

Application of TEM and Radioactivity Exploration in Deep Underground Water Resource Exploration

Wei Liu, Chao Zhang, Jinqiao Chu

CCCC Second Highway Consultants, Co., Ltd., Wuhan Hubei
Email: 598704332@qq.com

Received: Dec. 30th, 2019; accepted: Jan. 12th, 2020; published: Jan. 19th, 2020

Abstract

The large loop source centered transient electromagnetic method is widely used in the exploration of deep groundwater resources. The calculation method of the late apparent resistivity adopted by TEM has obvious boundary effect. In order to suppress the boundary effect effectively, the method of calculating the all-time apparent resistivity is adopted in this paper. In order to solve the problem of serious shortage of water resources in a certain area of Shaanxi Province, TEM and radiometric methods were used to survey the groundwater resources in this area. The location of underground water bearing fracture can be roughly determined by the distribution of apparent resistivity, the range of fracture structure can be delineated by radioactive α -ray anomaly, and the apparent resistivity and radioactive α -ray anomaly measurement can reflect each other to improve the measurement accuracy. This work has reached the predetermined goal, and the newly determined four water wells meet the design requirements of single well water spray volume, which further verifies the reliability of the comprehensive application of TEM and radioactive exploration in the exploration of deep groundwater resources.

Keywords

TEM, Radioactivity Detection, All-Time Apparent Resistivity, Groundwater Resources Survey

瞬变电磁法与放射性勘探在深层水资源勘探中的应用研究

刘 伟, 张 超, 褚金桥

中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉
Email: 598704332@qq.com

收稿日期: 2019年12月30日; 录用日期: 2020年1月12日; 发布日期: 2020年1月19日

摘要

大回线源中心方式瞬变电磁法在深层地下水资源勘探中有着非常广泛的应用。瞬变电磁法(TEM, transient electromagnetic method)采用的晚期视电阻率的计算方法有着明显边界效应,本文为了有效地压制边界效应采用了计算全区视电阻率的方法。为解决陕西某地区水资源严重短缺的问题,分别采用TEM和放射性测量法对该地区进行地下水资源勘察。地下含水断裂位置可通过视电阻率分布情况大致确定,断裂构造范围可通过放射性 α 射线异常来圈定,通过视电阻率和放射性 α 射线异常测量来相互印证,提高测量精度。本次工作达到预定目标,新确定的4口水井满足设计要求的单井喷水量达到50 m³/h,进一步验证了TEM与放射性勘探的综合应用在深层地下水资源勘探中的可靠性。

关键词

瞬变电磁法, 放射性勘探, 全区视电阻率, 地下水资源勘探

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源的匮乏导致了地区民生、经济、社会发展缓慢和生态环境破坏等一系列的问题[1]。在传统的地下水资源勘探中各种地球物理学方法一直得到极为广泛的应用。

目前国内外可以采用多种工程物探方法进行地下水资源勘察工作,包括核磁共振、电法、EH4、激发极化等,每种方法都有其适用性,在地下水直接勘探方面核磁共振方法已经取得了良好的效果[2],但是核磁共振方法容易受到电磁干扰,并且勘探深度只有有限的70~100 m,并不能够完全满足部分地区精细勘察深部地下水目标的需要。梁建刚等组合利用电阻率法和激发极化法等方法[3],结合各种方法的独到之处,同时通过相互比对规避因方法局限产生的缺陷,最终取得了良好效果。吴小洁等结合多种地球物理勘探方法,通过划分基岩破碎带来寻找地热水[4],张彪等则利用高密度电法勘探浅表地层,EH4寻找深部大构造和区域性断裂发育这两种方法相结合的方式,在严重缺水的花岗岩区取得了不错效果[5],电阻率法因其本身原理的限制并受地形、地下异常体等多方面因素的干扰导致效果较差,激发极化法则从一方面补充了电阻率法的不足,但由于形成异常的影响因子同样较多导致解译成果的多解性,在一定程度上影响了激发极化法在实际工程的推广应用[6]。

瞬变电磁法作为间接找水的方法拥有独特的优势,其在具有勘探深度大、抗电磁干扰能力强优点的同时,仍能保证对低阻层具有较高的分辨率。瞬变电磁技术是根据地下介质电性差异来确定相对低阻(即含水层)的位置。我国在20世纪70年代开始用核技术方法进行寻找地下水的研究,到如今技术逐渐趋于成熟。相较于传统电磁法,放射性探测法具有独特的优势:仪器装备相对轻便,操作更加简化,成本进一步降低,效率更高,成果更加直观,可视性更强,相对于电法抗干扰能力更强等等。采用TEM和放射性测量法对该地区进行地下水资源勘察。地下含水断裂位置可通过视电阻率分布情况大致确定,断裂构造范围可通过放射性 α 射线异常来圈定,通过视电阻率和放射性 α 射线异常测量来相互印证,提高测量精度。为了能提高勘探成果的可靠性,进一步降低勘探的风险,本文利用放射性测量方法和大回线源瞬变电磁方法相互综合、印证的方法,来进一步现场提高工作效率。流程见图1。

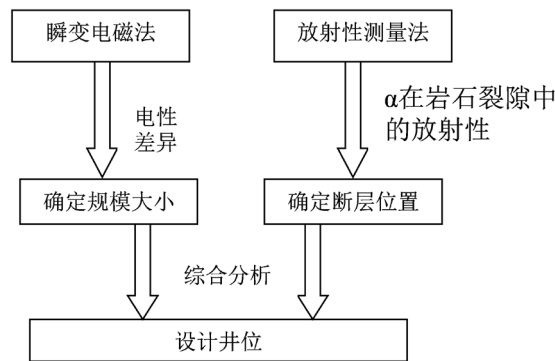


Figure 1. Schematic diagram

图 1. 示意图

2. 工作原理简介

2.1. TEM 原理及全区视电阻率定义

瞬变电磁法的工作原理在地表铺设输入阶跃电流的不接地回线，当发送回线的电流突然断开时，就会在下半空间产生感应涡流场，最后通过感应涡流场衰减曲线特征获取地下目标体的物理信息。本次使用的大回线源瞬变电磁法采用的发射线圈为 300 m*500 m，在大回线中心范围内采集数据。大回线源瞬变电磁法铺设回线简单，线圈铺设完好后，可同时通过多台接收机完成采集工作，还可以改成阵列式观测即把接收线圈按照阵列布置。大回线源装置采用中心回线计算晚期视电阻率，晚期视电阻率表达式为：

$$\rho = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left[2\pi I_0 a^2 \mu_0 / \left(5t \frac{\varepsilon(t)}{ns} \right) \right]^{2/3}$$

式中 I_0 为电流； a 为圆线圈半径，对于矩形线圈， $a = \sqrt{L_1 L_2 / \pi}$ ， L_1 和 L_2 分别为矩形线圈的边长； μ_0 为磁率； $\varepsilon(t)$ 为实测的感应电动势； n 为接收线圈匝数； s 为接收线圈面积； t 为各道采样时间时长。

计算中心回线源晚期视电阻率时，当早期道不满足晚期视电阻率计算条件时会导致计算结果偏大；在实际工作中勘探区位于回线中心的一定范围内，由于存在不同点场响应的差异性的情况，出现较为明显的“边界效应”。针对上述两点问题本文采用了计算全区视电阻率的方式[7]。全区视电阻率计算公式为：

$$H_z(t)_{\text{回线}} = \sum_{i=1}^4 \int_0^{L_i} \frac{I_y}{4\pi r^3} \left[\left(1 - \frac{3}{2u^2} \right) \text{erf}(u) + \frac{3}{u\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2/2} \right] dL$$

$$H_z(t) = \frac{1}{sn\mu_0} \int_0^t V_z(t) dL$$

式中 t 表示时窗时间， $V(t)$ 表示感应电压， s 表示接收线圈面积， n 表示接收线圈匝数。在计算全域视电阻率、全区视电阻率时都采用二分迭代的方法。

实际工作中采集到的 TEM 数据是二次场感应电动势在时间序列上的衰减曲线，资料的处理过程中，需要进行时深转换把现场采集资料转换成电阻率随深度变化。通过以下的公式计算视电导率、视电阻率及视深度等相关参数，本次拟采用电磁波扩散速度反演与瞬变电磁一维反演相结合的方法，计算每道的探测深度，利用并通过现场钻孔和相关地质剖面图等相关地质资料进行交叉对比。时深转换计算公式如下：

$$h_r = \left(\frac{3Aq}{16\pi(v(t)/I)S_r} \right)^{1/4} - \frac{t}{u_0 S_r}$$

$$S_r = \frac{16\pi^{1/3}}{(3Aq)^{1/3} u_0^{4/3}} \frac{(V(t)/I)^{5/3}}{(d(V(t)/I)/dt)^{4/3}}$$

式中 A 是发射线圈面积, $V(t)/I$ 是归一化感应电压, $d(V(t)/I)/dt$ 则表示归一化感应电压对时间的导数。

首先建立一维理论正演模型, 假设均匀半空间电阻率 $r = 100 \Omega \cdot m$, 回线线框大小为 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, 测量点距为 30 m , 供电直流电流 1 A , 图 2 为发射线圈与测点相对位置示意图。图 3 为晚期视电阻率计算方法与全区视电阻率计算方法视电阻率断面图, 从晚期视电阻率断面图 3(a) 可以很明显的看出, 早期道则会有电阻率的假高值出现, 这种情况即是瞬变电磁法的边界效应。而通过全区视电阻率断面图 3(b) 则可以明显看出, 不存在图 3(a) 中所看到的因边界效应而在早期道产生的视电阻率假高值, 所以我们可以看到视电阻率更接近模型的实际电阻率。

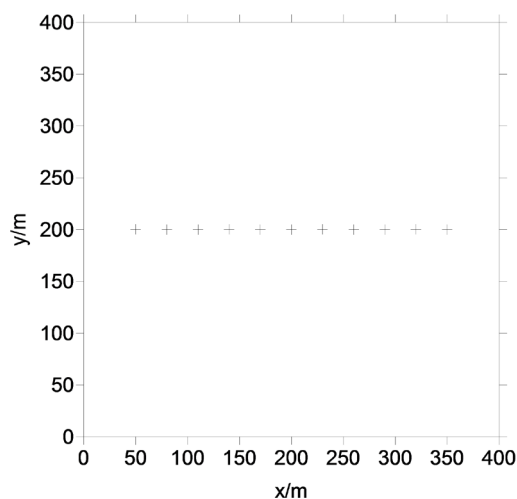


Figure 2. Schematic of transmitter loop and measuring point position for forward
图 2. 正演线框及测点布置位置示意图

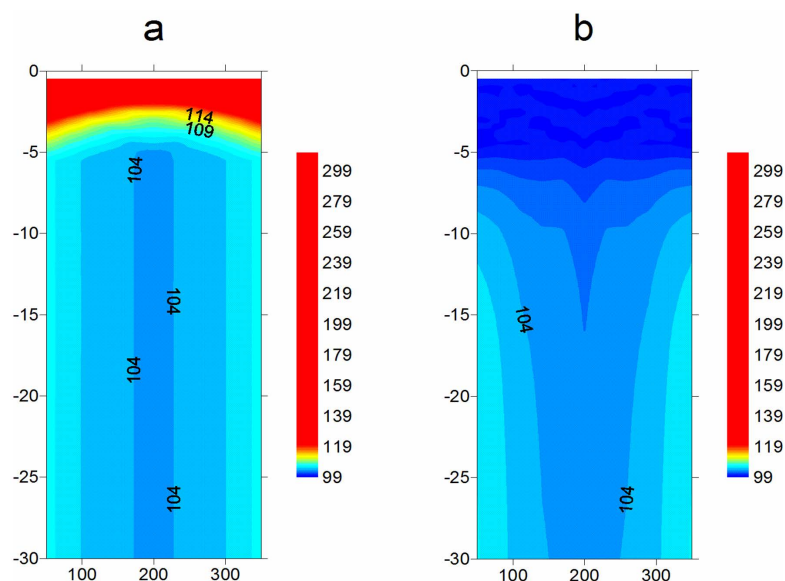


Figure 3. Profile of apparent resistivity of model. (a) Later-time apparent resistivity; (b) All-time apparent resistivity
图 3. 理论模型视电阻率断面图。(a) 晚期视电阻率断面图; (b) 全区视电阻率断面图

2.2. 应用放射性方法寻找地下水原理

氡气测量法是采集地下水水、大气以及土壤中的氡气浓度，并通过测量氡气浓度差异来解决相应地质问题的一种较为常用的测量方法。氡(Rn)是惰性气体中的一种，它一般以游离原子的形式沿着孔隙迁移，因此断层破碎带、地裂隙等都有利于氡气在其中扩散，而一般放射性异常产生的原因也分大概为三类：

1) 不同岩石拥有的放射性矿物的种类和含量都不相同；

2) 由于地质构造运动造成岩石挤压破碎变形，所以在构造及裂隙发育带中岩石的射气系数(即 1 克岩石在完全达到放射性平衡的时间内放出的氡量)具有更强的迁移能力，射气更易于到达地表，产生异常也更明显；

3) 地下水的地球化学作用导致土壤及岩石中的放射性元素发生变化，出现放射性异常[8]。地下水分为孔隙裂隙水、土壤水以及不同层位间的层间水。孔隙裂隙水与成岩裂隙、风化裂隙以及构造裂隙等各种裂隙有紧密关系，其中构造裂隙带一般都是地下水储运都极为丰富的地带[9]。

3. 工区概况

3.1. 区内地质

勘察区处于鄂尔多斯盆地南缘与汾渭地堑中部边缘交互地段，地质构造复杂。根据过往勘察资料，该区域内有多条北东，北东东向高角度正断层发育，以上断层多含水丰富，对基岩裂隙水具有控制作用。

3.2. 区内水文地质

根据工程地球物理测量深度的范围，勘察区内的地下水可分为浅层松散沉积层孔隙裂隙水和深部基岩裂隙水。

3.2.1. 松散沉积层孔隙裂隙水

1) 下中更新统黄土状土潜水含水岩组

主要分布在二级黄土塬，黄土状土及粉质粘土为主要岩性、局部区域含薄层砂砾石层。水位埋藏深度在 25~85 m 之间，中心处较深、南北两端较浅。赋水层厚度在 20~60 m，其厚度变化由基岩面起伏所致。

2) 下中更新统砂砾石状潜水含水岩组

主要存在于工区北部，上部为黄土状土，下伏砂砾石及少量粉质黏土，富水性良好，水位浅。

3) 上新统承压水含水岩组

主要存在于工区南部，上层为粉土夹细砂，含水很差，下伏砂砾石，为该组主要含水层，其同样具有较强的富水性。

3.2.2. 基岩裂隙水

1) 三迭系下中统纸坊群裂隙水含水岩组

集中在工区北部，主要成分为砂岩和泥岩，局部区域泥岩较厚，下伏石千峰组第四段厚层泥岩，厚层泥岩隔水性良好，能够起到类似隔水板的作用；工区内断层多，裂隙极其发育，为该含水岩组提供了极为有利于地下水赋存和运移的条件，使其成为该地区富水层。但由于该层底面基岩起伏较大，该层在各个测区的厚度变化较大，相对应的涌水量也变化较大。

2) 二迭系上统石千峰组第三段裂隙水含水岩组

该岩组主要岩性为砂岩局部夹少量泥岩，其中砂岩占比较大超过 90%，从以往该地区周边的勘察资料可以推测出，该岩组具有良好的富水性。且基岩裂隙水应属重碳酸型地下水。

须指出, 基岩裂隙水在地下的赋存情况虽然具有相对的成层性, 但是也不是一定的, 地下水一般会向断层和岩溶裂隙发育密集地带以及基岩顶部相对低洼处等地方富集。而且, 含水裂隙发育带及含水基岩风化层一般深度较深, 大多位于基岩面以下 40~90 m。

4. 数据采集及资料处理

4.1. 数据采集

整个采集工区共划分为 4 个小工区, 其中每一个小工区内共布设测线两条, 测线布置为正南北向, 点距采用 20 米点距, 线距为 100 米, 平面布置图如图 4。经过实地实验之后, 确定如下工作参数: 大回线框长度为 500 m × 300 m; 采样频率为 25 Hz; 采样延时为 120 us; 测道数为 40 道; 发射电流为 3.3 A; 接收线圈等效面积为 2200 m²。现场质量检查均通过现场监理确认, 符合相关规范及设计要求, 确信所采集数据均是有效的。



Figure 4. Measuring point floorplan
图 4. 测点平面布置图

4.2. 资料处理

瞬变电磁法所采集数据是测点各个测道的瞬时感应电压, 需更进一步换算成视深度、及各深度的视电阻率等数据, 才能进行下一步处理, 具体步骤如下: 对于实测的原始数据, 先做初步整理和预处理, 再据此计算全区的视电阻率, 经过反演和滤波后, 绘制成相应的视电阻率断面成果图, 最后综合解释。处理流程图见图 5。

5. 资料解释

为了进一步验证全区视电阻率有效性, 分别用晚期视电阻率和全区视电阻率对某一工区实测资料进行计算, 如图 6 所示。从图 6(a)和图 6(b)可以看出, 两种视电阻率计算方法所计算出来的晚期(中深部)结果基本一致, 但浅层和边界电阻率差别很大: 图 6(a)可以看到很强的“边界效应”, 早期道(浅部)尤其靠近边框部, 电阻率的假高值现象较为明显, 而图 6(b)则基本不存在视电阻率“边界效应”, 且未发现明显的电阻率假高值, 进一步验证了全区视电阻率有效性, 对后期资料全部采用全区视电阻率计算方法进行数据处理。

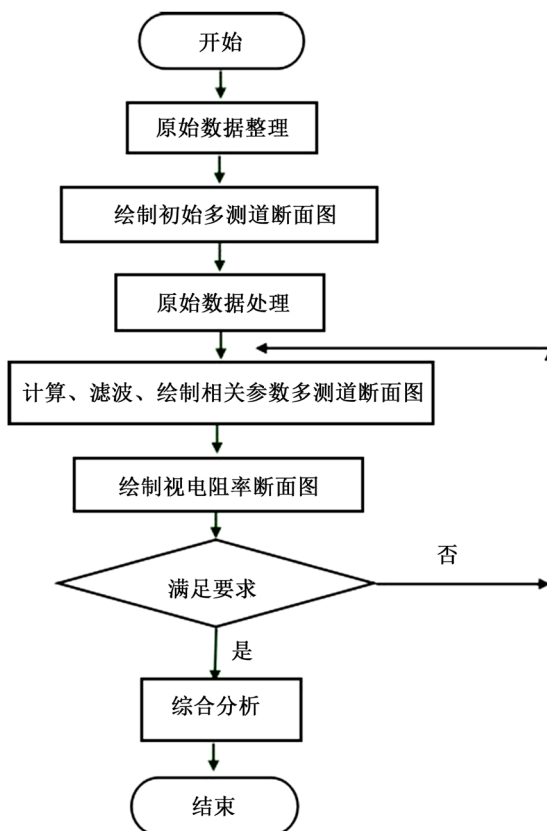


Figure 5. Data processing flow
图 5. 数据资料处理流程图

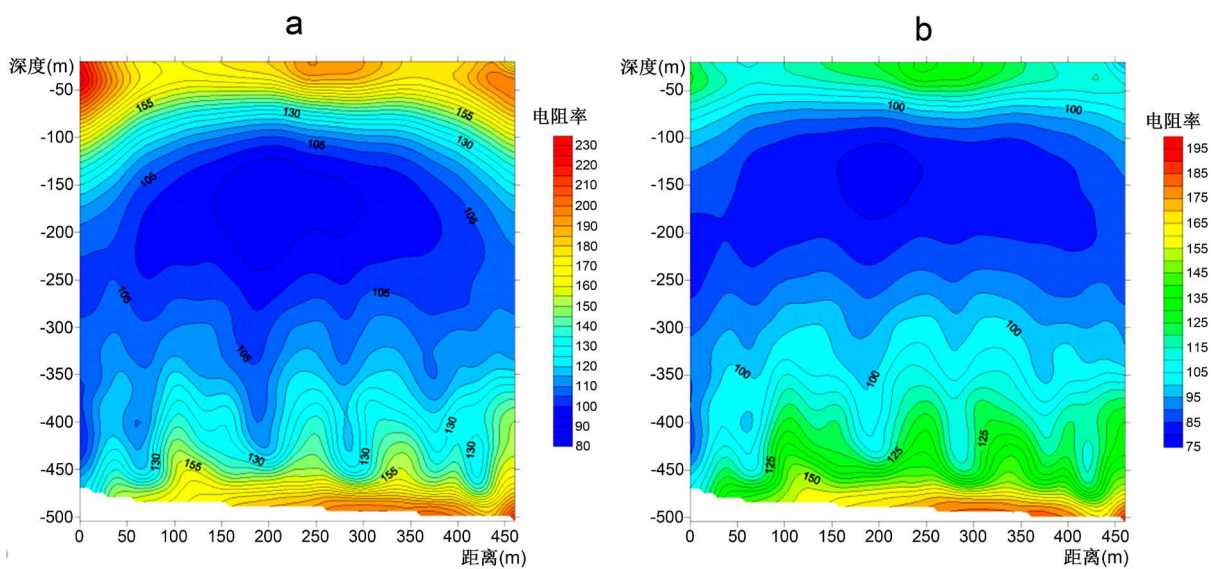


Figure 6. Profile of apparent resistivity of measured data. (a) Later-time apparent resistivity; (b) All-time apparent resistivity
图 6. 实测资料视电阻率断面图成果图。(a) 晚期视电阻率成果图; (b) 全区视电阻率成果图

5.1. 资料解释

以某一工区资料为例，见图 7 从视电阻率断面成果图上可明显看到 0~100 m、150~230 m、270~320 m

处有相对低阻的异常区域出现, 可明显看到有异常出现呈现向下弯曲状, 深度在 380 m 左右, 电性差异反映为 80~105 $\Omega\cdot\text{m}$ 的低阻, 可看出该位置富水性好, 且根据 α 测量剖面图上可以看出该 3 处有明显的高值异常, 可推测出该三处为基岩面相对低洼积水区或断裂发育集中带, 故建议井位设在 0~100 m、150~230 m、270~320 m 处, 考虑到村民用水方便, 建议井位位于 190 m 处。

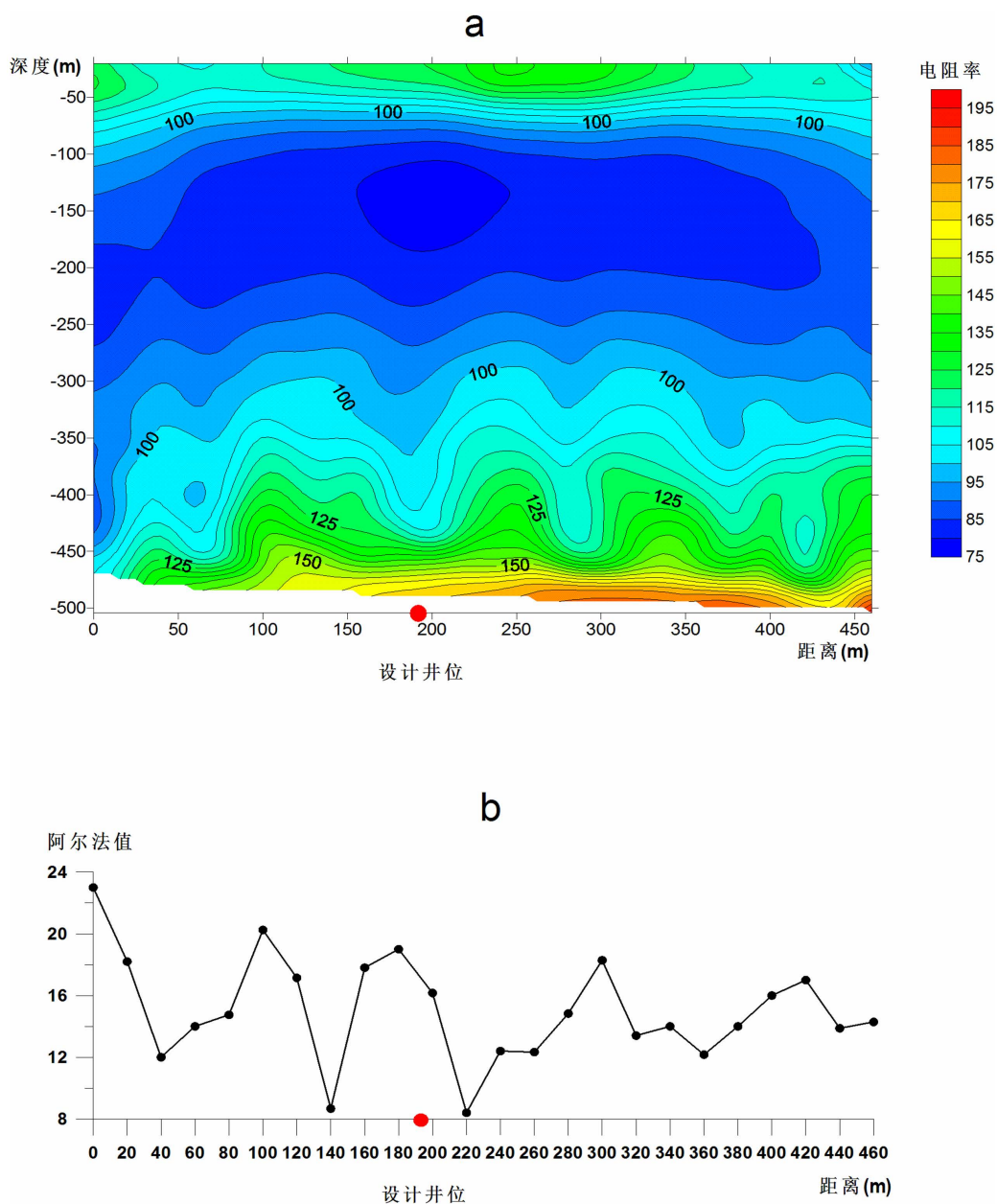


Figure 7. The apparent resistivity section, radioactive α curve and well location design
图 7. TEM 视电阻率成果、阿尔法值曲线及井位设计

5.2. 钻孔验证

结合瞬变电磁法和放射性测量共确定 4 个井位, 并进行钻孔验证, 钻孔平均深度 375 m, 单井涌水量达到并超过设计目的 50 m^3/h , 给当地用水困难的现状带来了极大的改观。

6. 结论

1) TEM 技术在寻找地下水资源时具有以下优势: ① 勘察深度大; ② 分辨率高; ③ 效果显著等, 能够有效提高找水的工作效率。

2) 全区视电阻率计算的方法能够有效规避晚期视电阻率计算方法所存在的“边界效应”, 避免了早期道的高值假异常, 能够更加真实的反映出模型的地电情况, 更利于大回线源瞬变电磁法所采集数据的处理和后期解译, 对于进一步提高工程物探的精准度, 有着积极意义。

3) 工程物探中一般依据电阻率越低富水可能性越高的原则, 但多种因素都可能对电阻率产生影响, 且物探本身具有多解性, 复杂的地质条件也可能对测量数据产生影响, 可能导致最终的推测结果与实际情况有所偏差。结合放射性测量, 可以有效避免上述情况, 两种方法结合, 避免一种方法的缺陷, 发挥各自的优点, 以相互验证、补充, 有效的避免的单一方法的多解性, 进一步降低工程物探的风险, 工作效率有了显著提升。

参考文献

- [1] 李茂榕, 王平. 西部地下水资源勘查的综合地球物理问题——以鄂尔多斯盆地白垩系地下水勘查为例[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 119-126.
- [2] 潘玉玲, 张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000: 98-107.
- [3] 梁建刚, 刘黎东, 高学生, 等. 电阻率法和激发极化法在地下水勘察中的应用[J]. 物探与化探计算技术, 2014, 36(4): 415-417.
- [4] 吴小洁, 张前, 陈长亮, 等. 综合电法勘探在五指山地区找热矿水中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(3): 348-350.
- [5] 张彪, 刘良志, 倪进鑫, 等. 综合物探方法在花岗岩严重缺水地区找水勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(4): 501-505.
- [6] 李金铭, 程学栋, 等. 激电找水应用基础研究[J]. 物探与化探, 1990, 14(4): 273-274.
- [7] 冯兵, 孟小红, 张斌. TEM 框内回线装置发射框边界影响及消除方法[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(5): 61-66.
- [8] 邹力, 葛君伟, 方方, 唐红, 贾文懿. 静电卡法在贵州普定找寻水库漏水处及地下暗河的实验[J]. 成都地质学院学报, 1985, 8(3): 93-94.
- [9] 程业勋. 核辐射场与放射性勘查[M]. 第 1 版. 北京: 地质出版社, 2005.