

文章编号: 1009-3850(2012)01-0108-05

## EH4 电磁系统在云南红河地区地下水勘查中的应用

焦彦杰, 王永华, 吴文贤, 杨 剑, 杨俊波, 李 华

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:** 本文介绍了 EH4 电磁成像系统的基本原理、技术特点和适用范围, 结合该系统在云南红河地区不同类型地下水勘查中的应用实例, 证明该系统能够查清厚覆盖层下的地质构造、地下河形态及含水岩溶带。利用该系统确定的井位已成功地打出地下水, 有效地解决了当地的供水问题。

**关键词:** 云南红河地区; 地下水勘查; EH4 电磁成像系统; 岩溶

**中图分类号:** P641.72

**文献标识码:** A

### 1 引言

由于自然因素和人类活动的双重影响, 经济发展与水资源之间的矛盾日益突出。2009 年下半年以来云南地区持续干旱, 供水形势非常严峻。针对云南严重缺水地区水文地质特点, 合理选择地球物理勘探技术方法寻找地下水, 提高地下水勘查效率, 是地质工作者的一项重要任务<sup>[1]</sup>。

近 40 年来, 应用地球物理技术寻找地下水资源取得了许多令人瞩目的成果。研究区岩溶地表露头很少, 地形起伏较小。此次工作的主要目的是解决农村生活用水困难。为此, 主要进行中浅部岩溶水探测。

本文主要阐述 EH4 电磁成像技术<sup>[2]</sup>在云南红河地区抗旱找水中的应用情况, 指出存在的问题并给出相关的建议。

### 2 方法原理及有效性分析

#### 2.1 方法原理

EH4 电磁成像系统属于部分可控源与天然源相结合的一种大地电磁测深系统。深部构造通过天然背景场源成像, 其讯息源为 10 ~ 100kHz。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 人工电磁讯号, 补偿天然讯号的不足, 从而获得高分辨率的成像。如果将大地看作水平介质, 大地电磁场是垂直投射到地下的平面电磁波, 则在地面上可观测到相互正交的电磁场分量为  $E_x$ 、 $H_y$ 、 $H_x$ 、 $E_y$ ; 通过测量相互正交的电场和磁场分量, 可确定介质的电阻率值, 通过电阻率的断面分布可推断含水层的埋深。

EH4 电磁成像系统主要优点: (1) 巧妙地采用了天然场与人工场相结合的工作方式, 使用部分可控源补充局部频段信号较弱的天然场, 完成整个工作频段的测量; (2) 发射装置轻便, 便于野外多次移动; (3) 多次叠加采集数据, 提供丰富的地质信息; (4) 实时进行数据处理和显示, 资料解释简捷, 图像直观, 并确保现场观测的质量; 现场直观给出连续剖面的似二维反演结果; 勘探深度较大, 分辨率高。其主要缺点是: (1) 对于浅层地表 50m 范围内探测分辨率不高; (2) 较容易受电磁噪声干扰, 成果解释存在多解性。

#### 2.2 有效性分析

此次工作主要针对中浅埋岩溶水的探测。而工作区中浅埋岩溶水一般赋存在浅埋的石炭系、二

收稿日期: 2010-08-30; 改回日期: 2011-11-20

作者简介: 焦彦杰(1978-), 男, 工程师, 主要从事地球物理勘查、地质找矿方面的工作。ajiaocd@gmail.com

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212010880402) 资助

叠系和三叠系的灰岩中,受构造控制。工作地区接地条件好,因此主要采用 EH4 电磁成像等手段查明构造带空间分布特征及碳酸盐岩埋深等情况。

EH4 电磁成像是磁偶源天然场与部分可控源相结合的频率域测深系统,既进行天然场法测量又可进行部分人工场法测量,人工发射源可弥补信号较弱的天然场来完成整个工作的频段测量。该方法设备轻便,操作简单,适合云南红河地区地貌特点。在分辨率方面,该系统接收频点多达 60 个左右,频点丰富。因此,无论在场地条件还是分辨率方面,该系统比较适合红河地区中浅埋岩溶地下水的勘查工作。无论储水形式怎样,只要岩溶区存在地下水,其物理性质都与围岩有着明显的差别,特别是围岩与水体的分界面在电性特征(电阻率、介电常数)方面存在着明显的物性差异(表 1)。EH4 电导率成像法主要是通过观测地层电性参数在纵向及横向上的变化特征,来确定地层岩性结构、岩溶发育带或岩石破碎位置,是一种先进的频率域电磁法勘查技术,代表当今国际上电磁法勘查技术的发展趋势,其主要特点是探测深度大、分辨率高,不足之处是存在静态和近场影响。

这次勘查的地下水主要是云南岩溶石山地区地下岩溶管道水的浅层岩溶水。岩溶区地表水与地下水转化频繁,地下水空间分布极不均匀,纵向上具有双层或多层结构。物探的主要目的是查明岩溶管道的空间分布,但受其规模和埋深条件的限制,物探找水难度较大。

表 1 各种介质的电性特征

Table 1 Electrical parameters of several media

| 介质名称 | 电阻率 $\rho (\Omega \cdot m)$        | 相对介电常数 $\epsilon_r$ |
|------|------------------------------------|---------------------|
| 粘土   | $1 \sim 2 \times 10^2$             | -                   |
| 含水粘土 | $0.2 \sim 10$                      | 17.5                |
| 板岩   | $10 \sim 102$                      | $8 \sim 20$         |
| 灰岩   | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$ | 5.5                 |
| 砂岩   | $10 \sim 10^3$                     | 4.65                |
| 玄武岩  | $10^2 \sim 10^5$                   | 7                   |
| 岩溶水  | $15 \sim 30$                       | $50 \sim 81$        |
| 地下水  | $< 10^2$                           | $50 \sim 81$        |
| 河水   | $10^{-1} \sim 10^2$                | $50 \sim 81$        |

3 地质背景

工作区为岩溶地区,巨厚的碳酸盐岩间常夹碎屑岩层,从而形成多层岩溶化含水层组。由于断裂交错发育,地层褶皱强烈,形成众多断块和背向斜及穹窿构造,而所夹碎屑岩往往构成隔水边界。所

以,一般岩溶水系统以断块型和褶皱型储水构造为主,面积局限。岩溶发育深度则常常不受排泄基准面控制,而受含隔水层、新构造运动期地壳相对升降幅度和水动力条件所制约。岩溶水一般以河谷和盆地为汇流排泄区,在这些地区常形成集中排泄点(带)和富水地段,岩溶发育相对均匀。而山地分水岭及斜坡地带多为补给径流区,岩溶发育极不均匀。

工作地区地处云南高原南缘,红河和珠江两大流域风水岭研究从区南部穿过,本次工作地点主要在珠江流域。工作区地貌类型众多:(1)构造-侵蚀形成的中山-高中山地貌;(2)构造-剥蚀形成的低中山-高中山地貌;(3)溶蚀为主形成的溶丘洼地、峰丛洼地、峰丛谷地等;(4)溶蚀构造形成断陷盆地如建水、石屏、曲溪等盆地;(5)侵蚀-堆积形成的堆积阶地、湖积盆地等。

区内地层除白垩系缺失外,自元古界到第四系均有分布,其中元古界、上古生界、三叠系分布最广。区内主要发育岩溶水和孔隙水,岩溶地下水主要赋存于自泥盆系中统东岗岭组至三叠系中统法郎组的碳酸盐岩地层中,碎屑岩主要为相对隔水层。岩溶含水层主要分布于建水盆地东、南部和异龙湖以北,受次级断裂和背斜、向斜的控制呈条带状展布。

4 应用效果

4.1 建水地区白坡村

白坡村地区元古界、震旦系、古生界、中生界均有分布,基底由元古界构成。区内水文地质条件比较复杂,各类含水层(组)均有分布,地下水类型齐全。

工区地下水受控因素很多。岩性决定了地下水类型、含水层(组)富水性、水动力条件及孔隙裂隙发育的程度等。工区上第三系(N)岩性主要为砾石、含砾砂岩;石炭系大塘阶( $C_1d$ )岩性主要为浅灰色鲕状灰岩、夹白云岩;泥盆系驼山组( $D_3t$ )岩性主要为浅灰色灰岩、夹白云岩,石关山组( $D_3s$ )岩性主要为白云岩夹少量灰岩,一打得组( $D_3y$ )岩性主要为浅灰色灰岩、夹少量白云岩;震旦系灯影组( $Z_2d$ )岩性主要为灰白色白云岩、硅质白云岩,澄江组( $Z_1c$ )岩性主要为紫红色砾岩、砂砾岩、粉砂岩。从岩性上看,本区的灰岩、白云岩为主要的含水层。

工区内断裂构造主要为北东向,是很好的导水通道。断裂构造发育对地下水控制作用也相当明显,

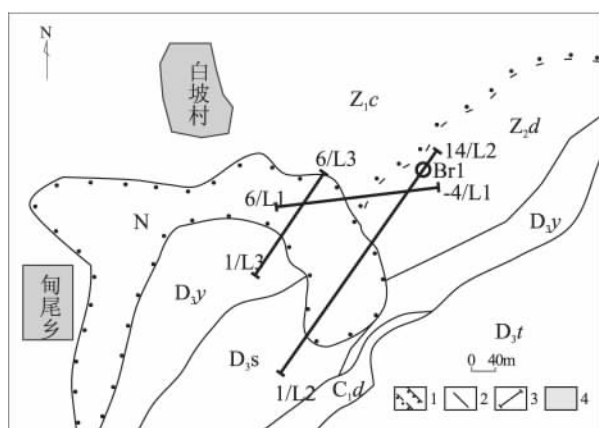


图1 白坡村水文地质条件图

N. 新近系;  $C_1d$ . 下石炭统大塘阶;  $D_3t$ . 上泥盆统驼山组;  $D_3s$ . 上泥盆统石关山组;  $D_3y$ . 上泥盆统一打得组;  $Z_2d$ . 上震旦统灯影组;  $Z_1c$ . 下震旦统澄江组; 1. 实测、推测不整合界线; 2. 实测地质界线; 3. 电磁测深剖面; 4. 村庄

Fig. 1 Sketch to show the hydrogeological setting of Baipo village in Jianshui, Yunnan

N = Neogene;  $C_1d$  = Lower Carboniferous Datangian;  $D_3t$  = Upper Devonian Tuoshan Formation;  $D_3s$  = Upper Devonian Shiguanshan Formation;  $D_3y$  = Upper Devonian Yidade Formation;  $Z_2d$  = Upper Sinian Dengying Formation;  $Z_1c$  = Lower Sinian Chengjiang Formation; 1 = measured/inferred unconformity; 2 = measured geological section; 3 = electrical sounding section; 4 = village

它不但控制着含水层(组)的展布,也控制着地下水的富集条件及排泄条件。本区地貌主要控制地下水补给、径流及排泄条件。灰岩和白云岩区溶洞、溶蚀洼地发育较多、漏斗星罗密布。工区温泉较多,热水资源丰富,主要受断裂及火成岩体控制。地下水化学类型较为简单,一般为  $HCO_3-Ca$  或  $HCO_3-Ca \cdot Mg$  型水。因此,在此区内进行地下水勘查,探测到碳酸盐岩型岩溶水希望很大(图1)。

L1 测线: 整体视电阻率呈现三层特征(图2), 电阻率均横向表现平缓。上部电阻率小于  $200 \Omega \cdot m$ , 推测为第四系; 中部电阻率为  $300 \sim 800 \Omega \cdot m$ , 推测为砂岩; 160m 以深电阻率比较大, 且横向变化平缓, 推测为溶蚀不发育的灰岩、白云岩。

L2 测线: 0 ~ 30m 低电阻率范围平稳, 起伏不大, 主要为地表上第三系砾石粘土。下部整体表现为小号点方向电阻率低, 大号点方向电阻率高, 表现为横向有一定倾斜。L2 测线主要穿过石关山组( $D_3s$ )、上第三系(N)和灯影组( $Z_2d$ ), 根据地层岩性, 穿过的碳酸盐岩区域主要为白云岩, 在合适的条件下, 白云岩比灰岩更容易产生溶蚀现象, 有利于储水。L2 测线北部为澄江组( $Z_1c$ )砂岩, 根据岩溶水文系统边界性质划分情况, 认为砂岩区域是弱透水岩层。有了弱透水层, 地下水含水量才能得以保证。

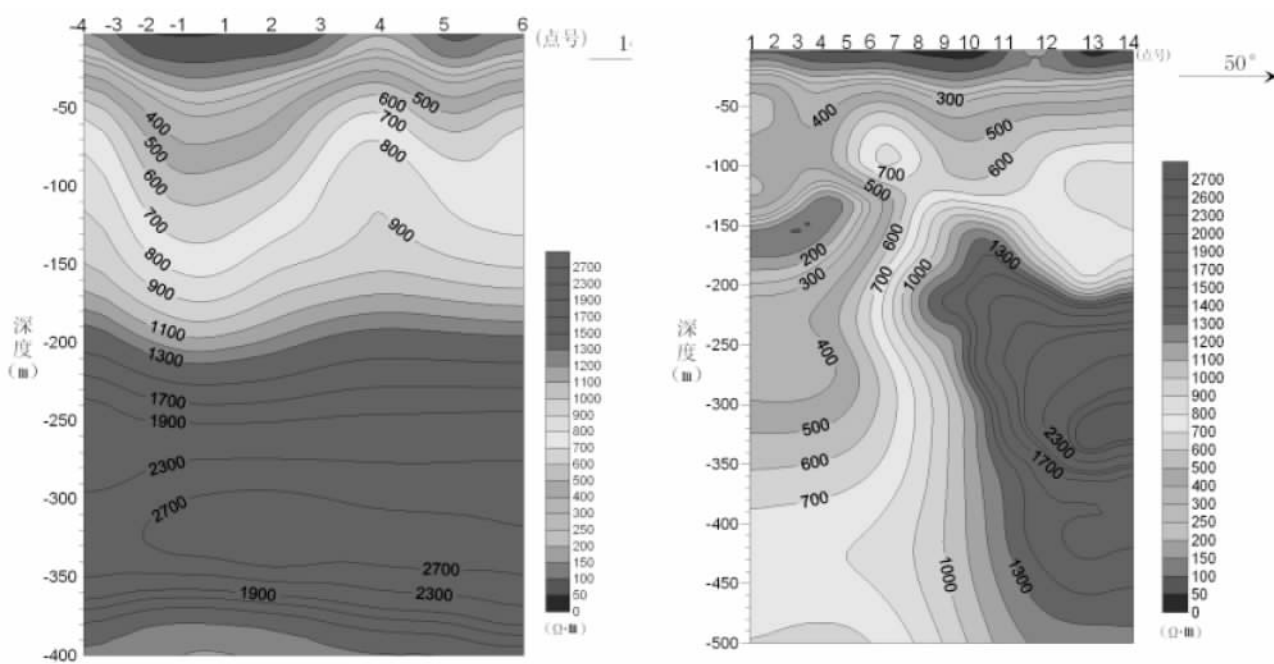


图2 白坡村 L1、L2 线 EH4 电磁测深视电阻率拟断面图

Fig. 2 Proposed profiles across L1 and L2 traverses in Baipo village based on the EH-4 apparent resistivity sounding

一般情况下,水动力作用明显,碳酸盐岩含水条件好且电阻率低,反之则高。根据物性、岩性及剖面综合推断,在 L2 线上划分了 3 个碳酸盐岩区域: C 区为强溶蚀带, B 区为中溶蚀带, A 区为弱溶蚀带。破碎带、断裂、强溶蚀带均为有利储水部位。L1 测线相交于 L2 测线 12 号点, 结合两条测线, 为了防止地下水漏失, 井位布设不宜在较陡的断裂带部位。考虑到灰岩、白云岩的厚度, 最终在 L1 线 13 号点布设井位 BR1。

白坡村 BR1 钻孔施工显示: 0~3m 为第四系粉质粘土, 3~220m 为泥质灰岩、灰岩, 50m 以浅含泥质成分较多; 50~100m 岩石裂隙发育; 100m 以深溶蚀现象发育, 可见溶沟、溶槽; 接近终孔位置岩石较硬, 性脆。与 EH4 电磁测深剖面解释相吻合, 后经抽水、稳定恢复时间试验, 该钻孔出水量达 150m<sup>3</sup>/d, 水位 125.5m, 为 CaHCO<sub>3</sub> 型岩溶水。有效解决了该村长达 30 多年的生活用水缺乏问题。

4.2 开远青塘子

区内出露地层有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、第三系和第四系。其中个旧组(T<sub>1g</sub>)和永宁镇组(T<sub>1y</sub>)是区内岩溶发育的主要层位<sup>[9]</sup>。

工作区位于南洞地下河系统的北部分支系统, 该子系统北起东山顶-雨那位, 南到南洞口, 东西两侧以断层及中上三叠系砂页岩为界, 呈北东向长条状分布。青塘子以南为主要迳流排泄区, 发育岩溶管道系统(图 3)。

岩溶干谷和盲谷是岩溶地区特有的河谷地貌, 它们不仅反映了早期地表河的位置和高度, 而且通常指示附近有地下河存在。研究表明, 区内有 3 条比较明显的岩溶干谷和盲谷, 其中一条位于南洞口-青塘子一线, 全长约 10km, 河谷地貌保存完整。谷

底可见河床相砂砾石堆积, 阿得邑以上则为地表河, 至青塘子附近才转入地下成为盲谷。因此, 其实质上这是一条岩溶干谷-盲谷组合系统。在阿得邑-青塘子段谷底有大量漏斗、落水洞作为地表水、地下水转换通道。已有连通试验证实, 青塘子落水洞与南洞 I 号暗河连通, 且岩溶干谷与 I 号地下暗河的平面位置基本一致。因此, 本岩溶干谷与南洞地下河 I 号暗河早期地表河有关系。此次工作目的就是探测与季节性溪流有关的暗河管道。

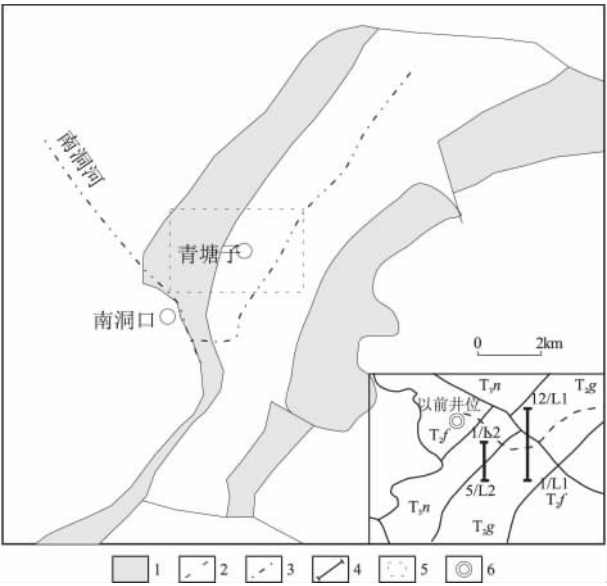


图 3 青塘子水文地质条件示意图

1. 碎屑岩区; 2. 河流、季节性溪流; 3. 地下河; 4. 电磁测深剖面; 5. 工作区; 6. 以前井位

Fig. 3 Sketch to show the hydrogeological setting of Qingtangzi, Kaiyuan, Yunnan

1 = clastic terrane; 2 = stream and ephemeral brook; 3 = subterranean streams; 4 = traverse; 5 = studied area; 6 = pre-existing well site

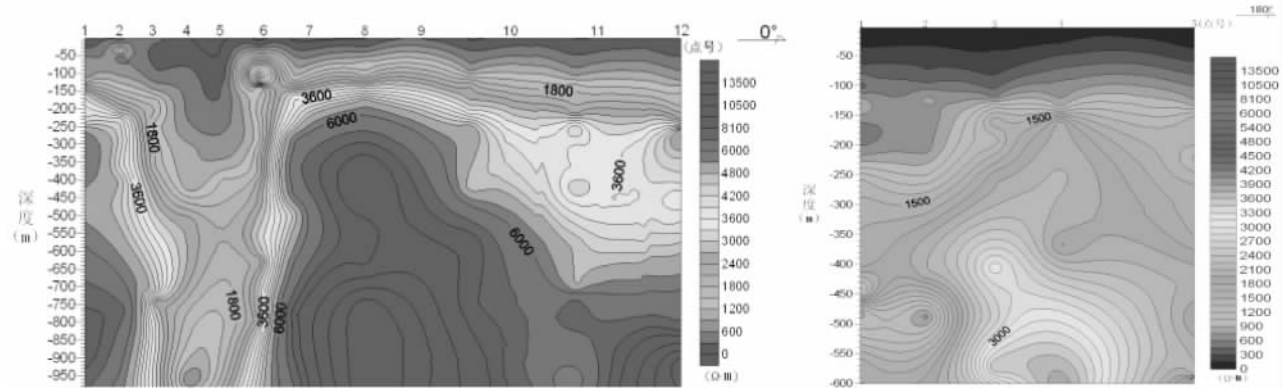


图 4 青塘子 L1、L2 线 EH4 电磁测深视电阻率拟断面图

Fig. 4 Proposed profiles across L1 and L2 traverses in Qingtangzi based on the EH-4 apparent resistivity sounding

L1 测线总体电阻率呈现高阻特征,在测点 3~7 之间有一明显低阻带,呈漏斗状,推测为断裂构造破碎带,倾角较大,深度一直延续到 950m 附近。但低阻部分分别在 200~400m、800~950m 形成闭合圈。暗河一般应循主导构造线方向发育,现有干河谷位于测点 5~6 之间,根据 L1 测线剖面中所表现上小下大的低阻带形态,推测深度 200~400m 低阻部分应为古河道(变迁)或暗河发育部位。

L2 测线为验证性测线,由于地形原因测线剖面较短,但测点 1~3 电阻率表现与 L1 测线低阻部分能够对应。根据以前的施工井位工程地质资料,也证实了河道的存在。但此低阻是否为南洞地下河 I 号暗河的表现还有待于进一步的工程验证(图 4)。

## 5 结论

EH4 电磁成像系统能划分电性界面,确定破碎带位置,可高分辨率地进行电阻率成像,是适合于云南红河岩溶地区地下水勘查的有效方法。

在本项目实施过程中,得到了云南省红河州各县市国土资源局大力协调,工作得到了云南省地质工程勘察院李长才总工、红河分院段乔文总工等的帮助,在此一并感谢。

### 参考文献:

- [1] 曹福祥,尹秉喜,朱庆俊. 电导率成像系统在西部地下水勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2005, 29(4): 323-325.
- [2] 蔡运胜,张宝华. 几种电法仪器在地质勘查中的应用 [J]. 地质与勘探, 2006, 42(5): 72-77.

## An application of the EH4 magnetic imaging system to the exploration of the groundwater resources in the Honghe region, Yunnan

JIAO Yan-jie, WANG Yong-hua, WU Wen-xian, YANG Jian, YANG Jun-bo, LI Hua  
(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** The present paper gives an introduction of the principles, techniques and application of the EH4 magnetic imaging system to the exploration of the groundwater resources in the Honghe region in Yunnan. The emphasis is placed on the investigation of the geological structures of the overburdens and morphology of subterranean streams, and the delineation of the hydrous karst zones. The techniques presented in this study turned out to be very effective in the exploration of groundwater resources in the Honghe region in Yunnan.

**Key words:** Honghe region in Yunnan; groundwater exploration; EH4 magnetic imaging system; karst