探方法	适用条件	方法优势	方法弱点	主要重难点与注意事项	应用案例分析
电阻率梯度法	非常适用于高阻硬岩地层分布区,探测电阻率显著变化的断裂带。主要用于寻找构造裂隙水。探测深度宜 200 m 以内	探测效率高,成本低,分辨率高,对低电阻率异常极为敏感	易受电磁干扰,存在浅表地层低阻屏蔽作用,垂向分辨率低,探测深度较小	重点结合地质构造设计合适的电极间距和排列方式。使用不极化电极,注意电极与地面的接触电阻可能显著影响测量结果;异常解释要考虑地表覆盖物、季节性变化和人为干扰等因素对电测法结果的影响	Erugu et al. (2022) 在印度南部花岗岩分布区寻找基岩裂缝水研究,初步勘查在 13 个不同地区进行了 37 次 GRP 测量(电阻率中间梯度法测量), MN=5 m, 在供电 AB 电极中心三分之一区间测量电位梯度。在优选的 Adinayakana-halli 村地区探测试验中,一次平行测量 GRP 法 3 条剖面,并分别进行 AB 间距为 400 m、600 m、800 m、1000 m 和 1200 m 的测量,GRP 法发现了基岩中 70 至 200 m 深度的充水裂缝区
横向电阻法	主要适应于冲洪积地层分布区。可对第四系松散层富水性进行调查评价,圈定富水区分布范围。探测深度宜 200 m 以内	能够客观反映含水层厚度与粒径对钻井出水量的联合贡献,快速评价松散层孔隙水资源潜力,且成本低	评价浅层地下水效果好,但是评价深层高矿化度电阻率降低的地下水难度较大	重点在于电测深曲线计算横向电阻率和研究横向电阻与出水量之间的函数关系。注意地下水矿化度升高会降低含水层横向电阻	汪青松 (2004) 在内蒙正兰旗发电厂建设基地附近开展地下水资源调查,根据横向电阻值(R)大小划分了强富水区($R=26000\sim 30000\ \Omega\cdot m$)、富水区($R=16000\sim 26000\ \Omega\cdot m$)、中等富水区($R=8000\sim 16000\ \Omega\cdot m$)、弱富水区($R<8000\ \Omega\cdot m$),其中强富水区呈条带状弯曲,反映了古河道的分布形态
激电多参数法	适用于目标地质存在供电激发效应的地质背景区。多用于评价低阻异常区地层的含水性,可寻找孔隙水、裂隙水和岩溶水。探测深度宜 300 m 以内	具有电阻率、极化率、半衰时等多参数优势,可评价地层含水性;受地形影响小,定位较准确	观测时间长,工作效率低。使用大功率发射系统,施工复杂	重点设计合理的观测参数,尽量使用大功率系统,以提高二次场测量信号。注意自然电场、人工电场及地下复杂介质可能会对测量结果造成干扰	薛胜利和凌丹丹 (2019) 在延安地区开展浅层地下水资源调查,考虑到梁、峁并存起伏复杂地形和基岩顶板埋深不一地质条件的影响,应用激电深测法。结果显示,极化率异常对富水带反映明显,从而总结出该区地层电性特征:梁峁区黄土电阻率最高,冲积或冲洪积松散层电阻率较低;黄土孔隙水和风化壳潜水发育时往往出现视极化率极大值;三叠系瓦窑堡组细砂岩与泥岩互层低阻高极化,富水性强
充电法	主要适用于有地下水露头的地区。可寻找岩溶水和构造裂隙水。探测深度宜 300 m 以内	具有快速、简便、定位准确的特点,工作效率高	探测深度有限;浅层结构对深部异常信息有干扰	重点调查确认出水露头与含水构造是否连通。注意供电安全,重视漏电检查,注意复杂地质条件和外界电磁干扰对异常的影响	王红等 (2019) 在湘东地区碎屑沉积岩红层盆地的地下水勘探中,利用已知地下水露头(已知井)充电,追踪控水断裂构造带。采用直流充电法电位梯度测量,通过分析已知井位地下水的连通性,确定充水断层。钻探验证单井出水量为 230 m ³ /d,取得了较好的找水效果
EH4 电磁成像法	适用于目标体与围岩电性差异明显地质背景;多用于寻找构造裂隙水和岩溶水。探测深度宜 500 m 以内	受地形限制较小,施工便利,工作效率高;勘探分辨率高;定位准确,成本适中	抗干扰能力总体较弱;有傍测体积效应;单一电阻参数难以直接判断含水性。	重点调查地质条件,合理布设勘探测线;必要时使用激电多参数法评价含水性;注意外界电磁干扰。	李霞等 (2018) 在河南西部严重缺水的山区找水,分析表明赵老园村岩体接触带区域是找水的有利靶区。采用施工便利的 EH4 电磁成像法在靶区测量了一条长剖面,发现了 4 处低阻异常,解释为 4 条断层,并在其中 3 条断层附近布置了 7 个激电测深点以评价含水性。结果表明 F2 断层具含水性,经钻探验证,涌水量为 15~25 m ³ /d
甚低频电磁法	适用于基岩区和薄层覆盖区,主要用于寻找构造裂隙水和岩溶水。探测深度宜 300 m 以内	仪器操作简便,数据采集效率高、施工成本低等。普查扫面发现找水靶区有优势	探测深度有限、容易受干扰、数据解释复杂	在实际操作中,努力减少外界干扰,确保数据的准确性,注意浅层和地表覆盖物的影响,正确区分浅层和深层异常。需要结合地质背景和多种勘探方法进行综合评价。必要用其它方法佐证	Vargemezis et al. (2012) 在希腊北部帕里奥里(Paliouri)地区找水。该区域主要由蛇纹岩组成,缺少直接的水文地质信息,研究采用综合地球物理技术寻找裂隙水:首先使用甚低频(VLF)电磁法测量了 18 条剖面;其次在 VLF 发现的导电异常位置,进行高密度电阻率层析成像(ERT)剖面测量,并在相同剖面上测量自然电位(SP)。综合解释确定了 2 处最适合建造水井的位置,建井后水量分别为 20 m ³ /h 和 20 m ³ /h
可控源音频大地电磁法	适用于有电性差异的地质背景区,主要寻找硬岩区充水断裂和岩溶构造带。探测深度宜 1000 m 以内	具有探测深度大、水平方向分辨能力强、工作效率高、地形条件限制小、抗干扰能力较强等特点	设备复杂、生产成本较高、数据解释复杂	调查地质条件,合理布设勘探测线。重点关注野外数据采集质量控制,加大供电电流,增强测量信号,避免高压线等电磁干扰。注意浅层效应和复杂地质条件对数据处理和异常解释的影响,分析场源效应的影响	宋希利等 (2012) 在山东沂蒙山坪上镇山底村花岗岩分布区找水,布设了 3 条东西向 CSAMT 法剖面,根据低阻异常发现一条 NNE 向构造破碎带,其中 3 线剖面上低阻异常呈“V”型最明显,垂向延伸最深达 170 m,且底部有一定宽度(约 40 m)。结合地质条件分析,推测由含水构造破碎带引起。钻探验证结果,井深 100 m 时,涌水量已达 36 m ³ /h,大大超出估算水量,揭露岩性为角闪石英二长岩,岩石较破碎,与物探推断吻合较好

续表 2

物探方法	适用条件	方法优势	方法弱点	主要重难点与注意事项	应用案例分析
音频大地电磁法	适用于有电性差异的地质背景区, 主要寻找硬岩区充水断裂和岩溶构造带, 以及高电阻覆盖层条件下找水。探测深度宜1000 m以内	具有探测深度大、水平方向分辨能力强、工作效率高、地形条件限制小等特点; 施工较为便利; 没有场源效应影响	易受外界电磁干扰。浅层分辨率有限, 存在高导电层屏蔽效应	认真研究地质条件, 合理选择勘探剖面, 重点关注数据采集和质量控制, 努力避免电磁干扰, 注意复杂地质条件下的异常解释、浅层屏蔽效应和多解性问题	郑智杰等(2024)在云南宣威大路边村找水, 在一条剖面上同时布置AMT法、高密度电法和联合剖面法, 以研究碎屑岩层的含水性。由于受地面场地狭窄和浅部碎屑岩电阻率小的影响, 高密度电法及联合剖面法测线长度有限, 探测深度较浅, 未能识别出深部构造裂隙等找水有效异常。AMT法电阻率断面清楚显示了300 m以浅的电性特征。在220~290 m测点段, 低阻层状异常呈“V”形向深部延伸至190 m以深, 结合水文地质资料推断为富水裂隙带或断裂破碎带。钻孔布设于“V”形低阻异常中心, 涌水量为366.267 m ³ /d
选频法	适用于具有电性差异的地质背景区。主要用于寻找含水地层、充水断裂或岩溶裂隙带等。探测深度宜500 m以内	仪器轻便, 工作效率高, 适用于复杂山区, 勘查成本低	容易受电磁环境干扰, 人文活动频繁的地区难以开展	在测量前进行现场勘察, 了解地质特征和可能的干扰源; 重点避开可能产生电磁干扰; 重视异常处理与解释, 必要时用其它方法佐证	张叶鹏等(2023)在湖南省桑植县马合口白族乡山区找水, 首先进行选频法剖面测量, 点距10 m, 测量频点40个, 发现一处低电位异常, 初步推断其为岩溶裂隙带; 然后对该处开展选频法单点测深工作, 采用25、67、170 Hz三个频率采样, MN=10~300 m, 增量10 m, 推测了4个含水深度; 最后利用AMT法对该处异常进行佐证, 探测结果与选频法一致性较好。经过钻孔验证, 各出水段深度与物探推测具有较高的吻合性, 孔深300 m, 水量达260 t/d
回线源瞬变电磁法	主要适用于电性差异明显的地质条件区。可用于寻找构造裂隙水、岩溶水和矿山积水, 以及沉积岩层孔隙水勘查。探测深度宜800 m以内	探测深度较大, 垂向分辨率高, 受地质噪声影响较小, 对低阻反应灵敏	设备复杂, 生产成本较高, 数据解释较为复杂, 且容易受地面或空间金属结构体的影响	重点进行观测参数试验, 选择合适的装置、供电电流和发射频率, 避免外部电磁噪声以及地形和地质条件可能干扰测量结果, 准确和高质量的数据采集是成功的关键	廖文鹏等(2017)在渭南市合阳县黄土覆盖区开展了找水工作。采用发射线框为1000 m×600 m的矩形回线大线框, 在线框内布设两条测线, 点距为30 m, 发射频率为8.3 Hz。在2线发现一处250 m深度以下存在低阻异常, 至450 m以下低阻异常特别明显, 推断为灰岩、白云质灰岩和白云岩中构造破碎裂隙引起。经后期钻井验证, 钻井深度约700 m, 出水量可达到60 m ³ /h
电性源短偏移距瞬变电磁	主要适用于电性差异明显的地质条件区。可用于寻找构造裂隙水、岩溶水和矿山积水, 以及沉积岩层孔隙水勘查。探测深度宜1500 m以内	场源发射类同CSAMT方式, 且收发距短, 施工相对便利, 异常体积效应较小, 垂向和横向分辨率高, 探测深度大, 定位较准	发射系统复杂, 仪器设备昂贵, 生产成本较高	分析水文地质条件, 合理布设勘探剖面。重点进行观测参数试验, 选择合适的装置、供电电流和发射频率, 注意外界电磁干扰	闫国才等(2020)在华北某矿区探测深部煤层顶板以上巨厚沉积砾岩层的富水性, 应用SOTEM法, 采用类地震的一发多收探测方法, 电性源AB为1000 m, 收发距R为1000 m, 测线间距50 m及100 m, 测点距10 m, 发射电流20 A、发射频率2.5 Hz。根据视电阻率异常圈定了相对强含水区(中心埋深500 m)和相对中等含水区(最大埋深800 m)等。经5个巷道勘探孔验证, 相对中等含水区域及强含水区域均表现为含水, 水量为560 m ³ /天。探测结果与实际验证情况相吻合
等值反磁通瞬变电磁法	主要适用于电性差异明显的地质条件区。可用于寻找构造裂隙水、岩溶水, 以及沉积岩层孔隙水勘查。探测深度宜300 m以内	仪器轻便, 适应城镇有限场地条件; 抗干扰能力强, 没有浅层勘探盲区, 分辨率高, 有利于探测低阻薄层地质体, 定位准确	相对于其他瞬变电磁法, 探测深度相对较小	OCTEM对金属体反应敏感, 勘探时天线正下方应远离金属体, 否则会产生异常干扰, 影响结果解释	周磊等(2019)在湖南郴州市某城镇有限场地条件下找水, 地表第四系覆盖, 下部基岩为灰岩, 要求勘查深度为100 m。共布置OCTEM法测线4条, 线距10~15 m, 点距5 m。数据采集选用的发射频率为6.25 Hz。在1线和2线上均发现一个明显的“V”形低阻异常区, 延伸深度约90~100 m, 推测为同一条破碎带引起, 认为低阻中心富水性较好。钻探结果在20~70 m孔深范围内出现多组裂隙, 基岩较为破碎并含水, 该钻孔已建井
放射法 放射法	适应于存在深部断裂构造、地层具有一定的孔隙度和渗透性的地质背景区。主要寻找构造破碎带中的裂隙水。探测深度宜300 m以内	仪器设备轻便, 施工便利, 不受复杂地形限制; 定位较准。 α 法工作效率高	难以对断裂构造含水性进行评价, α 法找水多需要与其它方法配合进行。 α 径迹法工作效率低	在潜水面以下, 很难测得深处的氡气, 因此 α 法测量需要考虑地层水文条件和天气因素, 下雨前后异常差异大	王海辉等(2012)在长春静月某地寻找基岩构造裂隙水, 首先进行电测深剖面, 发现低阻异常较明显且宽阔, 难以确定具体孔位, 因此增加了 α 径迹剖面探测。在背景值普遍较低的基础上, 出现了明显的双峰异常, 认为是规模相对较大的张性断裂带的反映。在峰值最大异常点定位钻井, 单井出水量为270 t/d。对区内另一处类似电测深法及 α 径迹异常, 再次钻井验证, 单井出水量为330 t/d

续表 2

物探方法	适用条件	方法优势	方法弱点	主要重难点与注意事项	应用案例分析
反射地震法	适用于层状结构地质背景区。可用于寻找岩溶水、裂隙水和孔隙水。探测深度可达2000 m以上	地层分辨能力强, 探测深度大、精度高, 能够划分地层结构和确定岩性孔隙度, 定位断裂构造精准	野外施工复杂, 成本高; 炸药震源往往难以解决。不适合城镇有限场地条件	重点开展地震地质条件分析和生产前试验工作, 选择合理观测参数; 重视地震资料处理和解释工作	高级等 (2013) 在西部某勘探区寻找白垩系地层中深层地下水, 采用反射地震方法。在时间剖面上, 反射波同相轴整体呈水平状分布, 但存在反射波同相轴扭曲错断现象, 还有反射亮点, 解释为贯通白垩系及其基底含水层的断裂破碎带 (DF3) 引起。经验证孔揭露, 预测深度364 m见DF3正断层, 实际遇见断层破碎带为354 m, 误差仅10 m, 单井日出水量3500 m ³ /d
地震波法	适用于地质结构较为均匀的地质背景, 主要寻找与围岩存在较大密度差或波速差的孔隙水含水层、充水断裂构造、溶洞等。探测深度宜500 m以内	不受震动噪声干扰, 电磁干扰影响小; 不存在覆盖层低阻屏蔽; 探测深度大; 仪器设备简单, 施工方便快捷。可在城市复杂环境中施工	存在体积效应, 定位相对模糊; 不能直接评价含水性	重点分析观测系统范围内可能存在的不均匀地质体引起的异常, 以避免物探异常推断解释出现较大误差	李超男 (2023) 在安徽宿州第四系覆盖区寻找覆盖层下岩溶裂隙水。为避免覆盖层低阻屏蔽, 应用了微动法, 采用三角形台阵方式观测, 检波器1 Hz, 采样间隔10 ms, 最大圆半径80 m, 点距20 m (异常处加密至10 m)。频散曲线与反演波速图可清晰识别基岩面, 在基岩面以下, 视横波速度等值线出现弯曲、闭合等现象, 相对低速区凸显, 结合地质资料, 推测低速区为溶洞。根据物探成果施工24个钻孔, 达到了很好的找水效果
直接找水法	适用于各种地质背景, 主要用于层状地层含水层调查评价和构造裂隙、溶洞充水性识别。探测深度150 m以内	用于预设井位含水性评价, 可直接计算地层中的含水量和埋藏深度	探测深度有限; 数据采集系统和资料处理系统较复杂, 工作效率不高; 容易受电磁干扰	存在近地表低阻层屏蔽效应, 探测深度和垂向分辨率都降低, 需要注意不能因此漏掉深部含水层异常; 还需注意电磁噪声产生的假异常	马瑞杰和李天骄 (2017) 在松嫩平原中西部低洼易涝盐碱地与风沙地交错覆盖区, 应用NMR法寻找基岩中地下水。采用边长150 m方形线圈, 激发频率为2383 Hz。利用NMR测深数据并应用分层多指数联合反演, 显示出基岩中白垩纪泥质砂页岩地层有含水层存在, 分别为地下3.75~33.75 m和63.75~150 m深度处。钻探结果表明, 地下3~21 m, 63~106 m和126~148 m深度处为中粗砂岩含水层, 涌水量为320 m ³ /h
重力方法	适用于覆盖区地质条件, 可调查研究区域性构造带、碳酸盐岩分布范围及深部基岩面形态	提供基础地质构造信息, 为寻找水源靶区预测提供依据	一般不能直接应用找水定位, 需要与其他方法综合应用	重力资料收集有一定难度, 实测工作量效率低	张晋等 (2014) 在2011年河南鹤壁地区的应急抗旱找水勘查中, 对区域重力资料进行了分析, 并在工作区范围内进行了重力剖面测量和二维反演, 获得了测区范围内沉积盖层的厚度变化和灰岩基底的起伏形态, 找出了古生界碎屑岩—碳酸盐岩地层中的主要断层异常, 确定了找水方向。为其他物探方法的选择和工作布置以及具体的找水定井工作提供了基本依据, 极大地提高了定井的速度
重磁方法	适用于基岩区和浅覆盖区。探测构造带及中基性岩体、岩脉分布。提供基础地质构造信息, 圈定找水靶区	收集航磁异常资料或进行野外实测施工都很方便, 成本低廉。可以提供地质构造信息	一般不能直接应用找水定位, 需要与其他方法综合应用	注意低缓异常对隐伏断裂构造的显示; 重点利用磁异常寻找中基性侵入岩, 侵入体接触带是储水构造	祁利成 (2024) 为研究碳酸盐岩地区综合物探技术方法, 在安徽巢湖寒武系碳酸盐岩发育区开展找水试验。首先分析航磁异常特征, 推断了隐伏岩体和主要断裂构造带, 根据航磁低值异常结合已知构造, 推测2个有利于岩溶水发育的区块, 再结合激电中梯方法次级断裂构造解释成果和低阻异常, 圈定了区内可能储水位置, 并用AMT法细查和微动详查准确定位。经钻孔验证, 孔深200 m, 出水量200 m ³ /d。表明磁法在找水靶区圈定过程中发挥了重要作用
综合物探方法组合	多种物探方法组合 主要应用于复杂地质条件区地下水勘查, 多用于寻找构造裂隙水和岩溶水	面上调查, 点上评价, 多方法相互验证, 能够排除物探异常的多解性, 提高找水成功率	增加了寻找水源的勘查成本, 降低了工作效率	重点结合地质条件, 优选找水物探方法组合; 应用低成本方法扫面, 多参数方法评价, 努力做到效率高、成本低, 效果好	李富等 (2019) 在西南乌蒙山片区普格县干田坝村找水。应用综合物探方法寻找基岩断层裂隙水。依次开展: 视电阻率联合剖面 (初步查明隐伏断裂位置, 为后续方法部署提供靶区, 发现了低阻“正交点”断裂带) → EH-4电导率成像系统剖面 (探测地层结构, 确定断裂带规模和产状, “正交点”一侧出现低阻异常带) → 瞬变电磁剖面 (对地层精细分层, 49 m深度以下出现低阻异常) → 激电测深 (多参数评价各低阻异常含水性, 推断“正交点”线段低阻异常富水) → 钻探发现断层角砾岩, 最大涌水量427.2 m ³ /d, 测井成果与物探推断一致

注: 物探方法实际探测深度与工作区地质条件和使用的仪器设备性能都有很大关系, 难以统一。表中所提供的探测深度为物探找水常用深度, 仅供参考。

不属于找水成功案例。不同的地质条件和多变的施工环境,对物探找水效果产生很大影响。物探找水需要依据地质条件,分析地下水类型,扬长避短,合理选择物探方法或方法组合。

4.2.1 碳酸盐岩分布区找水

在碳酸盐岩分布区或碳酸盐岩—碎屑岩分布区,往往都有岩溶发育,找水目标层为碳酸盐岩地层,寻找受断裂构造和层间构造控制的岩溶裂隙水容易取得成功。常用的方法包括高密度电法、地震波微动法、EH4 电磁成像法、选频法、联合剖面法、五极测深法、充电法、AMT 法和激电多参数法等。可供选择的方法较多,建议参考表 2 结合勘查区条件选用 2 种方便快捷的方法组合勘查,互相验证,互为补充,可提高找水效果。如张彪等(2015)在湖南衡阳花岗岩严重缺水地区找水中应用 EH4 电磁成像法和高密度电法组合。

如果找水目标层埋藏深度较大时,则需要采用探测深度大的地震、瞬变电磁等方法。例如:浅层纵波反射地震勘探联合 AMT 法在重庆市涪陵区页岩气勘查开发区勘查岩溶裂隙水(郭淑君等, 2021),地面大回线瞬变电磁法结合放射性 α 测量在渭南市合阳县地区开展的找水工作(廖文鹏等, 2017),以及笔者利用反射地震方法探测安徽蒙城县厚覆盖层下古生界灰岩中构造裂隙水,均效果显著。

4.2.2 花岗质岩层分布区找水

花岗质岩层分布区包括火山岩和变质岩地区,岩性坚硬,地下水主要存在于构造破碎带或与石英脉等其他岩体接触中,常用的物探方法与碳酸盐岩分布区大致相同,主要以寻找充分构造破碎带裂隙水和风化壳裂隙孔隙水为目标,激电多参数法、CSAMT 法、高密度电法、联合剖面法、EH4 电磁成像法、选频法、地震波微动法等找水效果都较好,成本低效率高。如宋希利等(2012)利用 CSAMT 法寻找沂蒙山花岗岩裂隙水。

为了提高找水成功率,建议采用两种以上方法进行组合勘查。如在湖南衡阳花岗岩严重缺水地区找水勘查中,采用 EH4 电磁成像法与高密度电法组合(张彪等, 2015),成功探获岩体裂隙水;Ohenhen et al.(2023)采用二维地震反射和二维电阻率成像相结合的方法,探测非洲马拉维地区结晶基底中构造裂隙水,效果较好;在胶东岩浆岩—变质

岩缺水山区,刘春伟等(2023)采用视电阻率联合剖面法和视电阻率垂向测深方法组合找水取得了较好效果,并总结出风化裂隙水、构造裂隙水和岩溶裂隙水的找水方向和电阻率模型。

4.2.3 碎屑沉积岩分布区找水

沉积碎屑岩分布区主要包括砂岩、粉砂岩和泥岩地层,基本上都是中生代及以前固结地层,也有中生代以来固结的红层。地下水主要存在于砂岩地层、层间裂隙和断裂构造破碎带中,找水方法与花岗质岩层分布区基本相同,主要方法有:激电多参数法、联合剖面法、反射地震法、AMT 法、CSAMT 法、高密度电法、EH4 电磁成像法等。如 Gomo(2023)在砂岩分布区依据 AMT 电位异常确定孔位,取得了找水成果。

由于地层中岩性多样,砂岩和泥岩电阻率差异大,增加了含水构造物探异常识别难度。宜采用多种物探综合勘查和激电多参数法组合。如李荣亮等(2018)采用激电多参数法与高密度电法相结合,利用偏离度(r)等参数评价甘肃清水沟地区三叠系砂岩板岩地层中高密度电法异常;李霞等(2018)采用激发极化多参数异常评价 EH4 连续电导率异常,在河南西部白垩系火山岩及火山沉积碎屑岩分布区确定钻井位置。

碎屑沉积岩往往发育炭质地层,如炭质板岩和煤层等,利用综合物探方法寻找低阻异常大致位置,再用激电多参数评价的工作流程(康方平等, 2020)在湖南某贫水板岩地区找水,取得了较好找水效果。

4.2.4 红层分布区找水

红层区主要指白垩系、古近系、新近系等陆相盆地沉积碎屑岩分布区,以紫红色砂岩、砂砾岩、泥岩地层为主,沉积物颗粒分选性差,固结性较差,岩石缺乏脆性,含水性均差,是典型的贫水地层,找水难度极大。该类地区在中国分布范围广,各地岩性差别较大,需要分析勘查区可能存在的地下水类型,确定找水主攻方向:(1)当红层的厚度相对较小,应重点考虑在红层的下部地层中找水;(2)红层顶部风化层往往含有少量的孔隙水,也可考虑勘查利用;(3)当红层的固结程度较高时,砂砾岩层中的断裂和破碎带往往含有较多的构造裂隙水,是优选勘查对象;(4)如果红层碎屑岩中存在孔隙度较大的砂

岩地层,孔隙水则成为主要勘查目标。根据主攻方向合理选择物探方法,激电多参数法、反射地震法、核磁共振法、高密度电法等可作常用方法,需要多方法组合。

李维等(2022)在四川广安市武胜县“红层”找水,研究了含水层涌水量与物性参数之间的关系,应用激电多参数法和高密度电法;刘圣博等(2024)在赣南红层碎屑岩地区找水,以断裂带、地层不整合面和隔水岩层为主攻对象;马瑞杰和李天骄(2017)应用核磁共振法评价白垩纪红层含水砂层含水量;王红等(2019)采用直流充电法电位梯度测量在湘东地区红层盆地追踪充水断层找水工作,均取得了找水效果。

4.2.5 第四系松散层分布区找水

在冲洪积平原和山间盆地,广泛发育河流冲洪积物第四系松散层。该类地层主要由砂砾石、黏土等松散沉积物构成,具有较好的岩性分选分层,多数富含地下水,但分布不均匀,富水部位主要存在于古河道砂层中。该类地层总体电阻率低,其中含水砂砾石层为高阻层,粘土层为低阻。调查评价这类地下水资源,物探方法能够发挥重要作用。电阻率测深法、横向电阻法、五极测深法、EH4 电磁成像法、OCTEM 法、浅层地震都能寻找含水砂层。张迪硕等(2022)利用航空瞬变电磁法在内蒙古巴林左旗地区圈定了含水地层;汪青松(2004)利用横向电阻法圈定含水层,优选最佳钻井取水位置。

4.2.6 特殊地形地貌区找水

这里特殊地形地貌区是指山区、城镇复杂地形区和黄土高原及戈壁荒漠覆盖区。

山区崎岖不平,植被茂盛,通行困难,铺设长导线类物探方法施工难度大,还存在物探异常地形改正问题。为了提高工效,建议山区找水宜选择短导线类且工作效率高、施工方便的物探方法,如选频法、AMT、EH4 电磁成像法、高密度电法、微动和放射性 α 法、OCTEM 法等。如王瑞丰等(2020)应用高密度电法与 TEM 法联合在河北承德山区勘查基岩裂隙水取得成功,为山区找水积累了经验;张叶鹏等(2023)利用选频法剖面测量、选频法单点测深、AMT 法在湖南省西北部山区寻找岩溶裂隙水的成功案例值得借鉴。此外,近年新发展的地—空电磁法也可以用于找水,利用时域电性源地空电磁

系统(张庆辉等, 2019)在复杂山区可成功探测埋深达 400~500 m 的煤炭采空积水区。

城镇不仅存在电磁干扰,且作业空间往往受建筑物限制,可选的物探方法少。微动方法往往成为首选。近年新发明的 OCTEM 法也是一种适合城镇有限场地条件下找水的方法,周磊等(2019)应用此法在湖南郴州市某城镇进行了野外试验,成功发现含水基岩构造裂隙破碎带。

在黄土高原等厚覆盖区找水,主要目标是穿透黄土覆盖层探测下部地层中构造裂隙水或地层孔隙水(田辽西等, 2023),地下水埋藏深,找水难度大。反射地震法和 CSAMT 法都是有效方法。近年新开发的 SOTEM 法也具有优势,闫国才等(2020)研究表明,该方法能够实现深度超过 1000 m 的低阻含水异常体有效探测。

戈壁荒漠覆盖区,地表干燥、接地电阻大,对电流屏蔽,直流电法勘探深度减小,深部找水难度加大。电磁法较有优势,可选用 EH4 电磁成像法、AMT 法、CSAMT 法、选频法、TEM 法等,必要时使用地震波法、激电测深多参数法、核磁共振法等。如高级等(2013)在西部干旱地区利用地震勘探法识别构造裂隙,取得良好找水效果;Makhlouf et al.(2024)在撒哈拉沙漠利用地震剖面法调查地层结构和断裂分布指导找水。多方法综合勘查效果更好,如朱晓泉等(2019)在甘肃北山戈壁荒漠地区综合物探找水,取得了良好的效果。

5 物探找水技术方法存在问题与展望

5.1 当前物探找水面临的问题

20 世纪 50 年代,直流电法和地球物理测井等方法开始应用于地下水勘查,主要勘查目标是第四系松散岩类孔隙水。20 世纪 70—90 年代,找水目标开始转向勘查难度较大的基岩裂隙水,采用激发极化法、甚低频法、AMT 法等探测方法均取得了良好的效果(刘圣博等, 2024)。21 世纪以来,随着我国现代化建设步伐的加快,对物探找水的要求提高,需要速度快、精度高的物探方法,从而高密度电法、核磁共振法、TEM 法、浅层高分辨率地震等探测技术方法得到飞速发展。

如今,物探找水又面临新问题:城镇化发展压缩了传统物探找水方法的作业空间,狭小空间找水

需求增大;新农村建设往往需要在复杂山区找水;长期地下水资源勘查与开采导致贫水区找水难度越来越大;国家开展水资源基础调查工作,缺少快速有效调查地下水水质水量的物探技术方法。现有的物探找水技术还存在数据采集抗干扰能力差、仪器设备价格昂贵、探测分辨率低、物探异常多解性、技术复杂工作效率低、勘查成本高等问题。

5.2 物探找水技术方法展望

随着人类社会对地下水需求的不断增加,物探找水技术也在持续发展和进步。为了提高找水效率并解决复杂地区的找水难题,物探技术将在高精度与高密度探测等方面不断创新,新仪器和新方法将不断涌现。微动法、OCTEM 法、SOTEM 法等先进技术将在物探找水领域得到广泛应用;二维和三维探测技术将迅速发展,如近年来新发展的地面全息电磁法(詹少全等, 2022)、半航空电磁法(又称地空电磁法)(Chen and Sun, 2020; 武欣等, 2023)以及多辐射源地空瞬变电磁法(李貅等, 2021)等研究成果,也将在找水实践中得到应用和发展。此外,物探多方法多信息联合约束反演技术与人工智能算法相结合(张朔宁等, 2023)未来必将得到快速发展。

为提高物探找水成功率和满足地下水资源调查需求,以往将地层岩性特征与其充电时发生的物理现象相结合,开发了极化率(η)、半衰时(T_h)、衰减度(D)、偏离度(r)等参数,用于评价地层的含水性,取得了较好的应用效果。21 世纪以来,汪青松(2004)研究含水砂层横向电阻与出水量的关系,提出了水量因子法,用于第四系松散层孔隙水调查评价,速度快、成本低、效果好。马建斌等(2013)研究建立了电阻率与岩石渗透率之间的函数关系。刘圣博等(2024)将其应用于高密度电法找水中,计算渗透率剖面指导找水,得到了验证,取得了较好找水效果。可见,随着地球物理与水文地质融合的不断深入,将会不断产生物探找水新参数,出现找水新方法。

6 结论

(1)地下水资源是中国水资源的重要组成部分。地下水资源勘查属于基础性、公益性和战略性地质调查工作,尤其是在干旱缺水地区,通过物探找水打井来解决人畜饮水问题是一项关键的民生

工程。地球物理方法在地下水资源勘查中发挥着重要作用。

(2)物探找水的基本思路首先在于分析勘查区的水文地质条件,确定地下水类型。然后依据地下水类型、地质背景及目标地质体与围岩的物性差异特征来设计勘查方案,并充分考虑勘查场地地形地质实际情况对物探方法实施的影响。

(3)物探找水并不存在绝对的技术方法优劣之分,与水文地质条件及场地条件相适应的方法就是好的方法。目前,高密度电法、激电多参数法、AMT 法、微动法等成本较低且工作效率较高的方法在实际应用中较为普遍,且有较多的成功案例报道。电阻率法、激电多参数法和地震勘探方法均被证明是有效的找水方法,而重力、磁力、放射性方法则可作为有效的补充。综合应用不同方法可以有效提高找水成功率。此外,核磁共振法作为一种直接的物探找水方法,以及横向电阻法在调查评价水资源方面均显示出较大的发展前景。

(4)目前,物探找水还面临一些新问题:城镇化发展压缩了传统物探找水方法作业空间,复杂山区找水需求增大,贫水区找水难度越来越大,国家水资源基础调查缺少快速有效的地下水资源调查评价探测技术。现有的物探找水技术方法还存在探测分辨率低、工作效率低、勘查成本高等问题。

(5)为进一步适应山区、城镇区、厚覆盖区等复杂地形地质条件区和提高找水效率的需要,物探找水技术方法还需要在多参数开发、高精度和高密度探测方面不断创新,正在快速发展的多参数半航空电磁法和地面全息电磁法等物探新技术将是未来物探找水应用研究的新方向。

致谢: 感谢《中国地质》主编郝梓国老师的悉心指导,感谢两位审稿老师提供的宝贵意见。感谢中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心王文杰、青海省环境地质勘查局何胜、甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院李荣亮、广州市番禺城市规划设计院张彪、秦皇岛中兵建设集团股份有限公司王会敏、华北地质勘查局第四地质大队宋启龙、山东省地矿工程勘察院宋希利、中国地质科学院地质研究所宋鹏、湖南省地质调查院曹创华正、周磊、康方平、湖南省地球物理地球化学勘查院屈利军、四川省地质矿

产勘查开发局成都水文地质工程地质中心董建兴、安徽省地质调查院叶臻、广西壮族自治区地质调查院曹淑在论文图件制作过程给予的大力帮助。

References

- Archie G E. 1942. The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME (Transactions of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers), 146(1): 54–62.
- Bassey E N, Ajani O O, Isah A G, Adeniji A A. 2024. Geophysical investigation of groundwater potential in iwo, osun state, southwestern nigeria using audiomagnetotelluric method[J]. *Results in Geophysical Sciences*, 16: 100066.
- Bon A F, Ombolo A, Biboum P M, Moutlen J M, Mboudou G E. 2022. Identification of hydrogeological features using remote sensing and electromagnetic methods in the hard-rock formations of the Cameroon coastal plain (Central Africa): Implications for water borehole location[J]. *Scientific African*, 17: 2468–2276.
- Chen C D, Sun H F. 2020. Characteristic analysis and optimal survey area Definition for semi-airborne transient electromagnetics[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 180: 104134.
- Chen Yixiang, Wei Jiye, Yu Liping, Zhao Wei, Cui Lei, Li Liangjie. 2012. Discussion of South Guizhou karst region electrical sounding abnormal type and genesis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(3): 17–22 (in Chinese with English abstract).
- Erugu N, Sahebrao S, Subash C. 2022. Electrical geophysical techniques pin-pointing the bedrock fractures for groundwater exploration in granitic hard rocks of Southern India[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 199: 104610.
- Fan Yonggang, Jia Dawei, Zhao Suozhi, Zhang Zhiguo, Xu Zhiqiang. 2018. The successful application of conventional resistivity sounding method to water prospecting in arid desert area of Alxa[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(5): 896–901 (in Chinese with English abstract).
- Fardous M Z. 2022. Identification of groundwater bearing zones using geoelectrical and electromagnetic techniques at Tourah Area, South of Cairo-Egypt[J]. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 26(9): 1–16.
- Gomo M. 2023. Use of electric potential difference in Audio Magnetotelluric (AMT) geophysics for groundwater exploration[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 20: 100864.
- Gomo M. 2024. Exploring deeper groundwater in a dolomite aquifer using telluric electric frequency selection method geophysical approach[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 26: 101265.
- Guo Shujun, Zhu Jiliang, Wang Chunhui, Ren Zhengwei, Ming Yuanyuan, Li Meng. 2020. Study on the joint application of electrical and seismic exploration in the investigation of fissure and karst cave in Fuling area[J]. *CT Theory and Applications*, 30(1): 49–59 (in Chinese with English abstract).
- Guo Songwei, Yan Qiang. 2020. Application of transient electromagnetic methods in water exploration of the west of Ming'an Town in Wulategiang, Inner Mongolia[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(7): 2564–2572 (in Chinese with English abstract).
- He Sheng, Jiang Houhui, Ma Wenxin. 2020. Application of five-pole electrical sounding method in water prospecting in Chaka Basin, Qinghai Province[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 43(6): 36–39 (in Chinese with English abstract).
- Huang Lishan, Hou Yijun, Chen Yuanrong, Jing Rongzhong, Wang Jianchao, Zhao Yi, Li Xuebiao, Pei Chao, Zeng Youqiang, Zeng Hui. 2022. Rapid and accurate positioning concealed fault using geophysical and geochemical techniques in cities and surrounding areas: A case study of Lingui District, Guilin City, Guangxi[J]. *Geology in China*, 49(3): 929–942 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Li Yun, Ge Weiya, Ye Nianjun, Feng Xiaoming, Gong Jianshi, Zhou Kaike, Hou Lili, Zhang Baosong, Zhao Muhua, Zhu Hongbing, Tong Changshui, Liu Lin. 2018. Determination of well drilling sites and methods in the drought areas of Gongyi, Henan Province during groundwater exploration[J]. *East China Geology*, 39(2): 142–150 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhezhu, Ou Pengzhi, Yang Jingxun, Dong Bo, Zhang Bohua. 2022. Application of resistivity composite profile and IP sounding in water prospecting in the mountain area[J]. *Jilin Geology*, 41(2): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Kasidi S, Ndatuwong L G, Kamureyina E. 2023. Application of integrated geophysical methods in groundwater exploration in Adamawa State University, Mubi[J]. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 12: 89–105.
- Kang Fangping, Jiang Jianliang, Peng Jie, Cao Chuanghua, Yao Haipeng. 2020. Application of integrated geophysical method to water search in a poorslate region of Hunan province[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 17(2): 258–264 (in Chinese with English abstract).
- Li Fu, Deng Guoshi, Yuan Jianfei, Wang Dewei, Tang Yeqi, Zhou Yimin. 2019. Comprehensive geophysical model for water prospecting in fault fracture zone: A case study of water supply well siting at Gantianba village[J]. *Carsologica Sinica*, 38(3): 344–352 (in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Jiao Yanjie, Wu Wenxian, Yang Jian, Yang Junbo. 2011. A tentative analysis on the geophysical technique which is compatible for groundwater exploration at karst area in Southwest of China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 38(5): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingming. 1993. A new parameter of induced polarization method for water prospecting —rate of deviation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, (6): 52–56 (in Chinese with English abstract).

- Li Rongliang, Cao Zicai, Zhu Yanlong, Su Hailun, Duan Kai. 2018. Application of electrical methods to groundwater prospecting in Qingshuigou, Gansu[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(4): 495–505 (in Chinese with English abstract).
- Li Wangming, Yi Qiang, Liu Shengkai, Xiao Liquan, Li Jun. 2020. An example of DC method for water exploration in the karst mountain water shortage area of northwest Hunan[J]. *Geophysics and Geochemical Exploration*, 44(6): 1294–1300 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Tang Cairui, Wei Liangshuai, Shu Qinfeng, Tao Junli, Tian Yinchuan, Chen Cailing, Luo Bing. 2022. Application of various geophysical prospecting method in red beds water exploration[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(3): 353–360 (in Chinese with English abstract).
- Li Xia, Chen Wenfang, Wan Liqin, Hou Lili, Wang Haigang, He Qingcheng, Wang Jinsheng, Qin Tongchun, Tian Xiaowei. 2018. Groundwater location in bedrock mountains with serious water scarcity using a combination of EH4 and symmetric quadrupole induced polarization[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 45(1): 23–29 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiu, Hu Weiming, Xue Guoqiang. 2021. 3D modeling of multi-radiation source semi-airborne transient electromagnetic response[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(2): 716–723 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jing, Wei Qifeng, Hong Juan, Zheng Shengye, Qin Yongcai, Yan Fusheng, Feng Yongxiong. 2016. Application of self-potential method to explore water in karst area[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 44(2): 68–78 (in Chinese with English abstract).
- Liao Wenpeng, Zhu Tong, Huang Rihua, Zhang Zhilei. 2017. The application of comprehensive geophysical prospecting method in water exploration[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 9(6): 768–774 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunwei, Wang Zhong, Hu Caiping, Shi Yanfang, Yang Xiaohui, Liu Xiaotian, Han Yuying, Li Bohui. 2023. Application of a comprehensive geophysical exploration methods to water exploration in magmatic rock mountainous areas with water shortage in Jiaodong Peninsula[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 47(2): 512–522 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shengbo, Liu Pan, Li Yiyong, Chen Changjing, Liu Lei. 2024. Detection research of multiple types of groundwater occurrence by electrical resistance tomography in Ganzhou area[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 21(2): 256–266 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Gan Fuping, Zhou Qiyong, Zhang Wei. 2018. Research on forward simulation of multi-electrode spacing combined profile curves of typical karst water-rich structures[J]. *Carsologica Sinica*, 37(4): 602–607 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jianbin, Tang Xinguang, Xiang Kui. 2013. Study on the method of calculating rock permeability by using resistivity[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 10(10): 105–106, 122 (in Chinese with English abstract).
- Makhlouf I, Guellala R, Lasmar R B, Dkhaili N, Salmouna L, Chahtour E. 2024. Contribution to groundwater research in the world's largest hot desert: Hydrogeophysical study for the apprehension of the Jurassic aquifer in the Tunisian “Sahara”[J]. *Natural Resources Research*, 33(4): 1549–1571.
- Meng Lishan, Zhang Xiangyuan, Liang Jiangang, Su Yongjun, Liu Hongwei. 2014. Application of electrical method in the groundwater prospecting in Neogene marlstone area in Xinxiang[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 42(1): 95–98 (in Chinese with English abstract).
- Miner W J, Adamson J K, Hasbrouck J C, Monforte S P, Vera M R. 2022. Geophysical reconnaissance of the western basin of the Plaine du Nord aquifer, Haiti[J]. *Hydrogeology Journal*, 30(5): 1417–1432.
- Muhammad S, Ehsan M I, Khalid P. 2022. Optimizing exploration of quality groundwater through geophysical investigations in district Pakpattan, Punjab, Pakistan[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(8): 721.
- Ohenhen L O, Mayle M, Kolawole F, Ismail A, Atekwana E A. 2023. Exploring for groundwater in sub-Saharan Africa: Insights from integrated geophysical characterization of a weathered basement aquifer system, central Malawi[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47: 101433.
- Ouyang Boluo, Yi Qiang, Lu Tao, Huang Chao, Shao Changsheng, Xiao Liquan, Liu Shengkai. 2022. Application of hydrogeological survey combined with direct current prospecting in groundwater search in Southern Jiangxi Province[J]. *South China Geology*, 38(2): 340–349 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jianwei, Zhan Jiacheng, Hong Tao, Wang Haihong, Li Qinze, Li Zhenyu. 2018. Combined use of surface Nuclear magnetic resonance and electrical resistivity imaging in detecting groundwater[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 37(3): 253–262 (in Chinese with English abstract).
- Qi Licheng. 2024. Application of comprehensive geophysical exploration technology to groundwater exploration in carbonate rock area[J]. *Groundwater*, 46(3): 138–140, 170 (in Chinese with English abstract).
- Qu Lijun, Li Bo, Zhou Pei. 2017. The application of multiple geophysical methods to water exploration in the arid areas of central Hunan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 41(5): 835–839 (in Chinese with English abstract).
- Rustadi, Darmawan I, Haerudin N, Setiawan A, Suharno. 2022. Groundwater exploration using integrated geophysics method in hard rock terrains in Mount Betung Western Bandar Lampung, Indonesia[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(1): 10–18.
- Song Xili, Song Peng, Tian Mingyang, Peng Yuming. 2012.

- Geophysical prospecting method in intrusive rocks area fight a drought to find water wells set[J]. *Progress in Geophysics*, 27(3): 1280–1286 (in Chinese with English abstract).
- Su YongJun, Ma Zhen, Meng Lishan, Liang Jiangang, Zhang Guoli, Li Jianguo, Teng Fei. 2015. Application of high-density resistivity method and induced polarization method to determine a good well location in groundwater prospecting[J]. *Geoscience*, 29(2): 265–271 (in Chinese with English abstract).
- Tang F, Lin F, Jin C, Deng G, Zhao H, Tie Y, Yu Q, Ren S, Ren G. 2020. Practical geological technologies facilitating poverty alleviation in Wumeng Mountain area[J]. *China Geology*, 3(3): 504–508.
- Tang Fu, Ma Fu An, Chen Bo, Peng Majun, Weng Dunxian, Feng Xiaobo. 2023. Application of high density electrical method on water finding in three different lithological strata in rocky mountain area of Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 37(2): 327–336 (in Chinese with English abstract).
- Tian Liaoxi, Wang Juwen, Feng Jianhong, Kang Liang. 2023. Hydrogeological conditions and water prospecting direction in water shortage area of Cretaceous basin in Longdong Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 37(4): 186–193 (in Chinese with English abstract).
- Vargemezis G, Tsourlos P, Stampolidis A, Fikos I, Ballas D, Papadopoulos N. 2012. A focusing approach to ground water detection by means of electrical and EM methods: The case of Paliouri, Northern Greece[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56(4): 1063–1078.
- Wang Haihui, Shi Jing, Liu Wei, Li Dawei. 2012. Application of α track exploration method in searching base rock groundwater[J]. *Jilin Geology*, 31(3): 88–91 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huimin, Song Qilong. 2021. Application of controllable source audio frequency magneto telluric method in groundwater exploitation of mountain valley in Shunping County, Hebei Province[J]. *Site Investigation Science and Technology*, (4): 50–53, 61 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong, Zhang Yepeng, Cao Heng, Huang Chaoyu. 2019. The study on the effectiveness of geophysical methods to find water in red bed basin areas in eastern Hunan[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 41(5): 653–658 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruifeng, Wen Laifu, Cheng Jiulong, Chen Zhi, Jiao Junjun, Shen Guoqiang. 2020. Joint detection of bedrock fissure water using high-density electrical method and transient electromagnetic method in Chengde area of Hebei China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 42(6): 784–790 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjie, Hao Yi, Bo Haijun, Xu Haoqing, Li Yongli, Mao Lei, Liu Yongxin, Yuan Shuai. 2021. A case analysis of multielectrode resistivity method for determining a well location in groundwater prospecting in the ore concentration area of Guyang County, Baotou City[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(4): 869–881 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Wang L, Shen J, Nie Z, Meng L, Cao L, Wei S, Zeng X. 2021. Groundwater characteristics and climate and ecological evolution in the Badain Jaran Desert in the southwest Mongolian Plateau[J]. *China Geology*, 4(3): 421–432.
- Wu Xin, Xue Guoqiang, Chen Weiying, Shi Jinjing. 2023. Research on key technologies of the low-noise system for Semi-airborne electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(9): 3904–3913 (in Chinese with English abstract).
- Xi Zhenzhu, Long Xia, Zhou Sheng, Huang Long, Song Gang, Hou Haitao, Wang Liang. 2016. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(9): 3428–3435 (in Chinese with English abstract).
- Xue Guoqiang, Wu Xin, Chen Weiying. 2023. Research of the Short-offset TEM (SOTEM) system[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(8): 3514–3523 (in Chinese with English abstract).
- Xue Shengli, Ling Dandan. 2019. Application of the induced polarization sounding method to the survey of shallow groundwater in the Yanan area[J]. *Geology and Exploration*, 55(6): 1463–1472 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guocai, Xian Penghui, Qiu Nianguang. 2020. Study on short offset transient electromagnetic detection technology for low-resistance electrical sources in deep mine[J]. *Coal Science and Technology*, 48(6): 171–176 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qinglian. 2010. Application of five-pole vertical electrical sounding in search karst water in limestone areas of Longyan District[J]. *Shandong Land and Resources*, 26(9): 43–45 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tianchun, Liang Jing, Cheng Hui, Cao Shujin, Dong Shaoyu, Gong Yufei. 2018. The effect and the anomaly analysis of shallow groundwater exploration based on the frequency selection method of natural electric field[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(6): 1194–1200 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Shaoquan, Dai Shikun, Li Aiyong, Chen Yuhuan, Wang Daoli. 2022. Test result of the holographic electromagnetic exploration method in Dayangshu Basin[J]. *Mineral resources and geology*, 36(6): 1190–1195 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Biao, Liu Liangzhi, Ni Jinxin, Liu Jiangshan. 2015. The application of comprehensive geophysical prospecting method to water exploration in the granite severe water shortage region[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 12(4): 501–507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dishuo, Yu Changchun, Wu Chengping, Qiao Chungui. 2022. Application of airborne transient electromagnetic method in the delineation of aquifer stratum in Balinzuoqi, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(Z1): 436–445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Weng Aihua, Zhao Jianliang, Zhang Qiudong, Zheng

- Dongcai. 2014. Application of comprehensive geophysical prospecting to water discovery[J]. *Ground Water*, 36(3): 110–112,134 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinghui, Tian Zhongbin, Lin Jun, Li Dongsheng, Ji Yanju, Ma Yulong, Jia Wei. 2019. Application of time domain electrical source ground airborne electromagnetic system in goaf water exploration[J]. *Journal of China Coal Society*, 44(8): 2509–2515 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuoning, Yu Guo, He Zhanxiang. 2023. Progress on joint inversion of electromagnetic constraints combined with multiple methods and multiple information[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 58(6): 1522–1534 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yepeng, Huang Chaoyu, Chen Yuxuan, Yang Tianchun. 2023. Application research of frequency selection method of telluric electricity field for drought resistant water prospecting in mountain area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 37(4): 788–793 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhijie, Zeng Jie, Gan Fuping, Chen Jili, and Lu Xiuhua. 2024. Application of comprehensive geophysical prospecting method to water detection in the clastic rock area of Dalubian village, Xuanwei, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 43(2): 432–440 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lei, Cao Chuanghua, Deng Zhuan, Tan Jialiang, Long Xia. 2019. Case study of geophysical prospecting water under the condition of limited site in urban areas[J]. *Urban Geology*, 14(1): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaquan, Li Ye, Zhu Hongtao. 2019. Application of comprehensive electrical method to water exploration in a goldmining area of Beishan in Gansu[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 16(6): 878–889 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 陈贻祥, 韦吉益, 喻立平, 赵伟, 崔雷, 李良杰. 2012. 黔南岩溶石山区电测深法异常类型及其成因探讨[J]. *水文地质工程地质*, 39(3): 17–22.
- 邓在刚, 朱春名, 李汤伟. 2019. EH4 电磁系统在川南严重干旱地区找水中的应用[J]. *四川地质学报*, 39(S1): 171–175.
- 樊永刚, 贾大为, 赵锁志, 张治国, 徐志强. 2018. 常规电阻率测深法在阿拉善干旱荒漠区找水中的成功应用[J]. *物探与化探*, 42(5): 896–901.
- 高级, 王利宏, 莫亮台, 陈卫, 姚松均, 孙峰, 徐昭杰. 2013. 地震亮点技术在西部干旱区找水技术研究[J]. *能源技术与管理*, 38(3): 153–155.
- 郭淑君, 朱继良, 王春辉, 任政委, 明圆圆, 李梦. 2021. 地震联合法在涪陵裂隙溶洞调查中的应用研究[J]. *CT 理论与应用研究*, 30(1): 49–59.
- 郭嵩巍, 闫强. 2020. 瞬变电磁法在内蒙古乌拉特前旗明安镇西找水工程中的应用[J]. *科学技术与工程*, 20(7): 2564–2572.
- 何胜, 蒋厚辉, 马文鑫. 2020. 五极纵轴电测深法在青海茶卡盆地找水中的应用[J]. *河北地质大学学报*, 43(6): 36–39.
- 黄兰珍, 方兴付. 1980. 五极纵轴直流电测深法的理论研究及应用[J]. *物化探电子计算技术*, (2): 3–26.
- 黄理善, 侯一俊, 陈远荣, 敬荣中, 王建超. 2022. 基于物探—化探技术快速精确定位评价城市及周边隐伏断层——以广西桂林市临桂区为例[J]. *中国地质*, 49(3): 929–942.
- 姜月华, 李云, 葛伟亚, 叶念军, 冯小铭, 龚建师, 周铠锷, 侯莉莉, 张宝松, 赵牧华, 朱红兵, 仝长水, 刘林. 2018. 河南巩义抗旱地下水井位确定和钻探方法[J]. *华东地质*, 39(2): 142–150.
- 金哲涛, 曲鹏志, 杨京勋, 董博, 张博华. 2022. 联合剖面法与激电测深法在山区找水中的应用[J]. *吉林地质*, 41(2): 41–48.
- 康方平, 蒋建良, 彭杰, 曹创华, 姚海鹏. 2020. 综合物探方法在湖南某贫水板岩地区找水的应用研究[J]. *工程地球物理学报*, 17(2): 258–264.
- 李超男. 2023. 微动法在宿州岩溶区找水中的应用[J]. *西部探矿工程*, 35(5): 171–174.
- 李富, 邓国仕, 袁建飞, 王德伟, 唐业旗, 周一敏. 2019. 断层破碎带综合地球物理找水模式——以干田坝村探采结合井为例[J]. *中国岩溶*, 38(3): 344–352.
- 李华, 焦彦杰, 吴文贤, 杨剑, 杨俊波. 2011. 西南岩溶地区找水的地球物理方法探讨[J]. *水文地质工程地质*, 38(5): 1–6.
- 李金铭. 1993. 激电找水的新参数——偏离度[J]. *勘察科学技术*, (6): 52–56.
- 李金铭. 1998. 激电极化法方法技术指南[M]. 北京: 地质出版社.
- 李荣亮, 曹自才, 朱彦龙, 苏海伦, 段凯. 2018. 电法在甘肃清水沟地下水勘查中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 40(4): 495–505.
- 李望明, 易强, 刘声凯, 肖利权, 李俊. 2020. 湘西北岩溶石山缺水地区直流电法找水实例[J]. *物探与化探*, 44(6): 1294–1300.
- 李维, 唐彩瑞, 魏良帅, 舒勤峰, 陶俊利, 田银川, 陈彩玲, 罗兵. 2022. 多种物探方法在“红层”找水中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 44(3): 353–360.
- 李霞, 陈文芳, 万利勤, 侯丽丽, 王海刚, 何庆成, 王金生, 秦同春, 田小维. 2018. EH4 和对称四极激发极化联合技术的严重缺水基岩山区找水研究[J]. *水文地质工程地质*, 45(1): 23–29.
- 李貅, 胡伟明, 薛国强. 2021. 多辐射源地空瞬变电磁响应三维数值模拟研究[J]. *地球物理学报*, 64(2): 716–723.
- 梁竞, 韦启峰, 洪卷, 郑盛业, 秦永才, 闫福生, 冯永雄. 2016. 自然电场法在岩溶地区找水打井中的应用[J]. *工程勘察*, 44(2): 68–78.
- 廖文鹏, 朱通, 黄日华, 张志磊. 2017. 综合物探方法在水资源勘察中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 9(6): 768–774.
- 刘春伟, 王重, 胡彩萍, 时彦芳, 杨晓辉, 刘小天, 韩玉英, 李波辉. 2023. 综合物探方法在胶东岩浆岩缺水山区找水中的应用[J]. *物探与化探*, 47(2): 512–522.
- 刘圣博, 刘盼, 黎义勇, 陈长敬, 刘磊. 2024. 高密度电法在赣南地区不同地下水赋存类型的探测研究[J]. *工程地球物理学报*, 21(2): 256–266.
- 刘伟, 甘伏平, 周启友, 张伟. 2018. 典型岩溶富水构造的多极距联合剖面曲线正演模拟研究[J]. *中国岩溶*, 37(4): 602–607.
- 马建斌, 唐新功, 向葵. 2013. 利用电阻率求取岩石渗透率的方法研究[J]. *长江大学学报 (自然科学版)*, 10(10): 105–106,122.

- 马瑞杰, 李天骄. 2017. 核磁共振技术在东北贫水地区找水中的应用[J]. 中国水运(下半月), 17(1): 260–261.
- 孟利山, 张像源, 梁建刚, 苏永军, 刘宏伟. 2014. 电法勘探在新乡市新近系泥灰岩地区找水中的应用[J]. 工程勘察, 42(1): 95–98.
- 欧阳波罗, 易强, 路韬, 黄超, 邵长生, 肖立权, 刘声凯. 2022. 水文地质调查结合直流电法在赣南地区找水中的应用[J]. 华南地质, 38(2): 340–349.
- 潘剑伟, 占嘉诚, 洪涛, 王海红, 李钦泽. 2018. 地面核磁共振方法和高密度电阻率法联合找水[J]. 地质科技通报, 37(3): 253–262.
- 祁利成. 2024. 综合物探技术在碳酸盐岩地区地下水勘查中的应用[J]. 地下水, 46(3): 138–140, 170.
- 屈利军, 李波, 周佩. 2017. 综合物探方法在湘中贫水山区找水中的应用[J]. 物探与化探, 41(5): 835–839.
- 宋希利, 宋鹏, 田明阳, 彭玉明. 2012. 物探方法在侵入岩地区抗旱找水定井中的应用[J]. 地球物理学进展, 27(3): 1280–1286.
- 苏永军, 马震, 孟利山, 梁建刚, 张国利, 李建国, 滕菲. 2015. 高密度电阻率法和激发极化法在抗旱找水定井位中的应用[J]. 现代地质, 29(2): 265–271.
- 唐甫, 马富安, 陈博, 彭马俊, 翁敦贤, 冯小波. 2023. 高密度电法在广西大石山区三种不同岩性地层的找水应用[J]. 矿产与地质, 37(2): 327–336.
- 田辽西, 王具文, 冯建宏, 康亮等. 2023. 陇东黄土高原白垩系盆地水文地质条件及缺水找水方向[J]. 干旱区资源与环境, 37(4): 186–193.
- 汪青松. 2004. 一种新的地下水资源物探评价方法——水量因子法及其应用效果, 地质、资源、环境与可持续发展[M]. 福建: 福建省地图出版社, 182–184.
- 王海辉, 石晶, 刘伟, 李大伟. 2012. α 径迹探测方法在寻找基岩地下水中的应用[J]. 吉林地质, 31(3): 88–91.
- 王会敏, 宋启龙. 2021. 可控源音频大地电磁法在河北顺平山间谷地找水中的应用[J]. 勘察科学技术, (4): 50–53, 61.
- 王红, 张叶鹏, 曹恒, 黄朝宇. 2019. 湘东地区红层盆地找水物探方法有效性试验研究[J]. 物探化探计算技术, 41(5): 653–658.
- 王瑞丰, 温来福, 程久龙, 陈志, 焦俊俊, 申国强. 2020. 高密度电法与瞬变电磁法联合勘查河北承德地区基岩裂隙水[J]. 地球科学与环境学报, 42(6): 784–790.
- 王文杰, 郝一, 薄海军, 徐浩清, 李永利, 毛磊, 刘永新, 袁帅. 2021. 包头市固阳县矿集区高密度电阻率法找水定井实例分析[J]. 物探与化探, 45(4): 869–881.
- 武欣, 薛国强, 陈卫营, 石金晶. 2023. 半航空电磁法全流程低噪声关键技术研究[J]. 地球物理学报, 66(9): 3904–3913.
- 席振铎, 龙霞, 周胜, 黄龙, 宋刚, 侯海涛, 王亮. 2016. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 59(9): 3428–3435.
- 薛国强, 武欣, 陈卫营. 2023. 短偏移瞬变电磁探测系统研究[J]. 地球物理学报, 66(8): 3514–3523.
- 薛胜利, 凌丹丹. 2019. 激电测深在延安地区浅层地下水调查评价中的应用[J]. 地质与勘探, 55(6): 1463–1472.
- 闫国才, 鲜鹏辉, 仇念广. 2020. 深井低阻体电性源短偏移距瞬变电磁探测技术研究[J]. 煤炭科学技术, 48(6): 171–176.
- 杨庆镰. 2010. 五极纵轴测深法在龙岩灰岩地区寻找岩溶水的应用[J]. 山东国土资源, 26(9): 43–45.
- 杨天春, 梁竞, 程辉, 曹书锦, 董绍宇, 宫玉菲. 2018. 天然电场选频法的浅层地下水勘探效果与异常分析[J]. 物探与化探, 42(6): 1194–1200.
- 詹少全, 戴世坤, 李爱勇, 陈予涵, 王导丽. 2022. 全息电磁法在大杨树盆地勘探方法试验成果认识[J]. 矿产与地质, 36(6): 1190–1195.
- 张彪, 刘良志, 倪进鑫, 刘江山. 2015. 综合物探方法在花岗岩严重缺水地区找水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 12(4): 501–507.
- 张迪硕, 于长春, 吴成平, 乔春贵. 2022. 航空瞬变电磁法在内蒙古巴林左旗地区圈定含水地层中的应用[J]. 地质通报, 41(Z1): 436–445.
- 张晋, 翁爱华, 赵建粮, 张秋冬, 郑栋材. 2014. 综合物探方法在应急抗旱找水中的应用[J]. 地下水, 36(3): 110–112, 134.
- 张庆辉, 田忠斌, 林君, 黎东升, 嵇艳鞠. 2019. 时域电性源地空电磁系统在煤炭采空积水区勘查中的应用[J]. 煤炭学报, 44(8): 2509–2515.
- 张朔宁, 喻国, 何展翔. 2023. 多方法多信息电磁联合约束反演方法研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 58(6): 1522–1534.
- 张叶鹏, 黄朝宇, 陈钰轩, 杨天春. 2023. 基于天然电场选频法在山区抗旱找水中的应用研究[J]. 矿产与地质, 37(4): 788–793.
- 郑智杰, 曾洁, 甘伏平, 陈吉礼, 卢秀华. 2024. 综合物探方法在碎屑岩地区找水中的应用——以云南宣威大路边村为例[J]. 中国岩溶, 43(2): 432–440.
- 周磊, 曹创华, 邓专, 谭佳良, 龙霞. 2019. 城镇有限场地条件下的物探找水试验[J]. 城市地质, 14(1): 97–102.
- 朱晓泉, 李辉, 朱洪涛. 2019. 综合电法在甘肃北山某金矿区找水中的应用[J]. 工程地球物理学报, 16(6): 878–889.