

doi: 10.11720/wtyht.2022.1505

罗卫锋, 胡志方, 甘伏平, 等. 南方碳酸盐岩地区页岩气钻探井位选址中的综合物探方法应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 824-829. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1505>

Luo W F, Hu Z F, Gan F P, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in well siting for shale gas exploration in carbonate areas in east China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 824-829. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1505>

# 南方碳酸盐岩地区页岩气钻探井位选址中的综合物探方法应用

罗卫锋<sup>1</sup>, 胡志方<sup>1</sup>, 甘伏平<sup>2</sup>, 张庆玉<sup>2</sup>, 康海霞<sup>1</sup>, 张云泉<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西桂林 541004)

**摘要:** 南方碳酸盐岩地区页岩气钻探工程面临的碳酸盐岩岩溶问题突出, 因此, 钻前开展近地表地球物理勘查, 合理选择井位是十分必要的。以广西柳州市融安县桂融页 1 井井位选址为例, 综合选择高密度电阻率法、音频大地电磁法及氦气测量 3 种方法, 开展钻前井位选址研究工作, 取得良好效果。桂融页 1 井在近地表没有钻遇断层破碎带, 与综合物探解释成果基本吻合, 表明综合物探方法在南方碳酸盐岩地区页岩气勘探井位选址勘查方面是有效的。本次成果为今后类似地区钻前井位选址提供了借鉴和参考。

**关键词:** 碳酸盐岩地区; 页岩气钻探; 井位选址; 岩溶; 综合物探方法

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)04-0824-06

## 0 引言

页岩气是中国能源保障战略性矿产的重要组成部分。南方地区古生界海相页岩常分布于碳酸盐岩下部或与碳酸盐岩互层, 碳酸盐岩与页岩间互发育是南方地区的基本地质特征, 页岩气钻探工程中面临的碳酸盐岩岩溶问题突出<sup>[1-2]</sup>, 常钻遇裂缝、溶洞及断层破碎带, 出现漏失、废井、移井等问题。因此, 开展钻前物探勘查, 合理选择井位是十分必要的, 可以保障井场安全, 降低钻井工程风险。

近地表地球物理方法在高速公路、铁路、隧道、工业和民用建筑的地基勘探和寻找地热等方面得到了广泛应用<sup>[3-10]</sup>, 但是在南方碳酸盐岩地区页岩气勘探井位选址方面的应用和研究还非常薄弱。高密度电阻率法是岩溶探测最有效的方法之一<sup>[12-14]</sup>, 在浅部几十米以内具有较高的分辨率, 但是深度相对较浅。音频大地电磁法不受高层屏蔽, 对低阻层

较敏感, 探测深度大, 能探测电阻率差异较大的高、低阻不均匀体<sup>[15-17]</sup>。氦气测量不受电磁干扰影响, 能够直接探测裂隙、破碎带、溶洞等地下构造<sup>[18-19]</sup>。本文将上述 3 种方法综合应用于钻前井位选址工作, 相互补充, 相互印证, 提高解释的准确性, 取得了良好的效果。

## 1 方法原理

### 1.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法以地质体的电性差异为基础, 研究在施加电场的作用下, 地下传导电流的变化分布规律, 推断地下具有不同电性差异的地质体或构造的空间展布特征。与常规电阻率法相比, 高密度电阻率法具有以下几方面的特点: ①集中了常规电剖面法和电测深法的特点, 不仅观测地下横向电性变化情况, 还观测一定深度范围内纵向电性的变化; ②电极布设一次性完成, 减少因电极布置而产生的

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“渝黔—滇桂地区页岩气战略选区调查”(DD20190108)

第一作者: 罗卫锋(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事非地震资料处理解释及方法研究工作。Email: luoweifeng\_08@163.com

通讯作者: 胡志方(1966-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事石油地质综合研究工作。Email: yjyzshzf@163.com

故障和干扰;③能有效进行多种电极排列方式的扫描测量,因而可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地质信息;④野外数据采集实现了自动化或半自动化,不仅采集速度快,而且避免了由于手工操作出现的错误;⑤与传统的电阻率法相比,该方法成本低、效率高,信息丰富,解释方便,勘探能力显著提高。

### 1.2 音频大地电磁法

音频大地电磁法以天然电磁场信号作为场源,它主要由太阳风与地球磁层、电离层之间复杂的相互作用,以及雷电活动等天然交变电磁场叠加而成<sup>[8]</sup>。该方法以卡尼亚大地电磁理论为依据,假设场源位于高空,地面电磁场为平面电磁波,地下介质在水平方向是均匀的,电磁波在地下介质传播中会衰减,振幅衰减到地面振幅的 $1/e$ 的深度为趋肤深度,计算公式为:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}, \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为视电阻率, $\mu$ 为磁系数, $\omega$ 为角频。

因此,观测天然电磁场的时间序列信号,将时间序列数据转化为频率域数据,用不同频率的阻抗计算视电阻率,便可达到测深目的。视电阻率计算公式为:

$$\rho = \frac{1}{2f\mu} |Z|^2, \quad (2)$$

式中: $f$ 为频率; $Z$ 代表介质阻抗, $Z = E_x/H_y$ 。

音频大地电磁法具有如下特点:①利用天然场源,无近场效应、过渡带效应影响;②仪器轻便,适用于地形、植被发育的山区;③观测频带宽,从 $0.1 \text{ Hz}$ 到 $100 \text{ kHz}$ ,探测深度可以从几米至 $2000 \text{ m}$ ;④张量观测,采用 $\text{TM}$ 、 $\text{TE}$ 两种模式观测,能较真实地反映地质规律。

### 1.3 氦气测量

氦气测量法是使用测氦仪测量土壤、水及大气中氦气浓度,通过研究氦气浓度的分布特征来解决地质问题的一种放射性测量方法。地下深处产生的氦气通过岩石节理、裂隙向上运移,进入到地表覆盖层,在断裂破碎带、溶洞、采空区上方富集,形成放射性氦异常区域,而在其附近地段氦含量明显较少。因此,根据地表探测的氦气异常,可以分析确定溶洞、采空区以及断裂破碎带的位置与范围。氦气测量对观测场地的适应性很强,不受地电、地磁影响,具有直接、轻便、省时、价廉等优点。

## 2 应用实例

### 2.1 区域地质地球物理特征

研究区位于桂中拗陷柳城斜坡带上(图1),行政区划隶属于广西柳州市融安县。

桂中拗陷为晚古生代海相沉积拗陷,可划分为8个次一级构造单元:柳城斜坡、宜山凹陷、马山凸起、红渡凹陷、柳江凸起、象州凹陷,呈现“三凹两凸一斜坡”的构造格局(图1)。地层从老到新分别为元古宙变质岩、古生界寒武系、泥盆系、石炭系以及少量第四系,泥盆系主要分布于桂中拗陷东部和北部、南部边缘处,中部有零星出露,呈角度不整合于寒武系之上,石炭系在区内分布广泛,与下伏泥盆系地层整合接触,第四系为陆相碎屑堆积。

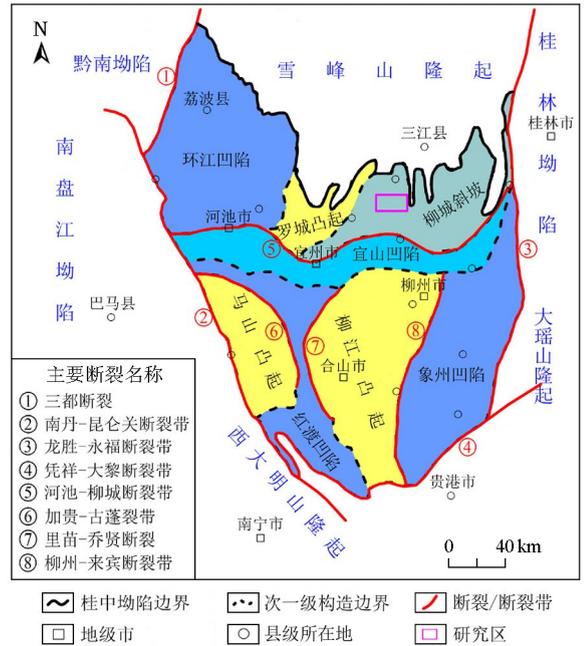


图1 桂中拗陷构造区划

Fig.1 Structural zoning map of Guizhong Depression

表1列出了研究区主要岩石的电性统计结果。第四系在区内分布较少,以黏土为主,电阻率值一般在 $1 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,呈现低阻特征;石炭系灰岩、白云岩电阻率值在 $9000 \sim 12000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,泥盆系灰岩电阻率值在几百~几千欧姆米之间。石炭系、泥盆系的灰岩、白云岩是研究区岩溶地貌发育的主要物质基础,整体呈现高阻特征。根据以往钻井资料分析,桂中拗陷钻井发生漏失井深一般为 $420 \sim 873 \text{ m}$ ,见岩溶的层系为上泥盆统、石炭系,岩性为灰岩。灰岩、白云岩中断层破碎带、溶洞及裂隙被地下水或第四系黏土充填,相对围岩呈现低阻特征,这为

表1 研究区岩石物性统计

Table 1 Statistical table of rock physical properties in the study area

地层	符号	岩性特征	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
第四系	Q	黏土	1~100
上石炭统	C <sub>2</sub>	灰岩、白云岩	939~11692
下石炭统	C <sub>1</sub>	泥质灰岩、泥页岩	246~1370
上泥盆统	D <sub>3</sub>	硅质岩、扁豆状灰岩	366~6441
中一下泥盆统	D <sub>2</sub> -D <sub>1</sub>	泥灰岩、泥质页岩	49~4925

研究区开展音频大地电磁和高密度电阻率法勘探提供了地球物理基础。

## 2.2 勘察方案

使用高密度电阻率法探测浅地表 100 m 以内的岩溶地质特征;音频大地电磁法的探测重点是中深层,探测地下 1 000 m 以内岩溶地质特征;氦气测量用于识别构造异常,对高密度电阻率法、音频大地电磁法探测结果进行验证,提高解释的准确性。

研究区隶属于广西柳州市融安县。沿研究区中部布设一条测线,方向 SWW—NEE(图 2),测线总长 430 m。为缩短勘探时间,降低施工成本,首先开展音频大地电磁测量,探测范围为桩号 30~430;在音频大地电磁反演处理结果的基础上开展高密度电法和氦气测量,氦气测量范围为桩号 125~325,高密度电法探测范围为桩号 0~300。



图2 测线布设

Fig.2 Line layout diagram

高密度电阻率测量采用重庆奔腾数控技术研究所生产的 WGMD-3 型高密度电阻率测量系统,最大供电电压为 400 V,滚动覆盖,确保满足 100 m 的勘探深度和精度要求;探测点距 5 m,采集装置为温纳装置,该装置的垂向分辨率相对较高,对地质体垂向分布的反应有较高的灵敏度。数据处理采用瑞典 res2dinv 软件对采集的视电阻率原始数据进行预处理、数据格式转换及地形校正,最后进行反演迭代处理,获得反演电阻率剖面。

音频大地电磁法采用美国 EMI 公司和 Geometrics 公司联合研制的 EH-4 连续电导剖面仪,观测交变电磁场互相垂直的电场分量  $E_x$ 、 $E_y$  和磁场分量  $H_x$ 、 $H_y$ ,有效观测频率范围为 10 Hz~100 kHz,探测深度约为 1 000 m,测量点距 10 m。对音频大地电磁测量的原始时间序列信号首先进行人工编辑,剔除畸变信号及个别跳跃频点,通过傅里叶变换转换为频域信号,然后经过滤波、放大处理,最后利用 IMA-GEM 软件进行二维反演,得到二维反演电阻率剖面图,结合地质资料对剖面进行解释。

氦气测量仪器为重庆奔腾数控研究所生产的 FFA-1 快速  $\alpha$  数字闪烁辐射仪,采用短期累积法测量土壤样品中的  $\alpha$  射线强度,测量深度为地下 70 cm,测量点距 10 m。氦气测量数据采用数理统计方法进行处理。对所有数据计算平均值( $\bar{X}$ )和标准偏差( $\sigma$ ),去掉( $\bar{X}-3\sigma$ , $\bar{X}+3\sigma$ )范围以外的测量数据,再次计算平均值( $\bar{X}_1$ )和标准偏差( $\sigma_1$ ),定义 $\bar{X}_1$ 为背景值 RnB,阈值  $RnF=\bar{X}_1+1.5\sigma_1$ ,最后绘制氦气测量异常曲线,超出异常阈值部分即为异常段。

## 2.3 效果分析

高密度电阻率剖面全长 295 m,其反演电阻率剖面(图 3c)显示,表层大部分表现为低阻,往下电阻率增大,分层明显。桩号 50~100、深度 0~38 m 区域出现中低阻异常,电阻率值在 20~100  $\Omega \cdot m$ ,异常两侧曲线不连续,推测为断层破碎带  $F_1$ ,倾向 SW;桩号 100~200 处,表层为厚度 0~20 m 的第四系低阻黏土,其下为高阻异常区(GZYC1),电阻率值为 200~1 000  $\Omega \cdot m$ ,应为石炭系灰岩的反映;另在桩号 120~140、180~200 处均有向下凹陷的弱低阻;桩号 200~240、深度 0~24 m 区域存在向下凹陷低阻异常,电阻率值为 10~150  $\Omega \cdot m$ ,推测为断层破碎带  $F_2$ ,断层倾向 SW。

音频大地电磁剖面全长 400 m。在中深度及以下范围内,音频大地电磁测深有较好的探测分辨率,弥补了高密度电阻率法在中深部探测方面的不足。从音频大地电磁测深反演剖面(图 3b)来看,断层破碎带  $F_1$ 、 $F_2$  及中部高阻异常(GZYC1)向下延伸很远,异常延伸方向与高密度电阻率法反映方向一致。图 3b 中,桩号 230~280、深度 0~1 031.5 m 区域存在高阻异常(GZYC2),电阻率在 40~140  $\Omega \cdot m$ ,为石炭系灰岩的反映;桩号 280~360、深度 0~1 032.9 m 区域存在低阻异常,电阻率在 4~40  $\Omega \cdot m$ ,推测为断层破碎带  $F_3$ ,倾向 NE;桩号 360~430、深度 0~1 028.9 m 区域存在高阻异常(GZYC3),电阻率值在

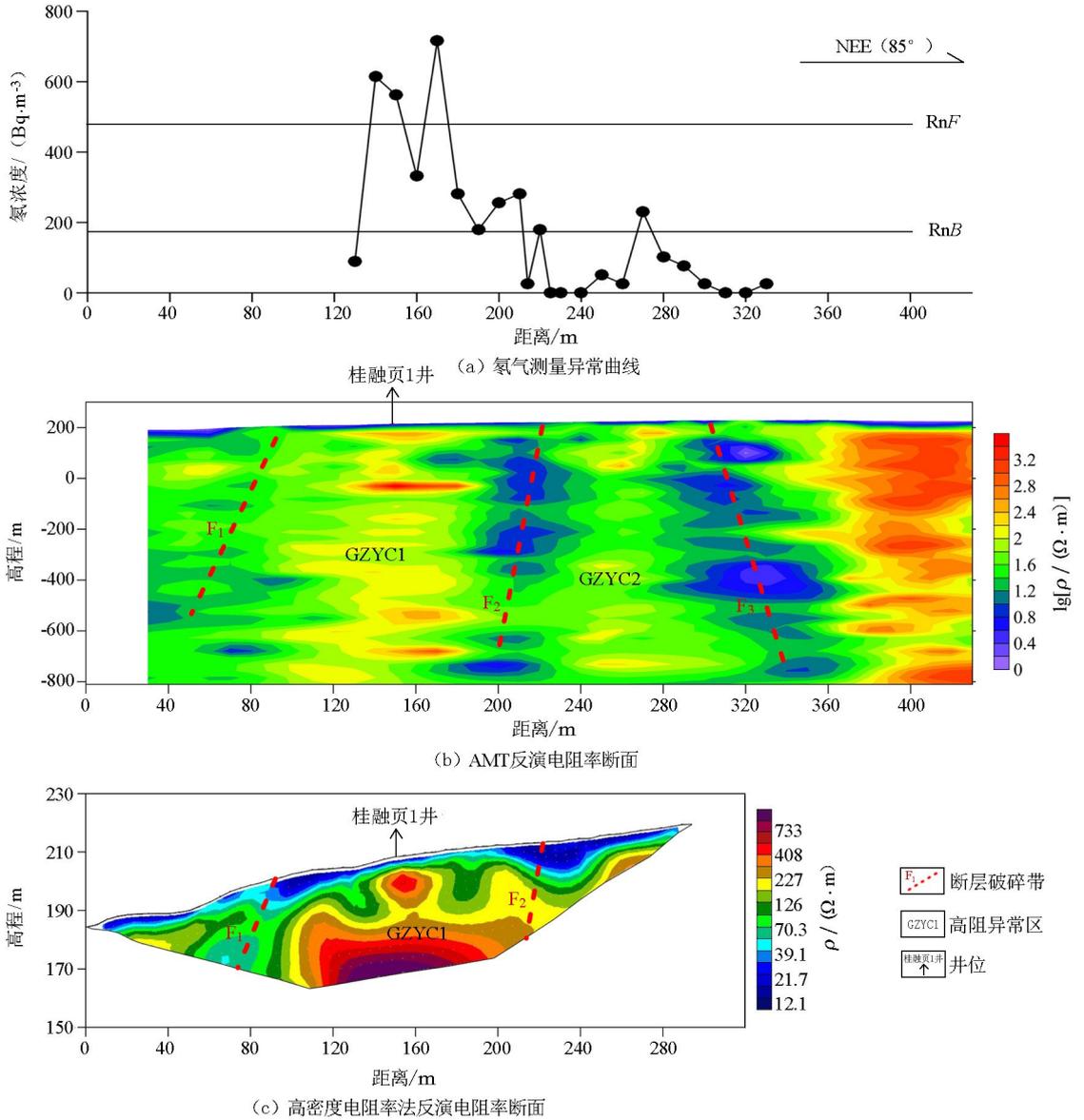


图3 综合物探成果

Fig.3 Integrated geophysical results map

40~1 580 Ω · m,为石炭系灰岩的反映。

氦气测量剖面全长 200 m。氦气测量参与计算数据 23 个,计算氦气异常背景值  $RnB = 176.14 \text{ Bq/m}^3$ , 阈值  $RnF = 484.49 \text{ Bq/m}^3$ 。氦气测量曲线形态高低错落,异常高低分明(图 3a)。桩号 130~210 区域有大于阈值的峰值异常,最大异常值为  $711.0 \text{ Bq/m}^3$ ,推测深部存在断层破碎带;但是断层破碎带位置与氦气浓度峰位不完全对应,分析认为:由于地下对流的影响,使氦浓度异常与断层位置出现了偏差,该断层破碎带与音频大地电磁剖面上断层破碎带  $F_2$  为同一断层。桩号 260~300 区域有大于背景值  $RnB$  的峰值异常,但是小于阈值  $RnF$ 。桩号 330 以后没有采集数据,所以附近区域没有进行氦气异

常分析。

### 2.4 钻孔验证情况

综合 3 种方法的勘察成果,推荐桩号 130~160、桩号 250~280 两处为桂融页 1 井建议井位,最终井位选择在桩号 150 处。桂融页 1 井完钻井深 3 305 m,开孔层位为石炭系罗城组,完钻层位为寒武系清溪组,在近地表没有钻遇断层破碎带,与综合物探解释成果基本吻合。

## 3 结论

1) 南方碳酸盐岩地区页岩气钻探工程中面临的碳酸盐岩岩溶问题突出,因此开展钻前近地表地

球物理勘查,合理选择井位,能有效避开近地表断层、溶洞及裂隙发育区,可以保障井场安全,降低钻井工程风险。

2) 与传统工程物探勘查不同,页岩气钻探井位选择不仅要查明地表几十米以内的岩溶地质情况,还需要查明地下千米以内断裂、溶洞的发育情况,因此要综合选择物探方法,深浅兼顾。

3) 单一物探方法存在局限性,综合物探勘查可以相互补充、相互印证,减少多解性,提高解释的准确性。

## 参考文献(References):

- [1] 章术,尹亮先,首照兵.贵州铜仁地区页岩气钻井施工难点及对策[J].探矿工程,2017,44(5):10-13.  
Zhang S, Yin L X, Shou Z B. Difficulties of Shale Gas Well Drilling Construction in Tonggongren of Guizhou and the Countermeasures [J]. Exploration Engineering, 2017, 44(5): 10-13.
- [2] 周晓庆,薛强,罗杰.四川盆地天然气钻前工程选址风险识别与防控措施[J].天然气工业,2012,32(8):105-107,136.  
Zhou X Q, Xue Q, Luo J. Risk identification and prevention measures for pre-drilling site selection in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(8): 105-107,136.
- [3] 王佳龙,邸兵叶,张宝松,等.音频大地电磁法在地热勘查中的应用——以福建省宁化县黄泥桥地区为例[J].物探与化探,2021,45(3):576-582.  
Wang J L, Di B Y, Zhang B S, et al. The application of audio frequency magnetotelluric method to the geothermal exploration: A case study of Huangniqiao area, Ninghua County, Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 576-582.
- [4] 赵广学,阮帅,吴肃元.隧道勘探 AMT 数据二维非线性共轭梯度反演的关键参数探讨[J].物探与化探,2021,45(2):480-489.  
Zhao G X, Ruan S, Wu S Y. Researches on the selection of key parameters in AMT 2D nonlinear conjugate inversion for railway tunnel exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 480-489.
- [5] 杨剑,李华,王桥,等.综合地球物理勘探快速获取城市待建区浅部三维地质特征:以成都市天府新区独角兽岛为例[J].地球物理学进展,2021,36(4):1751-1759.  
Yang J, Li H, Wang Q, et al. Rapid acquisition of shallow 3D geological features of undeveloped area in city by comprehensive Geophysical exploration:a case study on the Unicorn Island in Tianfu New District, Chengdu City [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(4): 1751-1759.
- [6] 孟庆旺.综合物探方法在嘉祥县青山区省级地质公园溶洞勘察中的应用效果[J].物探与化探,2020,44(6):1464-1469.  
Meng Q W. The application effect of comprehensive geophysical method in karst cave investigation of Qingshan Provincial Geopark in Jiaxiang County [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1464-1469.
- [7] 杨天春,王丹齐,张叶鹏,等.生产矿山岩溶灾害勘查中的综合物探应用研究[J].地球物理学进展,2021,36(3):1145-1153.  
Yang T C, Wang D Q, Zhang Y P, et al. Application research of comprehensive geophysical method to karst investigation in a productive mine [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1145-1153.
- [8] 叶莉,李非,黄小年.综合物探技术在东北公路工程多年冻土勘察中的应用与研究[J].灾害学,2018,33(S1):25-29.  
Ye L, Li F, Huang X N. Application and research of comprehensive geophysical prospecting technology in permafrost exploration of northeast highway project [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(S1): 25-29.
- [9] 黄毓铭,张晓峰,谢尚平,等.综合物探方法在南宁地铁溶洞探测中的应用[J].地球物理学进展,2017,32(3):1352-1359.  
Huang Y M, Zhang X F, Xie S P, et al. Application of integrated geophysical method to Karst cave exploration of metro engineering in Nanning [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1352-1359.
- [10] 高建华,蔡耀军,魏岩峻,等.综合物探在南水北调中线工程岩溶探测中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(4):533-536.  
Gao J H, Cai Y J, Wei Y J, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting to karst detection in South-to-North water diversion middle route project [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(4): 533-536.
- [11] 李丹,肖宽怀.高密度电法在铁峰山2号隧道工程探测中的应用[J].工程地球物理学报,2006,3(3):197-200.  
Li D, Xiao K H. High density electrical resistance exploration in the No.2 tiefengshan tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(3): 197-200.
- [12] 孟凡松,张刚,陈梦君,等.高密度电阻率法二维勘探数据的三维反演及其在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2019,43(3):672-678.  
Meng F S, Zhang G, Chen M J, et al. 3D inversion of high density resistivity method based on 2D high density electrical prospecting data and its engineering application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 672-678.
- [13] 王喜迁,孙明国,张皓,等.高密度电法在岩溶探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2011,39(5):72-75.  
Wang X Q, Sun M G, Zhang H, et al. Application of high-density electrical technique in karst detection [J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 72-75.
- [14] 马吉静.高密度电阻率法的异常识别和推断——以溶洞探测和寻找地下水为例[J].地球物理学进展,2019,34(4):1489-1498.  
Ma J J. Anomaly identification and inference of high density resistivity method: take karst cave exploration and groundwater exploration as an example [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1489-1498.
- [15] 尚彦军,金维浚,肖刚,等.AMT和高密度电法结合探测稻城LHAASO项目区隐伏断层和基岩埋深[J].地球物理学进展,2021,36(1):250-257.  
Shang Y J, Jin W J, Xiao G, et al. Combination of AMT and

- high-density electrical method to detect buried fault and bedrock depth in the LHAASO field of Daocheng, Sichuan Province [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 250–257.
- [16] 陈乐寿,王光镔.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社,1990. Chen L S, Wang G E. *Magnetotelluric Sounding Method* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [17] 张启生.音频大地电磁法原理及数据处理[J].内蒙古石油化工,2010(19):26–28. Zhang Q S. AMT principles and data processing [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2010 (19): 26–28.
- [18] 李富,周洪福,唐文清,等.物化探方法在隐伏活动断裂探测中综合研究——以安宁河秧财沟断裂为例[J].地球物理学进展,2019,34(3):1199–1205. Li F, Zhou H F, Tang W Q, et al. Comprehensive study of geophysical and geochemical methods in detecting buried active faults: taking the Yangcaigou fault in Anning River as an example [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1199–1205.
- [19] 甘伏平,吕勇,喻立平,等.氡气测量与CSAMT联合探测地下地质构造——以滇西路西部地区帕连,法帕剖面探测为例[J].地质通报,2012,31(2):389–395. Gan F P, Lyu Y, Yu L P, et al. The utilization of combined radon and CSAMT methods to detect underground geological structures: a case study of detection in Palian and Fapa profiles, Luxi area, western Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2): 389–395.

## Application of comprehensive geophysical prospecting method in well siting for shale gas exploration in carbonate areas in east China

LUO Wei-Feng<sup>1</sup>, HU Zhi-Fang<sup>1</sup>, GAN Fu-Ping<sup>2</sup>, ZHANG Qing-Yu<sup>2</sup>, KANG Hai-Xia<sup>1</sup>, ZHANG Yun-Xiao<sup>1</sup>

(1. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The drilling engineering for shale gas in carbonate areas in China is facing prominent carbonate karst. It is necessary to carry out near-surface geophysical prospecting before drilling and reasonably select the well locations in order to ensure the safety of the well site and reduce the drilling engineering risks. Taking the siting of Well Guirongye-1 in Rong'an County, Liuzhou City, Guangxi Province as an example, this study conducted the application research of well siting before drilling comprehensively using three geophysical prospecting methods, namely the high-density resistivity method, the audio-frequency magnetotellurics method, and radon survey, achieving satisfactory results. Well Guirongye-1 did not encounter a fault fracture zone near the surface, which is basically consistent with the interpretation results of comprehensive geophysical prospecting. This result indicates that the comprehensive geophysical prospecting method is feasible and effective in the siting of shale gas exploration wells in the carbonate areas in south China. This study will provide a certain reference for the well siting before drilling in similar areas in the future.

**Key words:** carbonate area; drilling for shale gas; well location selection; karst; comprehensive geophysical prospecting method

(本文编辑:沈效群)