

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.015

非均质岩溶含水层电阻率层析扫描探测试验研究

张 斌¹, 梁 越¹, 王平义¹, 代 磊¹, 张宏杰¹, 许 彬¹, 夏日风¹, 孙志伟²

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心; 2. 中交长江建设发展集团有限公司)

摘要: 为探究电阻率层析扫描技术对非均质岩溶管道的刻画能力,开展了不同边界布置和激发源条件下的非均质岩溶含水层探测室内模型试验。试验结果表明:相对于绝缘边界的探测模式,采用受控的电势边界条件作为层析扫描探测的反演约束条件可有效降低估计参数的不确定性;随着电势边界数量的增加,电阻率层析扫描对非均质岩溶管道的刻画精度逐渐提高;相较于恒流激发源模式,恒压激发源模式具有更高的成像精度和反演确定性,但其估计的电导率偏高;基于连续线性估计算法的电阻率层析扫描技术可有效刻画岩溶含水层电导率分布的非均质特性。

关键词: 岩溶含水层; 非均质; 电阻率层析扫描; 反演分析; 室内模型试验

Experimental study on electrical resistivity tomography detection of heterogeneous karst aquifers

Zhang Bin¹, Liang Yue¹, Wang Pingyi¹, Dai Lei¹, Zhang Hongjie¹, Xu Bin¹, Xia Rifeng¹, Sun Zhiwei²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University;

2. CCCC Yangtze River Construction and Development Group Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the capability of electrical resistivity tomography for characterizing heterogeneous karst conduits, laboratory model tests on the detection of heterogeneous karst aquifers were conducted under different boundary layouts and excitation source conditions. The experimental results indicate that compared to the observation mode with insulated boundaries, using controlled electrical potential boundary conditions as inversion constraints for electrical resistivity tomography detection can effectively reduce the uncertainty of estimated parameters. With the increase in the number of electrical potential boundaries, the characterization accuracy of electrical resistivity tomography for heterogeneous karst conduits gradually improves. Compared to the mode with constant current excitation sources, the mode with constant voltage excitation sources has higher imaging accuracy and inversion certainty, but the estimated conductivity is relatively high. The electrical resistivity tomography technique based on a successive linear estimation algorithm can effectively characterize the heterogeneous characteristics of the conductivity distribution in karst aquifers.

Key words: karst aquifer; heterogeneity; electrical resistivity tomography; inversion analysis; laboratory model test

我国是世界上岩溶分布面积最广的国家之一,达 340 万 km²,约占国土总面积的三分之一,我国的西南地区更是世界上连片分布面积最大的岩溶区^[1-2]。由于岩溶含水层包含大量分布极不均匀的溶孔、溶洞、溶蚀裂隙网络结构,其水力特性具有强烈的非均质性^[3-7],因此岩溶结构在工程建设中常被视为不良地质条件,裂隙溶洞的发育往往会导致地基承载力下降^[2,8]。此外,隧道、洞库等地下工程在施工过程中穿越岩溶发育地区时往往会面临较高的涌水突泥风险,给工程安全带来巨大的风险^[9-11]。随着我国西南地区水利、交通等基础设施建设的持续推进,对复杂岩溶含水层非均质特征的精确刻画技术需求也将日益迫切。

地球物理探测方法,如地震勘探、电磁勘探、电法勘探等,凭借其无损、高效、覆盖面广等优势,在岩溶含水层探测中得到了广泛应用^[12-13]。其中电阻率层析成像技术由于具有相对较低的成本和便捷可靠性等优势,被广泛用于岩溶等不良地质结构的探测刻画^[5,14-16]。胡富彭等^[4,17-18]通过数值模拟系统分析了电阻率层析成像典型装置的灵敏度和分辨率,并探究了伪影分布规律。刘征宇等^[19]通过构建形态约束,提高了电阻

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097);重庆市水利科技重点项目(CQSLK-2024005);重庆市建设科技计划项目(城科学 2025 第 2 号);广西科技计划项目(桂科 AA23062023)

作者简介: 张斌(1996—),男,博士研究生,主要从事含水层参数反演研究。E-mail:zbin196@163.com

通信作者: 梁越(1985—),男,教授,博士,主要从事水利工程灾害形成机理及防治研究。E-mail:liangyue2560@163.com

率层析成像对岩溶孤石异常地质边界或界面的识别能力。吴泽宇等^[15]使用电阻抗层析成像技术对比了 Tikhonov 正则化和稀疏正则化方法对地下溶洞的刻画识别效果。此外,电阻率层析成像技术也被应用于桩基、防渗墙、坝基等场地结构地下岩溶探测识别^[8-9,12,20]。

除了电性参数,渗透系数、储水系数等水力参数作为直接表征含水层渗透特性的指标,常被用作反演重构的目标参数来获得岩溶含水层空间结构特征^[11,13,21-22]。近年来,一些学者借鉴和发展了医学计算机断层成像概念,提出了一种适用于含水层空间参数测试的水力层析扫描方法^[22-24],其基本原理是通过观测含水层空间抽注水过程中的流量及水头响应,基于地下水渗流理论,通过连续线性估计(successive linear estimator, SLE)算法对含水层渗透系数和储水系数进行反演成像^[25]。Mohammadi 等^[22]通过室内砂箱试验,采用水力层析扫描技术探究了其对不同岩溶管道结构的刻画能力;Wang 等^[1]探究了水力层析扫描技术在隧道溶洞和裂隙中的识别能力。进一步地,Zha 等^[24]基于地质统计学理论,通过引入先验地质信息,利用水力层析扫描技术实现了野外大尺度裂隙场地的含水层刻画。然而,现场抽水试验的技术成本与时间成本相对较高,为此 Yeh 等^[26]进一步提出了基于 SLE 算法的电阻率层析扫描方法,Xu 等^[25]通过砂箱试验验证了其在刻画含水层非均质性中的可靠性,Liang 等^[27]进一步采用该方法成功刻画了黄土边坡的水分入渗过程。

然而,基于 SLE 算法的电阻率层析扫描技术对于具有强非均质性的岩溶含水层的刻画性能尚不明确,而现有电阻率层析成像方法多采用四极或三极观测装置,对电极利用效率不高,其反演算法多以正则化算法为主,难以准确表征空间电场响应与参数的非线性关系,对于准确刻画岩溶结构仍面临较大挑战。针对上述问题,本文采用基于 SLE 算法的层析扫描技术,开展不同边界和激发源条件下的岩溶含水层探测试验,旨在探索其对复杂岩溶含水层的刻画效果。

1 基于 SLE 算法的电阻率层析扫描理论

在传统电阻率层析成像反演中,通常需要通过装置系数计算视电阻率;随后基于初始模型进行正演模拟,预测视电阻率,并与实测数据对比,通过优化算法调整模型参数,最小化两者差异。通过反复迭代,直至收敛,最终得到地下介质的电阻率参数分布。而基于 SLE 算法的电阻率层析扫描方法无需计算装置系数,探测过程中只需监测空间激发源电极处的电势或电流强度,以及观测电极处的电势响应。该方法将电导率参数视为符合地质统计学理论的空间随机分布变量,迭代过程中通过灵敏度矩阵来描述电压与电导率之间的非线性关系^[27],并利用参数之间的协相关关系对后验参数进行更新,最终获得与观测响应差异最小的电导率估计场。对稳定的空间点源电场,SLE 算法具有如下的迭代格式^[26]:

$$\boldsymbol{u}_{\text{e},r+1} = \boldsymbol{u}_{\text{e},r} + \boldsymbol{w}_r^T (\boldsymbol{d}_{\text{obs}} - \boldsymbol{d}_r) \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{u}_{\text{e},r+1}$ 、 $\boldsymbol{u}_{\text{e},r}$ 分别为待估计的电导率参数向量在第 $r+1$ 、 r 次迭代的条件估计值,当 $r=0$ 时参数来源于先验资料,如已知的地质勘探信息、非均质特性等; $\boldsymbol{w}$ 为权重矩阵; $\boldsymbol{d}_{\text{obs}}$ 为观测电势响应值; $\boldsymbol{d}_r$ 为空间稳定点源电场模拟电势值。条件估计值 $\boldsymbol{u}_{\text{e}}$ 在每个迭代步骤由 $\boldsymbol{d}_{\text{obs}}$ 与 $\boldsymbol{d}_r$ 的差异进行调整,权重矩阵 $\boldsymbol{w}$ 计算公式为:

$$[\boldsymbol{R}_{\text{dd}} + \lambda \text{diag}(\boldsymbol{R}_{\text{dd}})] \boldsymbol{w} = \boldsymbol{R}_{\text{du}} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{R}_{\text{dd}}$ 为观测电势之间的协方差矩阵; $\boldsymbol{R}_{\text{du}}$ 为观测电势与估计电导率参数之间的协方差矩阵; λ 为 Levenberg-Marquardt 算法动态乘子。协方差采用一阶随机分析结合由伴随方程计算的敏感度得到:

$$\boldsymbol{R}_{\text{dd},r} = \boldsymbol{J}_{\text{du},r} \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} \boldsymbol{J}_{\text{du},r}^T \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}_{\text{du},r} = \boldsymbol{J}_{\text{du},r} \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{J}_{\text{du}}$ 为观测数据对电导率参数变化的敏感度矩阵; $\boldsymbol{R}_{\text{uu}}$ 为电导率的自相关协方差矩阵;下标 r 表示第 r 次迭代。协方差矩阵 $\boldsymbol{R}_{\text{dd}}$ 在 $r=0$ 时由先验地质信息给出,随后每次迭代按照下式逐步更新:

$$\boldsymbol{R}_{\text{uu},r+1} = \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} - \boldsymbol{w}_r^T \boldsymbol{R}_{\text{du},r} \tag{5}$$

重复上述过程直至 SLE 迭代收敛。通常采用以下标准来评估收敛性:连续两次迭代估计电导率场的空间方差变化小于指定容差,或者连续两次迭代模拟电位的变化低于给定阈值^[25]。当满足任意一个标准时,认为估计是最优的,迭代过程终止。最终的估计精度可由观测电势与模拟电势的平均绝对误差、均方误差和决定系数(R^2)来评价。

2 岩溶含水层模型及试验设计

2.1 岩溶含水层模型设计

岩溶含水层在地下水流的长期作用下逐渐溶蚀形成微孔、裂隙、导管、溶洞,导致岩溶区水力参数分布不均,表现出较强的非均质性。在岩溶结构中,分支导管结构(BCP)是最常见的岩溶通道结构,在已知的岩溶管道结构中占比超过一半。基于上述背景,在长 120 cm、宽 20 cm、高 70 cm 的亚克力箱体中构建了包含典型分支导管结构的岩溶含水层,模型示意图如图 1(a)所示。含水层长宽高分别为 100、20、70 cm,其基岩采用 600 目石膏粉与水充分搅拌混合后浇筑凝固而成。岩溶管道采用直径约为 5 cm 的卵石填充而成,以确保充水后管道与基岩之间的导电性差异,同时保证含水层整体稳定、不塌陷变形。浇筑完成的含水层正面如图 1(b)所示,通道的平均迂曲度和通道密度比分别为 1.03 和 31.10%。用于电阻率层析扫描探测的 70 个铜电极均匀布置在含水层背面,电极直径为 5 mm,长度为 20 cm,电极间距均为 10 cm,位于最外侧的电极与含水层边缘间距均为 5 cm。对于穿越亚克力箱体的电极区段,采用热缩绝缘管包裹密封,以降低边界效应的影响。电极头部与导线相接后引出至探测系统主机,含水层背面电极及接线如图 1(c)所示。为了探究边界条件设置对刻画精度的影响,参考 Xu 等^[25,27]的研究,浇筑的过程中在含水层中部($z=10\text{ cm}$)的上下左右四周与亚克力板接触的界面处分别预置了 4 段导电铜线。对于超过边界部分的导线采用热缩绝缘管密封后引出备用。含水层两侧设置有长度为 10 cm 的水槽,含水层与水槽之间通过开孔的亚克力薄板隔开,以确保水流能顺利进入模拟岩溶管道。试验中,箱体两侧水位始终保持在与含水层顶部相同的高度。

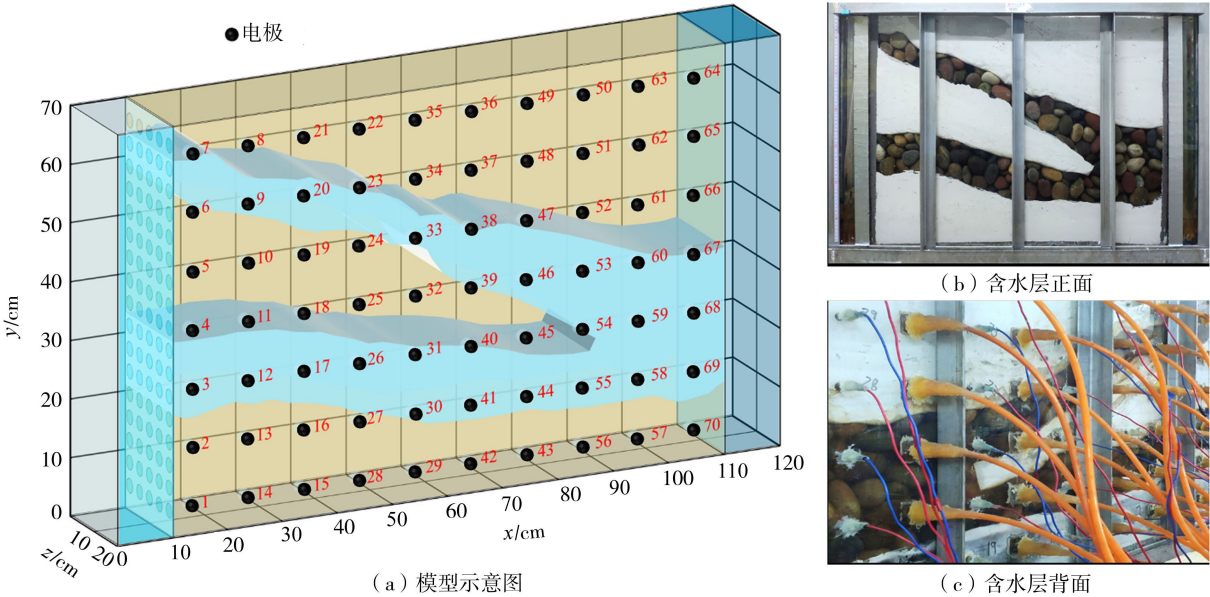


图 1 岩溶含水层物理模型
Fig.1 Karst aquifer physical model

2.2 试验设计与数据采集

与传统跨孔(井间)电阻率层析成像的四极探测模式不同,本文试验中的电阻率层析扫描采用类似于动点源的二极观测装置,探测过程中在选定的电极处施加激发源,同时将其余电极视为观测电极采集电势响应。通过持续观测不同位置激发源电极激励时的一系列电势响应数据,从而实现电阻率层析扫描快速探测。在本文试验中,根据不同的工况依次将含水层边界处引出的铜线连接至激发源的负极,以构建可控的电势边界。试验中激发源的数量固定为 8 个,分别位于编号为 9、13、23、27、44、48、58、62 的电极处。激发源的供电时长与断供时长固定为 1 s,占空比为 50%。为分别探究激发源和边界条件的影响,共设置了 8 组试验工况。其中工况 S1~S4 采用 0.01 A 的恒流电源作为激发源,工况 S5~S8 采用 24 V 的恒压电源作为激发源。具体地,对于设置为绝缘条件的边界,四周引出的导线悬空,而设置为固定电势的边界则将其引出的导线连接至激发源负极。各工况参数设置如表 1 所示。试验所需的电流和电势数据由中地装(重庆)地质仪器有限公司开发的 DUK-2B 电法仪改进而来的三维层析扫描成像探测设备采集得到。

2.3 数值模型

根据图 1 的含水层物理模型建立了如图 2 所示的电阻率层析扫描反演模型。模型长 100 cm、宽 70 cm，由边长为 2.5 cm 的正方形单元网格构成。整个模型包含 1 120 个单元网格和 1 189 个节点。模型内部位于节点处的白色圆圈为电极位置,其编号与物理模型含水层中的电极编号一致。已有研究表明,初始电导率分布、方差以及相关尺度等先验信息是层析扫描反演过程中的软约束,随着观测数据的引入,先验参数的约束作用会逐渐降低,故而先验信息的初始猜想值只需取值在合理范围内即可^[24,26]。鉴于此,反演模型的电导率初始分布设置为电导率 $\sigma=0.005\text{ S/m}$ 的均质场,方差为 $0.0001\text{ S}^2/\text{m}^2$,模型在 x 和 y 方向上的相关尺度分别为 20 cm 和 14 cm。为了避免反演过程中出现负值,初始电势设置为 0.01 V ^[21]。数值模型四周的边界条件设置与表 1 中各工况试验采用的边界条件一致。

3 试验结果与分析

3.1 不同工况刻画效果对比

将室内岩溶含水层中采用层析扫描探测模式得到的各工况数据代入层析扫描数值模型中,得到的反演结果如图 3 所示(图例中不同颜色代表的电导率值采用指数分布)。为了便于对比各工况的通道刻画效果,图 3 中采用黑色虚线对实际通道的轮廓进行了标注。总体上,无论采用恒流还是恒压激发源,在仅有右边界一个电势边界的工况 S1 与 S5 中,层析扫描的反演效果较差。在工况 S1 中,仅刻画出了上侧管道的小部分区域,整个岩溶通道轮廓模糊不清,难以辨别。工况 S5 中岩溶管道位置处则表现为断续的高电导率分布区域,虽然可以大致判别岩溶管道的位置,但仍难以达到识别岩溶管道轮廓走向的目的。随着所采用的电势边界数量的增加,层析扫描反演得到的电导率场中的岩溶管道轮廓的清晰度逐渐提高。而相较于采用恒压源的工况,基于恒流源探测数据反演得到的岩溶通道轮廓更为平滑。在工况 S1~S4 中,反演得到的电导率在

表 1 试验工况及参数设置

Table 1 Experimental conditions and parameter settings

工况	激发源	上边界	下边界	左边界	右边界
S1	恒流(0.01 A)	绝缘	绝缘	绝缘	电势
S2	恒流(0.01 A)	绝缘	绝缘	电势	电势
S3	恒流(0.01 A)	电势	绝缘	电势	电势
S4	恒流(0.01 A)	电势	电势	电势	电势
S5	恒压(24 V)	绝缘	绝缘	绝缘	电势
S6	恒压(24 V)	绝缘	绝缘	电势	电势
S7	恒压(24 V)	电势	绝缘	电势	电势
S8	恒压(24 V)	电势	电势	电势	电势

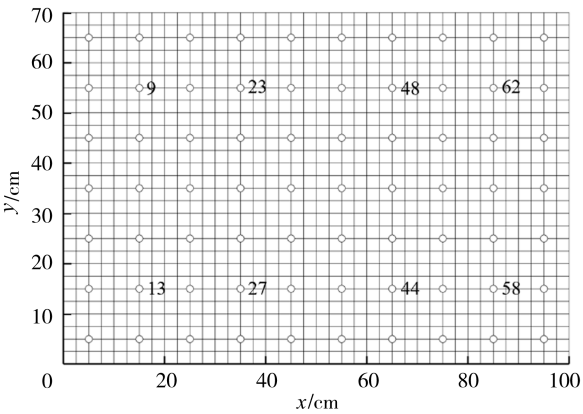


图 2 电阻率层析扫描反演模型

Fig.2 Electrical resistivity tomography inversion model

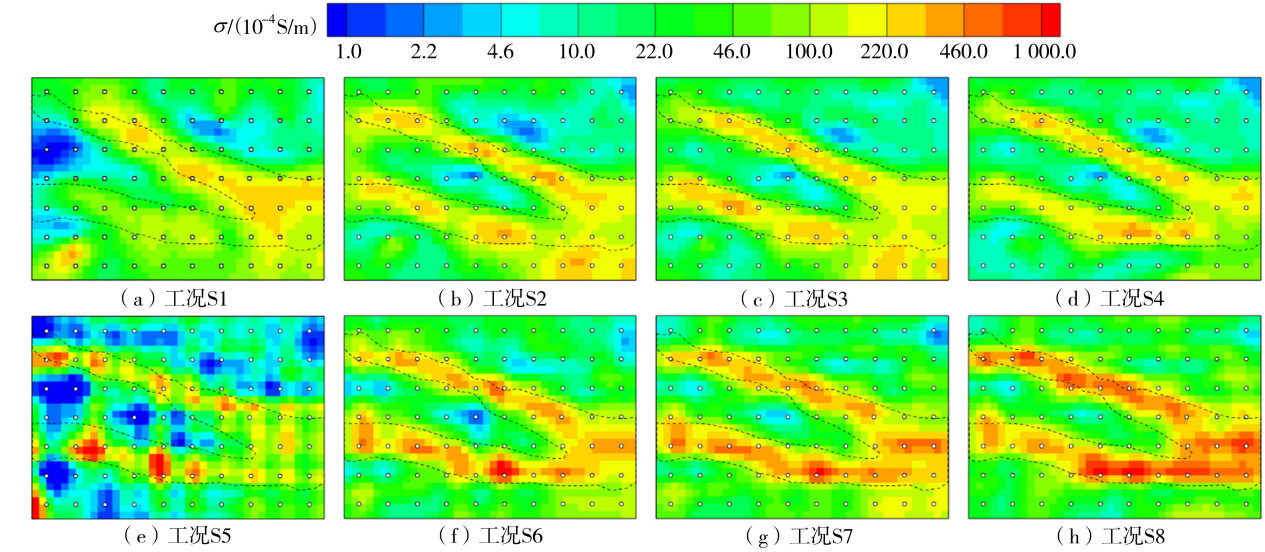


图 3 各工况的电导率反演结果

Fig.3 Inversion results of conductivity for different conditions

0.000 1~0.041 2 S/m 之间,而工况 S5~S8 在 0.000 1~0.141 7 S/m 之间。采用恒压源的试验工况中层析扫描反演得到的电导率水平要高于恒流源工况,且这种差异在具有高电导率的岩溶管道部位更为显著。此外,采用恒压源作为激发源时,电势边界数量为 2 的工况 S6 对岩溶管道的刻画性能优于 4 条边都为受控电势边界的工况 S4。

为了进一步对比各工况的反演效果,图 4 给出了基于层析扫描反演的电导率场正演计算得到的各电极位置处模拟电势与试验得到的观测电势散点图,其中蓝色散点代表电势点,黑色虚线为 45 度斜线,红色实线为观测电势与模拟电势散点的线性拟合趋势线;各工况的平均绝对误差、均方误差和 R^2 如表 2 所示。在工况 S1 中,模拟电势和观测电势的一致性最差,其 R^2 仅有 0.889,同时具有最大的截距和最小的斜率。在采用恒流源的工况中,随着所采用受控电势边界数量的增加, R^2 逐渐增大,由工况 S1 的 0.889 增大至工况 S4 的 0.981,同时其斜率由 0.812 增大至 0.972。而在采用恒压源的工况中,随着采用的电势边界数量的增加, R^2 由工况 S5 的 0.979 增大至工况 S7 的 0.993。观测电势与模拟电势拟合斜率在 0.951~0.966 之间,而截距由工况 S5 的 0.299 降低至工况 S8 的 0.001。在估计精度指标方面,平均绝对误差和均方误差最小的均为工况 S4,分别是 0.015 V 和 0.000 5 V²;而工况 S5 的平均绝对误差和均方误差均最大,分别为 0.606 V 和 0.656 3 V²。

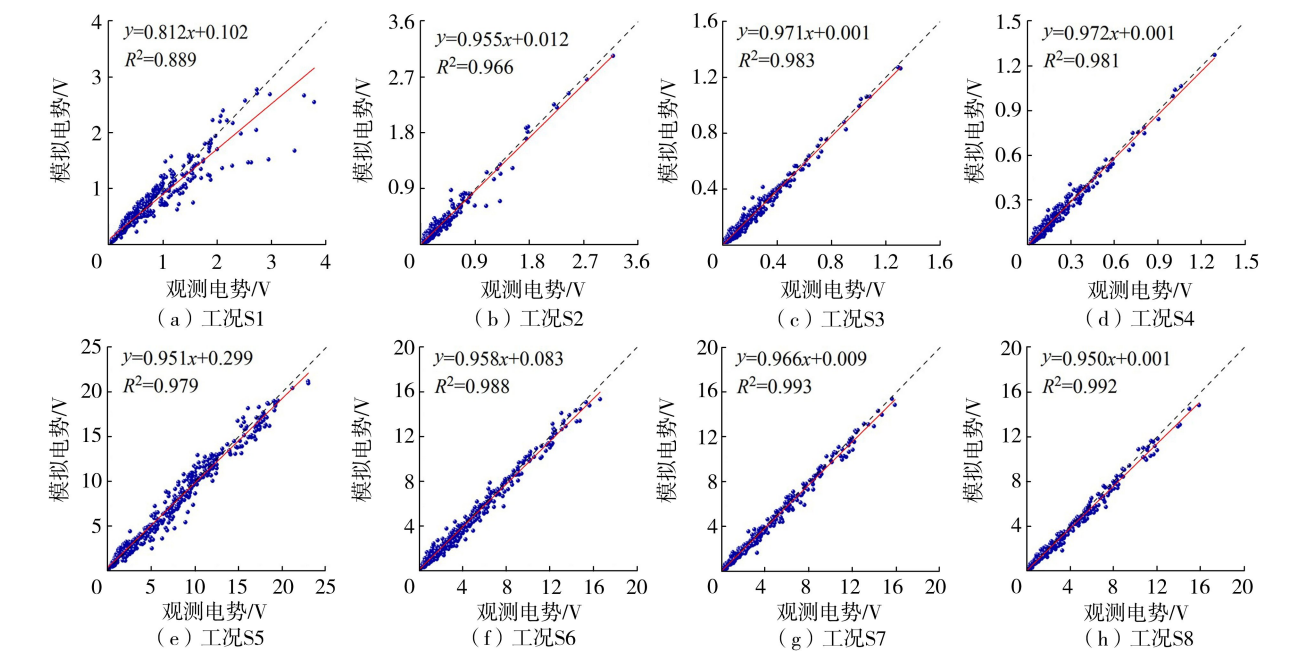


图 4 各工况的模拟电势与观测电势散点图

Fig. 4 Scatter plot of simulated and observed electrical potentials for different conditions

对比分析表明,采用恒压源的工况其绝对误差和均方误差水平均相对较高。此外,对比各工况的电势可发现,采用恒流源的工况电势要显著低于采用恒压源工况,这表明采用恒压源开展电阻率层析扫描时观测电势响应更为显著。此外,对于工况 S3、S4、S6、S7、S8,模拟电势与观测电势数据点总体分布在 45 度线附近,这表明来自 SLE 的估计值是最佳无偏的,即采用层析扫描技术反演得到的含水层电导率分布整体上与实际岩溶含水层是高度相似的。基于观测电势与模拟电势计算得到的反演精度评价指标分布规律与图 3 中的电导率反演结果基本一致。综合反演效果及指标分析表明,在采用两侧固定电势边界的条件下,电阻率层析扫描技术已基本可以实现对岩溶管道的高解析度刻画。

表 2 各工况的电势反演精度评价指标			
Table 2 Evaluation indicators of electrical potential inversion accuracy for different conditions			
工况	平均绝对误差/V	均方误差/V ²	R ²
S1	0.115	0.041 2	0.889
S2	0.037	0.003 9	0.966
S3	0.016	0.000 6	0.983
S4	0.015	0.000 5	0.981
S5	0.606	0.656 3	0.979
S6	0.289	0.165 3	0.988
S7	0.192	0.091 0	0.993
S8	0.195	0.094 7	0.991

3.2 不同工况下的误差对比

为了深入对比分析各工况的反演误差与估计的不确定性,绘制了工况 S1~S8 估计电导率自然对数的残余方差(以下简称“残余方差”)如图 5 所示。在采用恒流源的工况 S1~S4 中,残余方差在 0.171~1.266 之间,模型四周存在较高的残余方差分布区域,特别是采用绝缘边界条件的边界周围,估计的电导率存在较高的不确定性。随着电势边界数量的增加,边界处带状的高残余方差区域逐渐转为团状的高不确定性区域。而在四周均为电势边界的工况 S4 中,高残余方差区域主要集中分布在模型的 4 个角落处。相比之下,采用恒压源工况的残余方差水平与工况 S1~S4 相比更低,整体上在 0.114~0.489 之间。在工况 S5 中,高不确定性区域主要集中在左侧区域的顶部和底部;在工况 S6~S8 中,随着电势边界数量的增加,模型整体的残余方差呈现出逐渐增大的趋势,高不确定性区域主要呈带状分布集中在模型 4 个角落的电极周围,而非边界区域。其原因可能是在采用电势边界后,位于边缘电极处的电势梯度增大,使得采集得到的电势与总体水平存在较大差异,进而导致估计的不确定性增大。此外,在工况 S5~S8 中,激发源所处的电极区域均具有较低的不确定性,表明增加刺激源数量有助于改善岩溶含水层的层析扫描刻画精度。

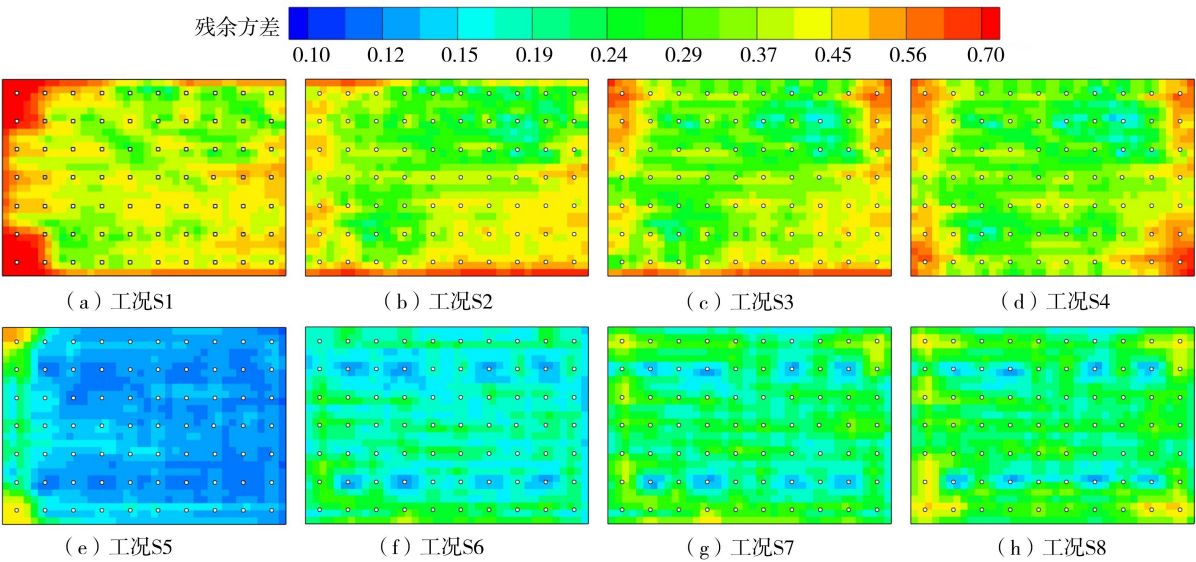


图 5 各工况迭代收敛时的残余方差分布

Fig. 5 Distribution of residual variance at iteration convergence for different conditions

图 6 给出了不同工况中估计电导率和残余方差的下四分位数(Q1)、均值和上四分位数(Q3)。随着电势边界数量的增加,采用恒流源工况的电导率均值由工况 S1 的 0.0073 S/m 增大至工况 S2 的 0.0083 S/m,而后逐渐降低至工况 S4 的 0.0066 S/m。工况 S1~S4 电导率的上四分位数变化规律与电导率均值类似,均呈现出先增大后减小的趋势,而其残余方差的下四分位数、均值和上四分位数均随着电势边界数量的增加而减小。采用恒压源工况的电导率均值则呈现出相反的趋势,由工况 S5 的 0.0076 S/m 增大至工况 8 的 0.0152 S/m。工况 S5~S8 中的其余统计指标均呈现出与电导率均值相同的增大趋势,其电导率和残余方差的变化规律与图 3 和图 5 一致。对比分析表明,与采用恒压源的工况相比,采用恒流源时层析扫描反演的残余方差相对更高,具有相对较大的不确定性,而采用恒压源的层析扫描探测模式则会得到相对较高的反演估计值。

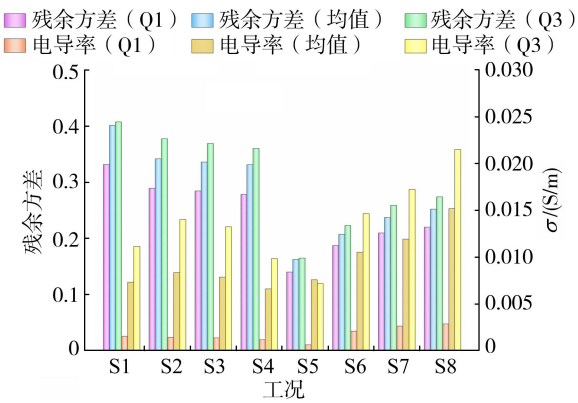


图 6 估计电导率和残余方差的特征统计值

Fig. 6 Characteristic statistical values of estimated conductivity and residual variance

4 结 论

- a. 基于 SLE 算法的电阻率层析扫描技术可以有效刻画岩溶含水层电导率分布的非均质特性。相对于绝缘边界,在探测数据采集和反演模型中采用受控的电势边界有助于降低反演的不确定性,且层析扫描成像的分辨率随着电势边界数量的增加而逐渐提高。
- b. 无论采用恒流源或是恒压源作为激发源,在模型两侧采用固定电势边界作为层析扫描反演约束条件已基本可以实现岩溶管道的刻画。与采用恒流源的探测模式相比,以恒压源作为激发源的探测模式反演得到的电导率偏大,但其对岩溶管道的刻画分辨率更高,同时具有较高的确定性。

参考文献:

[1] Wang Xintong,Xu Zhenhao,Hu Jie. A new attempt for the detection of potential water-bearing structures in tunnels via hydraulic tomography:the first numerical investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,135:105034.

[2] 王薇,邓小虎,金聪,等. 电磁波 CT 揭露重大工程岩溶发育特征:以某地铁岩溶勘察为例[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):13977-13982. (Wang Wei,Deng Xiaohu,Jin Cong,et al. The characteristics of karst development in major projects revealed by electromagnetic wave computed tomography;a case for karst investigation of a metro[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(34):13977-13982. (in Chinese))

[3] Ringel L M,Illman W A,Bayer P. Recent developments,challenges,and future research directions in tomographic characterization of fractured aquifers[J]. Journal of Hydrology,2024,631:130709.

[4] 胡富彭,欧元超,付茂如. 不同充填介质下的溶洞跨孔电阻率 CT 探查数值模拟[J]. 中国岩溶,2019,38(5):766-773. (Hu Fupeng,Ou Yuanchao,Fu Maoru. Study on numerical simulation of karst cross-hole resistivity CT exploration at cave with different filling media[J]. Carsologica Sinica,2019,38(5):766-773. (in Chinese))

[5] Zhang Jian,Sirieux C,Genty D,et al. Imaging hydrological dynamics in karst unsaturated zones by time-lapse electrical resistivity tomography[J]. Science of the Total Environment,2024,907:168037.

[6] 代方园,高扬,宿庆伟,等. 瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶分布及形态特征的应用:以山东省济南地区为例[J]. 中国岩溶,2022,41(2):308-317. (Dai Fangyuan,Gao Yang,Su Qingwei,et al. Application of transient electromagnetism and cross-hole CT imaging to detect karst distribution and morphological characteristics;a case study of Jinan,Shandong Province[J]. Carsologica Sinica,2022,41(2):308-317. (in Chinese))

[7] 陶小虎,赵坚,陈孝兵,等. 岩溶含水层水流模型研究进展[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2):76-84. (Tao Xiaohu,Zhao Jian,Chen Xiaobing,et al. Research progress in numerical models for water flow in karst aquifer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(2):76-84. (in Chinese))

[8] 张邦,张场,周杰. 大直径桩端岩溶三维高精度成像方法[J]. 应用声学,2024,43(5):1060-1069. (Zhang Bang,Zhang Yang,Zhou Jie. Three dimensional high precision imaging method of karst below large diameter pile[J]. Journal of Applied Acoustics,2024,43(5):1060-1069. (in Chinese))

[9] Ma Lei,Sun Xiaofan,Qian Jiazhong,et al. Identification of high-permeability and water-rich zones in a fractured karst water source area based on the hydraulic tomography method[J]. Journal of Hydrology,2024,629:130648.

[10] 罗术,金俊俊,甄大勇,等. 基于数值模拟分析的弹性波 CT 岩溶探测能力研究与应用[J]. 工程地球物理学报,2023,20(3):330-336. (Luo Shu,Jin Junjun,Zhen Dayong,et al. Application of the elastic wave tomography in karst exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2023,20(3):330-336. (in Chinese))

[11] 陈亚洲,董维红. 利用示踪试验时间-浓度曲线分析岩溶管道结构特征[J]. 水文地质工程地质,2022,49(1):41-47. (Chen Yazhou,Dong Weihong. Analysis of structural characteristics of karst conduit by time-concentration curve of tracer test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2022,49(1):41-47. (in Chinese))

[12] Torrese P. Investigating karst aquifers:using pseudo 3-D electrical resistivity tomography to identify major karst features[J]. Journal of Hydrology,2020,580:124257.

[13] 仇文岗,孟凡胜,何昌杰,等. 岩溶区空间变异性边坡建筑荷载作用下稳定分析[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(2):316-323. (Zhang Wengang,Meng Fansheng,He Changjie,et al. Stability analysis of slope with spatial variability in karst area under building load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2023,43(2):316-323. (in Chinese))

[14] 陈亮,颜书法,万昱. 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614. (Chen Liang,Yan Shufa,Wan Yu. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(8):1605-1614. (in Chinese))

[15] 吴泽宇,刘祚秋,汪利. 电阻抗成像探测地下溶洞的几种方法[J]. 中山大学学报(自然科学版),2022,61(2):100-105. (Wu Zeyu,Liu Zuoqiu,Wang Li. Electrical impedance imaging for cavity detection[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2022,61(2):100-105. (in Chinese))

[16] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):71-75. (Liu Xiao,Peng Youwen,Yuan Zhihui,et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):71-75. (in Chinese))

[17] 付强,李士强,闫孝姮,等. 三维跨孔电阻率 CT 观测电极序列优化及必然伪影分布规律总结[J]. 地球物理学进展,2023,38(5):2263-2275. (Fu Qiang,Li Shiqiang,Yan Xiaoheng,et al. Optimization of the observation electrode array and summary of the distribution law of inevitable artifacts for 3D cross-hole resistivity CT[J]. Progress in Geophysics,2023,38(5):2263-2275. (in Chinese))

[18] 蒋林城,肖宏跃,丁尚见,等. 跨孔电阻率法装置灵敏度分析及分辨率讨论[J]. 地球物理学进展,2018,33(2):815-822. (Jiang Lincheng,Xiao Hongyue,Ding Shangjian,et al. Analysis of sensitivity of arrays and resolution discussion of cross-hole resistivity method[J]. Progress in Geophysics,2018,33(2):815-822. (in Chinese))

[19] 刘征宇,庞永昊,王传武,等. 基于不完整边界先验信息的跨孔电阻率 CT 反演方法研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(6):1124-1132. (Liu Zhengyu,Pang Yonghao,Wang Chuanwu,et al. Cross-hole resistivity inversion method constrained by prior information of incomplete boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(6):1124-1132. (in Chinese))

[20] 张文俊,李术才,苏茂鑫,等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报(工学版),2014,44(3):75-82. (Zhang Wenjun,Li Shucai,Su Maoxin,et al. Detection method of karst caves in city subway based on the cross-hole resistivity tomography[J]. Journal of Shandong University (Engineering science),2014,44(3):75-82. (in Chinese))

[21] 薛佩佩,文章,梁杏. 地质统计学在含水层参数空间变异研究中的应用进展与发展趋势[J]. 地质科技通报,2022,41(1):209-222. (Xue Peipei,Wen Zhang,Liang Xing. Application and development trend of geostatistics in the research of spatial variation of aquifer parameters[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(1):209-222. (in Chinese))

[22] Mohammadi Z,Illman W A. Detection of karst conduit patterns via hydraulic tomography;a synthetic inverse modeling study[J]. Journal of Hydrology,2019,572:131-147.

[23] 张海发,马士谦,梁越,等. 基于电阻率层析扫描的水下抛石体内部空洞探测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):123-128. (Zhang Haifa,Ma Shiqian,Liang Yue,et al. Internal cavity detection of underwater riprap based on resistivity tomography[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):123-128. (in Chinese))

[24] Zha Yuanyuan,Yeh T C J,Illman W A,et al. Incorporating geologic information into hydraulic tomography;a general framework based on geostatistical approach[J]. Water Resources Research,2017,53(4):2850-2876.

[25] Xu Dong,Sun Ronglin,Yeh T C J,et al. Mapping soil layers using electrical resistivity tomography and validation;sandbox experiments[J]. Journal of Hydrology,2019,575:523-536.

[26] Yeh T C J,Liu Shuyun,Glass R J,et al. A geostatistically based inverse model for electrical resistivity surveys and its applications to vadose zone hydrology[J]. Water Resources Research,2002,38(12):1278.

[27] Liang Yue,Xia Rifeng,Yeh T C J,et al. Characterizing preferential infiltration of loess using geostatistical electrical resistivity tomography[J]. Engineering Geology,2024,340:107692.

(收稿日期:2025-02-17 编辑:熊水斌)