

doi: 10.11720/wtyht.2020.1575

李望明, 易强, 刘声凯, 等. 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, 2020, 44(6): 1294–1300. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1575>

Li W M, Yi Q, Liu S K, et al. An example of DC method for water exploration in the karst mountain water shortage area of northwest Hunan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1294–1300. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1575>

湘西北岩溶石山缺水地区直流电法找水实例

李望明, 易强, 刘声凯, 肖利权, 李俊

(湖南省地质矿产勘查开发局 四一六队, 湖南 株洲 412003)

摘 要: 湘西北岩溶石山缺水地区地形条件复杂, 电磁干扰较强, 在地下水勘查工作中, 优先选用抗干扰能力较强的直流电法较为适宜。工程实践表明: 在地势相对较缓且勘探深度相对较浅(0~150 m 左右) 时, 采用小极距视电阻率联合剖面法+高密度电阻率法; 在地形条件较差或勘探深度相对较深(0~400 m 左右) 时, 采用小极距联合剖面法+三极激电测深法, 并进行适当的反演与解释, 既可提高工作效率又解决了实际问题, 取得了较好的找水效果。

关键词: 直流电法; 找水; 岩溶地区; 强电磁干扰; 湘西北

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1294-07

0 引言

湘西北岩溶石山地区位于湖南省西部, 属云贵高原东缘、武陵山脉东北部, 有 7 个国家级深度贫困县位于此区域, 降水极不均匀; 区内碳酸盐岩广布, 属于典型的岩溶石山缺水地区, 解决用水困难已成为当地政府和群众的心头大事, 也是作为国家级贫困县打赢脱贫攻坚战的重要保障和必然要求。该地区地形地貌主要分为两类: 一类是侵蚀溶蚀型低山溶丘洼地、溶丘谷地地貌, 洼地、落水洞、溶洞等岩溶形态发育, 山丘较圆滑; 另一类是溶蚀构造型中低山急陡坡峰丛峡谷地貌, 山峰尖丛, 地形坡度较陡, 常形成悬崖陡壁, 沟谷深切狭窄, 呈“V”型或“U”型沟谷^[1-2]。近年来国家加大了对湘西北农村电网改造力度, 新建了大量 10 kV 电力线及其变电站, 电磁干扰明显增多。因此, 湘西北岩溶石山缺水地区地形条件复杂、电磁干扰较强, 在地下水勘查时, 优先选用抗干扰能力较强的直流电法较为适宜。笔者针对湘西北岩溶石山缺水地区不同地形地貌及地质条件特征, 采用视电阻率联合剖面法、高密度电阻率法、三极激电测深等直流电法, 并进行适当的反演与解释, 取得了较好的找水效果。

1 方法与技术

1.1 方法依据

湘西北岩溶石山缺水地区地层主要有寒武系、奥陶系、第四系等; 寒武系和奥陶系为海相碳酸盐岩建造, 岩性主要为灰岩、白云岩、泥质灰岩; 第四系主要为冲洪积、坡积松散堆积物。

由《永顺幅 1:20 万区域水文地质普查报告》测井数据可知: 灰岩、白云岩电阻率较高, 变化范围为 490~3 800 $\Omega \cdot m$, 平均值为 2 590 $\Omega \cdot m$; 泥质灰岩次之, 变化范围在 180~1 500 $\Omega \cdot m$, 平均值为 583 $\Omega \cdot m$, 但它们都与地下水(<100 $\Omega \cdot m$) 的电阻率差异明显, 这就为采用直流电法找水提供了地球物理依据; 湘西北岩溶石山缺水地区主要是探测岩溶裂隙水和断裂构造水, 对应地电模型为高阻中找球状或板状低阻; 因此, 采用视电阻率联合剖面法、高密度电阻率法、激电测深法找水依据充分。

1.2 直流电法方法技术

1.2.1 视电阻率联合剖面法

视电阻率联合剖面法是寻找裂隙型地下水常用的、效果显著的方法, 但容易受地形影响, 并且在急陡坡峰丛峡谷地貌中, “无穷远”电极的距离往往难

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-06-19

作者简介: 李望明(1988-), 男, 2010 年毕业于中南大学, 工程师, 主要从事水工环物探方法研究与应用工作。

万方数据

以达到 AO 的 5 倍以上;因此,在湘西北岩溶石山缺水地区常采用小极距 ($50\text{ m}<AO<120\text{ m}$) 的联合剖面法,当极距减小时可减弱地形影响,且“无穷远”电极的距离更容易满足规范要求^[3-4]。

湘西北岩溶石山地区充填第四系黏土的浅部溶沟溶槽较发育,小极距联合剖面法勘探深度较浅,对岩溶裂隙带和浅部溶沟溶槽均有异常反映;为了更好地区分上述异常,一方面应平行布置多条测线,连续性较好的异常往往为断层或岩溶裂隙带的反映,局部测线的异常往往为溶沟溶槽的反映,另一方面在同一测线采用其他直流电法(如高密度电法或激电测深法)探测以进行对比、验证。

1.2.2 高密度电阻率法

高密度电阻率法具有许多优点^[5],但其勘探深度一般较浅(小于 150 m),而湘西北岩溶石山缺水地区地下水位埋深变化较大,地表不均匀,局部基岩浅埋或裸露,高密度视电阻率拟断面图易形成“八”字型干扰,因此,测量点距选择相对较大,一般为 $10\sim20\text{ m}$,工作装置主要采用温纳或施伦贝谢装置,对高密度电法数据的坏点应进行剔除,然后采用最小二乘法进行反演^[6-8];解释推断时应充分了解地下水位埋深,选择的异常深度应在地下水位以下。

1.2.3 激电测深

激发极化法是利用含水岩石在人工电场作用下产生的激电效应及其时间特性寻找地下水,由于这种方法受地形影响小,所以最适用于山区找水。激电测深装置主要为对称四极和三极装置,在测线两端可进行人工跑极时,一般采用对称四极装置,而湘西北岩溶缺水地区,地势陡峻或一侧为悬崖、峡谷,往往采用三极装置。为使勘探深度、数据信息量和工作效率得到兼顾,三极激电测深采用人工跑极和阵列式观测相结合,即供电采用人工跑极,测量采用多通道阵列式观测方式,野外获得高质量数据后进行数据预处理,然后采用最小二乘意义下的变阻尼共轭梯度法进行二维反演^[9-13],获得反演断面图进行解释推断。

综上所述,在湘西北岩溶石山缺水地区进行物探工作,在地势相对平坦且勘探深度相对较浅($0\sim150\text{ m}$ 左右)的地方采用小极距视电阻率联合剖面法+高密度电阻率法找水效果较理想,在地形条件较差或勘探深度相对较深($0\sim400\text{ m}$ 左右)且电磁干扰较强的地方采用小极距联合剖面法进行普查,然后选取异常较好的测线(≥ 1 条)进行三极激电测深法效果较佳。

万方数据

2 应用实例

2.1 联合剖面法+高密度电法找水实例

湘西北 A 村为干旱缺水村,地形地貌属于溶蚀构造型中低山急陡坡峰丛峡谷,村子建在 NE 向的沟谷中,沟谷较窄,两侧为急陡坡峰,村子上空有一组 10 kV 电力线及少量 220 V 民用电力线穿过(图 1)。根据地质资料,该村出露地层岩性主要为寒武系白云岩、白云质灰岩,地下水位埋深约 50 m ,该村附近发育一条 NNW 向压性断层,富水性较弱。找水思路为:受构造应力影响,该断层两侧岩溶裂隙可能相对发育,为此,垂直断层并沿 NE 向沟谷布置了 2 条物探测线(2 线、4 线),长度均为 600 m 。

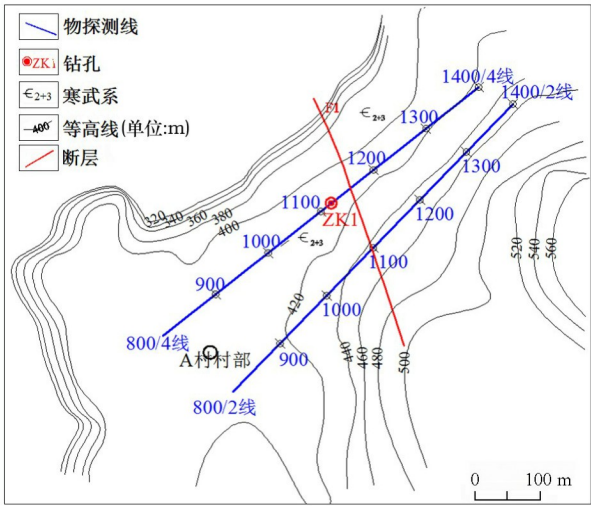


图 1 A 村平面示意
Fig.1 Plan of village A

根据测区的地形、地质条件,选择了抗电磁干扰较强的小极距联合剖面法+高密度电阻率法,在同一条测线上用两种方法进行探测,使用重庆奔腾数控研究所研制的 WDJ-4 型多功能激电仪,联合剖面法极距 $AO=100\text{ m}$,点距 10 m ,高密度电阻率法点距 10 m ,采用温纳装置,采集层数为 14 层。

图 2 为该村 4 线的物探成果图。从图中分析:联合剖面曲线在 950 点、 1040 点呈相对低阻异常、在 1120 点附近呈正交点异常,高密度电阻率拟断面在 1120 点附近呈低阻“U”字型异常,但断面图上“八”字型干扰较明显;采用最小二乘法进行反演,得到高密度电阻率反演断面图。综合分析: 960 点附近浅部岩溶裂隙发育,发育深度与地下水位深度(50 m)相当,推断其充填黏土; 1040 点附近为浅部溶沟溶槽; 1120 点附近为岩溶裂隙发育,发育深度大于 120 m ,位于地下水位以下,推断其富水性较

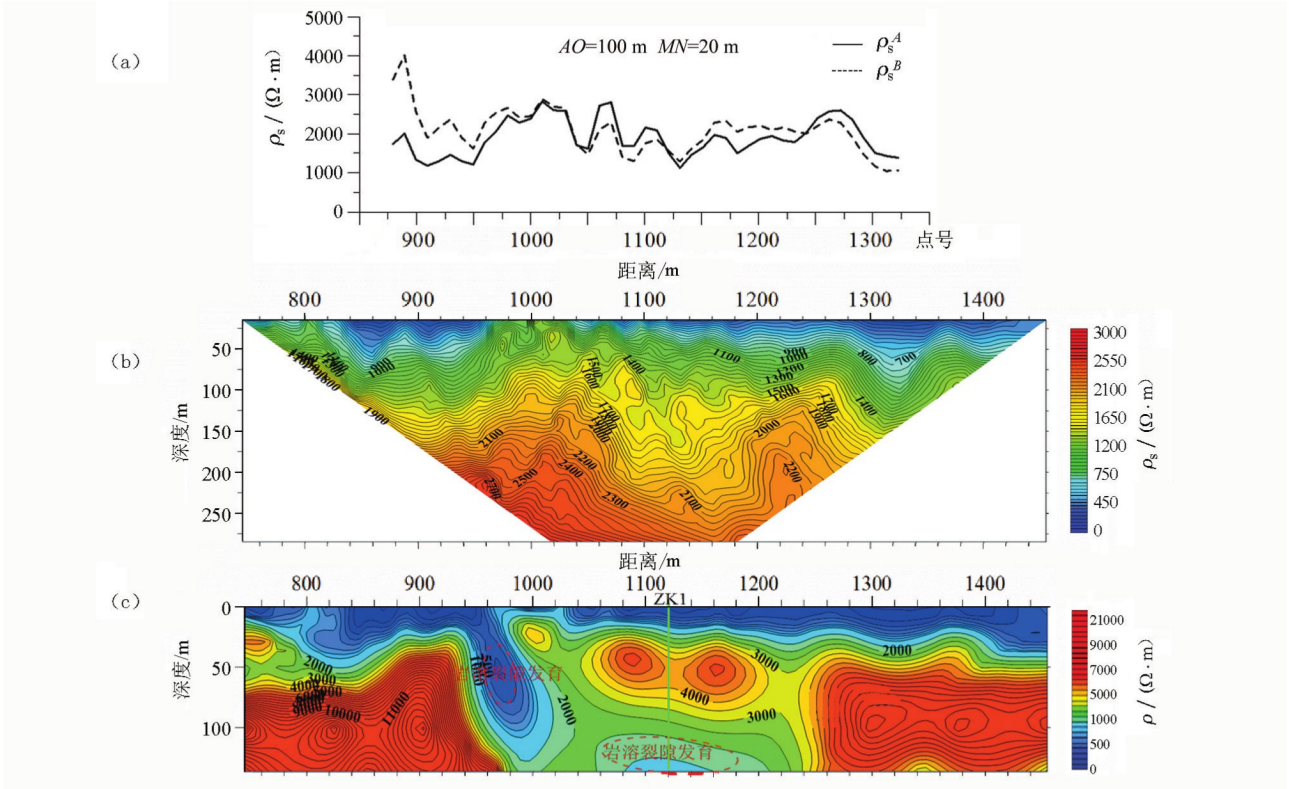


图2 A村4线联合剖面曲线(a)、高密度视电阻率拟断面(b)、高密度电阻率反演断面(c)

Fig.2 Joint profile curve(a) , high density apparent resistivity profile(b) and inversion profile(c) of village A line 4

好。因此,水文地质钻孔 ZK1 位置选择在 4 线 1120 点,经钻探验证及抽水试验;地下 122~185 m 处溶蚀裂隙发育,涌水量为 470 t/d,可解决约 3 000 人的饮水问题。

2.2 联合剖面法+三极激电测深找水实例一

湘西北 B 村为干旱缺水村,属于溶蚀构造型中低山急陡坡峰丛峡谷,该村附近有一条 NE 向沟谷,延伸长度约 4 km,沟谷东南侧为高差超过 120 m 的急陡坡峰,无法展布测线,村子上空有 10 kV 电力线及少量 220 V 民用电力线穿过,电磁干扰较强(图 3)。根据地质资料,该村出露地层岩性主要为寒武系白云岩、白云质灰岩,地下水位埋深约 15 m。地质人员推断沟谷附近发育一条 NE 向断层,找水思路为探测该断层的位置及倾向,达到间接找水目的。为此,在垂直沟谷且地形相对平坦的位置布置 2 条 NW 向测线。为了尽可能多地获取 NE 向沟谷附近的地质信息,采用了小极距联合剖面+三极激电测深法,使用重庆奔腾数控研究所研制的 WDJ4-4 型多功能激电仪,联合剖面法极距 $AO = 70\text{ m}$,三极激电测深极距为指数形式递增,最大 $AO = 410\text{ m}$ 。

图 4 为该村 6 线联合剖面法测量结果,从图中分析:联合剖面曲线在 950、1180、1260 点附近呈相对低阻异常,通过与其他平行测线对比,其中 1260

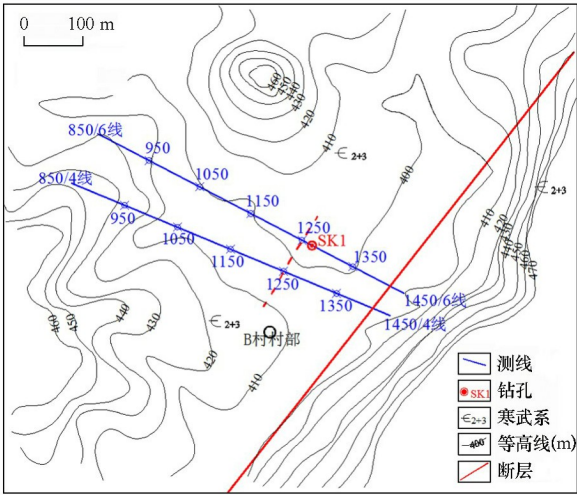


图3 B村平面示意

Fig.3 Plan of village B

点低阻异常连续性较好,因此,选取在 1260 点附近开展三极激电测深工作,图 5 为激电测深拟断面与反演断面图,图 6 为推断结果。由于三极测深视电阻率拟断面图往往易形成“挂面条”现象,而最小二乘意义下的变阻尼共轭梯度二维反演可减弱上述效应^[10-11],因此,三极激电测深解释推断时以电阻率反演断面图、视极化率拟断面图为主,其他断面图为辅。依据电阻率反演成果图推断,1260 点附近的低

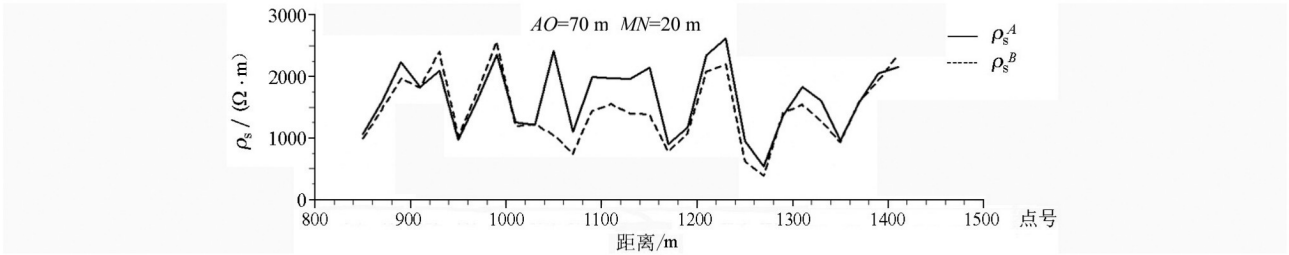


图4 B村6线联合剖面曲线
Fig.4 Joint profile curve of village B line 6

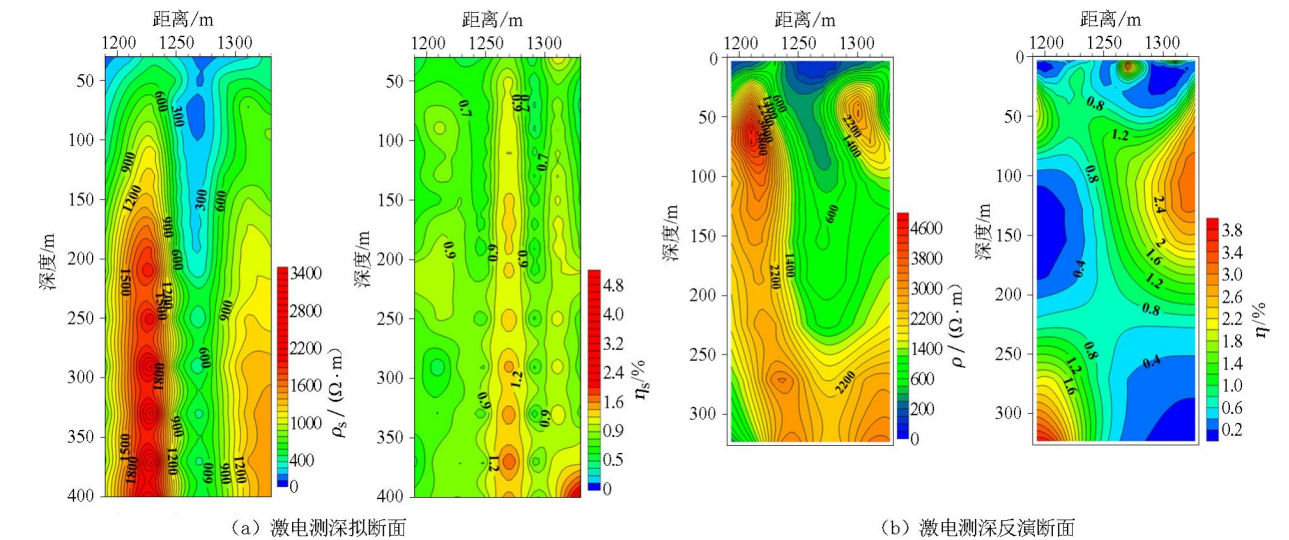


图5 B村6线三极激电测深拟断面与反演断面
Fig.5 Pseudo section and inversion section of village B line 6

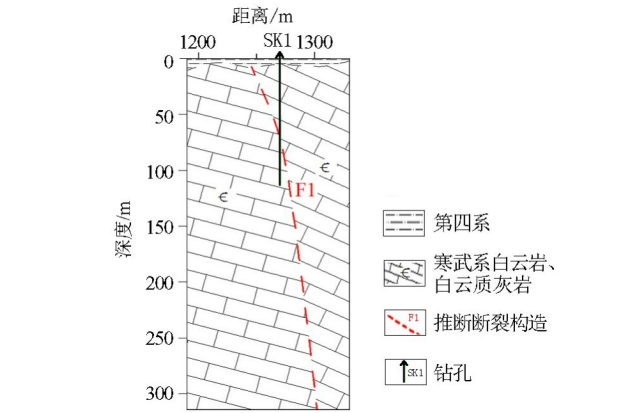


图6 B村6线地质推断结果
Fig.6 Geological inference results of village B line 6

阻异常为断层的反映,断层倾向ES(大号);依据视极化率拟断面图分析,1270点视极化率较高,推断其富水性较好。

SK1钻孔位置选定在6线1270点(断层上盘),经钻探验证,43.5~52.9 m为断裂带,52.9~98.7 m溶蚀裂隙发育,钻探至115 m后,经抽水试验涌水量为220 t/d,超过100 t/d的设计要求,选择终孔。

2.3 联合剖面法+三极激电测深找水实例二

湘西北C村为干旱缺水村,属于溶蚀构造型中低山急陡坡峰丛峡谷,地形条件较差,电磁干扰较强(图7)。根据地质资料:该村出露地层岩性主要为奥陶系灰岩、泥质灰岩,局部有志留系砂页岩覆盖于奥陶系灰岩上,地质调查资料显示该村附近有NW向断层或裂隙带。本次勘探要求出水量为1000 t/d,拟勘探深度为300 m,找水思路:探测NW向断层或裂隙带的位置及倾向,并依据视极化率比较其富水性,选择富水性相对好的位置实施钻探,从而达到找水目的。因此,沿NE向平行布置了3条测线,采用小极距(AO=110 m)联合剖面法+三极激电深法;联合剖面曲线显示3线950点高低阻梯度异常明显(图8)且连续性较好,因此选择在950点附近开展三极激电测深工作;三极激电测深最大AO=600 m,二维反演采用最小二乘意义下的变阻尼共轭梯度法。

图9为3线三极激电测深成果,从电阻率反演断面图中分析,800~950点电阻率等值线呈高、低阻层状相间,结合地质资料推断:由浅到深依次为砂页岩、灰岩、泥质灰岩、灰岩;950点附近等值线明显不连续,

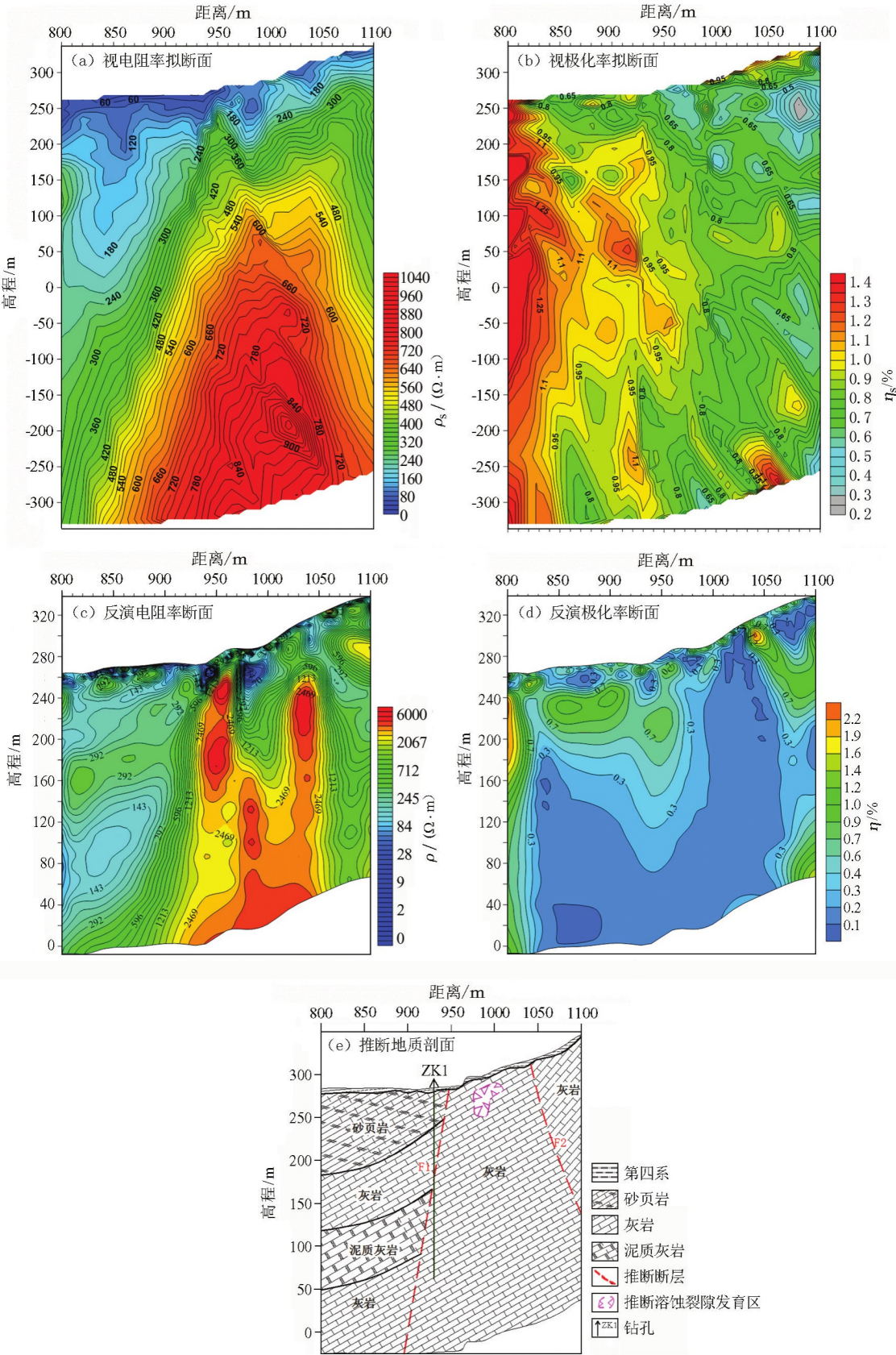


图 9 3 线三极激电测深视电阻率与视极化率拟断面、反演断面及推断地质剖面

Fig.9 3-line apparent resistivity and apparent polarization of three pole IP sounding cross section, inversion section map and geological inference map

万方数据

[5] 李金铭.地电场与电法勘[M].北京:地质出版社,2005.
Li J M. Geoelectric field and electrical prospecting[M].Beijing: Geological Publishing House,2005.

[6] 王宇玺.高密度电阻率法的主要装置特点与应用[D].成都:成都理工大学,2010.
Wang Y X.Characteristics and application of main devices for high density resistivity method [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2010.

[7] 高阳,熊华山,彭明涛,等.渝东南岩溶储水构造高密度电阻率法异常特征[J].物探与化探, 2016, 40(6): 1108-1115.
Gao Y, Xiong H S, Peng M T, et al. High density electrical prospecting anomaly analysis of water-bearing structure in karst area of southeast Chongqing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1108-1115.

[8] 陈松,余绍文,刘怀庆,等.高密度电法在水文地质调查中的应用研究——以江平圩幅为例[J].地球物理学进展, 2017, 32(2): 849-855.
Chen S, Yu S W, Liu H Q,et al. Application and research of high density resistivity method in hydrogeological prospecting-A case study on Jiangping town map [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 849-855.

[9] 葛为中,吕玉增,丁云河.梯度电测深剖面法及其应用[J].物探与化探,2011, 35(2): 206-211.
Ge W Z, Lyu Y Z, Ding Y H. The gradient sounding profile method and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 206-211.

[10] 刘海飞,柳建新,麻昌英.直流激电反演成像理论与方法应用[M].湖南:中南大学出版社,2017.
Liu H F, Liu J X, Ma C Y. Application of theory and method of DC IP inversion imaging[M].Hunan: Central South University Press, 2017.

[11] 刘海飞,阮百尧,吕玉增.直流激电测深二维反演的若干问题研究[J].物探与化探, 2007,31(1):47-50,54.
Liu H F, Ruan B Y, Lyu Y Z. Some problems concerning 2D inversion of direct current IP sounding data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 47-50,54.

[12] 柳建新,蔡盛,刘海飞,等.激发极化法测深曲线反演方法及对比分析[J].物探与化探, 2012,36(6):956-959.
Liu J X, Cai S, Liu H F, et al. A comparative analysis of the inversion methods for induced polarization sounding curve[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 956-959.

[13] 孙仁斌,楚丽霞,王宁,等.时间域激电测深二维反演在内蒙古兴和盆地贫水区找水勘查中若干案例研究[J].地球物理学进展, 2017,32(1): 387-394.
Sun R B, Chu L X, Wang N, et al. 2D inversion of IP-resistivity sounding in water exploration of Xinghe basin in Inner Mongolia [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 387-394.

[14] 杨湘生. 湘西北岩溶石山物探找水数据处理方法实例[J]. 物探与化探, 2002, 26(3): 198-202.
Yang X S. Some practical examples illustrating geophysical water exploration in karst stone hill areas of Northwestern Hunan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(3): 198-202.

[15] 任志平,李貅,赵威,等.地面核磁共振找水三维有限元数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2016,31(3): 1152-1157.
Ren Z P, Li X, Zhao W, et al. Three-dimensional finite element numerical simulation for surface nuclear magnetic resonance [J]. Progress in Geophysics, 2016,31(3): 1152-1157.

An example of DC method for water exploration in the karst mountain water shortage area of northwest Hunan

LI Wang-Ming, YI Qiang, LIU Sheng-Kai, XIAO Li-Quan,LI Jun

(No. 416 Geological Party, Hunan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhuzhou 412003, China)

Abstract: In the water shortage area of karst mountain in northwest Hunan, the terrain condition is complex and the electromagnetic interference is strong. In the groundwater exploration, the DC method with strong anti-interference capability is preferred. The engineering practice shows that, when the terrain is relatively gentle and the exploration depth is relatively shallow (about 0~150 m), the small distance combined section method of apparent resistivity + high-density resistivity method is adopted, and when the terrain condition is poor or when the exploration depth is relatively deep (about 0~400 m), the small distance combined section method of apparent resistivity and three-pole IP sounding method are used, and proper inversion and interpretation are carried out, which not only improves the working efficiency but also solves the practical problems, and achieves better water finding effect.

Key words: DC method;water exploration;karst area;strong electromagnetic interference;northwest Hunan

(本文编辑:沈效群)