

刘道涵,徐俊杰,齐信,等.基于高密度电法的城市岩溶地下水通道三维电性成像[J].中国岩溶,2023,42(6):1331-1338.

DOI: 10.11932/karst20230615

# 基于高密度电法的城市岩溶地下水通道三维电性成像

刘道涵<sup>1,2</sup>,徐俊杰<sup>1,2</sup>,齐信<sup>1,2</sup>,邬健强<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205; 2. 中南地质科技创新中心,湖北武汉 430205)

**摘要:**岩溶地下水通道是隐伏岩溶区常见的地质现象,开展城市隐伏岩溶通道探测对城市地下空间开发和地质灾害防治具有重要意义。岩溶通道常具有高度的空间变异性,常规二维探测难以对其进行较好的表征。基于此,文章采用三维高密度电法对城市隐伏岩溶地下通道进行了精细探测,结合地球物理数值模拟和应用实例,分析三维高密度电法对不同充填类型岩溶地下通道的成像效果。结果表明:三维高密度电法较二维探测在数据量和分辨率上均有较大提升,可更直观地表征目标体三维电性结构特征,该探测方法对岩溶地下水通道成像具有优势;通过对武汉市源泉村岩溶地下水通道三维电性成像,揭示了该低温热泉的地下水运移特征,可为城市地热勘探开发提供参考。

**关键词:**三维高密度电法;隐伏岩溶;岩溶地下水通道;三维电性成像

中图分类号:P631.3 文献标识码:A

文章编号:1001—4810(2023)06—1331—08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

我国是岩溶大国,可溶岩面积约为 $346.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占国土面积的三分之一以上<sup>[1]</sup>。岩溶区内广泛存在各种岩溶空洞和岩溶地下通道,形成了以管道流为主的复杂地下水系统<sup>[2]</sup>,促进了地下水土岩等物质运移,导致岩溶区城市地下空间开发和利用均面临着复杂的岩溶地质问题<sup>[3]</sup>,岩溶地面塌陷灾害亦时有发生<sup>[4]</sup>。而对于地热活动区域,岩溶地下水通道内往往伴随着频繁的热量交互,直接影响着地热开发的质量<sup>[5]</sup>。因此,开展岩溶地下通道探测对城市地下空间开发和地质灾害防治都有重要意义。

岩溶地下通道探测是岩溶探测的重要组成部分,地球物理勘探因其广泛的适用性、探测深度和精度而被广泛应用<sup>[6]</sup>。常见的方法有高密度电法(ERT)、直流电测深(VES)、地质雷达(GPR)、瞬变电磁法(TEM)、地震折反射层析成像(ST)和面波勘探(SW)

等,各种方法在技术特点、探测成本等方面均存在差异<sup>[7]</sup>。地质雷达具有高效率和高分辨率特点,但受有限的穿透深度、不规则地形和含水黏土等因素的影响,主要应用于裸露型和浅覆盖型岩溶<sup>[8-9]</sup>;电磁法和地震勘探在埋藏型岩溶探测中具有较好的效果<sup>[10-12]</sup>;此外,微重力探测可用于探测浅层溶洞和充填型溶洞<sup>[13]</sup>。高密度电阻率是最常用的岩溶探测地球物理方法,目前已被应用于各种不同的岩溶地质环境,如洞穴探测<sup>[14]</sup>,充水型岩溶地下水通道探测<sup>[15-16]</sup>,城市地下空洞检测<sup>[17]</sup>,以及工程勘察等<sup>[18-20]</sup>。

现行高密度电法多为二维剖面探测,无法表征地质体三维物性差异,在地下洞穴、岩溶通道等三维物性地质体探测中<sup>[21-22]</sup>,易出现“旁侧效应”问题,降低了岩溶探测的准确性。而三维高密度电法随着电极道数增大,数据量几何增长,对数据信噪比和正反演拟合计算等面临极大地挑战<sup>[23-24]</sup>,其能否适用于城市强干扰环境,以及对岩溶地下通道的圈定效果如

第一作者简介:刘道涵(1987—),男,高级工程师,主要研究方向为地球物理方法及应用研究。E-mail: ldhwcegs@163.com。

通信作者:邬健强(1990—),男,高级工程师,主要研究方向为地球物理方法及应用研究。E-mail: 1191261549@qq.com。

收稿日期:2022—02—13

何等问题均尚待研究。因此,本文拟对三维高密度电法对岩溶通道的成像效果开展研究,结合数值模拟和实例分析探讨其对城市隐伏岩溶通道精细探测的优劣势。

## 1 高密度电法

高密度电法(ERT)是在直流电阻率测深方法的基础上发展演化而来,是一种以各种介质电性差异为基础的阵列式勘探方法<sup>[25]</sup>。通过对地下供入短时电流建立直流电场,并用阵列电极采集不同位置的电位差计算视电阻率值,然后对地下半空间进行网格剖分求取灵敏度矩阵,最后反演拟合求取地下位置的电阻率值,实现对地下空间电性探测<sup>[26-27]</sup>。

目前,常用的高密度电法为二维勘探技术,兼具电测深和电剖面的特点;或通过多条平行的二维探测结果进行三维显示,亦或对二维采集数据合成进行三维反演等<sup>[28-30]</sup>,该方法虽能获得地下三维空间电阻率值,但地电场激发响应和数值计算仍采用二维形式,并非真正意义上的三维探测,也被称为“拟三维”高密度电法。本文介绍三维高密度电法,将地下电阻率设定为空间位置的三维函数 $\rho(x,y,z)$ ,可表征三维空间电性差异,同时,激发电场表征为电流的三维函数,保证了各方向供电电场的需要,其正演求解可用以下三个分量的偏微分方程表达。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -I(x,y,z) \quad (1)$$

其中,  $V(x,y,z)$  为地下某点  $r(x,y,z)$  处的标量电位场,  $I(x,y,z)$  为发射电场电流,  $\sigma(x,y,z)$  为地下某点  $r(x,y,z)$  处的电导率, 为该点电阻率  $\rho(x,y,z)$  的倒数。

高密度电法探测本质上是对采集的视电阻率数据进行反演计算,拟合地下空间电阻率值。本文利用圆滑模型的正则化反演算法<sup>[31]</sup>,将反演问题转换为对以下目标函数的最优化迭代求解。

$$\phi = (Gm - d^{obs})^T W_d (Gm - d^{obs}) + \lambda (m - m_{ref})^T W_m (m - m_{ref}) \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为正则化因子,控制着反演过程中数据拟合函数和模型拟合函数间的权重;  $d^{obs}$  为实测视电阻率参数;  $G(x,y,z)$  为计算核函数;  $m$  为待拟合模型参数;  $m_{ref}$  为先验模型;  $W_d$  为数据权重因子;  $W_m$  为模型粗糙度的差分因子。

## 2 数值模拟

为刻画三维高密度电法对不同充填类型岩溶通道的探测效果,笔者构建了以下三维地球物理模型(图 1),该模型由分布于  $100 \Omega \cdot \text{m}$  背景场中的三个电性异常体,分别代表了含水充填型溶洞( $10 \Omega \cdot \text{m}$ )、干泥沙质充填型溶洞( $500 \Omega \cdot \text{m}$ )和空气非充填型溶洞( $1000 \Omega \cdot \text{m}$ )。三个异常体分布于地下  $40 \text{ m} \times 95 \text{ m} \times 28.7 \text{ m}$  的空间内,异常体大小均为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 12.3 \text{ m}$ (图 1a)。采用美国 AGI 公司开发的 EarthImage3D 软件平台进行数值模拟,正演计算中模拟布设电极  $20 \times 5$  个共计 100 道,电极按  $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  布置,采集装置选用三维混合偶极-梯度排列。将地下空间进行网格剖分为  $16 \times 28 \times 7$  个单元,利用有限差分算法求解式(1)的偏微分方程,边界条件求解选择 Dirichlet 方法。为模拟城市噪声影响,对正演视电阻率数据叠加 3% 的高斯随机噪声,并进行三维拟牛顿共轭梯度反演计算,得到模型三维正反演结果(图 1)。

由正演模拟结果可见(图 1b),正演计算视电阻率值介于  $84 \sim 117 \Omega \cdot \text{m}$ ,较模型真实电阻率( $10 \sim 1000 \Omega \cdot \text{m}$ )的范围明显变小,更趋于背景电阻率值( $100 \Omega \cdot \text{m}$ );同时,三维正演结果无法直观反映地下电性异常特征。经过 2 次迭代计算后,三维反演拟合收敛,得到反演电阻率结果(图 1c),其中,反演拟合最小均方根误差 RMS 为 5.2%,二阶范数 L2 为 1.1,显示数据收敛较快,且模型拟合较好,反演算法能够较好压制数据噪声。对反演结果与真实模型对比可见,三维高密度电阻率反演对三种充填类型的岩溶均有异常显示,且异常体形态和位置与模型对应较好;对比三个异常体可见:含水充填型岩溶低阻异常区范围更小,且边界较清晰。对反演结果进行切片显示可见(图 1d):空气充填型岩溶反演电阻率明显偏低,与泥沙质充填型岩溶的电阻率值接近,且溶洞形态呈现出“上小下大”特征。综上所述,三维高密度电法可较好实现三种充填型岩溶的精细探测,圈定岩溶异常体的三维边界,尤其对低阻的含水充填型岩溶具有较好效果,但反演电阻率数值受背景场影响易出现失真,不利于泥沙质和空气充填型岩溶的判别。

## 3 实例研究

本次探测实例位于武汉市北部双峰山南麓低温

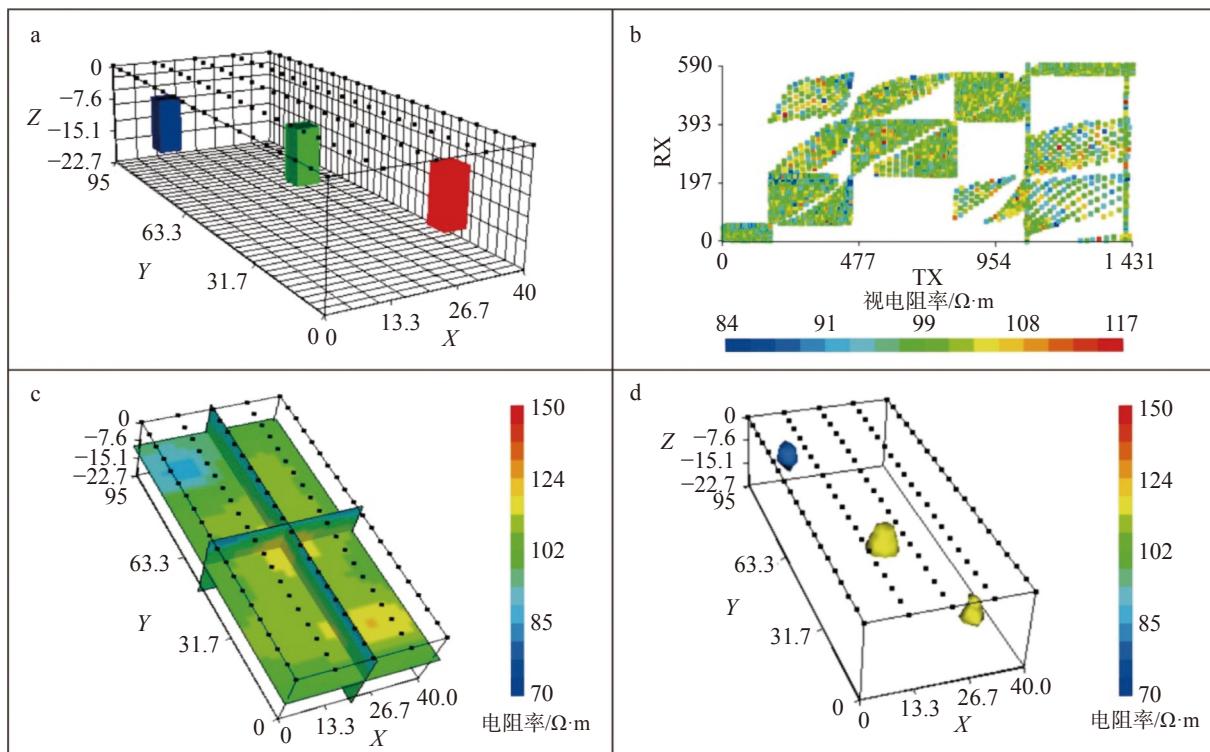


图 1 三维高密度电法模拟计算

a: 三维模型 b: 正演视电阻率数据 c: 三维反演结果切片 d: 反演电性异常体

Fig. 1 Simulation calculation from 3D ERT

a: 3D Model b: Forward modeling c: Slices inversed by 3D ERT d: The anomalous body inversed by 3D ERT

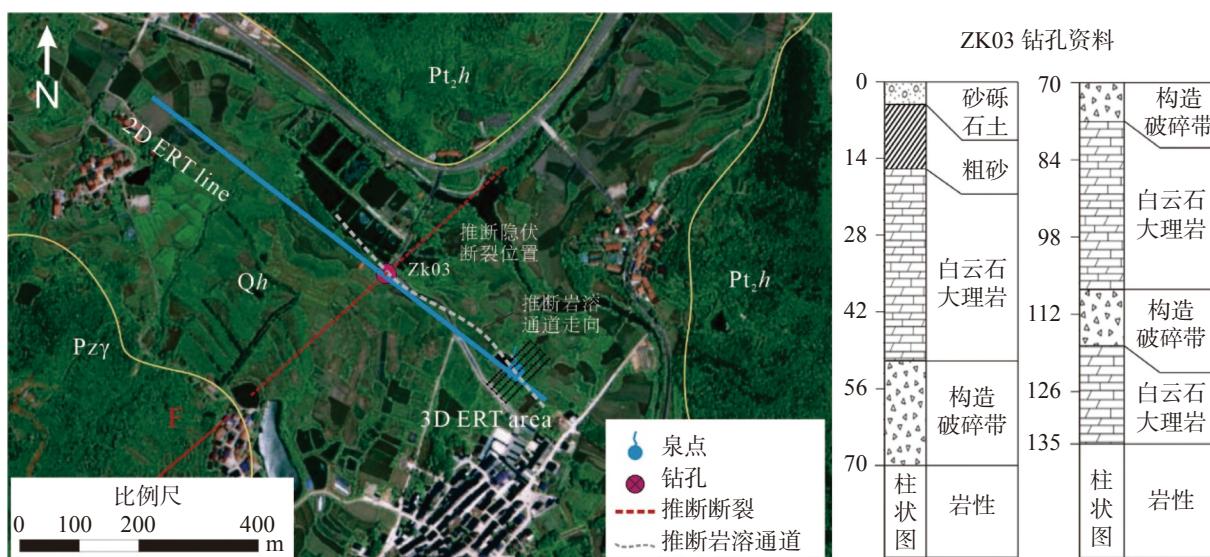


图 2 地表泉点工作区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of work area in the surface spring

热泉群,水温约27℃,主要由东西两处出露泉点群组成(图2)。其中,西部泉点群较大,由多处地下水出露,形成较大面积(约 $3.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ )的池塘群,已用做热带鱼养殖;东部泉点流量较小,仅出露一处泉点。区内主要为第四系覆盖,两侧山体出露地层分别为

新元古界青白口系黄麦岭岩组片岩和大理岩( $\text{Pt}_2\text{h}$ )和古生代花岗岩( $\text{Pzy}$ ),且南部存在一NNE断裂,在测区内隐伏。同时,测区周边广泛分布居民区和生活用电,电磁干扰较为严重。

分别采用二维和三维高密度电法查明区内隐伏

断裂位置和岩溶地下水通道三维探测。其中,二维剖面垂直断裂沿近东西向展布,长约830 m,电极距10 m,采用偶极-偶极装置进行测量。使用AGI公司生产的8通道SupSting高密度电法仪耗时约80分钟

钟,共计采集730个数据点。采用带地形圆滑反演算法,经过3次迭代计算后得到二维高密度电法反演结果(图3)。

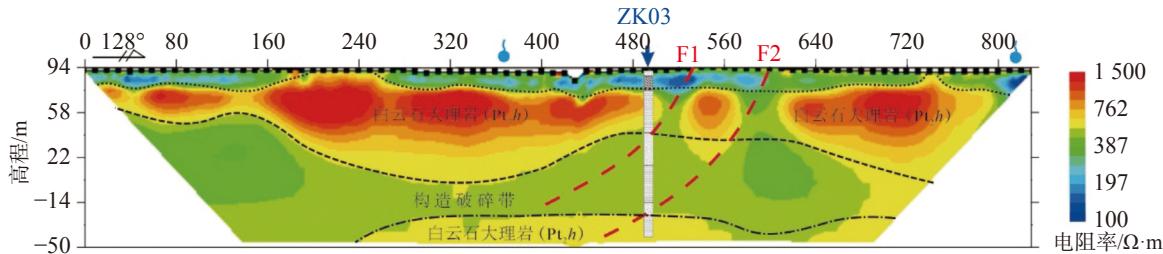


图3 地表泉点二维高密度电法探测结果  
Fig. 3 Results of 2D ERT in the surface spring

结合钻孔资料对反演结果进行分析,由上到下可分为四层电性结构:①浅地表低阻层(300  $\Omega\cdot\text{m}$ 以下),厚度常小于15 m,主要由砂砾石和黏土组成,泉点群附近表现为较强低阻特征(200  $\Omega\cdot\text{m}$ 以下),且西侧泉点群附近低阻异常向东延伸;②高阻大理岩层,电阻率可达1 500  $\Omega\cdot\text{m}$ ,钻孔揭露为较完整白云石大理岩,厚度变化较大(介于30~80 m),于500~600 m段出现两处低阻异常;③次低阻构造破碎岩层(300~600  $\Omega\cdot\text{m}$ ),钻孔揭露为两层构造破碎带,为主要的富水地层,受地下水影响电阻率明显降低;④次

高阻大理岩层,埋深约110 m,受探测深度限制仅少量反映,未见底。

由于西侧泉点群被地表水系环绕,测量电极难以布设,为进一步探测泉点的岩溶通道,选择东侧泉点进行三维高密度电法探测。布设20×5共计100道电极,电极间距5 m×10 m,测区大小为95 m×40 m,测量装置为径向偶极-偶极排列。使用SupStingR8高密度电法仪耗时约150分钟,共计采集3 349个数据点。采用三维圆滑反演算法,经过3次迭代计算后得到三维高密度电法反演结果(图4)。

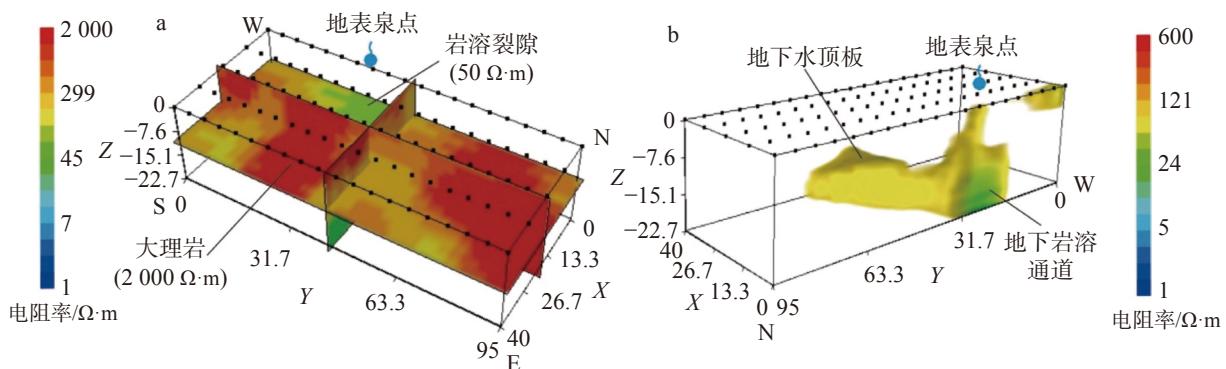


图4 地表泉点三维高密度电法反演结果

(a: 三维反演结果切片 b: 圈定地下水通道)

Fig. 4 Results inverted by 3D ERT in the surface spring

(a: Slices inverted by 3D ERT b: The boundary of groundwater channel)

对三维高密度电法反演结果进行分析(图4a),可见围岩电阻率可达2 000  $\Omega\cdot\text{m}$ ,埋深较浅;中部泉水出露点附近地表电阻率明显降低(约50  $\Omega\cdot\text{m}$ ),泉点下部出现一连续低阻异常体,电阻率可低至40  $\Omega\cdot\text{m}$ 以下,呈带状连续展布。以40  $\Omega\cdot\text{m}$ 为阈值对地

下水赋存区进行单独显示(图4b),可清晰反映该岩溶地下通道分布特征:地下水埋深约15 m,顶界面较平缓,并于泉点(X=40 m, Y=45 m, Z=0 m)处上升至地表出露,同时,深部仍可见地下水主体沿北西向约317°延伸出三维测区,与西侧泉点群方向可对应。

对高密度电法剖面 500~600 m 段反映的低阻异常布设了钻探工作, 于 50~82 m 和 95~110 m 段揭露了两层断裂破碎带, 与物探结果可对应, 且与西南侧断裂延伸方向相同, 综合分析该断层为一组倾向 NW 断层组, 由两条近平行断裂组成, 视倾角约 65°, 走向约 NE(图 2)。该区地下水类型以裂隙岩溶水为主, 含水岩组主要为新元古界青白口系黄麦岭岩组大理岩。综合物探、钻探等结果分析, 该区两处低温热泉群由地下岩溶通道直接连通, 且与 NW 向断裂构造相关联, 反映深部热水沿断裂破碎带循环到浅部岩溶通道后, 经过一定距离的水平运移, 沿裂隙带、碳酸盐岩与片岩接触带附近以泉的形式出露地表的水动力过程。

#### 4 讨 论

三维高密度电法实现了岩溶地下通道三维电性成像, 反映出较强三维的结构, 这是常规二维探测基于的理论假设已无法满足的。对比数值模拟和应用实例, 可见三维高密度电法可直观反映岩溶通道结构、走向和埋深, 尤其对充水型低阻岩溶通道探测效果较好。在探测深度方面, 高密度电法探测深度与最大供电极距正相关, 该比例常数反映了在有限施工空间内所能达到的最大有效深度, 常规二维偶极-偶极排列为 14%~25%、斯伦贝谢排列约为 19.1%, 而本次采用的三维径向偶极-偶极排列为 23.9%, 混合偶极-梯度排列为 31.1%, 可见三维高密度电法的有效探测深度较二维探测更大。二维和三维高密度电法采集和数据拟合进行对比可见, 三维高密度电法施工繁琐, 数据量呈几何增加, 而跨测线供电-接收装置较好弥补了二维探测对旁侧响应的缺失; 但海量数据增加了反演拟合难度, 主要表现为收敛较慢, 拟合误差增大, 因此, 三维高密度电法仍面临着施工繁琐和海量数据处理难题, 节点式的轻便电道设备和反演优化算法亟待解决。

本文通过物探和钻探手段联合实现了泉点附近岩溶地下水通道的三维电性结构成像, 揭露了断裂破碎带和岩溶通道走向, 研究结果表明该低温热泉通过深大断裂与岩溶地下水系统相联通。鉴于此, 建议对区内地下岩溶裂隙开展系统性地热勘探, 查明区内热泉的水文地质条件, 以及地下水循环、热量交互过程, 从而为该热泉温度提升和城市地热开发

提供支撑。

#### 5 结 论

(1) 三维高密度电法具有更大的有效探测深度、数据量和分辨率, 在数据采集和正反演计算中均基于三维理论, 可直接用于三维电性成像, 较二维探测具有优势。

(2) 岩溶地下水通道具有较强三维低阻电性结构, 三维高密度电法可实现三维电性成像, 直观反映岩溶地下水通道结构和走向。

(3) 结合物探、钻孔验证确定了工作区内隐伏断裂和岩溶地下水通道空间展布特征, 揭露了该低温热泉的地下水运移过程, 有望为地热勘探开发提供参考。

**致谢:** 本文得到了国家自然科学基金项目(42107485)、国家重点研发计划项目(2020YFC1512400 和 2018YFC800804)、中国地质调查局项目(DD20221734)的联合资助。感谢编辑部付出的大量辛勤劳动, 感谢匿名审稿专家对论文提出的宝贵意见和建议!

#### 参 考 文 献

- [1] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.  
MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411-417.
- [2] 郭芳, 姜光辉, 王文科, 刘绍华. 岩溶洞穴交互带概念的提出及其在水资源管理中的意义[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 1-9.  
GUO Fang, JIANG Guanghui, WANG Wenke, LIU Shaohua. Concept of karst cave hyporheic zone and its significance in water resource management[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(1): 1-9.
- [3] 黄强兵, 彭建兵, 王飞永, 刘妮娜. 特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 85-94.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, WANG Feiyong, LIU Nina. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 85-94.
- [4] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.  
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [5] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1923-1937.  
WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems

- and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1923-1937.
- [6] 李万伦, 刘素芳, 田黔宁, 吕鹏, 姜重昕, 贾凌霄. 城市地球物理学综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2134-2140.
- LI Wanlun, LIU Sufang, TIAN Qianning, LYU Peng, JIANG Zhongxin, JIA Lingxiao. Reviews in urban geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 2134-2140.
- [7] Chalikakis Kvrif. Contribution of geophysical methods to karst system exploration: An overview[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(6): 1169-1180.
- [8] Li S C, Zhou Z Q, Ye Z H, Li L P, Zhang Q Q, Hu Z H. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 116(2): 247-257.
- [9] Djabir F, Abderrezak B, Mohamed C, Mohamed C, Said S, Abdeslam G, Mehdi A. Investigating karst collapse geohazards using magnetotellurics: A case study of M'rara basin, Algerian Sahara[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 160: 144-156.
- [10] Amanatidou E, Vargemezis G, Tsourlos P. Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 196: 107-177.
- [11] 孙茂锐, 陈超, 刘路, 李星. 高密度电法与低频雷达天线同位置岩溶区实测分析[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(4): 519-523.
- SUN Maorui, CHEN Chao, LIU Lu, LI Xing. Field study of high density electrical method and low frequency radar antenna at the same location in karst areas[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2021, 18(4): 519-523.
- [12] Valois R, Camerlynck C, Dhemaied A, Guerin R, Hovhannissian G, Plagnes V. Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France)[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(9): 1183-1192.
- [13] Solbakk T, Fichler C, Wheeler W, Lauritzen S, Ringrose P. Detecting multiscale karst features including hidden caves using microgravimetry in a Caledonian nappe setting: Mefjell massif, Norway[J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 2018, 98(3): 359-378.
- [14] Fadhli Z, Saad R, Nordiana M M, Azwin N, Bery A A. Mapping subsurface karst formation using 2-D electrical resistivity imaging (2-D ERI)[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 20(1): 349-358.
- [15] 邬健强, 赵茹玥, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 朱超强. 综合电法在岩溶山区地下水勘探中的应用: 以湖南怀化长塘村为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 93-98.
- WU Jianqiang, ZHAO Ruyue, GAN Fuping, ZHANG Wei, LIU Yongliang, ZHU Chaoqiang. The application of electrical prospecting method to groundwater exploration in karst mountainous areas: A case study of Changtang village, Huaihua area, Hunan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(1): 93-98.
- [16] 陈贻祥, 黄奇波, 覃小群, 韩凯, 肖琼, 苗迎, 杜成亮, 贺德煌. 自然电场法与高密度电法联作在西江中下游岩溶区找水中的应用[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 684-697.
- CHEN Yixiang, HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, HAN Kai, XIAO Qiong, MIAO Ying, DU Chengliang, HE Dehuang. Application of self-potential and high-density resistivity method to the water exploration in karst terrain of middle-lower reaches of Xijiang river[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 684-697.
- [17] 朱飞飞. 地井联合物探技术在岩溶注浆检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(4): 450-458.
- ZHU Feifei. Application of geophysical prospecting technology combined with ground and well in karst grouting detection[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2022, 19(4): 450-458.
- [18] 张光保. 高密度电法在复杂岩溶地区路基勘测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(3): 344-347.
- ZHANG Guangbao. Application of high-density electrical technique to karst roadbed in complex areas[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(3): 344-347.
- [19] Ungureanu C, Priceputu A, Bugea A L, Chiric A. Use of electric resistivity tomography (ERT) for detecting underground voids on highly anthropized urban construction sites[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 209: 202-209.
- [20] 覃政教. 地面物探在岩溶地基工程勘察中的应用: 以桂林某花园综合楼为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 338-343.
- QIN Zhengjiao. Application of the ground physical exploration in karst foundation engineering prospecting: A case study from a comprehensive building in a garden of Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(4): 338-343.
- [21] Anchuela O P, Juan A P, Casas Sainz A M, Anson D, Gil Garbi H. Actual extension of sinkholes: Considerations about geophysical, geomorphological, and field inspection techniques in urban planning projects in the Ebro basin (NE Spain)[J]. *Geomorphology*, 2013, 189: 135-149.
- [22] Verdet C, Sirieix C, Marache A, Riss J, Portais J. Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill[J]. *Geomorphology*, 2020, 360: 107177.
- [23] Fu Z Y, Ren Z Y, Hua X R, Shi Y, Chen H, Chen C J, Li Y N, Tang J T. Identification of underground water-bearing caves in noisy urban environments (Wuhan, China) using 3D electrical resistivity tomography techniques[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 174: 103966.
- [24] 杨妍妨, 居和建, 甘伏平, 程洋, 王永. 断层-充水溶洞上不同装置三维高密度电阻率法正演模拟响应特征分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 708-717.
- YANG Yanfang, JU Hejian, GAN Fuping, CHENG Yang, WANG Yong. Response characteristics of forward modeling of 3D high-density resistivity method on different devices in the fault-water-filled cave[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 708-717.
- [25] 刘道涵, 罗士新, 陈长敬. 高密度电阻率法在丹江口水源区尾

- [25] 矿坝监测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 215-219.  
LIU Daohan, LUO Shixin, CHEN Changjing. The application of high density resistivity method to the monitoring of tailings dam[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 215-219.
- [26] 周文龙, 吴荣新, 肖玉林. 充水溶洞特征的高密度电法反演分析研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 699-705.  
ZHOU Wenlong, WU Rongxin, XIAO Yulin. Back analysis of high density resistivity method in the water-bearing karst cave[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(6): 699-705.
- [27] 郑智杰, 曾洁, 赵伟, 甘伏平. 高密度电法在岩溶区找水中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1262-1267.  
ZHENG Zhijie, ZENG Jie, ZHAO Wei, GAN Fuping. Application research of high density resistivity method in water exploring in karst area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1262-1267.
- [28] Torrese P. Investigating karst aquifers: Using pseudo 3-D electrical resistivity tomography to identify major karst features[J]. Journal of Hydrology, 2019, 580: 124257.
- [29] 张欣, 赵明阶, 汪魁, 荣耀, 刘强. 电法三维成像技术在隧道岩溶探测中的应用[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 291-298.  
ZHANG Xin, ZHAO Mingjie, WANG Kui, RONG Yao, LIU Qiang. Application of 3D electrical resistivity tomography to a tunnel in a karst area[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(3): 291-298.
- [30] 孟凡松, 张刚, 陈梦君, 李怀良. 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 Fansong, ZHANG Gang, CHEN Mengjun, LI Huailiang. 3-D inversion of high density resistivity method based on 2-D high-density electrical prospecting data and its engineering application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 672-678.
- [31] Papadopoulos N G, Tsourlos P, Papazachos C, Tsokas G N, Sarris A, Kim J H. An algorithm for fast 3D inversion of surface electrical resistivity tomography data: Application on imaging buried antiquities[J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59(3): 557-575.

## Three-dimensional electrical imaging of urban karst groundwater channels based on electrical resistivity tomography

LIU Daohan<sup>1,2</sup>, XU Junjie<sup>1,2</sup>, QI Xin<sup>1,2</sup>, WU Jianqiang<sup>1,2</sup>

( 1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China; 2. Geosciences Innovation Center of Central South China, Wuhan, Hubei 430205, China )

**Abstract** In China, approximately  $346.3 \times 10^4 \text{ km}^2$  of the karst rocks are distributed, accounting for about one-third of the country's land area. Karst groundwater channels are common geological phenomena in concealed karst areas. Various karst caves and underground channels widely developed cause the complex groundwater system dominated by pipe flow, which promotes the transport of groundwater, soil, and rocks, resulting in complex geological issues for urban underground space development and utilization in karst areas. In these areas, ground collapse disasters occur from time to time. In geothermal areas, karst groundwater channels are often accompanied by frequent heat exchange, directly affecting the quality of geothermal development. Therefore, conducting exploration of karst underground channels is of great significance for the development of urban underground space and the prevention of geological disasters in karst areas.

Due to the high degree of spatial variability of karst channels, it is a challenge for conventional two-dimensional detection methods to complete the geophysical imaging, which in turn results in the difficulty of conventional karst detection. Geophysical exploration is widely used due to its wide applicability, large detection depth, and accuracy. However, different geophysical methods have different advantages in terms of detection depth, resolution and practicality. The Ground Penetrating Radar has the characteristics of high efficiency and high resolution, but it is mainly applied to the exposed and shallow-covered karst due to factors such as limited penetration depth, irregular terrain, and clay content. Electromagnetic and seismic exploration can generate better results in the exploration of buried karst. In addition, microgravity exploration can be used to detect shallow karst caves and fill-type karst caves. Electrical resistivity tomography (ERT) is the most commonly used geophysical method for karst exploration, and has been applied to various karst geological environments, such as cave exploration, the exploration of water-filled karst groundwater channel, the detection of urban underground cavity, and engineering surveys.

In this study, 3D ERT was used for fine detection of concealed karst underground channels in the urban area. Combining with geophysical numerical simulation and application examples, the effectiveness of 3D on karst underground channels with different filling types was analyzed. The research results show that 3D ERT has a significant improvement in data volume and resolution compared to 2D ERT. 3D ERT can more intuitively characterize the three-dimensional electrical structure characteristics of the target body and has advantages in imaging karst groundwater channels. Through the three-dimensional electrical imaging of the karst groundwater channel in Yuanquan village, Wuhan City, the groundwater migration characteristics of the low-temperature hot spring are revealed. The analyses of geophysical prospecting and drilling show that two low-temperature hydrothermal vent groups in this area are directly connected by karst underground channels and connected with north-west fault structures, reflecting a hydrodynamic process. In this process, deep hot water firstly circulates along the fault fracture zone to shallow karst channels, and after its horizontal migration at a certain distance, deep hot water exposes at the surface in the form of spring near the fracture zone, and the contact zone of carbonate rock and schist.

In this study, the three-dimensional electrical structure imaging of karst groundwater channel near the hot spring point has been jointly realized by geophysical exploration and drilling, and the trends of fractured fault zone and karst channel have been displayed. Study results show that the low-temperature hydrothermal spring is connected to the karst groundwater system through deep faults. In view of this, it is proposed to carry out systematic geothermal exploration in the area to find out the hydrogeological conditions of hydrothermal spring, the groundwater circulation and heat interaction processes. In addition, the study results may provide support for the temperature increase of the hydrothermal spring and for the development of urban geothermal energy.

**Key words** 3D ERT, concealed karst, karst groundwater channel, three dimensional electrical imaging

(编辑 张玲)

## 硫化物矿床开采对碳酸盐岩风化和相关 碳汇计算的影响研究取得新认识

近日,中国地质调查局岩溶地质研究所岩溶碳汇研究团队对雅鲁藏布江一级支流拉萨河流域控制断面进行一个完整水文年每月2次的采样,分析了水文化学、 $\delta^{13}\text{CDIC}$  和  $\delta^{34}\text{SSO}_4$  特征。研究发现,煤系地层硫化物及矿床硫化物的氧化形成的硫酸(各占约50%)广泛参与了流域的化学侵蚀,硫酸对碳酸盐岩的风化作用旱季显著强于雨季;硫酸参与作用下,流域碳酸盐岩风化速率提高了31%(升至  $29.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$ ),岩石(碳酸盐岩和硅酸盐岩)风化消耗大

气  $\text{CO}_2$  通量则降低了35%(降至  $207 \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$ )。这项研究揭示了硫化物矿床开采对碳酸盐岩风化和相关碳汇预算的影响,并提供一种识别和校正硫酸参与流域岩石风化定量贡献的方法。硫酸参与流域碳酸盐岩的风化改变了区域碳循环,从而影响全球碳循环和气候变化,这在全球碳循环模型构建中应予以关注。

(供稿 谢银财)