

杨妍妨, 居和建, 甘伏平, 等. 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.

DOI: 10.11932/karst20220505

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

杨妍妨¹, 居和建², 甘伏平¹, 程洋¹, 王永¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 南宁理工学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 高阻碳酸盐岩中的低阻断层和充水溶洞是岩溶区地下水勘查的主要目标体。根据高阻中找低阻的原则, 建立碳酸盐岩类裂隙溶洞水赋存模式的断层—溶洞地电模型, 利用 RES3D 软件进行温纳、施伦贝格、偶极—偶极三种采集装置的正演模拟计算, 从三维反演结果、剖面、电测深曲线三个维度, 对比分析不同装置下断层—溶洞目标体的地电响应特征和规律。结果显示: (1) 探测深度内, 温纳、施伦贝格、偶极—偶极装置可有效识别断层及其上盘三倍于电极距规模的充水溶洞, 无法分辨断层下盘二倍于电极距规模的充水溶洞; (2) 相同模型和观测条件下, 偶极—偶极装置对目标体的识别能力最强, 其三维反演结果可识别溶洞下边界, 剖面中形成左凸低阻圈闭异常, 不同测深点的曲线类型、拐点、极值点与模型设计最为贴近, 且拐点对应岩性界面, 极值点位于地质体的中心深度。该工作对野外观测方式的选取和地质解译有一定指导意义。

关键词: 断层-充水溶洞模型; 不同装置; 三维高密度电阻率法; 模拟; 响应特征

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 05-0708-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

溶洞发育、地下水的分布和储存一般都与构造有关^[1-2]。在断裂构造带附近, 岩石破碎, 溶隙发育, 地下水沿着裂隙运动顺畅, 对灰岩产生强烈的溶蚀改造作用, 往往沿着这些张性裂隙发育溶洞, 其规模不一, 形态各异, 具有不确定性、隐蔽性的特点^[3-5]。物探电法, 尤其是高密度电阻率法, 是碳酸盐岩类裂隙溶洞水勘查最为常用的手段之一^[6-7]。三维成像因采集数据大, 可获得丰富、高精度的地质异常信息, 其理论已经得到深入研究^[8-11], 并成功应用于底板和

顶板水探测^[12-13]、隐伏构造富水性勘探^[14]、高速公路溶洞探测^[15-16]中, 含水三维电阻率成像方法日趋完善。

在三维高密度电阻率法众多采集方式中, 偶极—偶极装置分辨率高, 尤其对水平方向的电阻率变化反映敏感, 适用于探测纵向结构的异常体^[17-18]; 温纳装置有很好的垂向分辨率, 信噪比最高, 但水平方向分辨率差, 适合浅层勘探^[19-20]; 施伦贝格装置分辨率和信噪比适中, 水平方向的分辨率相对温纳装置明显改善, 综合探测效果好^[21-22]。此外, Loke 认为, 温纳、施伦贝格和偶极—偶极装置在大极距、电极数

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0507504); 广西重点研发项目(桂科 AB21075002)

第一作者简介: 杨妍妨(1992—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事岩溶地质探测技术研究与应用工作。E-mail: yangyanfang@mail.cgs.gov.cn.

通信作者: 居和建(1993—), 男, 硕士, 讲师, 从事岩溶区地下结构无损检测研究与应用工作。E-mail: Hejian_Ju@nncet.edu.cn.

收稿日期: 2022-03-30

大于 12×12 的情况下推荐使用^[22]。在对地下水勘查及溶洞探测时,由于目标体通常埋藏较深,在一定电极距下,需要进行大网格的测量,而何种采集装置可得到最佳勘探效果仍需进一步探究。

地电模型建立和正反演模拟计算,可以把握地电场异常特征,并进一步指导选择采集装置、观测参数、数据处理以及地质解译。本文基于岩溶区普遍存在的碳酸盐岩类裂隙溶洞水赋存模式,建立三维断层—溶洞地电模型,并进行温纳、施伦贝格、偶极—偶极三种采集装置的正反演模拟计算,获取含水目标体的地电响应特征和规律。结果可提高地质解释效率,可望能有效提高对地下地质结构的进一步认识。

1 基本原理

高密度电阻率法基于目标地质体与周围岩土体之间的电性差异,通过观测在被动源电场作用下地质体的电性响应特征来研究地下结构^[23]。实际地质体多为三维或似二维特征,常规二维勘探是在指定测线上进行纵横向观测,获取测线下方地质体二维电性结构,通常没有垂直测线方向的宽度概念^[24],二维数据处理结果也只是一种近似结果^[22]。三维高密度电阻率法的观测系统则不同,它是大量电极一次性铺设在工区指定平面范围内,通过多测线、多方向组合观测(图1),可获取测区地下全空间任意方向丰富、高精度的地质异常信息。

2 模型设计与正演计算

2.1 物性参数选取

断裂对碳酸盐岩类地下水的分布、富集影响显著,同时容易在断层两侧形成溶洞。富水的断层和充水溶洞与围岩具有明显的电性差异,这为高密度电阻率法勘查裂隙溶洞水提供了较好的地球物理前提。南方岩溶区的相关钻孔、测井及试验结果表明,第四系覆盖层电阻率较低,一般在 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 以下

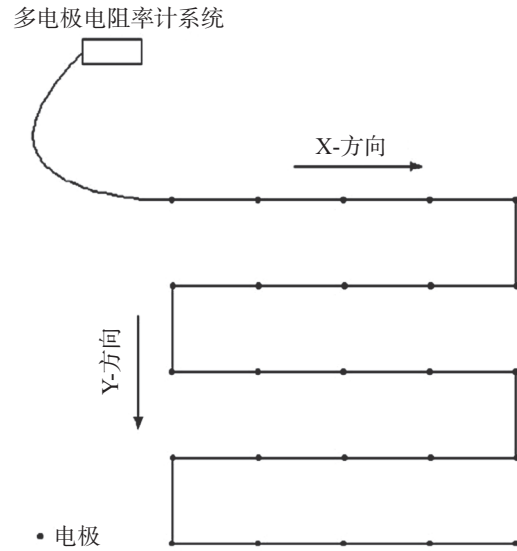


图1 地面三维观测的电极布置方式

Fig. 1 Electrode arrangement for 3D observation on the ground

(表1)^[25];灰岩电阻率变化从 $n \sim n \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ^[26],完整的灰岩电阻率高达数万欧姆米,而裂隙灰岩电阻率则从几百到几千欧姆米^[27];张性断层及其影响带,因空隙度增大,透水性和富水性增强,电阻率明显低于两盘岩体^[28];溶洞的电阻率取决于填充物质,桂北地区充水溶洞实测电阻率一般约 $25 \Omega \cdot \text{m}$ ^[27]。根据相关地质体的电性特征,将覆盖型岩溶区的碳酸盐岩类裂隙溶洞水赋存模式简化成组合地电模型进行研究较为方便。

2.2 模型设计参数

设计模型参数如表2。地表覆盖层为耕植土,厚度 3 m ,电阻率取值 $100 \Omega \cdot \text{m}$,其下电阻率 $4\ 000 \Omega \cdot \text{m}$ 的裂隙灰岩中发育倾角 78° 、宽度 10 m 的张性富水断层,电阻率 $800 \Omega \cdot \text{m}$;断层上盘发育直径 15 m 、中心埋深 17.5 m 的充水溶洞1,下盘发育直径 10 m 、中心埋深 15 m 的充水溶洞2(图2),表征张性断层上盘裂隙富水性更强^[31]的情况,两个溶洞电阻率均取值 $25 \Omega \cdot \text{m}$ 。

2.3 正演计算

综合考量目标体埋深、分辨率、工作效率等因素,三维模型网格剖分为 $x \times y = 50 \times 30$ 个电极数,层数 12 ,

表1 南方岩溶区常见介质的电阻率^[25-31]

Table 1 Resistivity of common media in the karst area of south China

介质类型	岩溶水	完整灰岩	裂隙灰岩	耕植土
电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	<50	10 313~56 785	451~5 786	93.56~260.3

表 2 断层-溶洞地电模型设计参数
Table 2 Designed parameters of fault-cave geoelectric model

地质体	电阻率 $\rho_0/\Omega \cdot m$	x 水平向范围 x_0/m	y 水平向范围 y_0/m	顶界埋深 z_{u0}/m	底界埋深 Z_{b0}/m	中心埋深 Z_{m0}/m	倾角 $\theta_0/^\circ$
围岩	4 000	无限延伸	无限延伸	-	-	-	-
覆盖层	100	无限延伸	无限延伸	0	3	1.5	-
断层	800	117.5~127.5	无限延伸	3	-	-	78
溶洞1	25	102.5~117.5	62.5~77.5	10	25	17.5	-
溶洞2	25	127.5~137.5	65~75	10	20	15	-

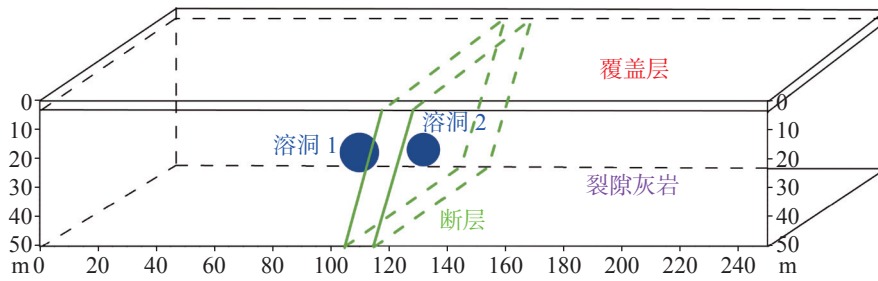


图 2 碳酸盐岩类地下水的断层-溶洞模型简图

Fig. 2 Diagram of fault-cave model of carbonate groundwater

电极距 5 m, x 方向测量范围 0~245 m, y 方向测量范围 0~145 m。断层为顶面发育在 $x=117.5\sim 127.5m$ 、y/z 方向无限延伸、倾角 63° 的板状体。因三维正演的网格剖分为长方体, 球体溶洞用长方体近似, 溶洞 1 正方体边长 15 m, 范围为 $x=102.5\sim 117.5 m$ 、y=

$62.5\sim 77.5 m$ 、 $z=-10\sim -25 m$; 溶洞 2 正方体边长 10 m, 范围为 $x=127.5\sim 137.5 m$ 、 $y=65\sim 75 m$ 、 $z=-10\sim -20 m$ 。最后使用 Loke 开发的 RES3DMOD 软件对模型进行温纳、施伦贝格、偶极-偶极三种装置的正演计算 (图 3)。

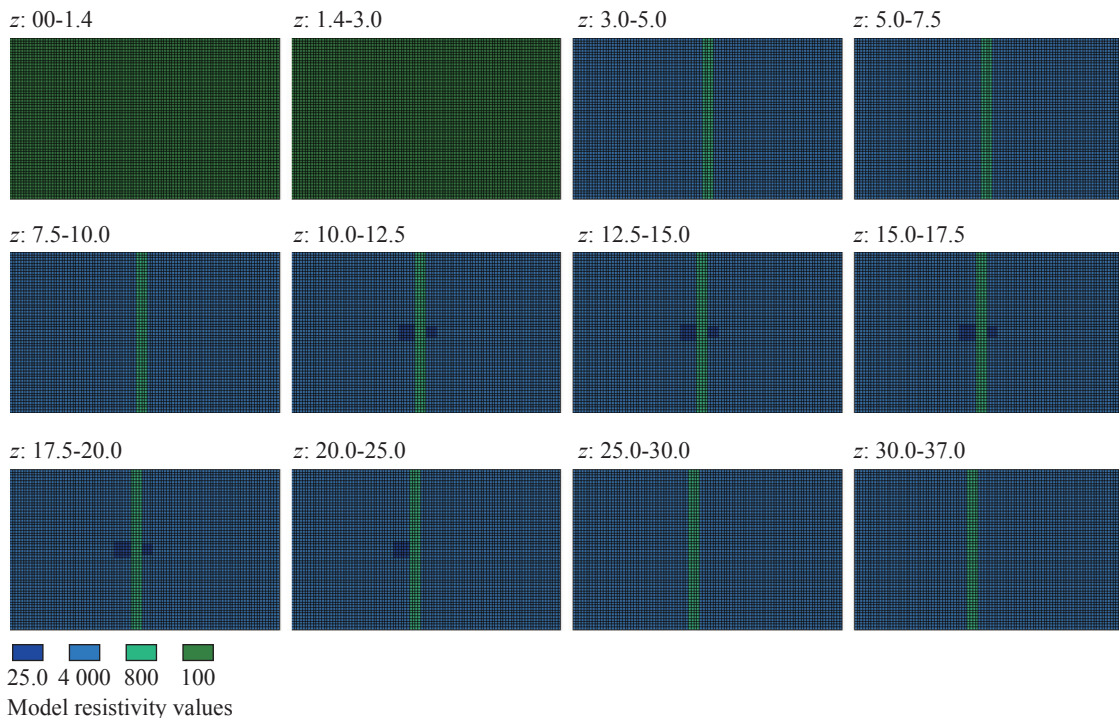


图 3 正演模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of forward modeling

3 结果分析

使用 RES3DINV 软件进行平滑约束最小二乘方法反演计算, 得到不同装置类型下的三维反演结果 (图 4, 图 5)。在电极数 $50 \times 30 = 1\,500$ 个, 电极距 5 m 排列条件下, 温纳装置反演电阻率 $87 \sim 4\,767 \Omega \cdot \text{m}$ 、探测深度 38.1 m; 施伦贝格装置反演电阻率 $90 \sim 5\,680 \Omega \cdot \text{m}$ 、探测深度 46.3 m; 偶极—偶极装置反演电阻率 $80 \sim 5\,310 \Omega \cdot \text{m}$ 、探测深度 55.4 m。

3.1 电性特征

高阻碳酸盐岩中的中阻断层和低阻溶洞是地下水勘查的目标体, 通常根据电阻率相对变化以及变化梯度带来识别目标体。反演结果显示, 三种装置均能较好反映目标体的存在, 并呈现一致的特征: 模型浅表低阻覆盖层的底板埋深、电阻率值与模型设计一致; 在溶洞发育位置 ($y=62.5 \sim 77.5 \text{ m}$), 受体积效应的影响, 断层与溶洞 1、2 连成由蓝色向绿色渐变的同心圆状低阻圈闭异常, 不同装置的低阻异常由浅至深贯穿至不同深度; 在远离溶洞影响的部位 ($y < 30 \text{ m}$ 或 $y > 110 \text{ m}$), 断层呈向 y 、 z 方向延伸的绿色条带低阻异常 (表 3)。

因反演的电阻率值为趋肤深度范围内上、下、左、右、前、后电性层的平均效应, 结果与真实电阻率值大小可能相差甚远。温纳装置反演结果 (图 4(a), 图 5(a)) 中, 同心圆状低阻异常体由浅至深贯穿整个探测深度范围, 其中断层区电阻率值 $400 \sim 2\,280 \Omega \cdot \text{m}$, 与模型偏差 $-400 \sim 1\,480 \Omega \cdot \text{m}$, 溶洞附近 ($y=62.5 \sim 77.5 \text{ m}$) 呈负偏差, 远离溶洞位置 ($y < 30 \text{ m}$ 或 $y > 110 \text{ m}$) 呈正偏差; 溶洞区受中阻断层和高阻围岩的影响, 电阻率值远大于模型设计, 为 $1\,100 \sim 3\,400 \Omega \cdot \text{m}$, 偏差 $1\,075 \sim 3\,375 \Omega \cdot \text{m}$ 。施伦贝格装置反演结果 (图 4(b), 图 5(b)) 中, 相比温纳装置, 指示溶洞的低阻圈闭异常电阻率值更低, 偏差降至 $995 \sim 2\,645 \Omega \cdot \text{m}$, 断层、围岩在溶洞的影响下电阻率反而愈加偏离模型设计。偶极—偶极装置反演结果 (图 4(c), 图 5(c)) 中, 断层和溶洞异常得到有效区分, 电阻率值更为准确, 条带异常指示断层, 为无限延伸的板状体; 圈闭异常指示溶洞区, 溶洞 1 的下边界可被有效识别。

3.2 几何特征

提取横穿溶洞、断层区 ($y=67.5 \text{ m}$) 的 XZ 剖面①、

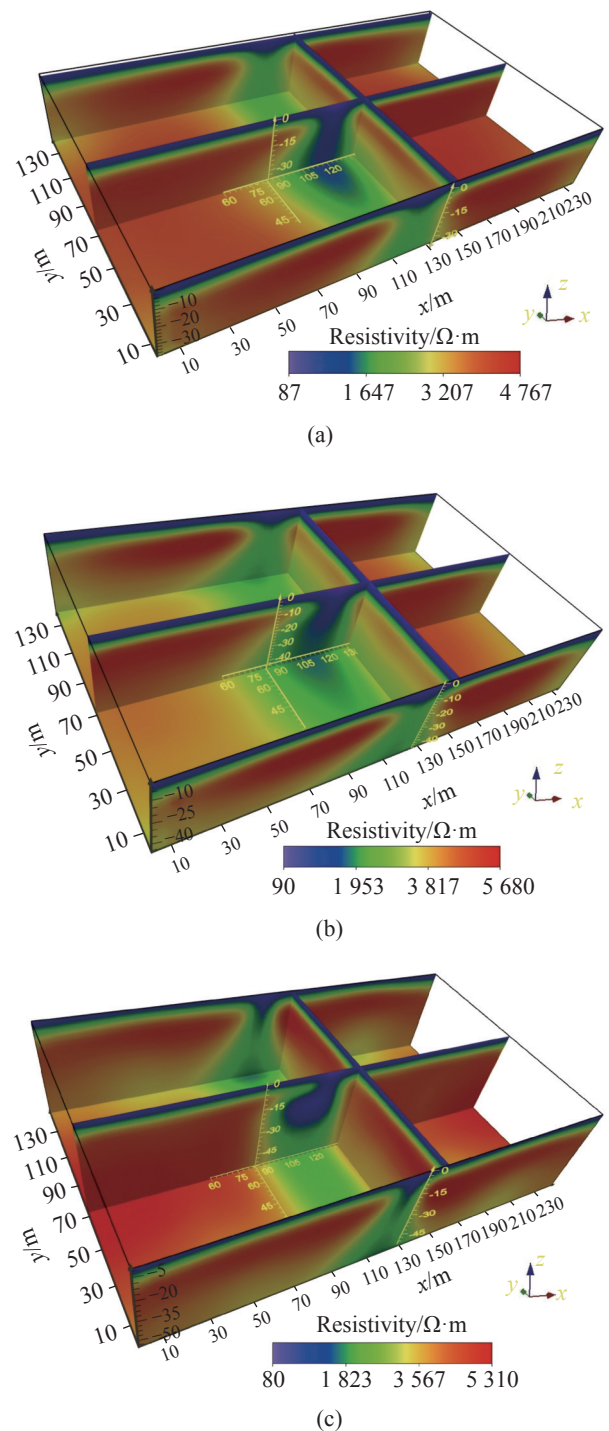


图 4 反演结果立体图

(a) 温纳装置 (b) 施伦贝格装置 (c) 偶极—偶极装置

Fig. 4 3D inversion results in stereograms

(a) Wenner device (b) Schlumberger device (c) Dipole-Dipole device

远离溶洞部位 ($y=7.5 \text{ m}$) 的 XZ 剖面② (图 6), 以及 I、II、III、IV 四个测深点 (图 7), 综合三维结果, 分析发现:

对于温纳装置, 在远离溶洞部位 ($y < 30 \text{ m}$ 或 $y > 110 \text{ m}$), 指示断层的绿色条带状低阻异常顶部埋

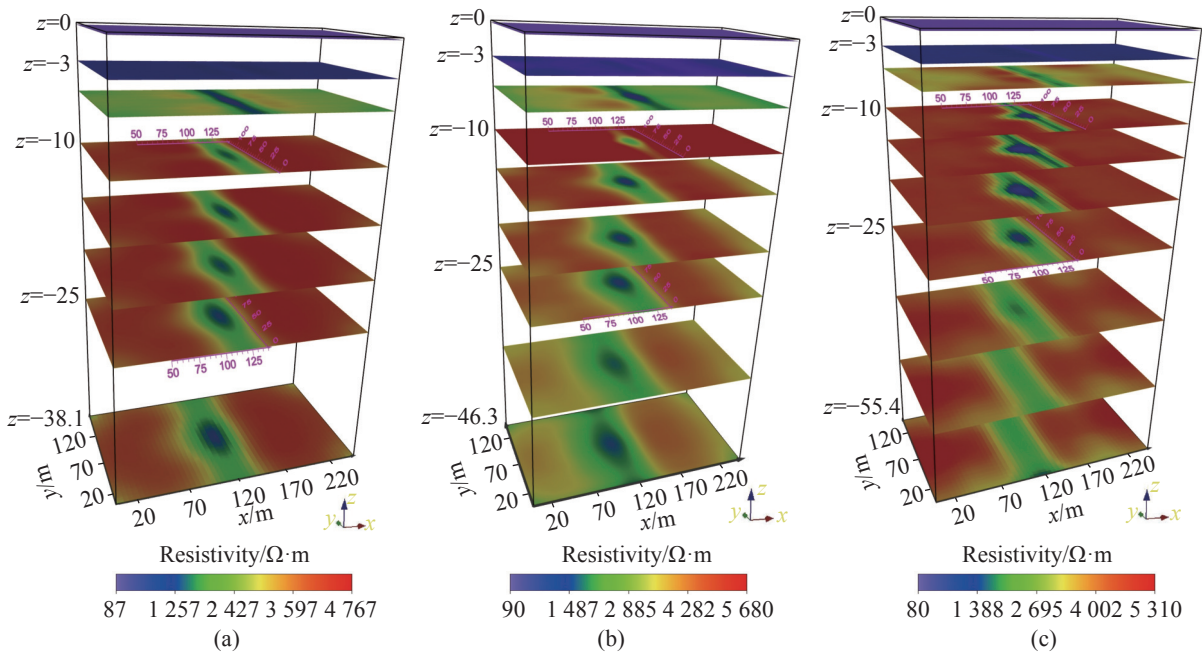


图 5 反演结果 XY 切片图

注: (a)温纳装置 (b)施伦贝格装置 (c)偶极—偶极装置

Fig. 5 3D inversion results in XY slices

(a)Wenner device (b)Schlumberger device (c)Dipole-dipole device

表 3 地质体在不同装置下的反演电性参数与模型设计差异表

Table 3 Differences between inversed resistivity and model designed parameter in different devices

地质体	温纳装置反演 电阻率值 $\rho_w/\Omega\cdot m$	$\rho_w - \rho_0$	施伦贝格反演 电阻率值 $\rho_s/\Omega\cdot m$	$\rho_s - \rho_0$	偶极—偶极反演 电阻率值 $\rho_p/\Omega\cdot m$	$\rho_p - \rho_0$
围岩	1 200~4 767	-2 800~767	1 460~5 680	-2 540~680	870~5 680	-3 130~1 680
覆盖层	87~350	-13~250	90~260	-10~160	80~195	-20~95
断层	400~2 280	-400~1 480	293~2 200	-507~1 400	200~2 060	-600~1 260
溶洞	1 100~3 400	1 075~3 375	1 020~2 670	995~2 645	480~2 100	455~2 075

深及 x 方向分布较为明显, 根据电阻率变化梯度带可识别断层的倾向、顶部埋深、水平宽度以及大致的倾角和上盘边界(表 4); 在溶洞发育位置($y=62.5\sim 77.5\text{ m}$), 指示溶洞区的低阻圈闭异常大致分布于 $x=99\sim 126\text{ m}$, $y=55\sim 105\text{ m}$ 处, 整体向溶洞 1 部位突出, 溶洞 2 和断层几乎没有反映, 无法根据反演结果判断溶洞的发育深度及边界。也就是说, 该模型条件下, 温纳装置无法探测溶洞下边界, 也基本无法分辨出 2 倍于电极距规模的异常体, 勉强可以分辨出 3 倍于电极距规模的异常体, 野外测量时应注意电极距的选择。

施伦贝格装置对溶洞的指示比温纳装置更为准确, 体现在圈闭异常的电阻率值更接近模型设计、溶洞 1 处低阻圈闭左凸现象更为明显, 但对溶洞 2 的

反映无明显改观, 无法分辨 2 倍于电极距规模的异常, 且低阻圈闭异常同样从浅表贯穿到最大探测深度, 无法探测下边界, 异常大致分布于 $x=104\sim 126\text{ m}$, $y=63\sim 76\text{ m}$ 。在 Y 方向上, 离溶洞越远断层本身特征显示越为明显, 如图 4(b)中 $y=2.5\text{ m}$ 、 $y=132.5\text{ m}$ 剖面以及剖面②中, 断层的倾向、顶部埋深、水平宽度、倾角及上盘边界均可准确识别。

偶极-偶极装置对模型的拟合程度最高, 体现在图 6(a)中形成与溶洞 1 对应的左凸低阻圈闭异常, 图 7 中呈现与模型一致的测深曲线类型, 如(a)中的“KHK”型、(b)的“KH”型、(c)的“A”型, 并且拐点对应岩性界面, 极值点位于地质体的中心深度。在溶洞发育位置($y=62.5\sim 77.5\text{ m}$), 根据低阻异常左凸现象可以判断溶洞 1 的存在, 溶洞 2 未得到反映; 叠加溶

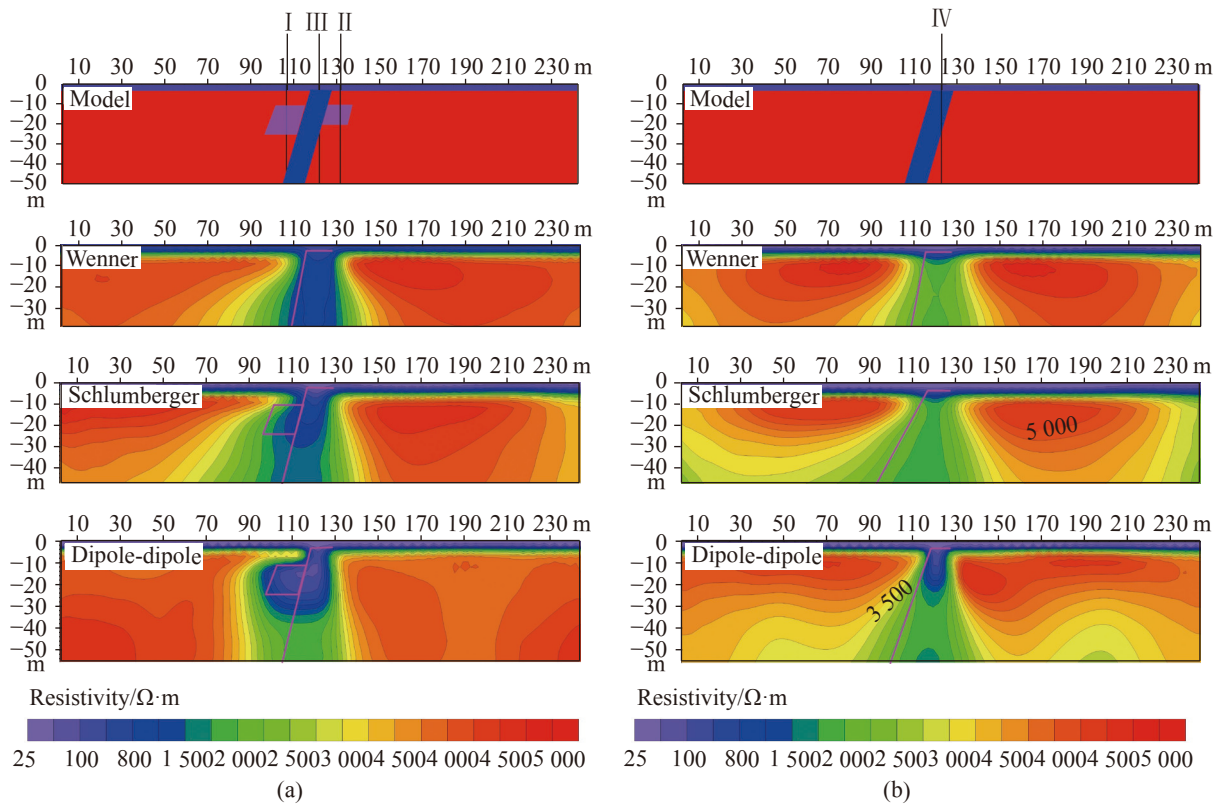


图 6 典型剖面

注：(a)横穿溶洞区($y=67.5\text{ m}$)的 XZ 剖面① (b)远离溶洞部位($y=7.5\text{ m}$)的 XZ 剖面②

Fig. 6 Typical electrical profiles

(a)Profile crossing the cave zone ($y = 67.5\text{ m}$) (b)Profile far from the cave ($y = 7.5\text{ m}$)

表 4 目标体在不同装置下的反演几何参数

Table 4 Inversion interpretation results in different devices

目标体	装置	x 水平向范围 x/m	y 水平向范围 y/m	顶界埋深 Z_{t0}/m	底界埋深 Z_{b0}/m	中心埋深 Z_{m0}/m	倾角 $\theta_0/^\circ$
溶洞1	温纳	99~126	55~105	-	-	-	-
	施伦贝格	102~126	60~102	-10.5	-	-	-
	偶极-偶极	105~129	65~80	-10	27	18.5	-
断层	温纳	115~127.5	无限延伸	-5	-	-	83
	施伦贝格	115~127.5	无限延伸	-3.9	-	-	60
	偶极—偶极	117.5~127.5	无限延伸	-3.2	-	-	70

洞的断层,倾向、顶部埋深仍可分辨,但倾角、水平宽度的偏差增大。在远离溶洞部位($y < 30\text{ m}$ 或 $y > 110\text{ m}$),断层的倾向、顶部埋深、水平宽度、倾角同样可通过绿色条带状低阻异常的电阻率相对变化以及变化梯度带得以识别。因而在该模型条件和观测系统下,偶极—偶极装置对目标体的识别能力最为突出。

4 结论与建议

本文通过对断层—充水溶洞组合模型进行三维

正反演计算,结合典型剖面、电测深曲线,分析不同装置中目标体的响应特征及规律,得到以下结论:

(1)探测深度内,温纳、施伦贝格、偶极—偶极装置可有效识别断层及其上盘三倍于电极距规模的溶洞1,目标体均呈绿色条带状并伴有颜色渐变的同心圆状低阻圈闭异常;三种装置无法分辨出断层下盘二倍于电极距规模的溶洞2;

(2)相同模型和观测条件下,偶极—偶极装置对目标体的识别能力最强。其三维反演结果可识别溶洞下边界,剖面中形成左凸低阻圈闭异常,不同测深

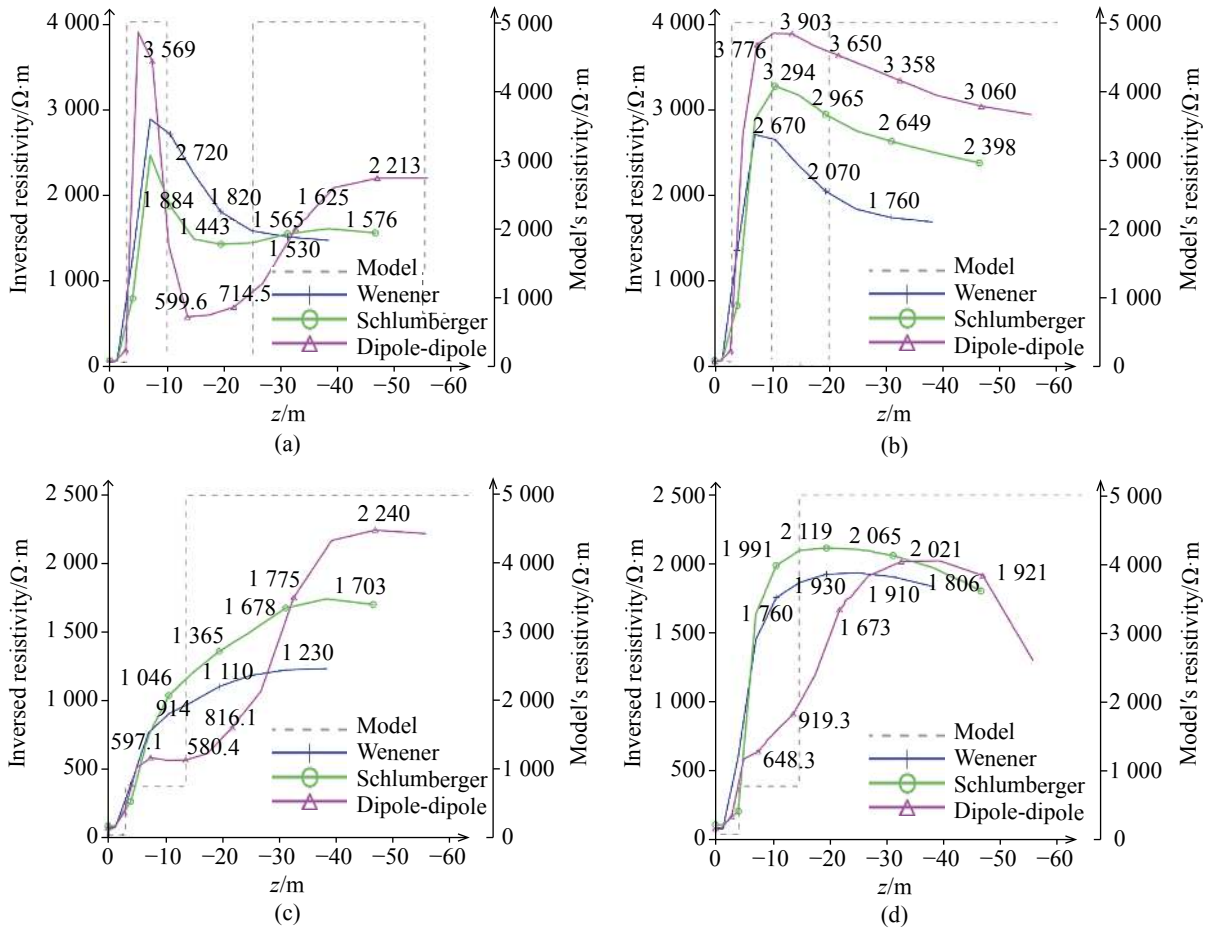


图7 不同位置点测深曲线:

注: (a)溶洞1地面测深点I (b)溶洞2地面测深点II (c)溶洞区断层地面测深点 (d)远离溶洞区断层地面测深点IV

Fig. 7 Sounding curves at different locations

(a)Sounding point I for Cave 1 (b)Sounding point II for Cave 2 (c)Sounding point III for the fault in the cave area, (d)Sounding point IV for the fault far from the cave area

点的曲线类型、拐点、极值点与模型设计最为贴近,且拐点对应岩性界面,极值点位于地质体的中心深度。

总之,在南方岩溶区的三维高密度电阻率法找水工作中,可优先选择偶极-偶极的观测方式,并注意电极距的选取。

致谢: 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

参考文献

[1] 张美良,林玉石,冉景丞,陈会明. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 13-20.
ZHANG Meiliang, LIN Yushi, RAN Jingcheng, CHEN Huiming. The characteristics of karst caves development in Libi, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 13-20.
[2] 罗利川,梁杏,周宏,谢凯,陈标典. 香溪河流域岩溶洞穴发育与分布特征[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 450-461.
LUO Lichuan, LIANG Xing, ZHOU Hong, XIE Kai, CHEN

Biaodian. Development and distribution characteristics of karst caves in the Xiangxi River basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(3): 450-461.

[3] Redhaouania B, Bédier M, Gabtni H, et al. 2016. Hydro-geophysical characterization for groundwater resources potential of fractured limestone reservoirs in Amdoun Monts(North-western Tunisia)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 128: 150-162.
[4] 胡树林,陈烜,帅恩华. 超高密度电阻率法在岩溶及破碎带探测中的应用[J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 821-824.
HU Shulin, CHEN Xuan, SHUAI Enhua. The application of the ultra-high density resistivity method to the investigation of karst caves and fracture zones[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(6): 821-824.
[5] 王志鹏,刘江平,王鸣谦,易磊. 高密度电法对带破碎状溶壳溶洞探测数值模拟[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(2): 193-202.
WANG Zhipeng, LIU Jiangping, WANG Mingqian, YI Lei. Detection numerical simulation of karst cave with broken shell by high density resistivity method[J]. *Chinese Journal of Engi-*

- neering Geophysics, 2019, 16(2): 193-202.
- [6] 杨妍妨. 高密度电阻率法在识别岩溶区断层结构特征中的应用[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(1): 62-69.
YANG Yanfang. Electrical resistivity tomography to identify fault structures in karst terrains[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(1): 62-69.
- [7] 朱庆俊, 李伟, 李凤哲, 孙银行, 李戌. 广西隆安县地下水储水构造的地质-地球物理模型及其地球物理响应特征分析[J]. 中国岩溶, 2011, 30(1): 34-40.
ZHU Qingjun, LI Wei, LI Fengzhe, SUN Yinhang, LI Shu. Analysis on geologic-geophysical model and geophysical response of groundwater reservoir in Longan County, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(1): 34-40.
- [8] Loke M H, Barker R D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion[J]. Geophysical Prospecting, 44(3): 499-523.
- [9] White R M S, Collins S, Denne R, et al. 2001. A new survey design for 3D IP inversion modelling at Copper Hill[J]. Exploration Geophysics, 32(4): 152-155.
- [10] 强建科, 阮百尧. 不同电阻率测深方法对旁侧不均匀体的反映[J]. 物探与化探, 2003(5): 379-382.
QIANG Jianke, RUAN Baiyao. The reflection of the lateral inhomogeneous body by different resistivity sounding methods[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003(5): 379-382.
- [11] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 三维高密度电阻率E-SCAN法有限元模拟异常特征研究[J]. 地球物理学报, 2006(4): 1206-1214.
HUANG Junge, WANG Jialin, RUAN Baiyao. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006(4): 1206-1214.
- [12] 施龙青, 翟培合, 魏久传, 朱鲁, 韩进, 尹会永, 于小鸽. 三维高密度电法在底板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 733-736.
SHI Longqing, ZHAI Peihe, WEI Jiuchuan, ZHU Lu, HAN Jin, YIN Huiyong, YU Xiaoge. Application of three-dimensional high density resistivity to detection of floor water[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 733-736.
- [13] 施龙青, 牛超, 翟培合, 魏久传, 朱鲁, 高卫富. 三维高密度电法在顶板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3276-3279.
SHI Longqing, NIU Chao, ZHAI Peihe, WEI Jiuchuan, ZHU Lu, GAO Weifu. Application of three-dimensional high density resistivity technique in detecting roof water[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3276-3279.
- [14] 马静晨, 李娜. 三维高密度电法在隐伏构造富水性勘探中的应用[J]. 城市地质, 2014, 9(1): 43-45.
MA Jincheng, LI Na. Application of 3D high-density electrical method to detection of the groundwater exploration in concealed structure[J]. Urban Geology, 2014, 9(1): 43-45.
- [15] 刘明伟. 组合三维与真三维高密度电法在高速公路溶洞探测中效果的对比研究[J]. 公路隧道, 2016(3): 41-46+50.
LIU Mingwei. Comparative study on the effect of combined 3D and true 3D high-density electrical method in karst cave detection of expressway[J]. Highway Tunnel, 2016(3): 41-46+50.
- [16] 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.
- [17] 李昊. 三维高密度电阻率法数值及物理模拟实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
LI Hao. Research on numerical and physical simulation experiment of 3D high density resistivity method[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [18] 白登海, 王立凤, 孙洁, 朱金芳, 黄宗林, 黄丹青, 何兆海, 祖金华, 廉雨方, Quentin Yarie, Volker Schaepe. 福州八一水库—尚干断裂的高密度电法和瞬变电磁法试验探测[J]. 地震地质, 2002(4): 557-564.
BAI Denghai, WANG Lifeng, SUN Jie, ZHU Jinfang, HUANG Zonglin, HUANG Danqing, HE Zhaohai, ZU Jinhua, LIAN Yufang, Quentin Yarie, Volker Schaepe. DC and TEM test sounding for the Bayi Reservoir-Shanggan Fault in Fuzhou city, Fujian province, China[J]. Seismology and Geology, 2002(4): 557-564.
- [19] 黄真萍, 吴伟达, 张义, 胡晓娟. 三维高密度电法高分辨数值模拟与分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 795-800.
HUANG Zhenping, WU Weida, ZHANG Yi, HU Xiaojuan. Numerical simulation and analysis of 3D high density resistivity method with high resolution[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 795-800.
- [20] 黄真萍, 胡艳, 朱鹏超, 李文灵. 高密度电阻率勘测方法分辨率研究与探讨[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 1015-1021.
HUANG Zhenping, HU Yan, ZHU Pengchao, LI Wenling. Analysis of resolution in fluence factors of High Density Resistivity Electrical Method and application[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 1015-1021.
- [21] Dey A, Morrison H F. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures[J]. Geophysics, 1979, 44(4): 753.
- [22] Loke H M. 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys[J]. Reports on the Researches, 2013, 31: 67-72.
- [23] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 武汉: 地质出版社, 1983.
FU Liangkui. Tutorial on electrical prospecting[M]. Wuhan: Geological Publishing House, 1983.
- [24] 朱瑞, 李朝辉, 时向阳, 任云峰, 吴松, 张连忠. 三维高密度电法在隐伏断层探测中的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 106-109+143.
ZHU Rui, LI Zhaohui, SHI Xiangyang, REN Yunfeng, WU Song, ZHANG Lianzhong. Application of 3D electrical resistivity tomography to buried fault detection[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 106-109+143.
- [25] 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 甘伏平, 张伟. 综合物探法在柳州泗角村岩溶塌陷区调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2017,

- 44(5): 143-149.
- ZHENG Zhijie, AO Wenlong, ZENG Jie, GAN Fuping, ZHANG Wei. Application of integrated geophysical methods to karst collapse investigation in the Sijiao village near Liuzhou[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, 44(5): 143-149.
- [26] 桂林冶金地质学院, 广西物探队, 广西航空物探队. 广西区域岩石物性调查报告[R]. 2005:29-30.
- Guilin Metallurgical Institute. Guangxi geophysical prospecting team, Guangxi airborne geophysical prospecting team. Guangxi regional rock physical investigation report[R]. 2005: 29-30.
- [27] 郑智杰, 陈贻祥, 甘伏平. 岩溶区岩土地球物理性质浅析: 以吉利岩溶塌陷区为例[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(2): 920-927.
- ZHENG Zhijie, CHEN Yixiang, GAN Fuping. Brief analysis of the geophysical properties of rock and soil in karst area: Taking Geely karst collapse area as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(2): 920-927.
- [28] 李清林, 秦建增, 谢汝一, 张晓普. 高密度电阻率二维层析成像在庐断裂带山东潍坊段试验结果的初步分析[J]. *地震地质*, 2006(4): 589-596.
- LI Qinglin, QIN Jianzeng, XIE Ruyi, ZHANG Xiaopu. A preliminary study on the experimental result of 2D resistivity tomography survey along Tanlu fault zone in Weifang, Shandong[J]. *Seismology and Geology*, 2006(4): 589-596.
- [29] 宋希利, 宫述林, 邢立亭. 高密度电法在地下空洞探测中的应用研究[J]. *工程地球物理学报*, 2010, 7(5): 599-602.
- SONG Xili, GONG Shulin, XING Liting. Applications of high-density electrical method to underground cavity detection[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(5): 599-602.
- [30] 曹崇本, 周世恩. 岩溶蓄水构造电阻率模型建立及其在物探找水中的应用[J]. *贵州地质*, 2014, 31(3): 223-228.
- CAO Chongben, ZHOU Shien. Building and significance of karst reservoir structure resistivity model in geophysical water exploration[J]. *Guizhou Geology*, 2014, 31(3): 223-228.
- [31] 谢忠球, 温佩琳, 喻振华. 提高高密度电阻率成像分辨力的数据处理技术[A]//湖南省地球物理论丛[C]. 长沙: 中南大学出版社. 2001.
- XIE Zhongqiu, WEN Peilin, YU Zhenhua. Data processing techniques to improve the resolution of high density resistivity imaging[A]//Collection of Geophysical Papers in Hunan Province[C]. Changsha: Central South University Press.

Response characteristics of forward modeling of 3D high-density resistivity method on different devices in the fault-water-filled cave

Yang Yanfang¹, Ju Hejian², Gan Fuping¹, Cheng Yang¹, Wang Yong¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Nanning College of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Low blocking layers and water-filled caves in high resistivity carbonate rocks are the main target bodies for groundwater exploration in karst areas. Three-dimensional imaging by high-density resistivity can obtain rich and high-precision geological anomaly information in any direction in the whole underground space of the survey area through multi-line and multi-direction observation, which is one of the most commonly used methods for water exploration of carbonate fissure caves.

According to the principle of finding low resistance in high resistance, the water occurrence model of carbonate fissure karst cave in overlying karst areas is simplified into a combined geoelectric model of fault-karst cave, and the physical property parameters of various bodies are assigned according to the resistivity characteristics of common media in the karst area of south China. The specific parameters of the model are as follows: the surface overlying layer is cultivated soil with a thickness of 3 m and a resistivity of 100 $\Omega \cdot m$. In the fractured limestone with an underlying resistivity of 4,000 $\Omega \cdot m$, a tensile water-rich fault, with a dip angle of 78° and a width of 10m, is developed with a resistivity of 800 $\Omega \cdot m$. Water-filled cave 1, with a diameter of 15 m and a central burial depth of 17.5 m, is developed in the hanging wall of the fault, and Water-filled cave 2, with a diameter of 10m and a central burial depth of 15 m, is developed in the footwall. The resistivity of both caves is 25 $\Omega \cdot m$.

Given the burial depth, resolution, working efficiency and other factors of the target body, the mesh of the 3D model is divided into $x \times y = 50 \times 30$ electrodes. The number of layers is 12; the electrode distance is 5m; the measurement range of x direction is 0-245 m; the measurement range of y direction is 0-145 m. RES3D software has been used to perform forward and inverse simulation calculation of Winner, Schlumberger and Dipole-dipole acquisition devices. Inversion results within the range of detection depth are displayed in a three-dimensional manner, and XY horizontal slices are displayed on the model interface ($Z=0$ m, 3 m, 10 m, 25 m, and the maximum detection depth). To further explore the response characteristics of the model on different devices, XZ profile① across the karst cave and fault area ($y=67.5$ m), XZ profile② far away from the karst cave ($y=7.5$ m), and the sounding curves of different points (Ground sounding point I of Karst cave 1, Ground sounding point II of Karst cave 2, Ground sounding point III of Karst cave, and Ground sounding point IV far from the karst cave area) are extracted. The electrical characteristics of the three devices at and away from karst caves, the development depth and boundary of Karst caves 1 and 2, the inclination of faults, the burial depth at the top, the horizontal width, the inclination of the dip and the boundary of the hanging wall are analyzed.

Through the three-dimensional forward and inverse calculation of the fault-water-filled karst cave, combining with the typical profile and electrical sounding curve, we analyze the response characteristics and laws of the target body in different devices and draw the following conclusions, (1) Within the detection depth, Winner, Schlumberger, Dipole-dipole devices can effectively identify the fault and the cave of the upper wall three times the size of electrode distance of Cave 1. The target body is a concentric circle of low resistance trap anomaly with green ribbon and color gradient. These three devices cannot distinguish the fault footwall of two times the size of the electrode distance of Cave 2. (2) Under the same model and observation conditions, the Dipole-dipole device has the strongest recognition ability for the target body. Three-dimensional inversion results can identify the lower boundary of the cave, and the left convex low resistance trap anomaly is formed in the profile. The curve types, inflection points and extreme points of different sounding points are closest to the model design. Inflection points correspond to the lithology of interface. And extreme points are located at the central depth of the geological body.

Therefore, when using the three-dimensional high-density resistivity method for water exploration in the karst area of south China, we can prioritize Dipole-dipole observation method with the careful consideration of selecting the electrode distance. This study is of guiding significance for the selection of field observation mode and geological interpretation.

Key words fault and water-filled cave model, different acquisition devices, 3D high density resistivity method, simulation, response characteristics

(编辑 张玲)