

# 云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析

焦彦杰 吴文贤 杨 剑 李 富 杨俊波

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082)

**摘要:**西南地区水资源短缺严重威胁到当地人民群众生活用水,也制约了本地区的经济发展。如何针对西南缺水地区水文地质特点,合理选择地球物理勘探综合技术方法寻找地下水,提高地下水勘查效率,是水文地质工作面临的十分重要问题。本文介绍了电导率成像系统和高密度电阻率法的基本原理、技术特点和适用范围,结合云南岩溶山区地下水勘查的应用实例,进行对比分析,圈定了含水岩溶带,确定了井位,有效解决了当地供水问题,说明了方法的有效性。提出西南地区地下水勘查建议,为今后的地下水资源利用工作提供借鉴。

**关键词:**云南岩溶山区;地下水勘查;电导率成像;高密度电阻率

**中图分类号:**P641.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)03-0770-09

## 1 引言

由于自然因素和人类活动的双重影响,经济发展与水资源的矛盾日益突出,特别是 2009 年下半年西南地区干旱一直持续,形势非常严峻。合理有效地勘查、开发利用西部地下水源,成为地质工作者的一项重要任务<sup>[1]</sup>。国土资源部、中国地质调查局积极部署,发挥部门优势紧急行动,动员全系统力量支援西南旱区找水工作。

近 40 多年来,应用地球物理技术在寻找地下水资源方面已日趋发展成熟,并取得了许多令人瞩目的成果。地下水资源调查、勘查工作性质不同地球物理方法所发挥的作用也有所不同。根据地球物理勘探技术的特点,其在水文地质工作中的应用体现在两个层面:一是工作区宏观结构性探测;二是确定勘探孔、开采孔的具体位置,即通常所说的找水技术。此次找水工作主要应用的是高密度电阻率法和电测深法。地球物理勘查能反映的水文地质调查内容则包括:构造、地层结构、地层岩性、地下水富集程度、地下水水位、地下水水质、岩性结构、沉积规律、地下水运移特征等<sup>[2]</sup>。

工作区岩溶地表露头很少,地形起伏较小,地球物理探测方法利用条件较好。主要目的是为了解决农村生活用水困难,通过在中浅部岩溶山区利用综合物探方法进行找水,为西南地下水勘查提供一定的技术借鉴。

## 2 物探找水方法及适用性分析

### 2.1 物探找水方法技术

目前,中国在找水方面应用较多的物探方法主要包括电阻率法、激发极化法、电测深法、高密度电法、瞬变电磁法、核磁共振法、EH-4 连续电导率成像技术等。上述方法都有自己的优势和缺点,应针对研究区的具体情况进行选择。本文就是结合工作区使用的 EH-4 电磁测深和超高密度电阻率法,进行实例分析,总结成功与失败的经验,提高物探找水方法勘查水平。

超高密度电阻率法属于高密度电阻率法的一种,它集中了电阻率剖面法和电测深法的特点,能快速而准确地获取丰富的地下信息。该技术采用三电位电极系装置,通过连续密集的采集测线的电响应数据,实现地下分辨单元的多次覆盖测量,具有压制

静态效应及电磁干扰的能力,对施工场地尤为适应。一条高密度电法测线能了解地下一个面状信息,通过合理布置测线,能三维勾划地质体,从而达到立体勘探。高密度电阻率法较常规电阻率法具有以下特点:①电极布设一次完成,减少了因电极设置而引起的故障和干扰,为野外数据的快速、自动测量奠定了基础;②能有效地进行多种电极排列方式的扫描测量,可以获得较丰富的地电断面结构特征的地质信息;③野外数据采集实现了自动化或半自动化,采集速度快(每一测点需 2~5 s),避免了手工操作经常出错的问题;④可对资料进行预处理并显示剖面曲线形态,脱机处理后还可自动绘制、打印各种成果图件;⑤与传统的电阻率法相比,成本低、效率高、信息丰富、解释方便,勘探能力显著提高。

EH-4 电导率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 Hz~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 人工电磁讯号,补偿天然讯号的不足,从而获得高分辨率的成像<sup>[9]</sup>。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。优点: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;发射装置轻便,便于野外多次移动;多次叠加采集数据,提供丰富的地质信息;实时数据处理和显示,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。缺点:对于浅层地表 50 m 范围内探测分辨率不高;较容易受电磁噪声干扰;成果解释同样存在多解性<sup>[10]</sup>。

EH-4 电导率成像系统方法设备轻便,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,反映该系统频点丰富,分辨率要高于其他设备。因此,无论在场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。

岩溶化的岩体广义上为多重含水介质,其中既有岩块中的孔隙、分割岩块的裂隙,又有孔隙受岩溶化改造形成的溶孔、溶穴,裂隙溶蚀而成的溶隙,甚至形成宏观巨大的岩溶管道网络、溶潭、地下暗河等,都构成了不同规模大小的岩溶储水形式。无论哪种储水形式,只要岩溶区里存在地下水,它的物理性质都与围岩有着明显的差别,就可以利用含水岩层的物理性质与围岩的差别,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)。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的规模、产状、性质,岩溶发育带或岩石破碎位置<sup>[4-5]</sup>。

这次勘查的地下水部分为云南岩溶石山地区地下岩溶管道水的中浅层岩溶水。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。因此浅部地质信息勘查还需要补充高密度电阻率法,该方法在 0~150 m 范围内分辨率较高,对于 EH-4 电磁测深方法是个很好的补充,然后综合分析,判断其控水作用,确定宜井位置<sup>[6]</sup>。

### 3 实例分析

#### 3.1 白坡村

区内地层出露比较齐全,元古宇、震旦系、古生界、中生界均有分布。基底由元古宇构成。云南山字型构造是横跨滇中、滇东、滇南、滇北的主要构造体系。

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。地下水受控因素很多,但岩性是基础,它决定着地下水类型、含水层(组)富水性、水动力条件及孔隙裂隙发育的程度等。构造发育对地下水控制作用也相当明显,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。地貌主要控制地下水补给、径流及排泄条件。测区温泉较多,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  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  或  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型水,矿化度  $<0.5$  g/L,水质良好<sup>①</sup>。

工作区地层为新近系(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( $D_{3f}$ ),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

①于树忠,李伯昂,杜景云. 建水区域水文地质普查报告(1:20 万),1978.

表 1 各种介质的电性特征

Table 1 Electrical parameters of various media

介质名称	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	相对介电常数 $\epsilon_r$
粘土	$1 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2$	-
含水粘土	0.2~10	17.5
板岩	$10 \sim 10^2$	8~20
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	15~30	50~81
地下水	$< 10^2$	50~81
河水	$10^{-1} \sim 10^2$	50~81

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( $Z_{bdn}$ )岩性主要为灰白色白云岩、硅质白云岩,澄江组( $Z_{ac}$ )岩性主要为紫红色砾岩、砂砾岩、粉砂岩。

工作区内构造主要为北东向,与地质界线大致

相同,是很好的导水通道。结合区域地质,灰岩和白云岩区溶洞、溶蚀洼地、漏斗星罗密布。在该区进行地下水勘查时,探测到碳酸盐岩型岩溶水的希望很大(图 1)。

L1 测线,电阻率呈现 3 层特征(图 2)。0~20 m 电阻率小于  $200 \Omega \cdot m$ , 推测为第四系岩层;30~160 m 电阻率为  $300 \sim 800 \Omega \cdot m$ , 为中等大小,在-2~3 点之间,等值线有明显的向深部弯曲,该段在平面图上表现为从灯影组向澄江组、新近系过渡。灯影组的白云岩、硅质白云岩电阻率比澄江组、新近系的砾岩、砂岩高,推断该处砂砾岩的埋深比较厚;160 m 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<sup>7</sup>。

L3 测线,电阻率值的整体变化特征与 L1 测线相似,但在 5~6 点高电阻率变大并向浅部抬升,推断为深部灰岩、白云岩北东高、南西低,发育分带明显且具有一定的储水构造,与 L2 测线特征相似。

L2 测线,从电阻率范围来看与 L1 测线相似,但 L2 主要穿过石关山组( $D_{3s}$ )、新近系(N)和灯影组

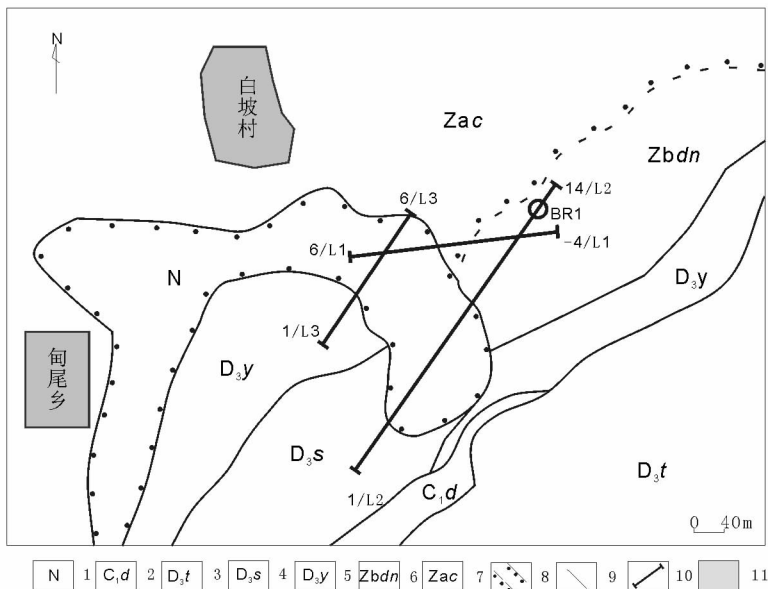


图 1 白坡村水文地质条件图

1—新近系;2—石炭系下统大塘阶;3—泥盆系上统驼山组;4—泥盆系上统石关山组;5—泥盆系上统一打得组;6—震旦系上统灯影组;7—震旦系下统澄江组;8—实测、推测不整合界线;  
9—实测地质界线;10—电磁测深剖面;11—村庄

Fig.1 Hydrogeological conditions of Baipo Village

1—Upper Tertiary; 2—Lower Carboniferous Datang Stage; 3—Upper Devonian Tuoshan Formation;  
4—Upper Devonian Shiguanshan Formation; 5—Upper Devonian Yidade Formation; 6—Upper Sinian Dengying Formation; 7—Lower Sinian Chenjiang Formation; 8—Measured and inferred unconformity;  
9—Measured geological boundary; 10—Electromagnetic sounding profile; 11—Village

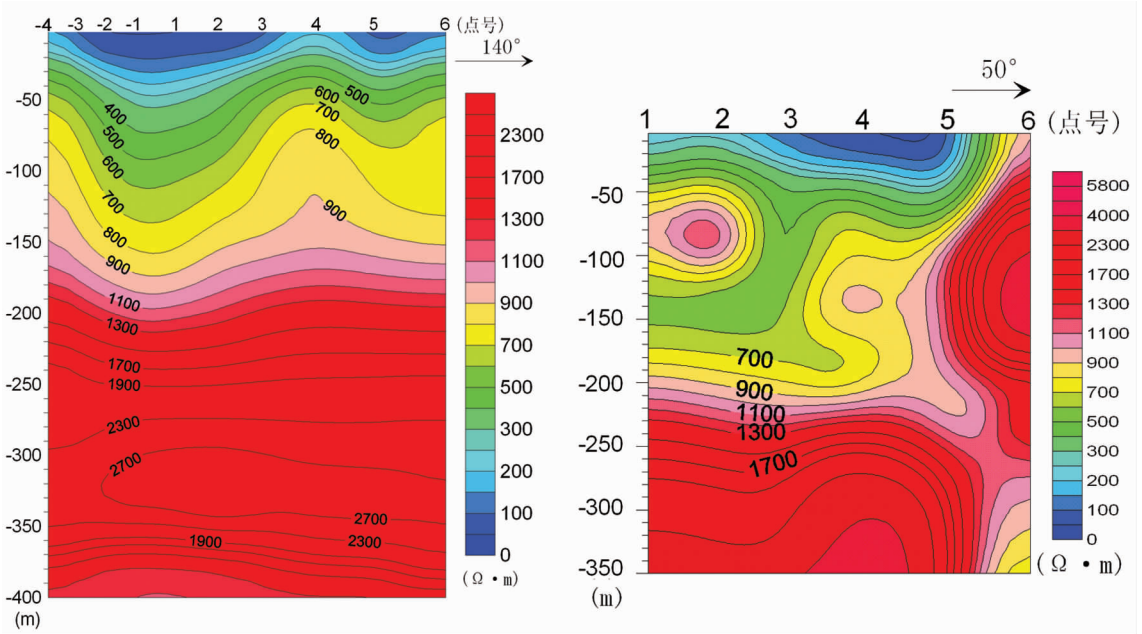


图 2 白坡村 L1、L3 线 EH-4 电磁测深 2D 反演电阻率断面图

Fig.2 EH-4 electromagnetic sounding 2D inversion resistivity section along L1, L3 line of Baipo Village

(Zb<sub>dn</sub>),大部分在碳酸盐岩区域。0~30 m 低电阻率范围平稳,起伏不大,主要为地表新近系砾石粘土。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。根据地层岩性,L2 测线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。一般情况下,水动力作用明显,含水条件好电阻率低,反之则高。

根据这几条剖面综合推断,划分了 3 个碳酸盐岩区域:C 区为强溶蚀发育带,电阻率 500~1000 Ω·m;B 区为中溶蚀发育带,1000~1300 Ω·m;A 区为弱溶蚀发育带,1300 Ω·m 以上。在溶蚀强发育带易产生破碎带、断裂,为良好的水通道及有利储水构造。另外,按照岩溶水文系统边界性质,可划分为:地表分水岭边界或弱透水岩层边界、阻水断裂边界、地下水分水岭边界和混合边界,其中前三类为固定边界,第四类为可变(或移动性)边界。从图 1 可知,砂岩区域可认为是弱透水岩层,区域水文地质条件比较有利。L1 测线相交于 L2 测线 12 号点,结合两条测线,为了防止地下水在水位低的情况下漏掉,井位布设不宜在较陡的断裂带部位。又考虑到灰岩、白云岩的厚度及分带情况,最终建议在 L1 线 13 号点布设井位 BR1,井深为 200 m 左右<sup>[8-9]</sup>(图 3)。

如图 3 所示的白坡村钻孔柱状图为后期搜集的钻孔资料。0~3 m 为第四系粉质粘土,3~220 m 为泥质灰岩、灰岩,50 m 以浅含泥质成分较多;50~100 m 岩石裂隙发育;100 m 以深溶蚀现象比较发育,可见溶沟、溶槽;接近终孔位置岩石较硬,性脆;表现了灰岩发育强弱分带现象,与 EH-4 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 150 m<sup>3</sup>/d,水位 125.5 m,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。

### 3.2 老里洞

沙山村是这次西南抗旱找水主要工作区,完成 2 条 EH-4 电磁测深剖面。为了更好地总结西南抗旱找水工作经验,8 月份又在沙山村、朱家寨完成 3 条 EH-4 电磁测深剖面(图 4)。

沙山村地层为石炭系岩关阶(C<sub>1Y</sub>)岩性主要为灰色鲕状灰岩,夹少量白云岩;泥盆系双阶段(D<sub>2ds</sub>)岩性主要为灰岩夹砂岩、泥质页岩;泥盆系南盘江段(D<sub>2dn</sub>)岩性主要为灰岩、白云岩,岩溶较发育,漏斗、洼地较多。朱家寨地层为岩性主要为泥盆系石关山组(D<sub>3s</sub>),浅灰色厚层状白云岩夹灰岩;泥盆系一打得组(D<sub>3Y</sub>),深灰色灰岩、白云岩夹硅质灰岩。

#### 3.2.1 沙山村

LR2 为抗旱期间施工钻孔,施工至 50 m 时遇

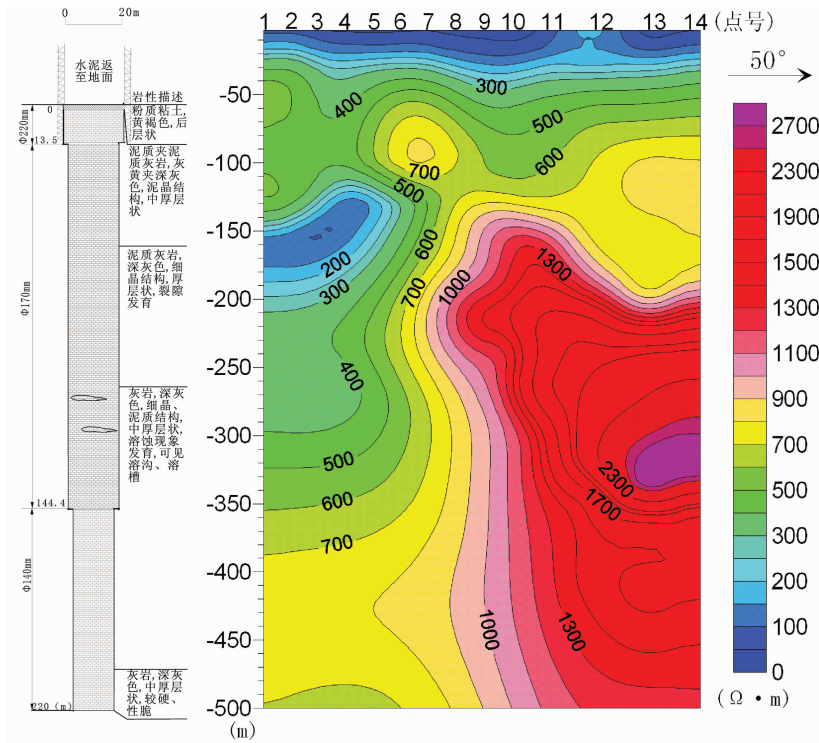


图3 白坡村钻孔柱状图、L2线EH-4电磁测深2D反演电阻率断面图

Fig.3 Drilling histogram, EH-4 electromagnetic sounding 2D inversion resistivity section along L2 line of Baipo Village

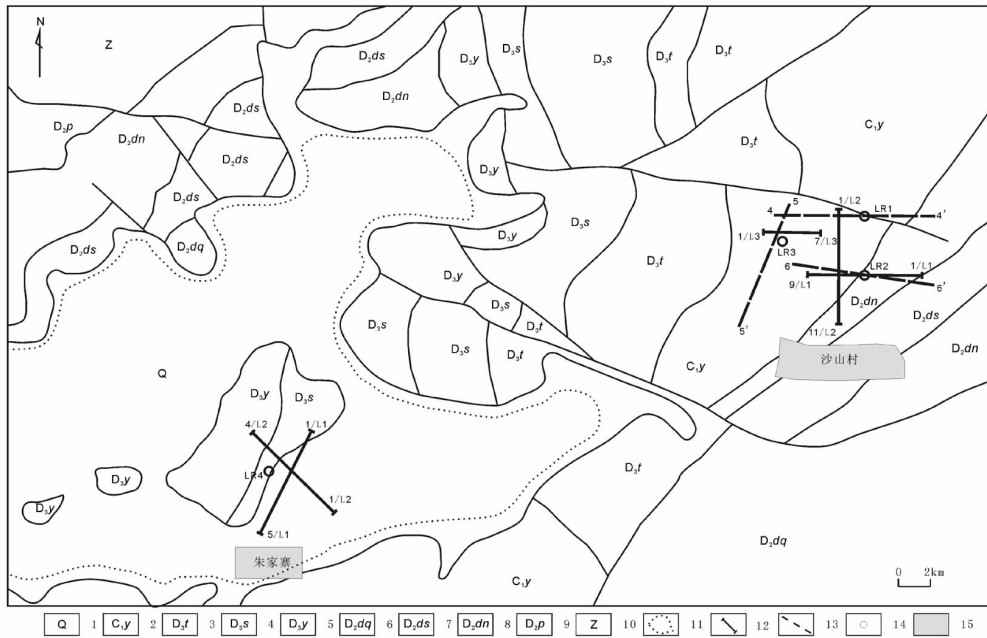


图4 老里洞水文地质条件图

1—第四系;2—石炭系下统岩关阶;3—泥盆系上统驼山组;4—泥盆系上统石关山组;5—泥盆系上统一打得组;6—泥盆系中统曲靖段;7—泥盆系中统双阶段;8—泥盆系中统南盘江段;9—泥盆系中统坡脚组;10—震旦系;11—岩溶槽谷;12—电磁测深剖面;13—超高密度电阻率剖面;14—孔位;15—村庄

Fig.4 Hydrogeological conditions of Laolidong

1—Quaternary; 2—Lower Carboniferous Yanguan Stage; 3—Upper Devonian Tuoshan Formation; 4— Upper Devonian Shiguanshan Formation; 5— Upper Devonian Yidade Formation; 6—Middle Devonian Qujing Member; 7— Middle Devonian Qujing Member; 8— Middle Devonian Nanpanjiang Member; 9— Middle Devonian Pojiao Formation; 10— Sinian; 11—Krst trough; 12— Sounding profile; 13—High density resistivity profile; 14—Hole; 15— Village

到溶洞充填物,继续施工至 90m 时,溶洞未揭穿。进行试抽水,抽水后水量较小,之后决定做物探工作,进行重新选孔。物探工作主要做了 EH-4 电磁测深、超高密度电阻率、激电测深。

如图 5 所示,L1 测线电阻率呈现三层特征,穿过的地层岩性主要为砂泥岩、灰岩和白云岩。0~70 m 电阻率小于 200  $\Omega \cdot m$ , 推测为第四系粘土层;中部电阻率为 300~1000  $\Omega \cdot m$ ,推测为灰岩、白云岩溶蚀发育带;剖面底部电阻率比较大,推测为致密灰岩,但等值线整体表现平稳,没有明显的破碎、断裂带和溶蚀洞<sup>7</sup>。

66' 测线,方向与 L1 测线大致相同,8~50 m 电阻率为 250~550  $\Omega \cdot m$ ,表示第四系不发育或基岩顶板埋深较浅。50~90 m 整条剖面为条带状低电阻率,根据地形地貌特征,在沙山村南部高地发现多出落水洞、天窗现象,推断原来形成的岩溶管道被来自高地的粘土泥质等物充填。且在剖面中部 378 m 处,LR2 钻孔资料也显示有泥质充填物(图 6)。

L2 测线,电阻率表现为北低南高现象。1~6 点 50 m 以深为明显低阻变化,且分带发育,与 L2 平行的 55' 测线对应部分也表现为低阻,推断含岩溶水。6~11 点深部电阻率高、闭合好,与 L1 测线表现相似,也呈现三层特征,为岩溶弱发育或不发育。综合

分析,在 L2 测线 2 点布设井位,有一定成井的可能性。后因施工问题,决定在 LR3 位置开钻,终孔 227.5 m,经抽水试验分析该井水温 26 $^{\circ}C$ ,水量 6 m<sup>3</sup>/d。可以说,该井没有达到成井要求的标准,可以示为干孔。

超高密度电阻率剖面 44' 测线,电阻率整体表现平稳,没有大的起伏。上部为低阻,下部为高电阻率值(图 7)。早期施工的现用供水井 LR1 位于 44' 测线 420 m 处,该处电阻率等值线稀疏,且上下部分敞开,根据井 LR1 的地质情况可相互验证,说明超高密度电阻率法在浅部相当有效。可以推断该处地质体不完整,下部有水源通道的可能性。L3 测线为 8 月份补做的 EH-4 测线,与 44' 测线小点方向有一段投影重合,其电阻率整体特征与 44' 测线表现相似,中部高两边低,分带均不明显,电阻率等值线完整,推断灰岩发育较弱或不发育(图 8)。据 LR3 钻孔资料,24.9~91.4 m 为灰色灰岩,岩溶中等发育;91.4~227.5 m 为灰色灰岩,岩溶不发育。综合分析,也就解释了钻孔 LR3 水量小或无含水的原因<sup>8</sup>。

### 3.2.1 朱家寨

L1 测线,大致可分为 3 层。上部电阻率小于 400  $\Omega \cdot m$ ,推测为第四系岩层;中部电阻率为 400~1600  $\Omega \cdot m$ ,推测为白云岩、灰岩溶蚀强发育带,厚

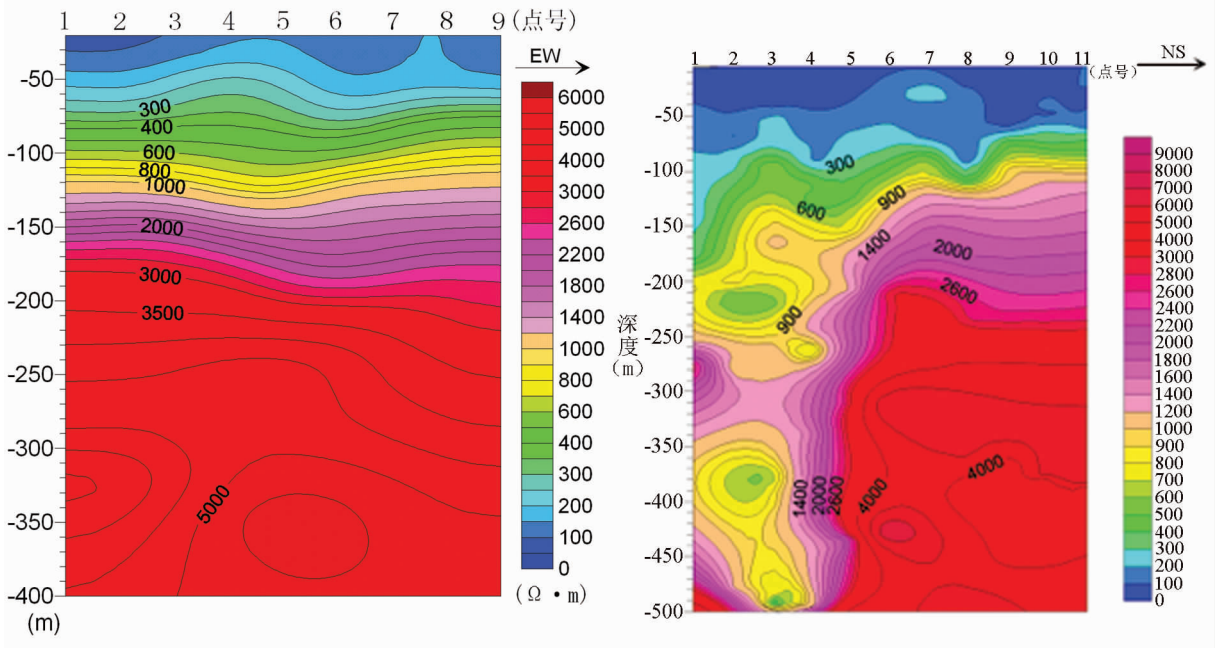


图 5 沙山村 L1、L2 线 EH-4 电磁测深 2D 反演电阻率断面图

Fig.5 EH-4 electromagnetic sounding 2D inversion resistivity section along L1, L2 line of Shashan Village

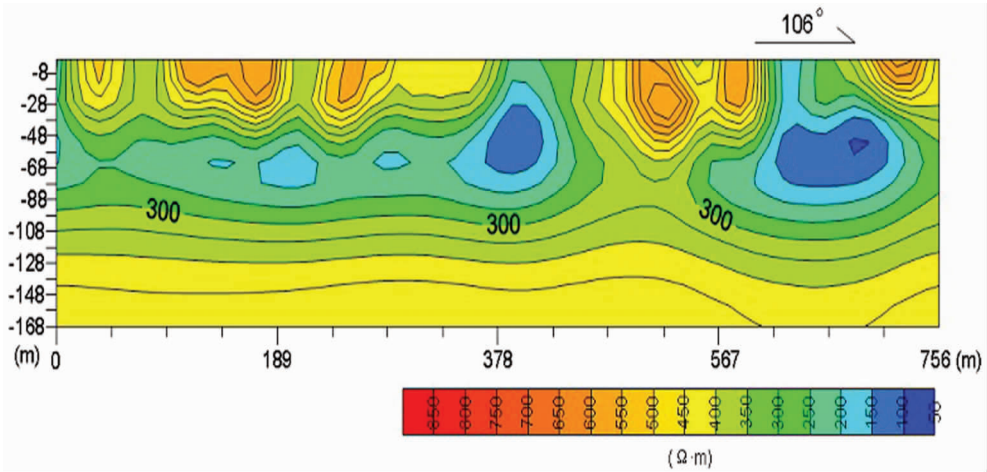


图6 66'线高密度电阻率断面图(据水文地质环境地质研究所资料)  
 Fig.6 High-density resistivity section along 66' line (from data provided by Institute of Hydrogeology and Environmental Geology)

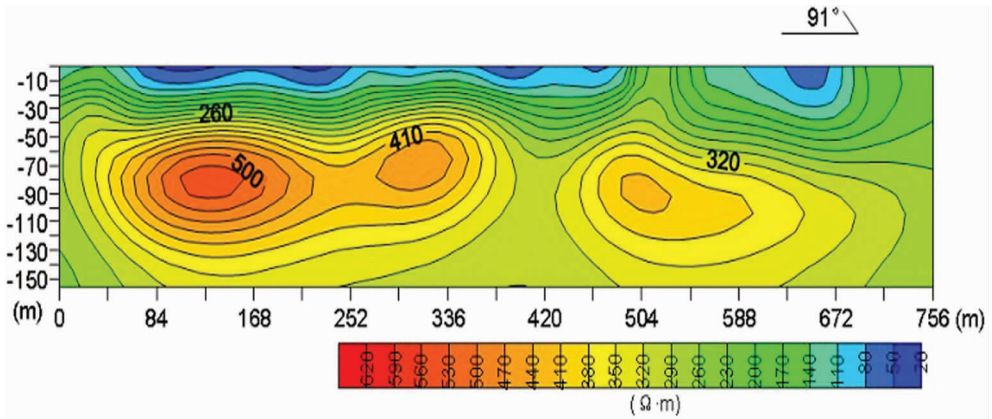


图7 44'线高密度电阻率断面图(据水文地质环境地质研究所资料)  
 Fig.7 High-density resistivity section along 44' line (from data provided by Institute of Hydrogeology and Environmental Geology)

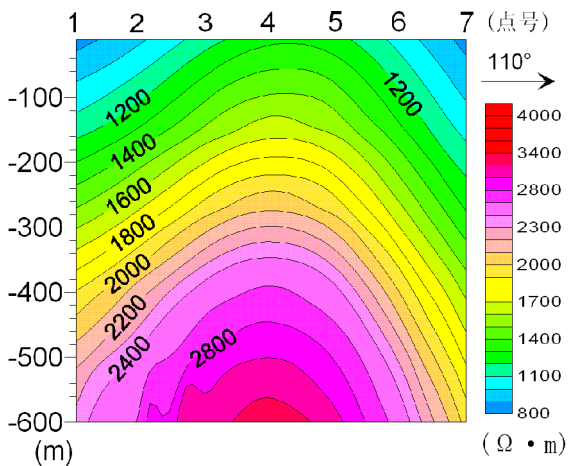


图8 沙山村 L3 线 EH-4 电磁测深 2D 反演电阻率断面图  
 Fig.8 EH-4 electromagnetic sounding 2D inversion resistivity section along L3 line of Shashan Village

度约 110 m;底部电阻率比较大,推测为致密白云岩、硅质灰岩。电阻率等值线在 1~3 点 150~600 m 范围发生明显畸变,反映岩溶构造发育,规模较大。L2 测线,电阻率表现向下不封闭形态。1~3 点为明显低阻变化,3~4 点电阻率增高,L1 测线高阻特征相吻合。

以前布设施工的井位 LR4 就位于 L1 测线 3 点靠北 30 m 处,井深 120.64 m,表层为第四系粘土层,之下为岩溶含水层,溶蚀裂隙发育,出水量 1920 m<sup>3</sup>/d(图 9)。

总体来看,朱家寨位于建水岩溶断陷盆地的西南部,处于盆地边缘一岩溶槽谷的出口地段。该槽谷四周属岩溶峰丛洼地地貌,漏斗非常发育,易形成落水洞。利用 EH-4 电磁测深,可以推断完整、不发育的岩体阻挡地下水,断裂、破碎带成为岩溶水赋存空间。

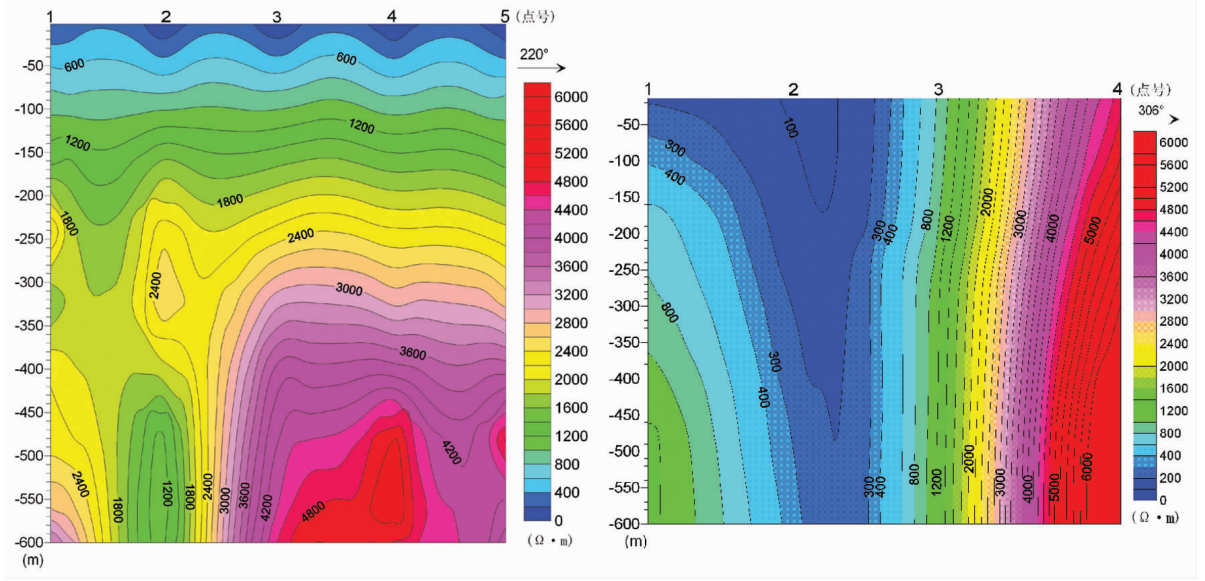


图 9 朱家寨 L1、L2 线 EH-4 电磁测深 2D 反演电阻率断面图  
 Fig.9 EH-4 electromagnetic sounding 2D inversion resistivity section along L1, L2 line of Zhujiashai Village

从水文地质资料分析,老里砦的朱家寨、沙山村都属于地下水的径流区,两地距离不远,但地层有所不同。通过扩大工作范围,在沙山村西北方向进行地下水勘查比较有前景<sup>[8-9]</sup>。

### 3.3 对比分析

从以上实例分析可以看出,利用物探手段找水,首先要取决于区域水文地质等先决条件。如白坡村 BR1 所在地区为砂岩、碳酸盐岩互层,砂岩与碳酸盐岩存在电性上的差异,可以作为很好的分界线。碎屑岩层起着相对隔水和溶蚀边界的作用,阻碍了地下水的循环,降低了水动力强度,致使岩溶发育较弱。老里砦地区主要为碳酸盐岩,且地质、地貌为岩溶峰丛洼地,属于地下水的迳流区,具备物探工作的前提。其次从物探成果推断来说,白坡村电阻率剖面反映地质界面明显,具有地质体破碎、岩溶强发育带,而老里砦沙山村的 EH-4 电磁测深和超高密度电阻率剖面只能勉强或不能很好地反映良好的地下水赋存条件。因此在沙山村布置的井位成功率不是很大<sup>[9]</sup>。

## 4 结论与建议

EH-4 电导率成像系统能划分电性界面、确定破碎带位置、评价地下水矿化度,可高分辨率的电阻率成像。每种物探方法都有自己的“特长”,能解决特

定的问题,但也存在很多不足之处。西部地区地下水资源紧缺,水文地质条件复杂,物探找水难度大。单一物探方法已很难满足。在该地区开展水文地质物探工作,必须在掌握地质条件的基础上,有针对性地选择综合物探技术方法才能取得良好的效果。

众所周知,物探结果仅是地层物性层空间分布特性的反映,解释结果是多解性的。需要根据物性参数、地质条件及地质任务选择不同方法组合,提出较优的地下水勘查模式,建立合理的地质-地球物理模型,从而提高物探地质解释的程度,使解决地质问题的能力得到提高。

此次抗旱找水打井时间紧、任务重,而且工作区域有限,在短时间内进行靶区优选和精确定位存在一定困难。因此,为了更有效地勘查、保护、开发利用地下水资源,建议在缺少地区建立地下水勘查立体模式,提高综合勘查手段,实行地下水勘查常态化,并建立地下水勘查钻孔布置数据库。同时,还需要联合其他部门对地下水合理开发利用。

**致谢:**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;工作中碰到的技术等问题,也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及其他人员的无私帮助,在此一并表示感谢。



## 参考文献 (References):

- [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.  
Cao Fuxiang, Yin Bingxi, Zhu Qingjun. The application of the conductivity imaging system to groundwater investigation in Western China[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 29(4):323-325(in Chinese with English abstract).
- [2] 郭建强, 薛忠岐. 地球物理技术在地下水资源勘查中的作用[C]//严重缺水地区地下水勘查论文集:第2集. 2004.  
Guo Jianqiang, Xue Zhongqi. Geophysical exploration in the role of groundwater resources[C]// Proceedings of groundwater exploration serious water shortage: Episode 2. 2004(in Chinese).
- [3] 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.  
Cai Yunsheng, Zhang Baohua. The application of a few electrical method instruments in geologic prospecting [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(5):72-77(in Chinese with English abstract).
- [4] 武毅, 遥感、物探、钻探技术在西部严重缺水地区地下水勘查中的集成化研究. 2006.  
Wu Yi. Remote sensing, geophysical exploration, drilling technology, a serious water shortage in the western region of integrated groundwater exploration study, 2006.
- [5] 武毅, 郭建强, 曹福祥, 等. 多种物探技术勘查宁南深层岩溶水的组合试验[J]. 物探与化探, 2002, 26(2):113-117.  
Wu Yi, Guo Jianqiang, Cao Fuxiang, et al. The combination of varied geophysical techniques in exploring deep-seated karstic water of South Ningxia[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(2):113-117(in Chinese with English abstract).
- [6] 武毅, 郭建强, 朱庆俊. 宁南深埋岩溶水勘查的物探新技术 [J]. 水文地质与工程地质, 2001, 2:45-48.  
Wu Yi, Guo Jianqiang, Zhu Qingjun. New techniques application in the exploration of Ningnan deep-seated karst waters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 2:45-48 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孙建平, 曹福祥. 西部缺水地区地下水勘查物探技术方法优化研究[J]. 水文地质与工程地质, 2006, 5:123-125.  
Sun Jianping, Cao Fuxiang. Study on the comprehensive geophysical groundwater prospecting techniques for area of water shortage in Western China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 5:123-125(in Chinese with English abstract).
- [8] 李富, 王永华, 吴文贤. EH-4 电磁成像系统在隐伏构造探测中的应用[J]. 中国地质, 2009, 36(6):1375-1381.  
LiFu, Wang Yonghua, Wu Wenxian. The application of the EH-4 electromagnetic imaging system to the detection of concealed structure[J]. Geology in China, 2009, 36(6):1375-1381(in Chinese with English abstract).
- [9] 王宇. 西南岩溶石山区断陷盆地岩溶水系统分类及供水意义[J]. 中国地质, 2003, 30(2):220-224.  
Wang Yu. Classification of karst water systems in karst down-faulted basins of the southwestern China karst region[J]. Geology in China, 2003, 30(2):220-224(in Chinese with English abstract).
- [10] 武毅, 朱庆俊. 浅谈地下水地球物理勘查技术几个问题[J]. 水文地质与工程地质, 2004, 3:111-114.  
Wu Yi, Zhu Qingjun. On several issues of groundwater geophysical prospecting techniques[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 3:111-114(in Chinese with English abstract).

## Geophysical water exploration methods in stone mountain karst areas and case analysis

JIAO Yan-jie, WU Wen-xian, YANG Jian, LI Fu, YANG Jun-bo

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China)

**Abstract:** Water shortage in southwest China constitutes a serious threat to local people's living water, and restricts the economic development of this region. Therefore, the reasonable choice of integrated geophysical methods and technologies for finding underground water and improving the efficiency of groundwater exploration on the basis of the hydrogeological characteristics of southwest China constitutes a very important problem faced by hydrogeologists. This paper describes the basic principles, technical characteristics and application of the electrical conductivity imaging system and high density resistivity method, exemplified by application practice of groundwater exploration in karst mountain areas. The comparative analysis, the delineation of water areas in the karst zone, the determination of well locations all show that the method is effective. This paper presents suggestions for groundwater exploration in Southwest China and utilization of groundwater resources in future.

**Key words:** karst mountainous areas; groundwater exploration; conductivity imaging; high density resistivity

**About the first author:** JIAO Yan-jie, male, born in 1978, engineer, mainly engages in geophysical prospecting and geological prospecting; E-mail: ajiaocd@gmail.com.