

音频大地电磁法对隐伏溶洞识别效果的探讨

张德实^{1,2}, 何 帅^{1,2,3}, 杨炳南^{1,2,3}, 沈小庆^{1,2}

(1. 贵州省地矿局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查
工程技术创新中心, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队, 贵州 铜仁 554300)

[摘 要] 为研究音频大地电磁法对隐伏溶洞的识别效果, 针对无充填、半充填、全充填三种溶洞模型, 分别采用 Bostick 和 Occam TE、TM、TE+TM 三种模式进行一维反演, 将一维反演结果作为初始模型进行正则化二维 NLGG 反演, 将二维反演成果图与溶洞地质模型进行对比分析研究, 在其基础上筛选出最能反映不同溶洞模型形态的优选反演组合方式。将研究成果应用于松桃县黔龙洞进行验证, 结果反演剖面圈定的溶洞异常与溶洞实际位置、埋深、规模等特征具有较好对应关系, 证明音频大地电磁法对隐伏溶洞的识别能力较强。研究成果对岩溶区隐伏溶洞的勘查具有借鉴意义。

[关键词] 隐伏溶洞; 音频大地电磁法; 模型; 二维反演

[中图分类号] P631.2; P588.24+5 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2023)01-72-06

1 引言

查明隐伏溶洞空间分布、规模及充填情况对工程建设具有重大意义。现阶段针对溶洞的物探手段已有多种: ①浅层地震法分辨率高、结果可靠、地面条件制约少, 探测深度不超过 80 m(曾爱平等, 2022; 吴有亮等, 2006)。②地质雷达法灵敏度高, 可探测洞径小, 探测深度一般不超过 60 m(钟世航等, 2016)。③高密度电法采集数据量大、速度快, 点距、排列方式多样, 存在电极极化补偿、接地电阻控制难、地形起伏限制等问题(阮娟等, 2022; 陈先童等, 2022)。④电阻率电极-偶极测深法采集数据密集, 对电性不均匀体的横向、纵向分辨能力较高, 工作效率高, 但存在探测深度不超过 100 m, 分辨率不够高等问题(梁爽等, 2015)。

音频大地电磁法(AMT)通过观测天然变化的

电磁场水平分量, 将电磁场信号转换成视电阻率曲线和相位曲线, 反演求得各地层的电阻率和厚度值, 已较广泛应用于勘查地质构造、找矿、找水等领域(杨炳南等, 2015; 肖林等, 2021; 沈小庆等, 2021)。笔者拟从基础溶洞模型二维反演电性特征出发, 分析不同溶洞模型用不同模式及反演方法对应的电性相应特征, 结合在已知溶洞实测数据处理结果, 探讨音频大地电磁法识别隐伏溶洞的效果。

2 地质模型的建立与演算

2.1 正演地质模型建立

根据地下隐伏岩溶空间中充填物的充填程度, 可将其概化为“无充填”、“半充填”和“全充填”三种状态(张德实等, 2020), 并在其基础上建立三个溶洞地电断面正演概念模型(图 1)。

[收稿日期] 2022-01-18 [修回日期] 2022-12-15

[基金项目] 黔科中引地[2021]4027、黔科合支撑[2023]一般 172、黔科合支撑[2019]2868 联合资助。

[作者简介] 张德实(1986—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理、地球化学勘查与应用工作。E-mail: 370687968@qq.com。

[通讯作者] 何帅(1987—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 307050903@qq.com。

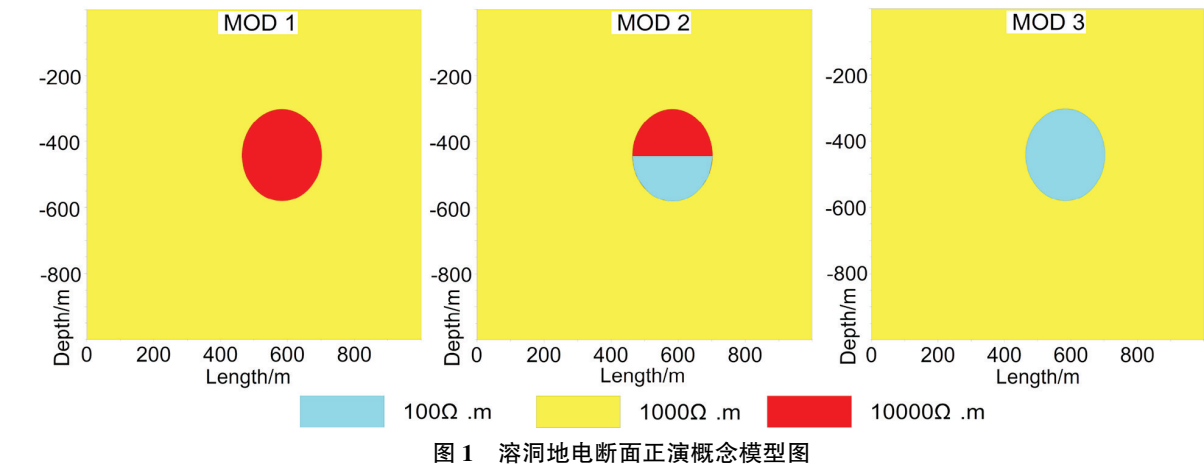


图 1 溶洞地电断面正演概念模型图

2.2 模型反演计算

选择能有效降低多解性的正则化二维反演方法 NLGG 和对初始模型和参数依赖较弱、与模型拟合度较好的 OCCAM,运用 MT soft2D 反演软件,对不同的初始模型二维正演给出的拟合数据,选用 Bostick 和 Occam 不同模式一维反演作为初始模型,进行 NLGG 反演(何帅 等,2019),以此对比选出研究区溶洞反演最优模式。

MOD1 反演成果图显示:一维方法 Bostick 和

Occam 两者差异较小,故后续不对此进行对比说明(后同);TE 数据作一维初始模型,TM 模式作二维数据反演均能显示模型溶洞(虚线范围,后同)上半部分的形态空间(图 2a、d);TM 数据作一维初始模型,TE 模式作二维数据反演均能显示模型溶洞的形态空间,但纵向深度误差约 60 m(图 2b、e);TE/TM 均值作一维数据初始模型,TM 模式作二维数据反演能显示模型溶洞的形态空间,纵向深度误差约 50 m(图 2c、f),为 MOD1 模型溶洞反演的最优模式。

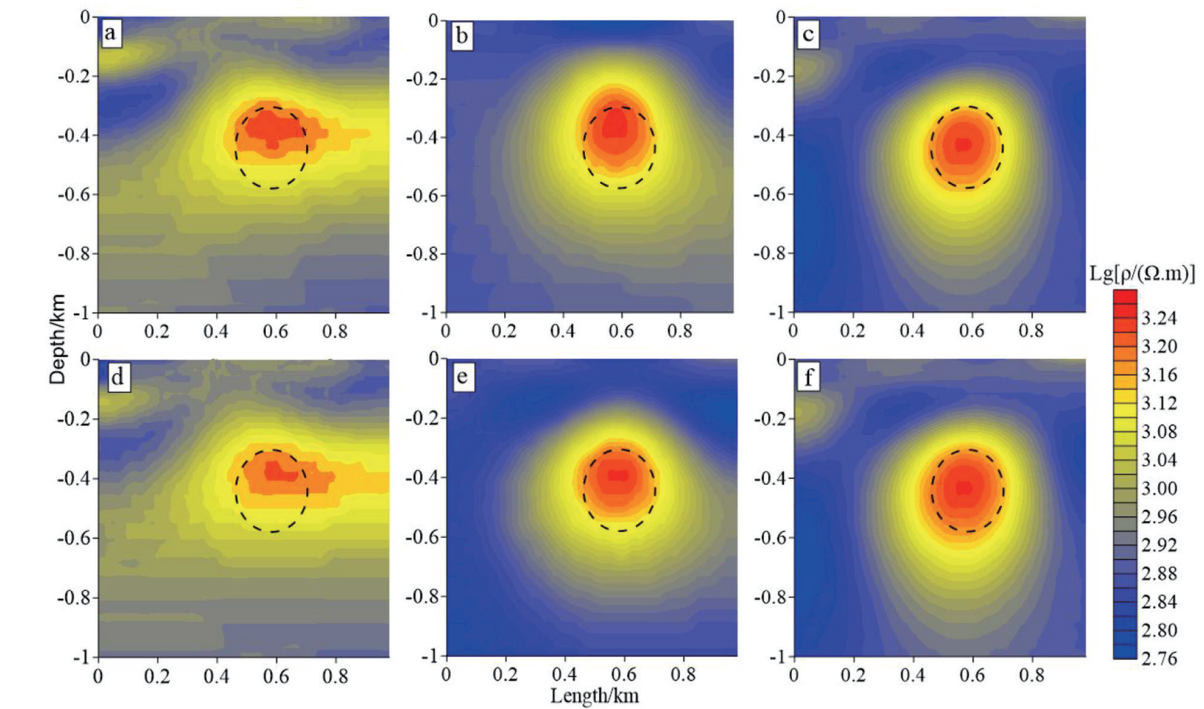


图 2 MOD1(无充填溶洞模型)反演效果图

Fig. 2 Inversion results map from mode one
a——一维初始模型 Bostick TE 数据+二维 TM 数据反演(简称 Bostick TE + TM,后同);b—Bostick TM +TE;c—Bostick TE/TM 均值+TM;
d—Occam TE +TM;e—Occam TM +TE;f—Occam TE/TM 均值+TM

MOD2 反演成果图显示: TE 数据作一维初始模型, TM 模式作二维数据反演均能显示模型溶洞形态空间(图 3a、d), 且下半部分显示较明显, 上半部分表现出局部电阻率横向上凸的趋势; TM 数据作一维初始模型, TE 模式作二维数据反演不能显示模型溶洞的形态空间(图 3b、e); TE/TM

均值数据作一维初始模型, 二维反演在模型溶洞附近形成上高阻圈闭、下低阻圈闭的形态, 但纵向深度较模型拉长, 横向位置偏向小号点超过 100 m (图 3c、f)。TE 数据作一维初始模型, TM 模式作二维数据反演为 MOD2 模型溶洞反演的最优模式(图 3a、d)。

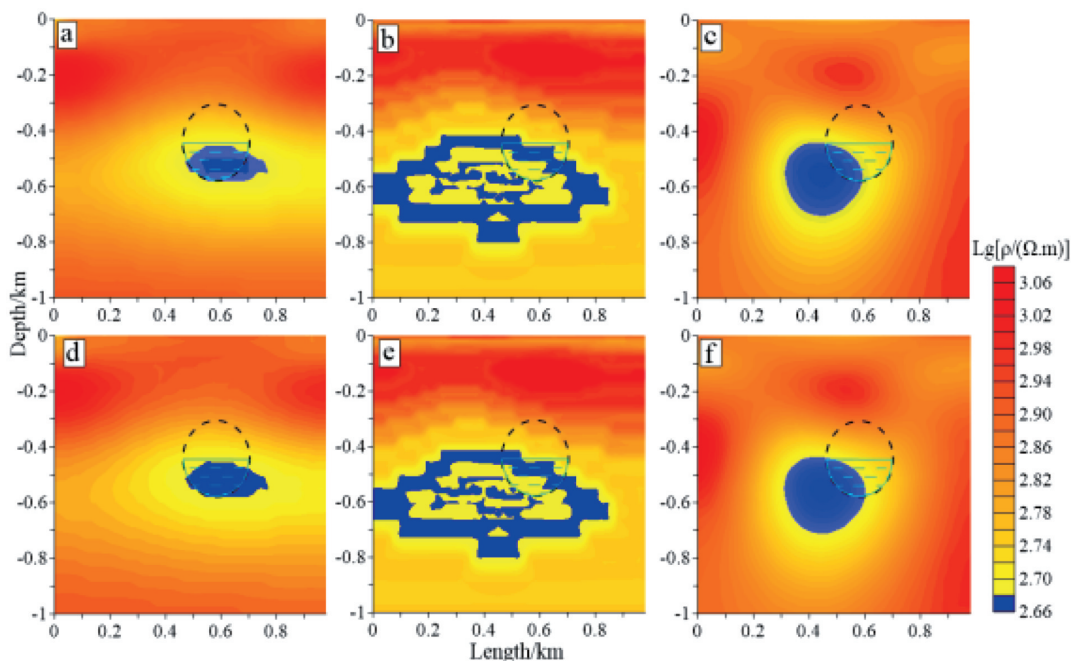


图 3 MOD2(半充填溶洞模型)反演效果图

Fig. 3 Inversion results map from mode two

a—Bostick TE + TM; b—Bostick TM + TE; c—Bostick TE/TM 均值 + TM; d—Occam TE + TM; e—Occam TM + TE; f—Occam TE/TM 均值 + TM

MOD3 反演成果图显示: TE 数据作一维初始模型, TM 模式作二维数据反演不能显示模型溶洞形态空间(图 4a、d); TM 数据作一维初始模型, TE 模式作二维数据反演均能显示模型溶洞的形态空间(图 4b、e), 纵向范围较模型溶洞稍宽; TE/TM 均值作一维初始模型, TM 模式作二维数据反演后在模型溶洞附近形成上高阻、下低阻的形态, 高阻浅部呈半封闭形态, 低阻深部下延趋势明显, 总体对模型溶洞的形态反映不明显(图 4c、f)。TM 数据作一维初始模型, TE 模式作二维数据反演为 MOD3 模型溶洞反演的最优模式(图 4b、e)。

洞, 发育在寒武系娄山关组(ϵ_3ls)地层中, 围岩主要为白云岩。统计直流电法仪测定标本的电性参数显示白云岩电阻率均值为 $1\,152\,\Omega\cdot m$, 浮土电阻率均值为 $112\,\Omega\cdot m$, 地下水电阻率均值为 $65\,\Omega\cdot m$, 且根据以往类似工作区数据, 无物质填充的溶洞电阻率大, 而充填淤泥或富含水的溶洞往往电阻率较低(杨天春等, 2016; 何国全, 2016), 存在物性差异, 具备开展音频大地电磁法测量的条件。

3.2 野外数据处理

实测剖面基本垂直于溶洞发育走向, 使用加拿大凤凰公司的 V8 电法工作站进行数据采集, 采用四分量张量观测方式(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y), 布极采用地质罗盘测定方向, 测绳量距离; 电极埋入土 15~25 cm, 并浇灌饱和盐水, 磁棒埋入地下 20 cm, 方向倾斜小于 1° , 并用土压实; 所有线缆没有打圈, 并不随风晃动。测线长 140 m, 有 8 个测点, 测点间隔 20 m, 采样频率为 0.35~10 400 Hz, 单点采集时间约 55 min。

3 模型验证——以松桃县黔龙洞为例

3.1 地质体地球物理特征

实测黔龙洞内横向宽约 40 m, 高约 50 m, 洞庭断面如倒梨, 洞内顶部渗水、底部积水, 为半充填溶

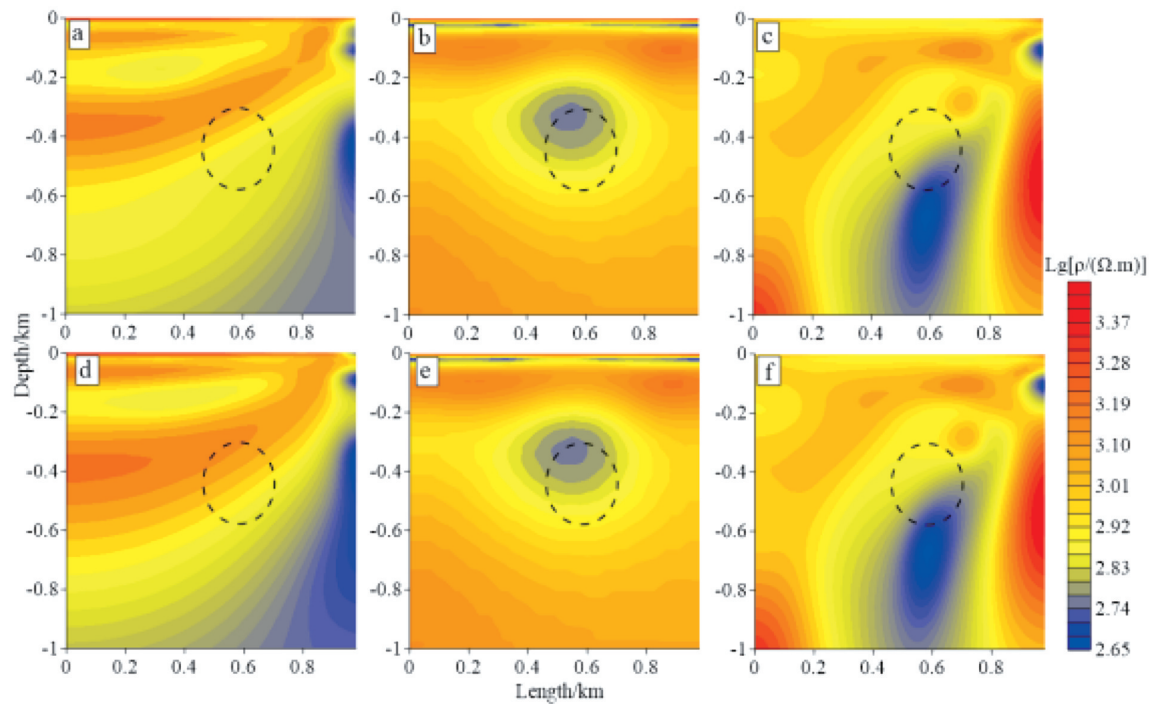


图 4 MOD3(全充填溶洞模型)反演效果图

Fig. 4 Inversion results map from mode three
a—Bostick TE +TE;b—Bostick TM +TE;c—Bostick TE/TM 均值 +TM;d—Occam TE +TM;e—Occam TM +TE;f—Occam TE/TM 均值+TM

表 1 研究区岩石电性参数测定结果统计

岩性描述	所属地层	地层代号	标本数	电阻率(Ω·m)	
				变化范围	平均值
白云岩	寒武系娄山组	Є ₃ ls	30	512~2 563	1 152
浮土	第四系	Q	30	57~221	112
地下水	—	—	5	35~85	65
空气	—	—	—	∞	∞

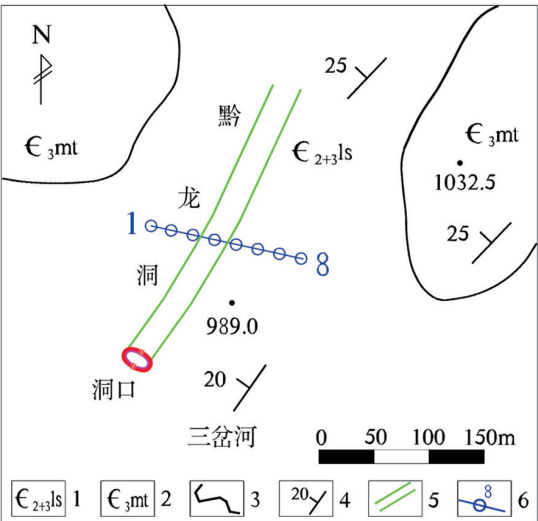


图 5 物探勘查工作布置图

Fig. 5 The layout of geophysical exploration
1—寒武系娄山关组;2—毛田组;3—地层界线;4—地层产状;5—溶洞投影位置;6—剖面位置

首先对采集原始数据进行人机交互式总览,观测各道数据的整体质量,对照野外记录班报进行去噪与筛选,再采用 SSMT-2000 进行 TBL 编辑、FFT 参数设置、快速傅式变换、Robust 阻抗张量估算等流程的预处理(程正璞等,2016;康敏等,2018),之后采用上述二维反演方法反演拟合,得到电性成果断面图。

3.3 结果与分析

物探反演图显示,异常平距 40~80 m 间,埋深海拔标高 840~890 m,为高阻围岩包围一个椭

圆状低阻圈闭异常,异常视电阻率介于 $100 \sim 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,围岩视电阻率介于 $1\,000 \sim 10\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,异常大小、形态与黔龙洞实际情况基本吻合,与半充填溶洞模型反演效果(图 3a、d)有相同的上部高阻、下部低阻的电性特征。

4 结论

通过建立模型反演分析及对音频大地电磁法在已知隐伏溶洞区域测量成果的分析研究,总结如下:

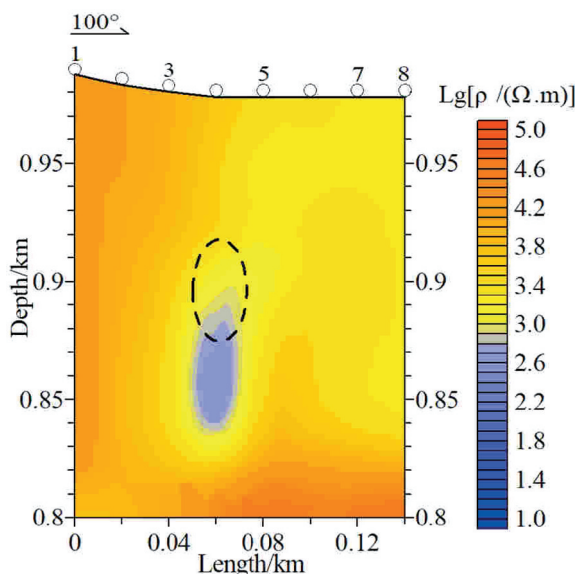


图 6 AMT 剖面反演成果图

Fig. 6 Map of the results of audio magnetotelluric profile inversion

(1) 根据物性参数和溶洞概念模型进行反演,分析不同溶洞类型的电性响应特征,可初步论证物探方法的有效性并优选出适合不同类型溶洞的数据处理(反演)方法。

(2) 黔龙洞是半充填型溶洞,TE 数据作一维初始模型,TM 模式作二维数据进行的二维反演能反映溶洞洞庭断面的形态,剖面图上低阻圈闭异常位置比溶洞的真实位置在纵向上偏深,与半充填溶洞模型反演效果吻合。

(3) 音频大地电磁方法表现出对隐伏溶洞的有效探测与识别,研究成果可为工程建设中隐伏溶洞的勘查提供借鉴。

【参考文献】

陈先童,吕天江,宋启文,等. 2022. 高密度电法与地质雷达组合探测废弃老煤窑巷道及采空区[J]. 贵州地质, 39(03): 262-271.

程正璞,胡祥云,李烨,等. 2016. 民丰凹陷大地电磁探测研究[J]. 石油地球物理勘探, 51(2): 391-403.

何帅,杨炳南,李核良,等. 2019. 音频大地电磁法对渝东南Ⅳ级地堑构造的识别及意义[J]. 地质科技情报, 38(01): 270-276.

何国全. 2016. 高密度电阻率法在岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 13(02): 175-178.

康敏,康健,秦建增. 2018. 音频大地电磁法对隐伏构造的识别与应用——以河南省郑州市老鸦陈周边为例[J]. 物探与化探, 42(01): 61-67.

梁爽. 2015. 单极-偶极装置电阻率法应用[J]. 煤矿安全, 46(04): 215-218.

阮娟,岑超,崔健,等. 2022. 强干扰条件下高密度电法结合地质雷达探测溶洞分布[J]. 四川有色金属, (04): 29-31+55.

沈小庆,杨炳南,周琦,等. 2021. 音频大地电磁法对黔东高地锰矿床电性结构及犁式正断层的识别[J]. 贵州地质, 38(02): 152-160.

吴有亮,雷宛,李金玺,等. 2006. 溶洞的浅层地震反射特征及工程应用[J]. 工程勘察, (04): 73-76.

肖林,陈云明,刘志臣,等. 2021. 音频大地电磁法在贵州遵义隐伏锰矿找矿勘查中的应用[J]. 贵州地质, 38(04): 412-418.

- 杨炳南,周琦,杜远生,等. 2015. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用:以贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J]. 地质科技情报,34(06):26-32.
- 杨天春,许德根,张启,等. 2016. 高密度电法在隐伏溶洞勘探中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,27(02):145-148.
- 曾爱平,彭慧芳,吴豪杰,等. 2022. 浅层地震在薄层采空区探测技术研究实践[J]. 地球物理学进展,37(06):2639-2647.
- 张德实,杨炳南,沈小庆,等. 2020. 高密度电阻率法在贵州岩溶地区塌陷测量效果探讨[J]. 工程地球物理学报,17(01):31-37.
- 钟世航,孙宏志,杨峰,等. 2016. 探地雷达地质勘查及检测技术[M]. 上海:上海科学技术出版社.

Discussion on the Effect of Audio Magnetotelluric Method on the Identification of Hidden Karst Caves

ZHANG De-shi^{1,2}, HE Shuai^{1,2,3}, YANG Bin-nan^{1,2,3}, SHEN Xiao-qing^{1,2}

(1. 103 Geological Party, Guichou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou China;

2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guichou, China;

3. Guizhou Prouince Manganese Ore Resources Forecasting and Evaluation Technology Innovation Talent Team, Tongren 554300, Guizhou, China)

[**Abstract**] In order to study the detection and identification effect of audio magnetotelluric method(AMT) on hidden caves, three cave models of no filling, half filling and full filling were established, and three models of Bostick and Occam TE, TM and TE+TM were selected for one-dimensional inversion. The one-dimensional inversion results are used as the initial model for regularized two-dimensional NLGG inversion, and the two-dimensional inversion results are compared and analyzed with the cave geological model, and the optimal inversion that can best reflect the shape of different cave models is selected. combination. Taking the measured section of Qianlong Cave in Songtao County as an example, the optimal inversion combination method closest to the karst cave model was selected for inversion and comparative analysis. It has a good corresponding relationship, which proves that audio magnetotelluric detection can identify hidden karst caves and provide valuable geophysical evidence.

[**Key Words**] Concealed karst cave; audio magnetotellurics; Modle; two-dimensional inversion