



利用水下电阻率层析成像技术 探测坝址岩溶溶洞

柴海斌¹, 曹佳俊¹, 杨迪琨², 吕邦来¹

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290; 2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055)

摘要: 内河航运和水电开发工程在推进社会进步中发挥了重要作用, 然而部分河底岩溶溶洞广泛发育, 严重影响工程选址及建设。提出水下电阻率层析成像探测方案, 并将该方法应用于广东东江下碓角航电枢纽工程, 共布设6条700 m长横跨江面的测线, 单个水底电缆排列包含40个电极, 极距5 m, 相邻排列重复观测长度为100 m。反演得到的三维电性结构刻画了高阻砾石层、低阻砂岩和高阻灰岩等关键地质单元, 结合已有钻孔资料划分出多个隐伏溶洞靶区。水下电阻率层析成像施工难度大, 正反演计算复杂, 研究成果可为后续电阻率层析成像和水下灾害地质异常体探测提供参考。

关键词: 水下电阻率层析成像; 三维电性结构; 岩溶溶洞; 钻孔

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0295-06

Detection of karst caves at dam site using underwater resistivity tomography imaging technology

CHAI Haibin¹, CAO Jiajun¹, YANG Dikun², LYU Banglai¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Inland waterway transportation and hydropower development projects play an important role in promoting social progress. However, the widespread development of underwater karst caves has seriously affected the site selection and construction of such projects. This paper proposes an underwater resistivity tomography imaging detection scheme, which is applied to Xiaijijiao Navigation and Hydroelectric Hub Project in Dongjiang, Guangdong Province. A total of six 700-meter-long cross-river survey lines are laid out, with each underwater cable arrangement containing 40 electrodes spaced 5 meters apart, and adjacent arrangements repeat observations every 100 meters. The inverted three-dimensional electrical structure delineates key geological units such as high-resistance gravel layers, low-resistance sandstone and high-resistance limestone, and multiple concealed karst cave target areas are identified in combination with existing borehole data. Underwater resistivity tomography imaging poses great construction difficulties and involves complex forward and inverse calculations, the research results can provide references for subsequent resistivity tomography imaging and underwater geological anomaly detection.

Keywords: underwater resistivity tomography imaging; three-dimensional electrical structure; karst cave; borehole

近年来, 国家加大内河开发力度, 开展众多航道扩能升级工程。然而, 部分内河河底广泛发育灰岩, 易受到地下水溶蚀作用而形成溶洞, 引

发地面塌陷和不均匀沉降的风险较大, 严重影响居民人身财产安全和工程建设。使用地球物理方法刻画隐伏溶洞的空间形态特征和分布范围, 可

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 柴海斌 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程物探及物探方法研究。

以指导设计施工，规避风险区域。

电阻率层析成像是一种基于地下介质电阻率差异的地球物理反演方法，该方法利用接收电极观测电势差数据推测地下电性结构，从而达到透视地质构造的目的。电阻率层析成像方法在浅地表地质异常体探测中精度很高，已被广泛应用于考古寻址^[1]、地下水污染和海水入侵过渡带范围圈定^[2]、岩溶和裂隙破坏带探测以及土壤水含量测量等工程和水文地质研究^[3-4]。然而，水下电阻率层析成像方法鲜有研究。

本研究提出一种流动式全覆盖水下电阻率探测方案，即在下游远处布设固定远极 B，沿预设测线滚动布设水底电缆，使用电极 A、M、N 对目标区域进行覆盖，最后结合电极的真实位置和实

测水底地形对数据进行二维、三维反演。将该方案应用于广东东江下矶角航电枢纽工程 6 条 700 m 长跨江测线，标靶出隐伏岩溶溶洞空间位置，以期为工程设计提供重要信息支撑。

1 工程地质背景

东江下矶角航电枢纽工程是一座以航运为主，兼有发电等综合效益的航电枢纽工程。

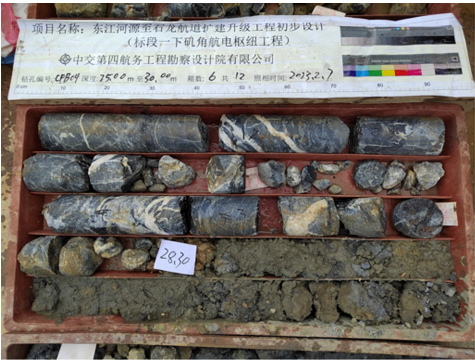
调查工区位于惠州市横沥镇东江流域河段，距惠州市城区约 40 km。该处的河段呈东南走向，河面宽约 700 m，水深 0.3~10 m，水势湍急。枢纽区内出露的地层从古生代到新生代均有发育，主要有古生界石炭系、中生界三叠系、新生界第四系地层，且出露侵入岩和构造岩等，测区工程地质情况见表 1。

表 1 测区工程地质情况

地质年代	岩土名称	渗透性等级
第四系全新统人工堆积层(Q_4^s)	人工填土	强透水
第四系全新统冲积层上段(Q_4^{2al})	以松散-稍密的砂卵石为主,局部为松散-稍密的砂质土和可塑状的粉质黏土	中等-强透水
第四系全新统冲积层下段(Q_4^{1al})	以中密-密实的砂卵石为主,局部为中密-密实的砂质土	中等-强透水
第四系中更新统-上更新统冲积层(Q_3^al)	粉质黏土夹卵石、砂卵石	弱-强透水
侏罗系下统天光侵入体(J_1T)	花岗岩	微-弱透水
构造岩	糜棱岩、压碎岩	弱-中等透水
三叠系(T)	粉砂质泥岩、泥质砂岩	弱透水
石炭系(C)	砂岩、炭质页岩、板岩、灰岩、白云岩	弱透水,溶洞填充物中等-强透水

根据测区钻孔资料，将地层划分为 3 层结构：水面下方 10 m 为分选性差的砂砾卵石层；其下方有厚度 10~40 m 不等的岩层，主要成分为砂岩、页岩、糜棱岩和风化灰岩；基岩主要为

灰岩。其中 28.3~33.7 m 的灰岩中有岩溶溶洞分布，根据钻孔岩溶统计，遇洞率 56%、直线率 31%，岩溶极为发育。图 1 为代表性有溶洞发育的岩芯照片。



a) 岩芯25~30 m



b) 岩芯30~35 m



c) 岩芯35~40 m



d) 岩芯40~45 m

图 1 钻孔 CFB04 溶洞岩芯照片

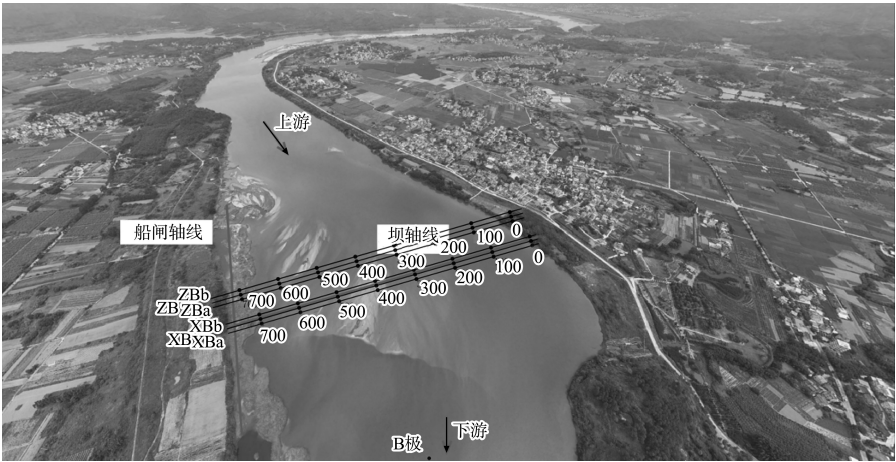
2 数据采集与处理

高密度电法测区位于水域, 河底地形起伏较大, 水深 0.3~10.0 m, 传统设备无法实施, 针对特殊的施工工况, 对物探设备和施工方案进行优化。采用水底布设电极的方式勘探, 为定制的水下防水电缆长 200 m, 配备 40 个共轴抽头不锈钢电极, 极距 5 m, 有效覆盖测线长 195 m。如图 2 所示, 为方便进行三维电阻率反演, 在中下坝址区域分别布置 3 条横跨东江的测线, 中线为拟选坝址线, 两侧 15 m 各布设 1 条测线, 每条测线长 700 m。每条测线由 6 个排列覆盖, 相邻排列之间位移 100 m, 即两个相邻排列有 100 m 重合。

电阻率的测量通过两个发射电极向地下供入稳定电流, 观测两个接收电极之间的电势差 ΔU 实现。在电阻率反演中, 初始模型设置需要准确的先验信息构建, 为此测量了河流以及测区钻孔中的岩芯样品的电阻率, 见表 2。先利用 SimPEG^[5] 软件进行二维反演, 再结合河床地形开展三维反演工作。

表 2 测区中常见的物质电阻率

介质名称	电阻率/ $\Omega \cdot m$
干砂石	1 000~5 000
河水	90~93
黏性土、腐殖土及表层土	20~200
未风化基岩	500~5 000



注: XB 为下坝址, ZB 为中坝址, B 极为无穷远的发射电极。

图 2 测线布设 (单位: m)

3 结果与讨论

3.1 二维反演

如图 3 所示, 下坝线电阻率反演剖面揭示河水以下地层自上而下包含 3 层基本结构: 1) 最上

面为连贯性较好、分布较为均一的高阻层, 电阻率可达上千 $\Omega \cdot m$, 结合地质情况, 判断为河床沉积的砂卵砾石层。由于卵石、砾石电阻率较高, 因此该层呈现相对高阻异常; 2) 砂卵砾石层下方

地层电阻率横向变化较为剧烈，频繁出现显著的低阻层，主要由砂岩、页岩、压碎岩等主导，造成低阻异常主要是由于孔隙水溶解了矿物质；3) 最下方的基底地层主要由灰岩构成，其未溶蚀部分呈现高阻。钻孔揭示灰岩中多发育溶洞，但是由于高阻屏蔽效应和溶洞偏小偏深，灰岩层中的溶洞较难直接反映在电阻率反演模型中。

如图 4 所示，中坝线揭示的低阻异常主要来源于砂岩、页岩、压碎岩等岩层内的丰富孔隙水，而高阻异常则主要与灰岩等弱透水性岩性相关。由于溶洞埋藏过深且有时位于高阻岩体内部，表面电阻率成像方法无法对其进行直接成像，但电阻率成像结果在岩性分层与推断低阻体岩层厚度等方面与钻孔吻合较好。

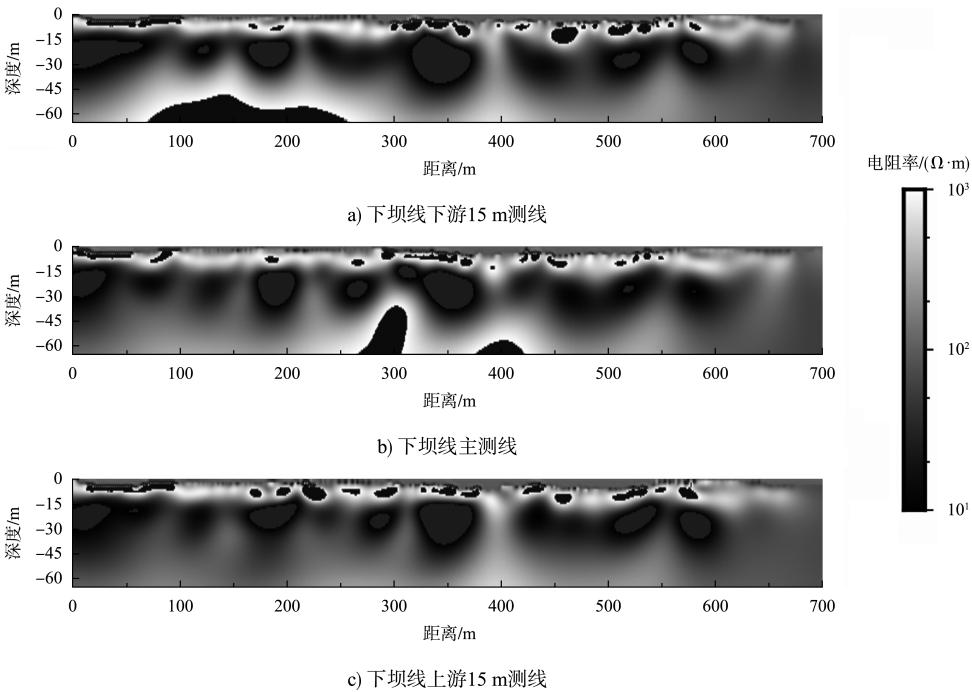


图 3 下坝各测线二维反演成果

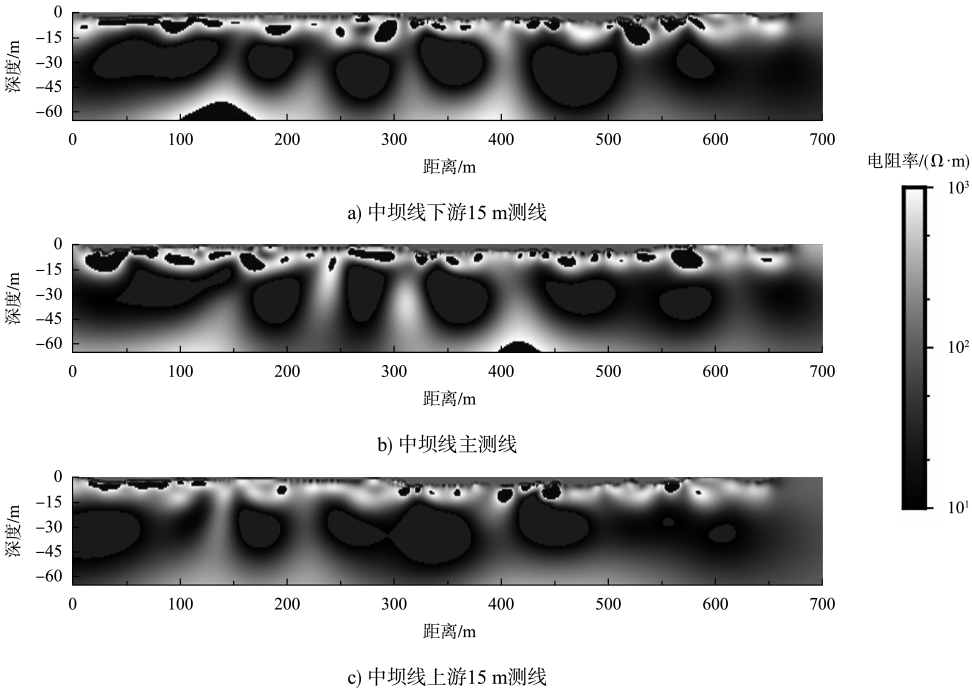


图 4 中坝各测线二维反演成果

下坝线和中坝线二维结果显示,低阻异常在全测线上与钻孔揭示的砂岩、页岩、破碎岩等岩性高度相关,除表层外的高阻异常与下伏灰岩高度相关。由于灰岩高阻对电流屏蔽和埋藏深度原因,赋存在灰岩体内的溶洞难以直接反映在电阻率断面图上,但电阻率成像可以为寻找含有潜在溶洞的灰岩提供可靠依据。

3.2 三维反演

经过多次迭代,数据误差达到允许的精度范围,获得了不同深度下的电性切面,如图5所示,深部的高阻异常主要集中在下坝址测线的200与400 m处,最深可达55 m,推测为风化或未风化的灰岩。中坝址的3条电性剖面与下坝址电性横

断面具有相似的分层特征。浅部高阻异常体发育深度在距江面以下25 m,与表层砂卵石厚度相吻合。相较于下坝址,中坝址深部的电性结构以相对低阻为主且在垂直测线方向上有连续发育的特征;电性切片结果显示其与下坝址深部的低阻体在空间上相连通。结合钻孔地质资料,下坝址深部的低阻异常主要为砂岩和全风化花岗斑岩。在勘察区域中,由于高阻屏蔽效应以及溶洞发育规模小且埋藏过深,很难直接反映在电阻率反演剖面中。中坝址深部低阻异常与下坝测线400 m处的高阻异常区域可定义为潜在溶洞发育的靶区。通过二维和三维电阻率结果,推测潜在溶洞发育的靶区,溶洞分布平面范围见图6。

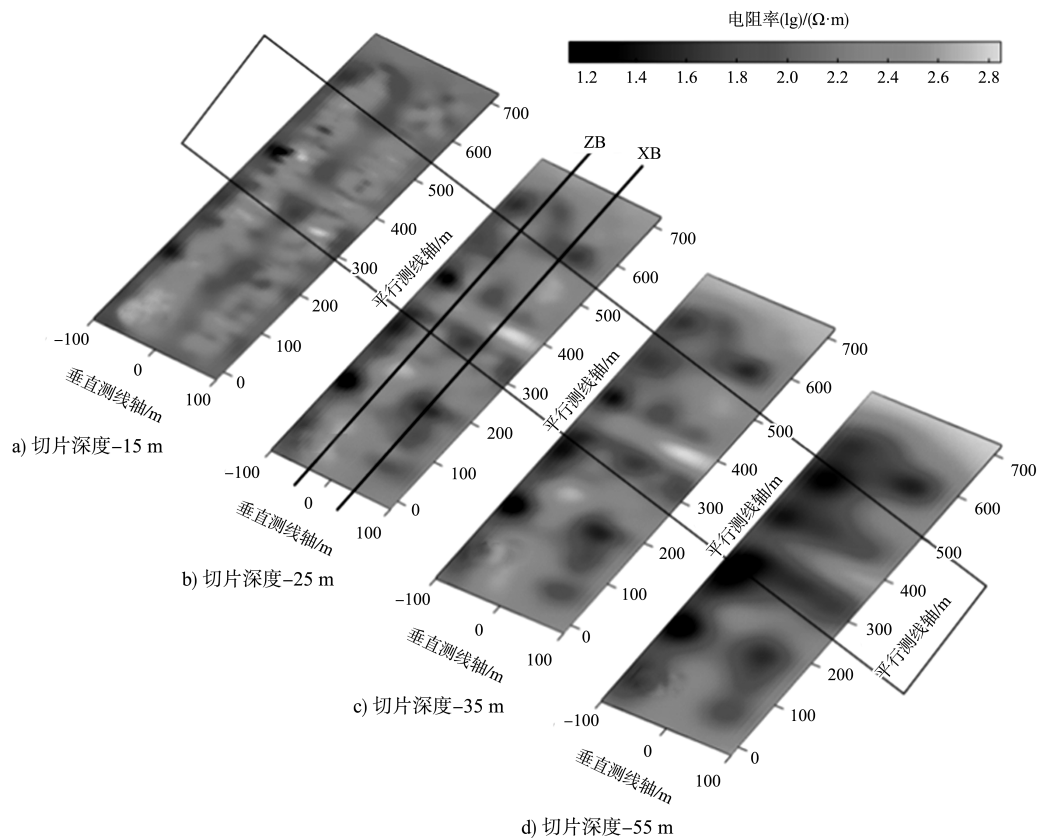


图5 不同深度下的三维电阻率模型切片

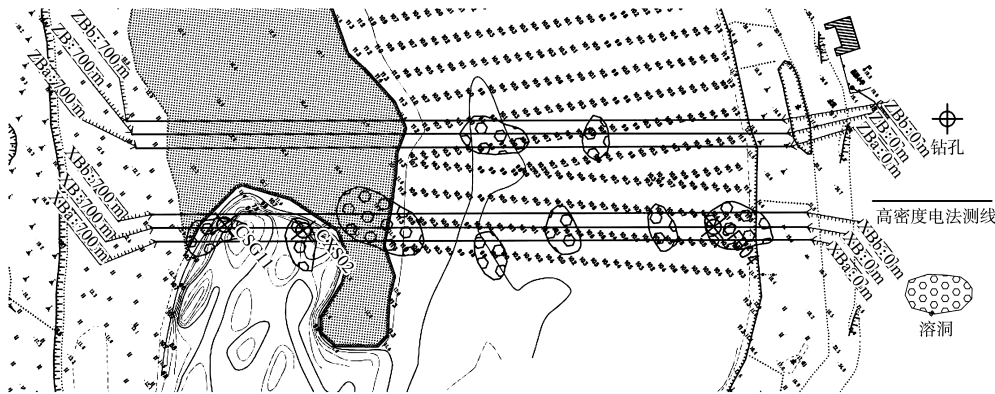


图 6 测区溶洞分布平面范围

3.3 孔中电视

部分钻孔进行了孔中电视工作，如图 7 孔内电视成果照片所示，该场区溶洞发育整体规模较小，

且大多有孔隙水、软土、风化岩土等充填物，属于低阻区，因此电法勘探虽然可找到潜在溶洞发育的靶区，但溶洞分布的精细形态仍需进一步研究。

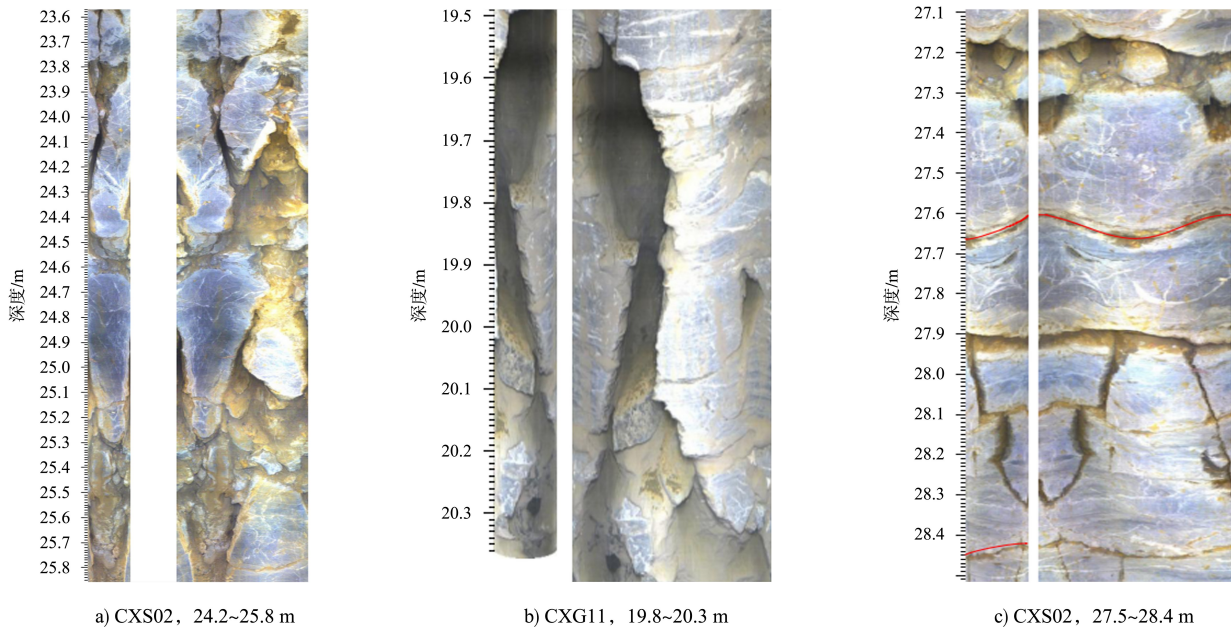


图 7 溶洞发育段孔中电视成果

4 结语

1) 研究旨在使用直流电阻率方法查明河流下方赋存溶洞的分布，与已有钻孔资料、孔内电视和地质推断进行相互验证，提高对区域的地质认识，为工程设计和施工提供依据。

2) 勘探采用横跨河面的水底电极、三极装置、滚动覆盖的观测方法，探测深度较深、工作效率较高、且精度较高。

3) 在二维和三维反演中加入地形参数，同时将实测的河水电导率、干砂石、黏性土、腐殖土及表层土和岩芯的电阻率加入模型，以减少反演多解性。

4) 模拟了无穷远极的真实位置，数据的三维反演结果有效识别出砾石、砂岩、灰岩等岩层单元，标定出潜在溶洞发育靶区，为寻找含有潜在溶洞的灰岩提供可靠依据。