

刘伟,周启友,潘晓东,等.基于时延三维电阻率反演的岩溶地下河管道空间分布识别物理模拟研究[J].中国岩溶,2022,41(2):298-307.

DOI: 10.11932/karst2022y04

基于时延三维电阻率反演的岩溶地下河管道空间分布识别物理模拟研究

刘伟^{1,2},周启友¹,潘晓东²,何长响²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 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)

摘要: 岩溶地下河管道空间分布的识别对岩溶区的各类地球科学工作意义重大, 文章阐述了采用时延三维电阻率反演技术, 开展对地下河管道空间分布识别的研究, 在室内灰岩介质下的物理模拟实验结果表明: 对雨季管道充水和枯季管道干涸时采集的电阻率数据进行时延反演后, 地下河管道的模拟三维空间分布被很好地突显出来, 时延反演效果大大地优于对单次采集数据的反演效果, 管道充填水时的反演效果次之, 管道充填空气时的反演结果很难有效识别地下河管道的空间分布情况。物理模型试验成果可指导野外实践中对岩溶地下河管道的探测研究。

关键词: 地下河管道; 空间分布; 时延三维电阻率成像; 物理模型

中图分类号: P631.322; P641.7 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2022) 02-0298-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地下河系统在中国南方岩溶区具有分布广泛、类型多样、规模多变等特点, 因岩溶地下河系统间常存在“穿(跨)跃”现象, 加之其流域面积和分枝数目多呈季节性变化和输入输出多端多样化特点, 造成地下河系统具有时空变化大的特征^[1]。岩溶地下河管道作为地下河系统主要的导水通道, 空间分布复杂, 在平面上其结构类型可分为单管型、树枝型、网络型和复合型等; 在剖面上地下河管道又可分为单层型、阶梯型和多层型等^[2-3], 岩溶区的各类地球科学问题如水资源勘查与评价^[4-6]、岩溶塌陷^[7-9]、内涝^[10-12]、水库渗漏^[13-15]、水污染^[16-18]等环境问题都与

地下河管道紧密相关, 对岩溶地下河管道空间分布的识别一直是岩溶探测研究中的重点和难点。地球物理方法以地下介质物性差异为前提, 具有无损、涵盖范围广等优点, 在岩溶地下河管道空间分布探测研究中得到了广泛应用, 也取得了显著效果^[19-22], 前人研究多是基于一维、二维的方式对不同地质条件下的岩溶管道进行探测, 受旁侧环境影响严重, 探测精度也较低, 甄别时要依赖于多种方法的相互对比、相互验证。随着地球物理探测仪器和数据处理软件的不断更新迭代, 近年来三维电法勘探已被应用到复杂地下岩溶的探测中^[23-24], 然而, 当前应用三维电法实际探测地下岩溶分布时, 往往仅局限于一次探测成像, 虽降低了多解性, 但在成像分辨率方面仍有

基金项目: 国家重点研发计划项目“不同气候区喀斯特关键带水文—生态耦合过程对比研究”(2021YFE0107100); 中国地质调查局地质调查项目“乌江流域水文地质调查”(DD20190326); “南方重点地区 1:5 万页岩气地质调查”(DD20190562); 中国地质科学院岩溶地质研究所所控项目(2021003)

第一作者简介: 刘伟(1985—), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要从事岩溶水文地质灾害探测研究工作。E-mail: liuwei_999@126.com。

收稿日期: 2021-01-09

待加强。而岩溶地下河管道是动态的地质体,与围岩相比较,地下河管道充填物随着季节和时间动态变化大,如丰水期时,管道内往往充满地下水,枯水期时,管道内仅部分充填地下水或完全处于干涸状态;又如,在枯水期,一次强降雨后地下河管道内地下水占据的空间会发生较大的变化。

鉴于此,笔者基于室内灰岩介质下的三维管道物理模型,对管道内分别充填空气和水来模拟地下河管道随季节或时间的变化而动态变化情况。针对岩溶地下河管道空间分布识别,开展了时延三维电阻率成像研究,以期室内模拟结果较真实、客观地反映地下河管道的实际情况,对今后应用该方法进行地下河管道探测具有一定的借鉴作用。

1 物理模型与试验方案

1.1 物理模型

物理模型由4 cm厚的黏土层和16块120 cm×120 cm×5 cm的灰岩石块组成,灰岩取自贵州省毕节市杨家湾镇附近采石场的二叠系茅口组(P₁m)纯灰岩。

将16块切割平滑完整的灰岩石块从下到上依次层叠在绝缘垫上,每层之间用稀泥浆沾刷,使其充分胶结,在最顶部的灰岩块上进行开槽处理,以模拟

三维的岩溶管道。首先在灰岩块的中心处开一120 cm×5 cm×5 cm的大长方体空洞,接着在垂直于该大长方体空洞的方向上再开两个57.5 cm×5 cm×5 cm的小长方体空洞,三个空洞彼此相通,两个小长方体空洞间隔为10 cm,且于模型中心呈奇对称分布(图1a),模拟岩溶管道顶底板埋深分别为4 cm和9 cm,上面覆盖黏土层,拟设计在物理模型中间40 cm×40 cm区域开展高密度电法数据采集,该区域模拟管道4~9 cm深度的切片示意图如图1b。

通过室内小对称四极法测量得到的模型中各介质电阻率如表1。

1.2 数据采集

三维高密度电法数据体由4个方向共84条二维测线数据构成,在物理模型中心40 cm×40 cm区域范围黏土层上共布置了441(21×21)个电极点,自定义坐标轴如下:以左上角处的电极点为坐标原点(图2),大长方体空洞长轴方向为x方向,另一方向为y方向(图1b)。

如图2,x和y方向分别各布置21条测线,x方向测线编号为line1~line21,y方向测线编号为line22~line42,相邻电极间距为2 cm,每条测线包含21个测点,测线长度为40 cm。xy方向(左上-右下)和-xy方向(左下-右上)也各布置21条测线,测线编号依

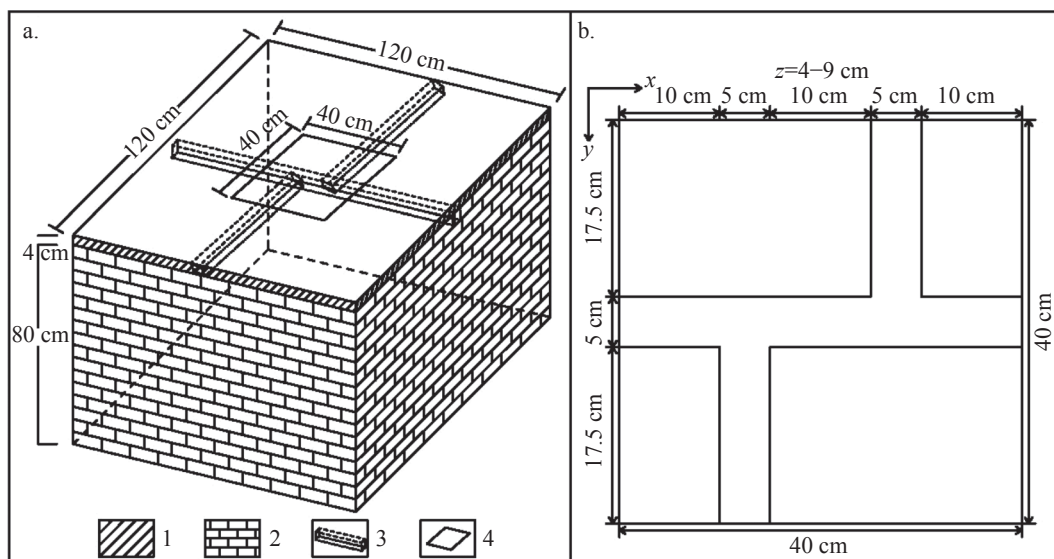


图1 物理模型及模拟管道切片示意图(a. 模型立体图, b. 模拟管道切片图)

(1. 黏土 2. 灰岩 3. 岩溶管道 4. 数据采集区域)

Fig. 1 Schematic diagram of physical model and simulation pipeline slice

(a. Model stereogram, b. Slice diagram of simulation pipeline slice)

(1. clay 2. limestone 3. karst pipeline 4. measurement area)

表 1 模型各介质电阻率参数表 (通过小对称四极法测量)
Table 1 Resistivity of the medium in the model (Measured by the small symmetrical quadrupole method)

模型介质	电阻率/ $\Omega \cdot m$
灰岩	5 850.48
上覆黏土	25.66
水	23.39

次为 line43~line63, line64~line84, 相邻电极间距为 2.828 cm, 测线长度和测点数不等, 长度范围为 28.28 m (11 个测点)~56.56 cm(21 个测点)。

测量仪器为重庆奔腾数控技术研究所研发的 WGMD-3 高密度电阻率测量系统, 电极采用直径 2 mm 的圆柱体铜棒, 电极入土 2~3 mm 并与表土接触紧密, 电极与仪器通过电线和转接头相连(电线和转接头由上海第一海洋地质工程有限公司专门设计)。首先对模拟岩溶管道充空气情况下进行数据采集, 考虑到三维反演时需要大量的数据, 同时又要兼顾探测效率, 本次模拟对每条测线分别采集了斯伦贝谢、温纳和偶极三种不同装置下的电阻率数据, 平均每条测线数据采集耗时约 15 min, 经过一天时间, 采集得到由 84 条测线构成的三维数据体共

11 502 组不同电极组合的电阻率数据; 再将模拟岩溶管道内注满水, 重复上述电阻率采集过程, 得到岩溶管道充满水时相同数据量的三维数据体。

由于所有电极位置都在模型中部的 1/3 范围内, 在垂向上模型厚度也远远大于最大供电极距, 因此水平方向和垂直方向的边界效应影响可以忽略不计^[25], 测量介质可近似看做水平半无限空间介质。

1.3 时延三维反演成像

时延三维电阻率反演成像是三维电阻率反演成像基础上发展起来的, 其原理是基于光滑约束下的最小二乘反演法^[26-27], 与常规三维反演技术的区别在于其能对多次观测得到的数据同时进行处理以观察数据的动态变化, 前一次观测数据的反演结果自动作为下一次反演的初始模型, 大大提升了对研究对象电阻率动态变化的监测能力^[28-29]。

反演使用的软件为 RES3DINVx64 ver.3.10 Professional^[30], 按照时延反演数据格式将充空气和充填水时分别采集得到的数据读入同一数据文件以进行时延成像, 处理中对电阻率数据使用 Blocky 反演(L1 范数)以适应模型介质电阻率的急剧变化^[31],

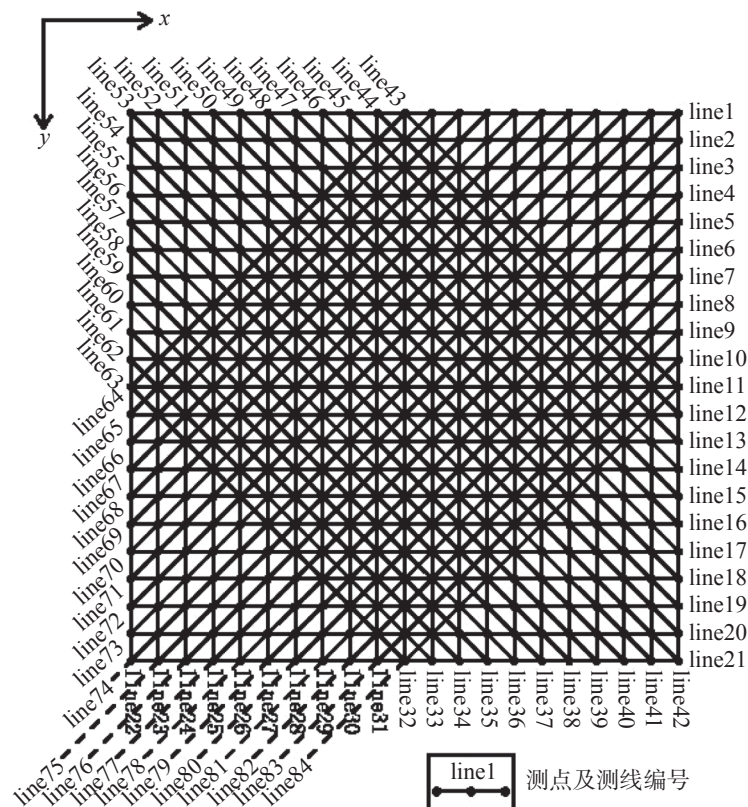


图 2 三维高密度电阻率法电极布置和测量模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrode and measurement patterns for 3D ERT

设置第一层厚度为 1/4 电极距, 往深部每层厚度增大 1.05 倍, 设置最大反演深度为 1.5 倍中值深度, 共得到 4 800 个有限元网格。反演迭代次数通常取 5~7 次, 最终选择均方根(RMS)较小的成果图(通常小于 5%)来完成解译工作。

为了比较时延反演成像和单次反演成像的效果, 本次反演中分别对充填空气和充填水时的地下河管道模型进行了单独成像, 单独反演时的参数设置与

时延反演参数设置相同。

2 试验结果与分析讨论

将采集得到的三维电阻率数据体进行反演, 模拟地下河管道依次充填空气和水时的时延三维电阻率反演成像立体图如图 3a 所示, 图中视角中展示了 xy, xz 和 yz 三个方向具有代表性的切片图像以利于

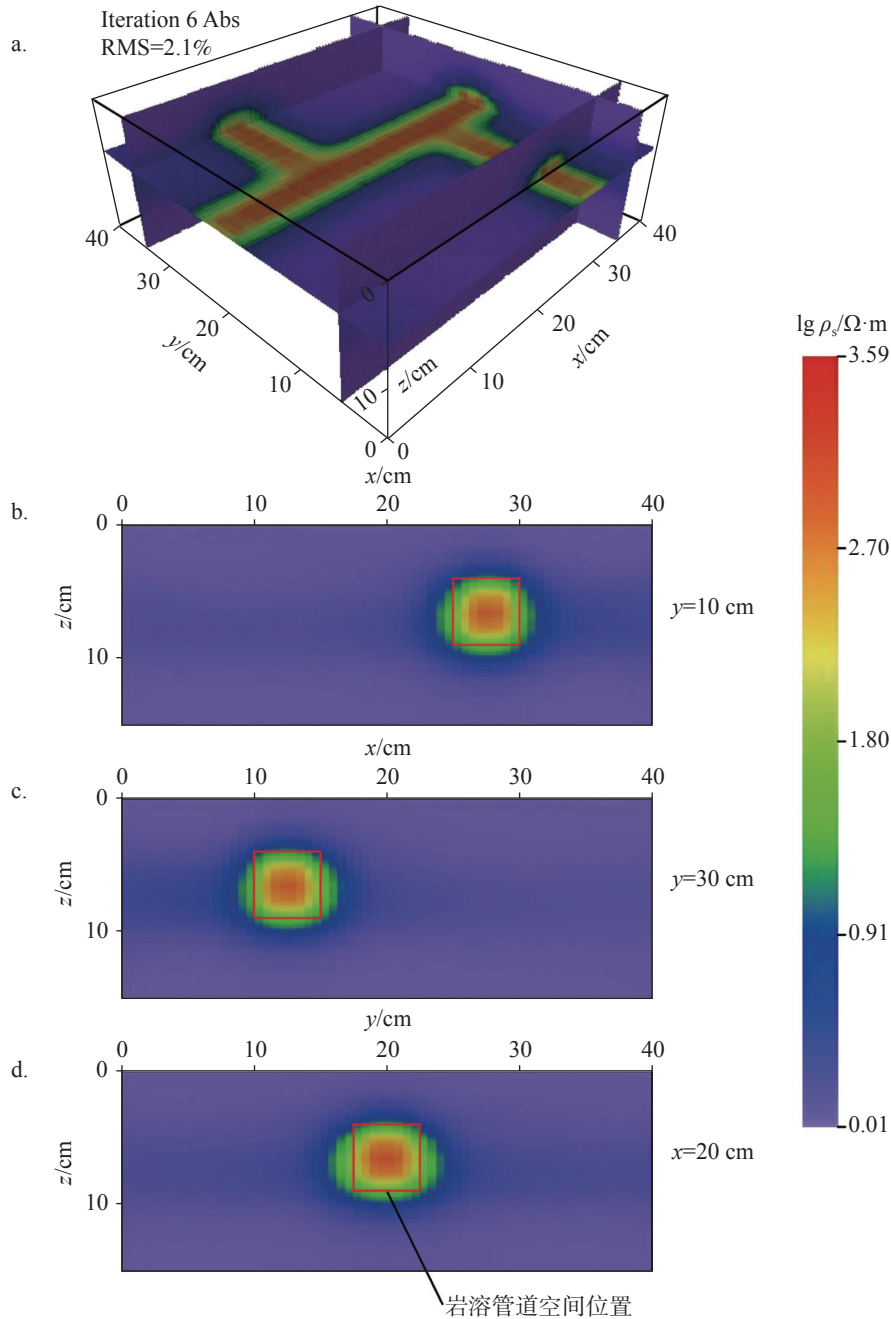


图 3 时延三维电阻率反演成像成果图 (模拟管道充填空气和水时的动态差异)

(a. 立体视角图, b. y=10 cm 时 xz 方向切片, c. y=30 cm 时 xz 方向切片, d. x=20 cm 时 yz 方向切片)

Fig. 3 Results of time-lapse 3D resistivity inversion (Dynamic difference of pipeline filling air and water)

(a. stereoscopic view, b. slice in xz direction, y=10 cm, c. slice in xz direction, y=30 cm, d. slice in yz direction, x=20 cm)

对比和分析,其中 xy 方向切片位于 $z=6$ cm 深度处, xz 方向切片分别位于 $y=5$ cm 和 35 cm 处, yz 方向切片位于 $x=35$ cm 处,从立体图上可以很清楚的看到模拟管道空间呈现出较大的电阻率变化,而管道周围电阻率变化较小,管道的平面位置被很好的突显出来。

对管道空间位置进行进一步分析,图 3b、图 3c 和图 3d 分别显示了 $y=10$ cm, $y=30$ cm, $x=20$ cm 处的

切片图像,这些切片从不同方向上切割模拟地下河管道空间,可以看到:电阻率变化较大的区域在横向上和纵向上与实际管道空间位置整体吻合良好,且越靠近管道中心,电阻率动态变化越显著。

模拟地下河管道充填空气或充填水时单独反演成像效果分别如图 4 和图 5 所示,图 4a(图 5a)、图 4b(图 5b)、图 4c(图 5c)、图 4d(图 5d)中三维视角或各

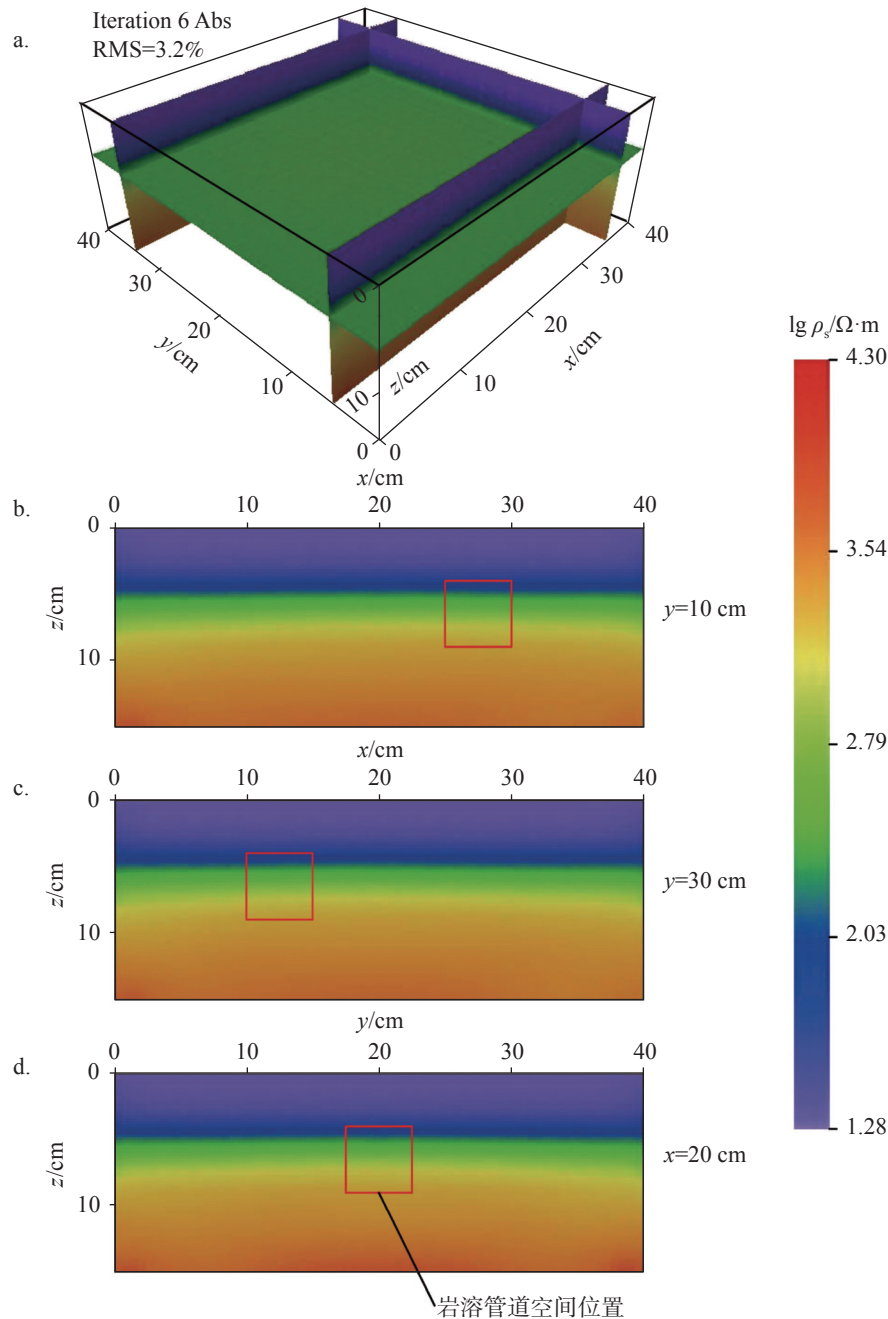


图 4 地下河管道充填空气时三维电阻率反演成像成果图

(a. 立体视角, b. $y=10$ cm 时 xz 方向切片, c. $y=30$ cm 时 xz 方向切片, d. $x=20$ cm 时 yz 方向切片)

Fig. 4 Results of 3D resistivity inversion for air-filled underground pipeline

(a.stereoscopic view, b. slice in xz direction, $y=10$ cm, c. slice in xz direction, $y=30$ cm, d.slice in yz direction, $x=20$ cm)

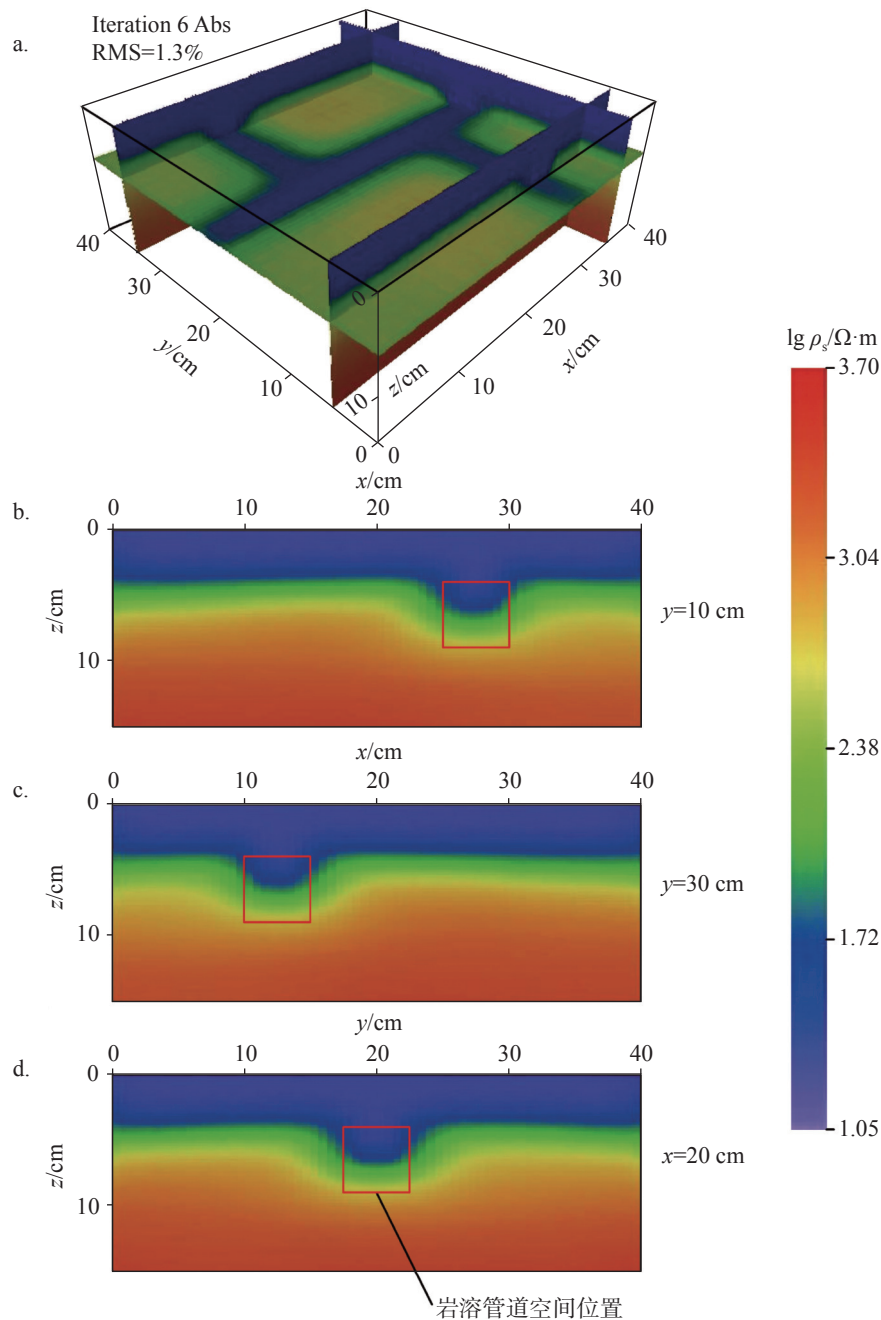


图 5 地下河管道充填水时三维电阻率反演成像成果图

(a. 立体视角图, b. $y=10\text{ cm}$ 时 xz 方向切片, c. $y=30\text{ cm}$ 时 xz 方向切片, d. $x=20\text{ cm}$ 时 yz 方向切片)

Fig. 5 Results of 3D resistivity inversion for water-filled underground pipeline

(a. stereoscopic view, b. slice in xz direction, $y=10\text{ cm}$, c. slice in xz direction, $y=30\text{ cm}$, d. slice in yz direction, $x=20\text{ cm}$)

方向上的切片位置与图 3 相同, 可以看到: 当管道充填空气时反演结果看不出电阻率差异, 无法有效地识别岩溶管道的空间位置; 当管道充填水时, 模拟管道空间整体上呈现出相对低电阻率特征, 管道底部的电阻率值大于上部, 管道的空间位置能被有效地反映出来。

依次提取物理模型中地下河管道中心处 ($x=20$

m , $y=20\text{ m}$) 充填空气或水时的时延反演结果, 以及充填空气或水时单独反演结果的电阻率测深数据, 并进行进一步分析, 曲线如图 6 所示, 图 6a 为电阻率测深曲线, 图 6b 为电阻率测深梯度曲线 (又称电阻率测深 K_s 曲线)。可以看到: 时延反演的电阻率测深曲线呈现出低—高—低的曲线形态, 且管道空间 ($4\sim 9\text{ cm}$) 与其它深度区间呈现出显著的电阻率对比差

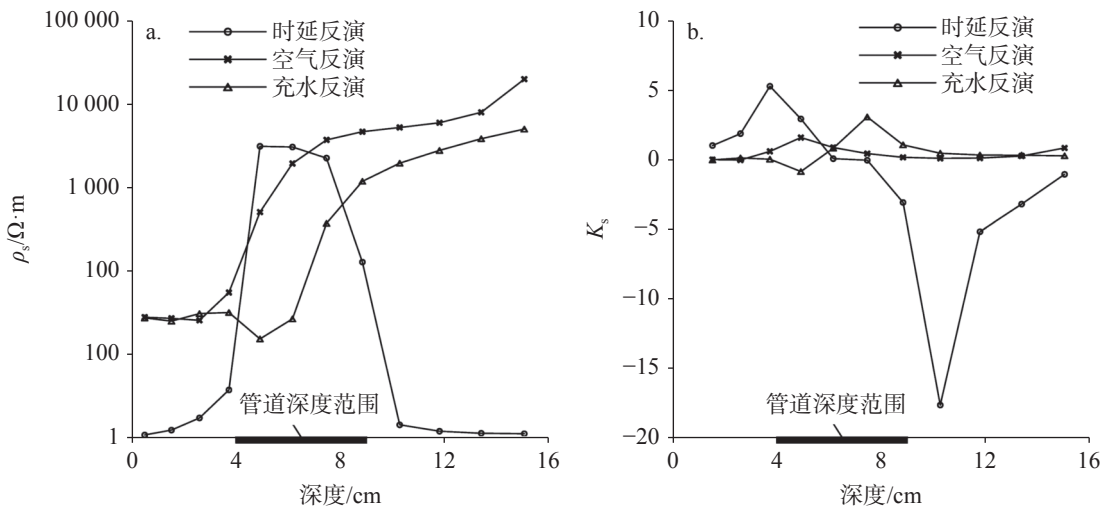


图6 地下河管道中心处时延反演、充水反演以及充填空气反演时电阻率测深曲线对比图 ($x=20\text{ cm}$, $y=20\text{ cm}$)

(a. 电阻率测深曲线, b. 电阻率测深梯度曲线)

Fig. 6 Comparison curves of resistivity sounding between time-lapse inversion, water-filled inversion and air-filled inversion at the center of underground river pipeline ($x=20\text{ cm}$, $y=20\text{ cm}$)

(a. resistivity sounding curves, b. resistivity sounding gradient curves)

异,这在电阻率梯度曲线上反映为管道空间在上覆黏土层以及下伏灰岩层附近的梯度值都较大,且梯度值在上部接触面附近为正值,在下部接触面附近为负值,管道的空间位置被很好地突显出来;充水反演时的电阻率测深曲线呈现出高一低一高的曲线形态,在电阻率梯度曲线上反映为管道空间在上覆黏土层附近的梯度值为负值,在下伏灰岩层附近的梯度值为正值,管道的空间位置能被有效反映出来;充填空气时的电阻率测深曲线呈现出单调上升的形态,可注意到管道空间内电阻率值变化相对较快,而其它深度区间电阻率值变化较缓,这在电阻率梯度曲线上反映为管道空间内的电阻率梯度值略大于其它深度区间的梯度值,但与时延反演结果和充水反演结果相比较时,管道空间内异常反映很微弱,很难被有效识别。

综合上述,无论是从电阻率反演图像还是从电阻率测深(梯度)曲线来看,充填空气时模拟管道反演效果较差,管道空间位置处异常微弱,这种微弱异常还是基于在室内规则模型下的测量,说明灰岩介质内的高阻空间很难被有效识别,这与学者们对电阻率法识别“高阻中的高阻”效果较差的看法一致,也是电法界的普遍认识^[32-33]。充填水时管道空间在反演图上呈现出相对低阻异常,在电阻率测深(梯度)曲线上异常也很明显,虽然管道空间分布也能被有效反映,但没有时延成像效果明显,可以看到充水时

管道空间外呈现出不同的电阻率值且跨度较大,在复杂的电性结构下这会使管道空间位置难以通过电阻率异常来有效识别,而时延电阻率反演成像重点关注的是研究对象的电性变化,可以突出反映下方电性动态变化较大的局部地质体,如地下河管道,从图3和图6可看出,在电阻率反演图像和电阻率测深(梯度)曲线上,管道空间位置反映都很显著。

值得说明的是,受试验硬件条件所限,本次对模型三维电阻率数据的采集是经过多次测量获得的,数据量大,繁琐且耗。当前市场上已有八通道高密度电法仪,如美国AGI公司生产的SuperSting R8/IP,可同时连接多达几万个电极,野外工作可实现真三维数据采集,能节省大量人工成本。虽如此,本文的室内模拟成果仍然具有较高的实际应用价值。

3 结论与建议

物理模拟试验结果表明,对雨季岩溶管道充水和枯季岩溶管道干涸时采集的电阻率数据进行时延反演成像后,模拟三维地下河管道的空间分布被很好地突显出来,时延反演效果大大优于对单次采集数据反演的效果,充填水时的反演效果次之,充填空气时的反演结果很难有效识别出地下河管道的空间分布。

本次物理模拟试验结果对野外实践具有指导意

义,建议在野外对复杂地下河管道空间分布的探测研究中,可在丰水期和枯水期时各采集一次三维电阻率数据,并对数据进行时延反演分析,次一级的选择是在丰水期时对岩溶管道进行三维探测并对数据进行反演分析,这样就能获得地下河管道充水或无水条件的有效定位,本项实用探测技术可在实践中推广应用。

参考文献

- [1] 秦俭,李身想. 浅谈南北方岩溶地貌差异成因[J]. *科技展望*, 2014, 14(14): 192.
QIN Jian, LI Shenxiang. On the causes of karst landform differences between South and North[J]. *Science and Technology*, 2014, 14(14): 192.
- [2] 郭纯青. 中国岩溶地下河系及其水资源[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(5): 43-45.
GUO Chunqing. Karst underground river system and its water resources in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2001, 28(5): 43-45.
- [3] 洛塔岩溶地质研究组. 洛塔岩溶及其水资源评价与利用的研究[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
Luota karst geological research group. Study on Luota karst and its water resources evaluation and utilization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [4] 杨杨,唐建生,苏春田,潘晓东,赵良杰. 岩溶区多重介质水流模型研究进展[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(4): 419-424.
YANG Yang, TANG Jiansheng, SU Chuntian, PAN Xiaodong, ZHAO Liangjie. Research advance on multi-medium flow model for karst aquifers[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(4): 419-424.
- [5] 徐中平,周训,崔相飞,拓明明,王昕昀. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 475-483.
XU Zhongping, ZHOU Xun, CUI Xiangfei, TUO Mingming, WANG Xinyun. Research advances of numerical simulation of groundwater in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(4): 475-483.
- [6] Bakalowicz M. Karst groundwater: a challenge for new resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(1): 148-160.
- [7] 常廷改. 岩溶塌陷型水库地震的形成条件分析[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(5): 42-45.
CHANG Tinggai. Forming conditions of karst collapsing induced earthquake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(5): 42-45.
- [8] 雷明堂,李瑜,蒋小珍,甘伏平,蒙彦. 岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究: 以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, S1: 148-152.
LEI Mingtang, LI Yu, JIANG Xiaozhen, GAN Fuping, MENG Yan. Preliminary study on the technology and method of sink-hole collapse monitoring and prediction—As an example of sink-hole collapse monitoring station in Zhemu Village, Guilin City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, S1: 148-152.
- [9] Gabrovsek F, Stepisnik U. On the formation of collapse dolines: A modelling perspective[J]. *Geomorphology*, 2011, 134(1-2): 23-31.
- [10] 裴建国. 广西溶注系统结构特征及其对岩溶内涝的影响[J]. *广西科学*, 2002, 9(3): 193-197.
PEI Jianguo. The structure characteristic of karst depression system and its effect on karst depression waterlogging[J]. *Guangxi Sciences*, 2002, 9(3): 193-197.
- [11] 黄秀凤. 坡心地下河流域岩溶内涝成因分析与防治对策[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(6): 42-46, 91.
HUANG Xiufeng. Causes of and countermeasures for karst waterlogging in Poxin underground river basin[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, 21(6): 42-46, 91.
- [12] Zeng J, Huang G. Set pair analysis for karst waterlogging risk assessment based on ahp and entropy weight[J]. *Nordic hydrology*, 2018, 49(3-4): 1143-1155.
- [13] 屈昌华. 中小型水库坝基岩溶管道渗漏勘察与处理实例[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2007, 34(10): 60-61.
QU Changhua. Investigation and treatment of seepage in bedrock solution pipeline of small and medium-sized reservoir dam[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2007, 34(10): 60-61.
- [14] 余加松,孙明彪,王太银. 贵州省三宝水库岩溶渗漏分析[J]. *地下水*, 2020, 42(4): 241-242.
YU Jiasong, SUN Mingbiao, WANG Taiyin. Analysis on karst leakage of Sanbao reservoir in Guizhou Province[J]. *Groundwater*, 2020, 42(4): 241-242.
- [15] Gutiérrez F, Mozafari M, Carbonel D, Gomez R, Raeisi E. Leakage problems in dams built on evaporites. The case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution[J]. *Engineering Geology*, 2015, 185: 139-154.
- [16] 赵小二,常勇,吴吉春. 岩溶地下河污染物运移模型对比研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1250-1259.
ZHAO Xiao'er, CHANG Yong, WU Jichun. A comparative study on two contaminant transport models used in karst underground rivers[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(4): 1250-1259.
- [17] 陈余道,程亚平,蒋亚萍,林鹏,蒋灵芝. 岩溶地下河反硝化作用的有限性: 一个碳酸盐岩管道的实验研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3629-3635.
CHEN Yudao, CHENG Yaping, JIANG Yaping, LIN Peng, JIANG Linzhi. Limitation of denitrification in karst subterranean river: A carbonate-conduit experimental study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10): 3629-3635.
- [18] 钟春里. 岩溶管道系统中污染物扩散及地下水自净能力研究: 贵州某磷石膏堆场为例[J]. *贵州地质*, 2011, 28(2): 126-130.
ZHONG Chunli. Study of pollutant dispersion and underground

- water self-purification capacity in the karst conduit system: phosphogypsum gradient in Guizhou as the example[J]. *Guizhou Geology*, 2011, 28(2): 126-130.
- [19] Gan F, Han K, Lan F, Chen Y, Zhang W. Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground: A case study in Mengzi of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 136: 91-98.
- [20] 陈玉玲, 甘伏平, 卢呈杰, 韦吉益, 赵伟. 裸露岩溶区地下河管道综合地球物理方法探测研究[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(3): 1608-1616.
CHEN Yuling, GAN Fuping, LU Chengjie, WEI Jiyi, ZHAO Wei. The Study of underground river course detection by integrated geophysical methods in bare karst area[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(3): 1608-1616.
- [21] 甘伏平, 喻立平, 黎华清, 卢呈杰, 韦吉益. 利用综合物探方法探测地下水流通道[J]. *地质与资源*, 2010, 19(3): 262-266.
GAN Fuping, YU Liping, LI Huaqing, LU Chengjie, WEI Jiyi. Detection of groundwater conduits by integrated geophysical methods[J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(3): 262-266.
- [22] Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, Valois R, Frank B. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(6): 1169-1180.
- [23] 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.
- [24] 高阳, 熊华山, 彭明涛, 江兆南, 范飞越. 三维高密度电法技术及其在岩溶塌陷勘探中的应用[J]. *桂林理工大学学报*, 2017, 37(3): 417-421.
GAO Yang, XIONG Huashan, PENG Mingtao, JIANG Zhaonan, FAN Feiyue. Three-dimensional high-density electrical technique and application of geophysical prospecting to karst collapse[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3): 417-421.
- [25] 周启友, 杭悦宇, 刘汉乐, 戴水汉, 徐建平. 饱和和排水过程中岩石电阻率各向异性特征的电阻率成像法研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 281-288.
ZHOU Qiyu, HANG Yueyu, LIU Hanle, DAI Shuihan, XU Jianping. The anisotropic properties of rock resistivity during saturation and desaturation processes revealed by electrical resistivity tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 281-288.
- [26] Ellis R G, Oldenburg D W. Applied geophysical inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 116: 5-11.
- [27] Loke M H. Electrical Resistivity Surveys and Data Interpretation[M]. Springer Netherlands, 2011.
- [28] Kim J H, Yi M J, Park S G, Kim J G. 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(4): 522-532.
- [29] Loke M H, Dahlin T, Rucker D F. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys[J]. *Near Surface Geophysics*, 2014, 12(2007): 5-24.
- [30] Loke M H. Rapid 3-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method[M]. 2015. Available at www.geotomosoft.com.
- [31] Loke M H, Acworth I, Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys[J]. *Exploration Geophysics*, 2003, 34(3): 182-187.
- [32] 郭秀军, 王兴泰. 用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题[J]. *物探与化探*, 2001, 25(4): 306-311, 315.
GUO Xiujun, WANG Xingtai. The application of geological radar in media of different lithologic characters[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2001, 25(4): 306-311, 315.
- [33] 崔锡钦. 利用高密度电阻率法进行空洞探测的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
CUI Xiqin. Study of the hole exploration with high density resistivity [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.

Study on physical simulation of spatial distribution identification of karst underground pipeline based on time-lapse 3D resistivity inversion

LIU Wei^{1,2}, ZHOU Qiyu¹, PAN Xiaodong², HE Changxiang²

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The spatial distribution of karst underground river pipelines is complex and changeable; therefore, it is of great significance for us to carry out the earth science work in karst areas to develop an effective detection technology for the identification of pipelines. Based on the characteristics that karst underground river pipelines change greatly with seasons and time, the spatial distribution identification of underground river pipelines is studied by the inversion technology of time-lapse 3D resistivity.

The results of pilot physical model experiments in limestone medium show that, the spatial distribution of simulated

three-dimensional underground river pipeline is well highlighted according to the time-delay inversion imaging of resistivity data respectively collected from water-filled pipelines in rainy season and air-filled pipelines in dry season. The area with large resistivity change is in good agreement with the actual spatial position of pipeline in transverse and longitudinal directions. The closer the resistivity is to the center of the pipeline, the more significant the resistivity change is. In terms of the electrical sounding curve, the resistivity presents a low-high-low feature, and the resistivity contrast between pipeline space and other depth intervals is significant. In terms of the electrical sounding gradient curve, both the gradient value of pipeline space near the overlying clay layer and the value underlying limestone layer are large. The gradient value is positive near the upper contact surface and negative near the lower contact surface. The inversion effect with water-filled pipeline is inferior to that of time-lapse inversion. When the simulated pipeline is filled with water, the pipeline space presents relatively low resistivity. The resistivity value at the bottom of the pipeline is greater than that of the upper part, and the actual spatial position of the pipeline can be effectively reflected. The resistivity presents a high-low-high curve on the electrical sounding curve. However, on the electrical sounding gradient curve, the gradient value of the pipeline space near the overlying clay layer is negative, and it is positive near the underlying limestone layer. It is difficult to effectively identify the karst pipeline through the inversion images only generated by air-filled data. The resistivity rises monotonously and the resistivity value in the pipeline space changes more quickly than that in other depth intervals on the electrical sounding curve, while on the electrical sounding gradient curve, the resistivity gradient value in the pipeline space is slightly larger than that in other depth intervals, but the anomaly in the pipeline space is very weak compared with the time-lapse inversion results and water filling inversion results.

It is suggested that when the spatial distribution of underground river pipelines in the field is studied, the 3D resistivity data should be collected in wet season and dry season, respectively, and the time-lapse 3D resistivity inversion image, electric sounding curve and electric sounding gradient curve can be comprehensively analyzed for the research. The subordinate choice is to carry out 3D detection of karst pipeline in wet season and analyze the data comprehensively, so as to obtain a practical detection technology that can effectively locate the underground river pipeline whether it is filled with water or free of water, which can be popularized and applied in practice.

Key words underground river pipeline, spatial distribution, time-lapse 3D resistivity inversion, physical model

(编辑 张玲 杨杨)