

周文龙,吴荣新,肖玉林. 充水溶洞特征的高密度电阻率法反演分析研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 699-705.
DOI:10.11932/karst20160612

充水溶洞特征的高密度电阻率法反演分析研究

周文龙,吴荣新,肖玉林

(安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:在 高 密 度 电 法 勘 探 中,不 同 性 质 的 溶 洞 其 反 演 电 阻 率 特 征 有 差 异,溶 洞 为 空 洞 时 反 演 电 阻 率 表 现 为 高 阻,充 满 水 时 表 现 则 为 低 阻,而 充 水 溶 洞 的 电 阻 率 反 演 特 征 很 难 判 断。文 章 通 过 构 建 不 同 充 水 程 度 的 溶 洞 模 型 进 行 正 演 模 拟,利 用 最 小 二 乘 法 对 模 型 的 地 电 断 面 进 行 反 演,对 比 不 同 反 演 成 像 模 型 的 地 电 响 应 特 征。结 果 表 明,充 水 溶 洞 的 电 阻 率 随 溶 洞 充 水 量 的 增 加 而 减 小,低 阻 的 范 围 随 着 水 量 的 增 加 而 不 断 扩 大,其 可 分 辨 性 强。野 外 探 查 资 料 进 一 步 验 证 了 模 拟 结 果,所 获 得 的 认 识 对 地 下 溶 洞 的 电 法 探 测 分 析 具 有 一 定 的 指 导 意 义。

关键词:岩溶溶洞,高密度电法,数值模拟,现场探测

中图分类号:P631.3;P642.25

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2016)06-0699-07

0 引 言

在岩溶发育区,由溶洞、破碎带等导致的地质病害会对基础工程建设带来严重的影响。溶洞不仅能造成定向钻穿越过程中漏浆、卡钻、掉钻等事故,而且在民用建筑中易引起地基变形、不均匀沉降、滑动和地面塌陷^[1]。在隐伏岩溶区,隐伏溶洞因其表层覆盖物的存在,造成其空间上的隐蔽性,在时间节点上溶洞的坍塌往往具有突发性和难以预测性,严重威胁人们的生命财产安全,因此,迫切需要针对隐蔽性溶洞的超前探测技术。目前探查隐伏溶洞的技术方法多种多样,应用较多的电阻率法、电磁法和地震法等,其中,高密度电法因其操作的简便性和识别溶洞的高分辨率而得到广泛的应用^[2]。前人在利用高度电法对溶洞探测过程中取得了很大的进展,例如祝卫东^[4]等利用高密度电法查明了地下采空区的范围,郑智杰^[5]等确定了岩溶管道的反演特征,刘伟^[19]等利用高密度电法确定岩溶塌陷分区。郭清石^[6]利用数值模拟对溶洞高密度电法勘探的理论进行研究,为电法勘

探野外工作提供了重要的参考。

高密度电法探测地下溶洞时,充水溶洞和空洞时因其地断面单一、且与周围岩层存在物性差异,在物性参数反演上特征明显而比较容易被识别出来。但探测半充水溶洞时,在水与空气交接处的参数反演特征受低阻的水和高阻的空洞共同影响,其电阻率反演成像模型的地电响应特征很难判断。对含水溶洞的电阻率反演成像模型特征随着溶洞中充水程度的变化而不断变化,且变化范围较大,表现出可能与周围岩电阻率反演特征大致相同,因而,造成对地下溶洞探测的分析解译出现误判或漏判等现象,严重影响工程建设的开展。因此,在特定条件下,理论上分析充水溶洞的高密度电法反演特征有望解决这一复杂的岩溶地质问题,对物探技术的探索以及对生产实践的指导具有一定的现实意义。

1 高密度电法

高密度电法是在电阻率法的基础上发展演化而

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172137)

第一作者简介:周文龙(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向:工程与环境勘探、地质工程。E-mail:wenlongzhou163@163.com。

通信作者:吴荣新(1972-),男,教授,博士,主要研究方向:工程与环境勘探、地球探测信息技术、煤田地质工程。E-mail:rxwu@aust.edu.cn。

收稿日期:2015-06-30

来,是一种以各种介质电性特征不同为基础的阵列式勘探方法^[16,19]。高密度电法勘探发展至今,实现了采集仪器的发展创新、分析软件的精度提高和应用范围的不断扩大^[7-10]。高密度电法数据采集的高精度、高密度和数据处理的高分辨率、使其成为溶洞、地下空洞探查的首选方法之一^[3,12]。隐伏溶洞在形成过程中受裂隙水、地表水和地下水的影响,导致溶洞中不同程度的充水,形成充水溶洞或半充水溶洞等^[11,13]。由于溶洞形态多样,围岩、空洞、水的导电性不同,高密度电法的地电响应特征也不相同。空洞在高密度电法勘探中,其电阻率反演剖面呈现为高阻特征,通过判断高阻异常区域来识别空洞;当溶洞充满水时视电阻率剖面表现为低阻区域,根据视电阻率低阻区域来判定充水溶洞。实际工作中,多数溶洞为充水或半充水,其电阻率反演特征不突出,对于充水溶洞一般是根据现场工程地质经验来判断,而对于全充水溶洞电阻率特征的理论研究较少,因此有必要对

不同充水量状态下溶洞的电阻率反演特征进行研究,分析反演电阻率值与不同充水程度的关系以及不同充水程度对周围围岩反演电性特征的影响,为利用高密度电阻率法探测充水溶洞提供分析、判定的依据。

本文利用数值模拟手段,建立隐伏溶洞不同充水程度条件下的二维数值模型,模拟隐伏溶洞不同充水程度条件下,正演和反演计算结果总结不同地质异常体的地电响应特征,为现场探测、分析、解释溶洞特征提供科学依据。

2 数值模拟

数值模拟基于 AGI 软件平台,针对可溶岩、空洞以及水的不同电性参数,构建不同地电模型,利用有限元法正演计算获得的电性分布结果,并对比反演模型与构建模型的一致性,从中总结出溶洞不同充水程度时的电阻率变化特征(图 1)。

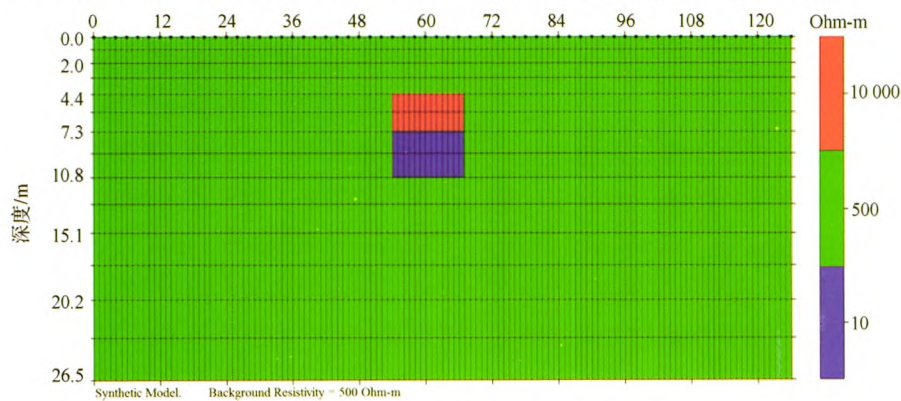


图 1 溶洞模型示意图

Fig. 1 Schematic model of the cave

正演数值模拟是将计算的地电断面模型分割成多个矩形小块,然后对每个离散化的小区域模块设置合理的电阻率值。根据赋予的电阻率值,利用插值公式,确定电阻率等值线。反演程序是以平滑约束的最小二乘法为基础,将二维模型断面分割成多个子块,模拟过程中调解各个子块的电阻率,比较正演计算电阻率模型和实测电阻率模型,利用均方差(RMS)衡量两者相似程度^[14-15]。均方差越小,正演数值模型与反演模型的差别越小,相似程度越高。

最小二乘法的公式如下:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \tag{1}$$

其中 $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$; f_x = 水平平滑滤波系数矩

阵; f_z = 垂直平滑滤波系数矩阵; J = 偏导数矩阵; λ = 阻尼系数; d = 模型参数修改矢量; g = 残差矢量。

构建 5 种二维管道(溶洞)模型,模型大小为 10 m × 8 m(宽×高),数值模拟空洞电阻率为 10 000 Ω · m,水的电阻率设为 10 Ω · m,空洞底部与水相接,模拟不同充水程度的溶洞。围岩电阻率为 500 Ω · m。溶洞模型位于地表下 4 m 处,数据采集参数为电极 64 根,电极距为 2 m。5 个溶洞模型参数见表 1。

利用有限元法计算得到 5 个不同模型的电性分布,在此基础上进行反演,对 5 个模型电阻率正反演结果进行综合分析。图 2 为反演过程收敛曲线,第 6 次叠代以后,反演收敛参数下降到 2% 以内,且两次

表 1 溶洞模型参数

Table 1 The parameters of cave model

类型	名称	充水程度(占总体积)	模型方案
模型一	全充水溶洞	1	水 10 m×8 m
模型二	充水溶洞	3/4	空洞 10 m×2 m, 水 10 m×6 m
模型三	充水溶洞	1/2	空洞 10 m×4 m, 水 10 m×4 m
模型四	充水溶洞	1/4	空洞 10 m×6 m, 水 10 m×2 m
模型五	溶洞空洞	0	空洞 10 m×8 m

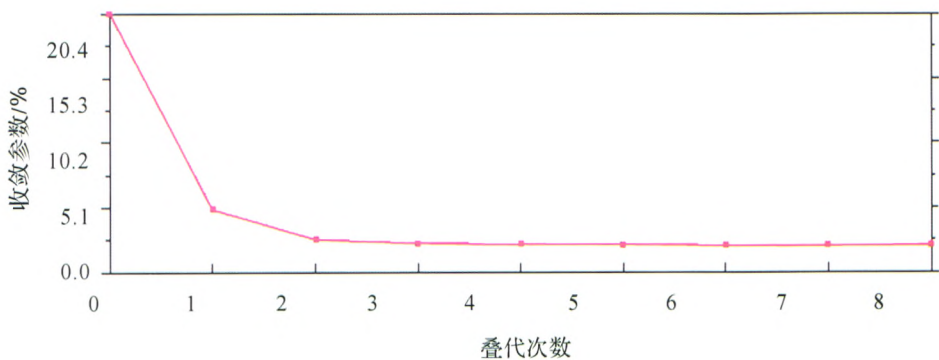


图 2 反演过程收敛曲线

Fig. 2 Convergence curve of inversion process

叠代值之间的反演收敛参数差异小于 0.1%，反演收敛参数趋于稳定。

图 3 为模型二维正反演计算完成后得到的正反演断面对比图。根据五个模型正演计算断面信息，模型正演断面图能清楚地反映充水溶洞和空洞的范围，异常体位置与模型模拟的位置一一对应。未充水区域与充水区电阻率差异明显，能够清晰判别。说明高密度电法对溶洞充水范围、充水面积的探查具有理论可行性。对比模型反演断面图，随着溶洞充水量的增加，反演结果图中低电阻率区域向外扩散的范围增大，异常体中心区域电阻率值变化的范围也就越大。同一位置充水量越大，电阻率值降低的越明显。反演电阻率等值线呈封闭、半封闭状，异常体的电阻率反演结果图一般为封闭的圈闭，图 3 的 a-1 和 e-1 表明模型模拟只有单一异常体时，模拟溶洞的大小与反演断面异常体的大小基本一致，水与围岩、空气与围岩的分界线明显。模型中水和空气并存时，低阻异常体的范围变化较大(图 3 的 b-1 和 c-1)，反演断面表现为上部高阻异常、下部低阻异常区，这种反演特

征可为充水溶洞的电阻率反演及解释提供判别依据。

图 4 为模型反演断面图 61 m 位置的电测深曲线，图 5 为反演断面图深度 12 m 的电剖面曲线。从图 4 可以看出模型 2—5 在深度方向上电阻率变化趋势大致相同，表现为随着深度的增加电阻率值先增加后减小最后趋于稳定。而全充水溶洞模型(模型 1)反演电阻率则表现为先减小后增加再趋于稳定，与模型模拟的围岩电阻率大致相同。该曲线反映的结果与构建模型时 61 m 位置深度方向上电阻率变化趋势一致。深度方向上溶洞空洞时电阻率变化范围最大，全充水溶洞电阻率变化范围最小，测深方向上充水溶洞随着充水量的增加电阻率变化就越小。

由图 5 可知，在水平方向上 5 个模型的电剖面曲线，中心区域电阻率值变化最为明显，溶洞空洞中心区域电阻率反演结果表现为高阻，而全充水溶洞则表现为低阻，对于充水溶洞随着充水量的增加，其中心区域反演结果的电阻率值不断降低。5 个模型电剖面曲线与模型深度 12 m 处正演计算的结果高度的相似。

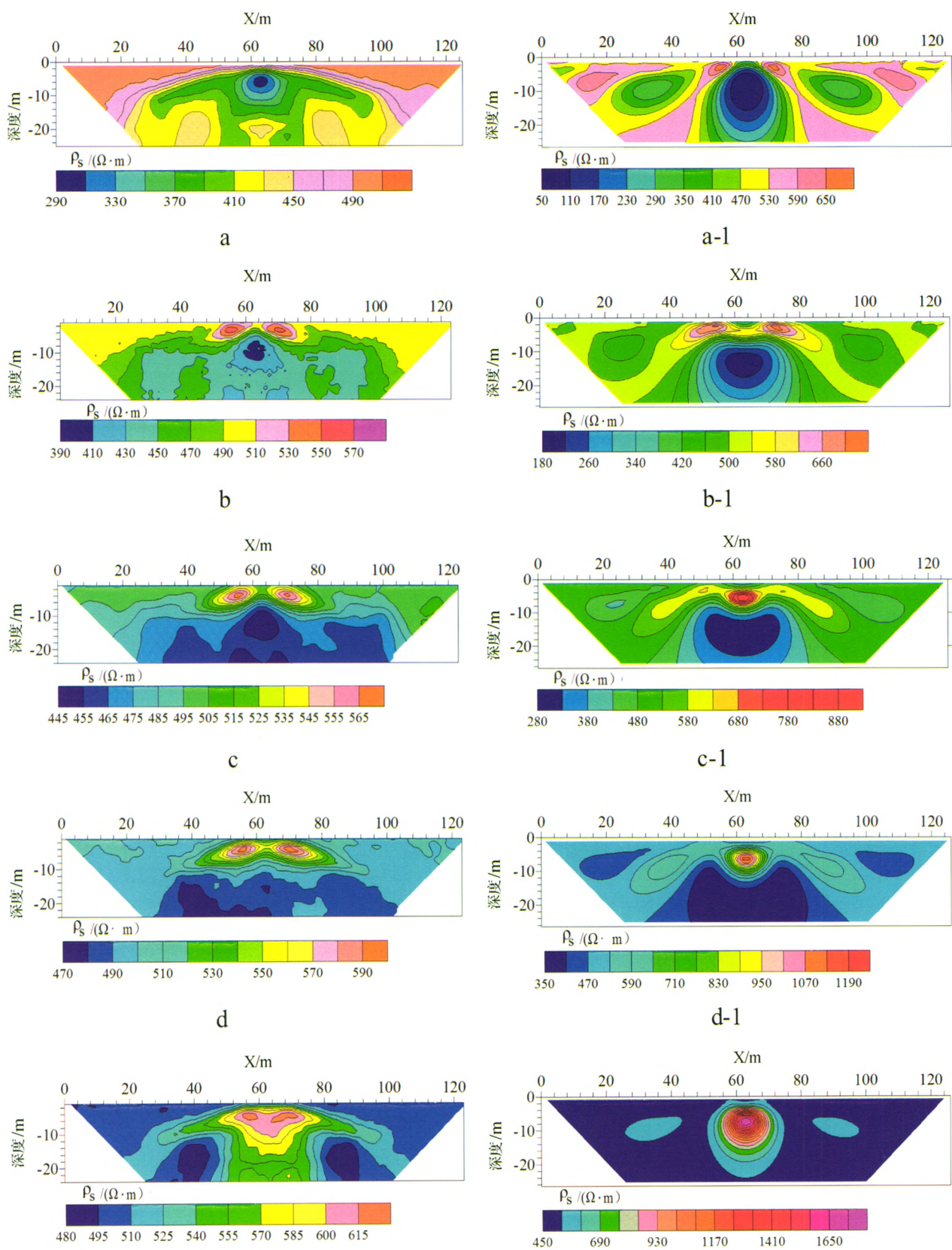


图 3 模型电阻率正反演对比图

Fig. 3 The resistivity of forward and inversion

a、b、c、d、e 分别为模型 1、2、3、4、5 的正演断面图；a-1、b-1、c-1、d-1、e-1 分别为模型 1、2、3、4、5 的反演断面图

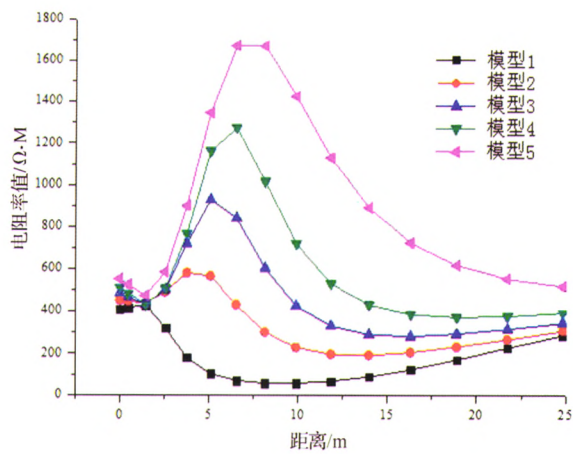


图 4 -61 m 位置一维电测深曲线图

Fig. 4 Dimensional electron bathymetric map

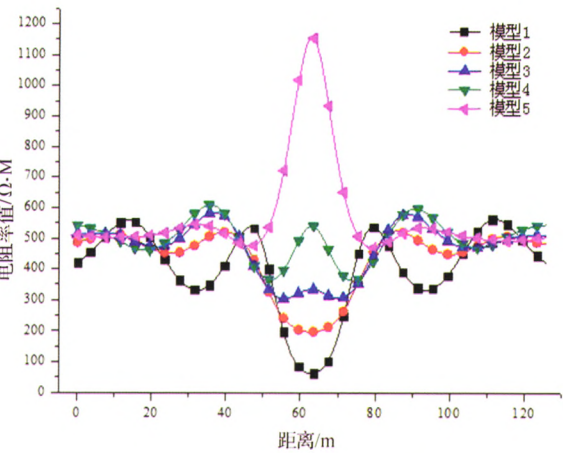


图 5 -12 m 位置一维电剖面图

Fig. 5 Electric sectional view of a one-dimensional

综合分析模型正反演对比图,不同程度充水模型的反演结果与实际模型设置一一对应,同时与正演计算的结果也能够很好的对应。反演结果对模型模拟的响应程度非常高,能够有效的判断溶洞模型的真实情况。充水溶洞的电阻率反演特征可为充水溶洞的判别提供可靠的依据。

3 工程案例分析

甘肃天水某地滑坡地质灾害调查区褶皱和压性断裂发育良好,该研究区地处秦岭地槽、陇陆地台两大地质构造单元的交错地带,滑坡体地表层覆盖第四系黄土、泥岩层、第三系砾层,且范围比较大。表层黄土受地表水浸泡,黄土中的节理(垂直节理、裂隙节理)发育,地表水沿着节理、裂隙和空隙向下渗流,在长期侵蚀的作用下地表凹陷段不断沉陷,形成落水洞。由于雨水的渗入和地表、地下水径流作用使落水洞处于充水状态。为了探明落水洞的发育情况,采用高密度电法勘探,现场布置两条勘探测线,电极间距为 5 m,采用重复半站测量的方式,测线长 450 m。

图 6 为滑坡区视电阻率剖面图,测线电阻率剖面电性特征明显。测线表层为一层厚度为 10 m 左右的黄土及风化泥岩层,浅层存在少量呈高阻特征的裂缝层,介质电阻率值达到 30 Ω·m 以上。其下为一层低电阻率值的介质层,电阻率值在 15~35 Ω·m,推断为砾岩层。黄土与砾岩层电性特征分界线明显。

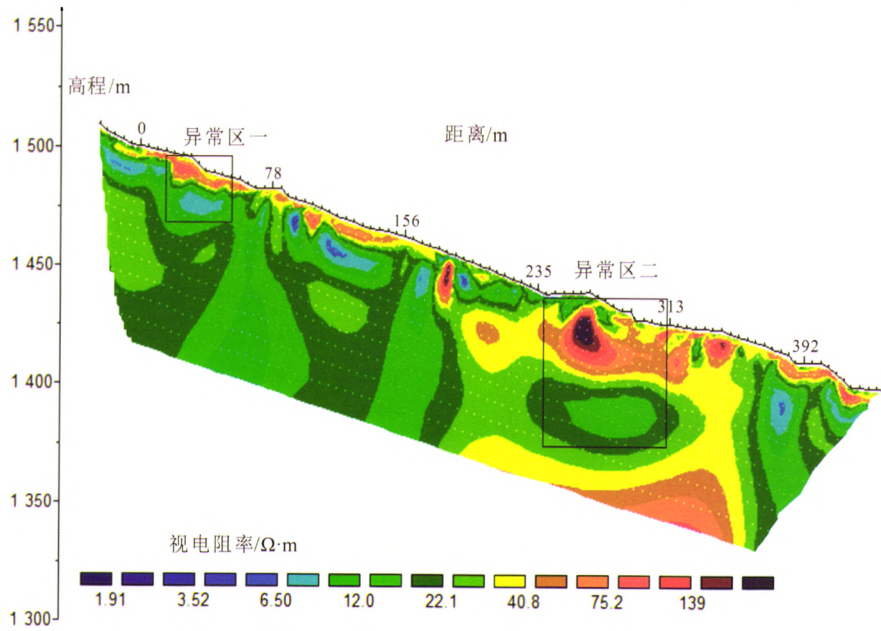


图 6 研究区视电阻率剖面图

Fig. 6 The apparent resistivity section of the study area

水平方向 20 m 到 840 m 范围内,高程 1 420 m 到 1 450 m 之间的视电阻率异常区一,该区域上部为长条状的视电阻率高阻区域,下部为视电阻率值较低的封闭的圆形区域,长条中间区域阻值较两边高,与图 3 b-1 溶洞充水模型反演的电阻率图相吻合,判定为充水落水洞。位于水平距离 240~300 m,高程 1 325~1 450 m 之间的视电阻率异常区二,表现为上部视电阻率为高阻,而下部表现为相对的低阻,高阻封闭的圈层与低阻区域有明显的分界线,与图 3 c-1 溶洞充水模型反演的电阻率图相吻合,上部相对于下部高阻,高阻异常区与低阻异常区并存。结合模型实验的电阻率反演断面判定该区域为充水落水洞。实地验证结果显示这两个异常区表层为黄土覆盖,表层以下为地表水与地下水作用形成的落水洞,洞内水和空洞同时存在,既为充水溶洞。

4 结 论

(1)对比不同模型的反演地断面信息,随着溶洞充水量的增加其反演结果图中,低电阻率区域向外扩散的范围越大,异常体中心区域电阻率值变化的范围也就越大。同一位置随着充水量越大,其电阻率值降低的越明显。溶洞为空洞或者饱水时,靠近溶洞围岩的反演电阻率值随着溶洞中心电阻率值同步变化,变化范围比含水溶洞模型变化明显,异常区域大小与模拟的溶洞的大小基本一致。

(2)溶洞中充水时,电阻率反演断面可以表现为低阻区域和高阻区域并存,上部空洞反演形成高阻区域,下部为充水而形成低阻区域的反演特征,可为充水溶洞的判别提供依据。研究充水溶洞不同充水程度的反演特征以及周围围岩电阻率值的变化规律,可为高密度电阻率法溶洞探测的分析、解释和研究提供参考。

(3)在黄土覆盖地区,根据模拟的地电模型,以及所获得相应的电阻率变化特征,能够准确识别充水落水洞,判断其位置,充水情况以及大致影响的范围。为类似工程的探查提供依据,为工程建设提供指导。

(4)文中建立高阻、低阻的异常模型,能够反映二维情况下,电阻率反演断面的特征,为研究电场在地

下空间分布规律提供依据。但现场岩土体情况复杂,需要综合考虑多种因素带入模拟实验研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 谭磊, 张平松, 吴荣新. 隐伏洞体并行电法探查试验研究[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版, 2015, (2): 38-43.
- [3] 孟令星. 三维电阻率方法对含水溶洞的反演模拟研究[J]. 山西建筑, 2014, (28): 58-59.
- [4] 祝卫东, 钱勇峰, 李建华. 高密度电阻率法在采空区及岩溶探测中的应用研究[J]. 工程勘察, 2006, (4): 69-72.
- [5] 郑智杰, 甘伏平, 曾洁. 不同深度岩溶管道的高密度电阻率法反演特征[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 292-297.
- [6] 郭清石. 高密度电法对溶洞勘探的数值模拟研究[D]. 西安: 西南交通大学, 2013.
- [7] 吴荣新, 刘盛东, 张平松. 双巷并行电法探测煤层工作面底板富水区[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 454-457.
- [8] 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.
- [9] 吴荣新, 张卫, 张平松. 并行电法监测工作面“垮落带”岩层动态变化[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 571-577.
- [10] 吴荣新, 刘盛东, 张平松, 等. 地面钻孔并行三维电法探测煤矿灰岩导水通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(A2): 3585-3589.
- [11] 王海宁, 乔光建. 涑源岩溶地下水系统泉水量变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 54-57.
- [12] 王永亮, 李昊洁, 张昀保, 等. 高密度电法在子牙新河堤防隐患探测中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 145-147.
- [13] 李树琼, 蒋丛林, 马志斌. 高密度电法在岩溶地区勘查中的应用[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 540-544.
- [14] Loke M H, Dahlin T. A comparison of the Gauss-Newton and Quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 49(3): 149-162.
- [15] Loke M H, Barker R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(3): 499-523.
- [16] 金聪, 刘江平. 二维高密度电阻率法数值模拟与应用[J]. 地质与勘探, 2014, 50(5): 984-990.
- [17] 谭磊, 胡雄武, 张平松, 等. 坝体浸润特征的并行电法连续监测技术[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 926-930.
- [18] 刘伟, 甘伏平, 赵伟, 等. 高密度电法与微动技术组合在岩溶塌陷分区中的应用分析: 以广西来宾吉利塌陷为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(1): 118-122.
- [19] 张欣, 赵明阶, 汪魁, 等. 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.

Back analysis of high density resistivity method in the water-bearing karst cave

ZHOU Wenlong, WU Rongxin, XIAO Yulin

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract In high-density electrical prospecting, karst caves may show different electricity resistivity (ER) characteristics due to the nature of cave fillings. When a cave is empty, its ER value appears extremely high, when being completely filled with water this value could be very low. However, for an unsaturated karst cave, the resistivity range is difficult to judge via ER data interpretation. By constructing different models with various cave moisture contents, forward modeling using the method of least square at geoelectric sections were conducted, compared with the different geoelectric response characteristics of their inversion imaging model. The results showed that the resistivity of water-bearing karst cave decreases with increasing water content. On the geoelectircal section the range of low resistance expanded with the amount of water increased, which was strongly distinguishable. Exploration data derived from the field work further has verified the validity of the simulated results shedding light on the significance of the model application and a better understanding of electrical analysis method for underground cavern detection.

Key words karst cave, high density resistivity method, numerical simulation, scene detection

(编辑 张玲)



湘江上游岩溶流域解决资源环境和基础地质问题成果显著

近日，由中国地质科学院岩溶地质研究所承担的《湘江上游岩溶流域 1：5 万水文地质环境地质调查》项目成果显著。

一是查明了工作区水文地质条件与地下水受控因素。调查地下河 10 条，岩溶大泉 22 个，岩溶地下水分布受区域性断裂、区域性向斜以及地层岩性的控制，区域性断裂主要有北西向、北东向区域型大断裂与南北向区域性大断裂，向斜为袁家向斜与砂石向斜，地下水多发育于泥盆系及石炭系地层，岩性以中厚层灰岩、白云岩为主。

二是分析了工作区岩溶地下河分布规律。区内地下河发育受岩组结构、地貌、地质构造等因素影响，岩组结构对地下河发育的影响体现在岩性、岩层厚度和组合关系等方面，在地层呈狭长条带状分布区域，地下河的发育受到两侧相对隔水层的限制，多呈单一管道，且长度中等；构造对区内地下河的影响主要受断裂及褶皱构造影响，地下河管道沿断层走向发育，管道单一，有长有短，受控于断层发育情况；河谷两侧出露多条地下河，这类地下河由于受地貌影响，多垂直地层发育，长度短且多呈单一管道状，部分地下河受到上部隔水层的阻隔，形成高位地下河。

三是阐述了岩溶丘陵区地下水系统模式及特征。

依据含水岩组、排泄方式、主径流方向进行分类，将岩溶水系统概化为两种主要类型：集中排泄型、分散排泄型。地下水流集中排泄型系统主要受河流侵蚀基准面、断裂构造和岩溶管道控制；地下水分散排泄型系统主要受褶皱构造和河谷地貌控制。

四是总结了岩溶丘陵区勘探找水打井模式。依据工作区水文地质特点，验证了成井模式为上覆红层阻水模式，不适合该区域的区域大断裂带充填阻水模式等。

五是查明了工作区内环境地质问题及地下水污染类型。区内环境地质问题主要表现为滑坡和地下水污染，地下水污染主要影响因素为洗矿废液、养猪场粪便、机械零件加工废物等；而石漠化呈总体改善。

六是对宜章县煤矿山地质环境进行了评价。选取地质环境、地质灾害、资源损毁、矿山开发利用等 12 个指标，采用层次分析法、灰色关联度法、模糊综合评价法等方法对宜章县煤矿山地质环境进行了评价分区，划分为恢复治理区、监测预警区、人为控制区、自然恢复区，这为矿山环境的治理提供了技术支撑。

(苏春田 供稿)