基于贝叶斯实验设计优化跨孔高密度电阻率法监测四维水文地质过程

彭勃[a,b]，强思远[a,b]，施小清[a,b*]

南京大学 a. 地球科学与工程学院；b. 表生地球化学教育部重点实验室，南京 210023

第一作者，E-mail：peng_bo@smail.nju.edu.cn

* 通信作者，E-mail：shixq@nju.edu.cn

2023-10-27 收稿；2024-01-06 修回；2024-01-18 接受

基金项目：国家重点研发计划项目 (2022YFC3703101)；国家自然科学基金项目 (42272276; 41977157)

中图分类号：P631.8；P641　　文章编号：2096-8523(2025)05-0293-09　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230600

摘　要：地球物理方法可以有效监测四维水文地质过程中水流的动态和物质的传输，其成像精度往往与监测布置方案密切相关。以常用的高密度电阻率法(electrical resistivity tomography，简称 ERT)为例，为了获得良好的成像精度往往需要大量的电极排列，导致监测时间较长，因而不能实时响应四维水文地质动态过程。已有 ERT 监测方案优化研究多侧重地表 ERT，很少针对跨孔 ERT。由于跨孔 ERT 在研究区域高精度刻画方面更具优势，提出了采用贝叶斯实验设计优化跨孔 ERT 监测方案。通过室内静态/动态实验以及野外场地数据，对比优化电极排列与传统电极排列的监测时间与监测精度，验证了贝叶斯实验设计优化方案的有效性。室内实验结果表明：优化后监测方案能减少约 75% 的监测时间，而且优化方案反演结果能更精准地动态刻画电阻异常区域，显著改善传统方案监测四维水文地质过程的滞后性误差。野外场地实验验证表明：在保证监测精度的前提下优化方案可减少约 95% 的监测时间。基于贝叶斯实验设计优化跨孔 ERT 电极排列监测方案为四维水文地质过程的高效监测提供了技术支撑。

关键词：跨孔高密度电阻率法；电极排列优化；地球物理；贝叶斯实验设计；四维水文地质监测

由于地下水流动和污染传输等水文地质过程通常随时间动态变化，因此近年来研究者越来越重视时间维度，将时间作为除了空间三维之外的第 4 个维度来考虑，由此提出了“四维水文地质过程”的概念[1]。通过使用先进的监测技术和建模工具开展四维水文地质监测，可以捕捉和分析四维水文地质过程中的时空变化，并提高对地下水流动、污染传输等过程的理解和预测能力。而当前地下水研究中监测井等点状的传统观测方式成本高、采样密度低，难以形成面状持续观测，容易忽略潜在的空间变异性，无法全面刻画含水层的复杂情况，限制了对于野外四维水文地质过程的理解，也影响了对于地下水系统演化的预测能力[1]。

地球物理方法由于非侵入、高效率和低成本的优点，近年来被广泛应用于四维水文地质监测中，提供水文地质空间结构和水流、污染物运移等过程的时空分布信息[2]。ERT 是一种根据地下介质的导电性差异来对地下介质的形状、大小、位置等情况进行刻画的常用地球物理方法。它采用众多测量电极排列，能够采集更丰富的信息，且其装置与电极易于布施，对地下流体的变化也更为敏感[3-4]。在野外实际四维水文地质监测中，ERT 具有重要的应用价值，如监测地下污染物运移和污染范围[5-6]、监测海水入侵[7-8]、监测边坡和滑坡[9-10]、探测岩溶[11-12]、探测地

著录信息：彭勃，强思远，施小清. 基于贝叶斯实验设计优化跨孔高密度电阻率法监测四维水文地质过程 [J]. 地质科技通报，2025，44(5)：293-301.
PENG Bo, QIANG Siyuan, SHI Xiaoqing. Optimizing 4D hydrogeological process monitoring using cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) via Bayesian experimental design[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 293-301.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

下水[13-14] 等。

根据电极位置的不同, ERT 可分为地表 ERT 和跨孔 ERT。地表 ERT 常用的电极排列监测方案有 Wenner 排列、Dipole-Dipole 排列、Wenner-Schlunmberger 排列、Pole-Pole 排列、Pole-Dipole 排列[15]。跨孔 ERT 常用的电极排列监测方案有 Bipole-Bipole 排列、Pole-Bipole 排列、Pole-Tripole 排列[15]。为了保证较高的测量分辨率, ERT 监测方案通过大量的电极排列采集所需数据将耗费较多时间。而在动态监测和快速成像方面, ERT 的数据采集时间至关重要[16]。如果数据采集耗费大量时间, 则 ERT 监测方案将不能实时响应地下流体的快速迁移和运动过程[17], 所测数据的反演结果会错估污染物范围, 出现“延迟效应”。因此为了有效减少数据采集时间并保持测量分辨率, 优化 ERT 监测方案势在必行。

近十几年来, 很多学者通过优化电极排列来优化 ERT 监测方案。这些优化方法大都是基于局部优化的思想, 通过寻找最优灵敏度或分辨率分布的有限个电极排列来进行测量, 其质量与完整数据集相当。例如 FURMAN 等[18] 提出了一种基于目标最优灵敏度的 ERT 电极排列优化方法, STUMMER 等[19] 的“GF”算法和 WILKINSON 等[20] 的“CR”算法则是基于计算分辨率分布的优化方法。但这些传统优化方法仍存在一定缺陷, 一方面是基于理想的线性高斯假设, 不符合研究场地实际情况; 另一方面是优化所需计算量大, 计算负担与电极数量的四次方成正比[21]。QIANG 等[22] 采用非线性贝叶斯实验设计, 并用叠加原理减少计算成本, 提出了一种新的 ERT 电极排列优化方法, 既保证了优化效果与传统方法相近, 又大幅降低了优化所需计算时间。然而这些 ERT 监测方案优化研究多侧重于地表 ERT, 很少针对跨孔 ERT。

相较于地表 ERT 的探测深度仅限于测量线长度的 1/5 左右且其分辨率会随深度增加而迅速下降[23], 跨孔 ERT 受场地限制小, 且孔中电极深入围岩, 既能减少观测区地表的干扰, 又能获取更多精细数据[24-25], 在研究区域高精度刻画方面更具优势, 也展现了更强的应用和发展潜力。跨孔 ERT 探测成像效果与所探测对象的复杂度、探测目标的大小和离电极的距离、钻孔间距、孔中电极间距以及所用的电极排列监测方案等因素有关[26]。在实际情况中, 钻孔间距与电极间距确定不变, 选用的电极排列监测方案将决定成像的分辨率[27]。对于跨孔 ERT 来说, AM-BN 电极排列监测方案(例如 Bipole-Bipole 排列)要比 AM-N 与 AM-B 电极排列具有更高的成像分辨率[28]。

因此本研究提出贝叶斯实验设计方法优化跨孔 ERT 监测方案。通过设计室内静态/动态跨孔 ERT 实验, 观察基于贝叶斯实验设计优化的电极排列所测数据反演成像效果, 验证贝叶斯实验设计优化跨孔 ERT 检测方案的有效性, 并通过野外场地数据验证该方案在野外场地上的应用效果。

1　研究方法

1.1　基于贝叶斯实验设计的 ERT 监测方案优化方法

基于贝叶斯实验设计的 ERT 监测方案优化方法是选择具有较高相对熵的电极排列来优化监测方案。相对熵为模型参数先验分布和后验分布之间的差异[29], 可以用 KL(Kullback-Leibler)散度 $u(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{d})$ 进行量化[22]:

$$u(\boldsymbol{s},\boldsymbol{d}) = \int p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{d},\boldsymbol{s}) \ln\left[\frac{p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{d},\boldsymbol{s})}{p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{s})}\right] \mathrm{d}\boldsymbol{m}, \qquad (1)$$

式中: $\boldsymbol{d}$ 为测量值; $\boldsymbol{m}$ 为模型参数; $\boldsymbol{s}$ 为电极排列; $p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{s})$ 为模型参数的先验分布; $p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{d},\boldsymbol{s})$ 为模型参数的后验分布。

相对熵是由测量值 $\boldsymbol{d}$ 引起的。在进行实验设计时, 我们并未获得实际的测量值, 因此需要对测量值 $\boldsymbol{d}$ 进行积分, 计算出相对熵的期望($U_{(s)}$):

$$U_{(s)} = \iint p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{d},\boldsymbol{s}) \ln[\frac{p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{d},\boldsymbol{s})}{p(\boldsymbol{m}|\boldsymbol{s})}] \mathrm{d}\boldsymbol{m} p(\boldsymbol{d}|\boldsymbol{s}) \mathrm{d}\boldsymbol{d}, \qquad (2)$$

式中: $p(\boldsymbol{d}|\boldsymbol{s})$ 为标准化常量。

根据贝叶斯法则对公式(2)进行改写, 并采用蒙特卡洛法[30](Monte Carlo method, 简称 MC)进行求解:

$$U_{(s)} \approx \frac{1}{n_{\mathrm{out}}} \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{out}}} \left\{\ln\left[p\left(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{m}^i,\boldsymbol{s}\right)\right] - \ln\left[p\left(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{s}\right)\right]\right\}, \qquad (3)$$

式中: $\boldsymbol{m}^i$ 为参数先验分布中随机采集的样本; $\boldsymbol{d}^i$ 为加入随机扰动后得到的模拟测量值; n_{out} 为 MC 模拟外循环的样本个数; $p(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{m}^i,\boldsymbol{s})$ 为似然函数, 是测量值与模型参数的联合概率分布; $p(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{s})$ 为标准化常量, 可用下式[22] 估算:

$$p\left(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{s}\right) \approx \frac{1}{n_{\mathrm{in}}} \sum_{j=1}^{n_{\mathrm{in}}} p\left(\boldsymbol{d}^i|\boldsymbol{m}^{i,j},\boldsymbol{s}\right), \qquad (4)$$

式中: n_{in} 为 MC 模拟内循环的样本个数, 为减少计算成本, 内外循环为相同的计算样本。

采用叠加定理减少贝叶斯实验设计的计算量,

将多个电流源的电路简化为仅使用其中一个电流源的电路，因此在 ERT 正演模拟中，四极装置测得的电压可以由两极装置得到的电压组合求得，其公式[22]如下：

$$U_{ABMN} = U_{AM} - U_{BM} - U_{AN} + U_{BN}, \quad (5)$$

式中：U_{ABMN} 为四极装置所测电压；U_{AM}，U_{BM}，U_{AN} 和 U_{BN} 分别为 AM，BM，AN，BN 两根电极柱所测电压；A，B 为电流电极；M，N 为电位电极。

1.2 灵敏度计算

基于模型灵敏度分布特征分析跨孔 ERT 观测排列被认为是最有效的衡量电极排列监测方案优劣的方法[16, 26]。灵敏度越高，测量对该区域的电阻率变化就越敏感。灵敏度[22]计算公式如下：

$$G_{ij} = \frac{\partial \boldsymbol{d}_i}{\partial \mathbf{m}_j}, \quad (6)$$

式中：$\boldsymbol{d}_i$ 为第 i 个模型测量值；$\boldsymbol{m}_j$ 为第 j 个模型参数；G_{ij} 为由于第 j 个模型参数的变化而导致的第 i 个模型测量值的变化。

1.3 算例设置

为了验证基于贝叶斯实验设计优化电极排列方案的可行性及有效性，我们设置了跨孔 ERT 的室内静态/动态实验与野外场地数据验证。

1.3.1 室内静态/动态实验

选取长 0.55 m、宽 0.40 m、高 0.35 m 的水箱，内注入电阻率为 13.00 Ω 的 NaCl 溶液。每个电极柱上布置 20 个电极，共 40 个电极，水面到顶端电极的距离为 0.02 m，各电极间距为(0.01±0.001)m，电极柱之间相距 0.10 m(图 1a, b)。选取绝缘实心双 PVC 管作为电阻异常体。异常体截面长 0.04 m，宽 0.02 m，电极柱和地表隧道设置在水箱中部，远离水箱壁，以减少边界效应的影响。使用 AGI Supersting R8 进行 ERT 数据测量。

以左侧电极上端点为原点，水平向右为 x 正轴，垂直向下为 y 负轴，以 0.01 m 为单位长度作坐标系。静态实验中电阻异常体质心位于 x= 0.230 m，y= −0.055 m，位于第三电极与第七电极之间(图 1c)。使用 Bipole-Bipole 电极排列进行一次完整测量，共得到 1 249 个数据作为完整跨孔 ERT 数据集(100% 数据点)，并遵循均匀取样原则，选取了其中 250 个数据点(20% 的数据点)作为缩减跨孔 ERT 数据集，以保证缩减数据集的分辨率分布均匀。基于贝叶斯实验设计的电极排列则基于优化算法从完整跨孔 ERT 数据集中选出，其数量与缩减数据集一致。采用 AGI Earthimager 2D 对测得数据进行反演。为了更直观地分析反演结果，用反射系数 r 将反演结果进行标准化处理[31]：

$$r = \frac{\rho - \rho_0}{\rho + \rho_0}, \quad (7)$$

式中：ρ_0 为水箱水的背景电阻率；ρ 为测量的电阻率。

当 r = −1 时，电阻异常体为完美导体；r = 0 时，电阻异常体为背景电阻率；r = 1 时，电阻异常体为完美绝缘体。

动态实验中电阻异常体以 0.016 m/h 的速度匀速下降，在 4 h 内质心从 x=0.218 m，y= −0.027 m 处运动至 x=0.218 m，y= −0.092 m 处(图 1d)。实验中

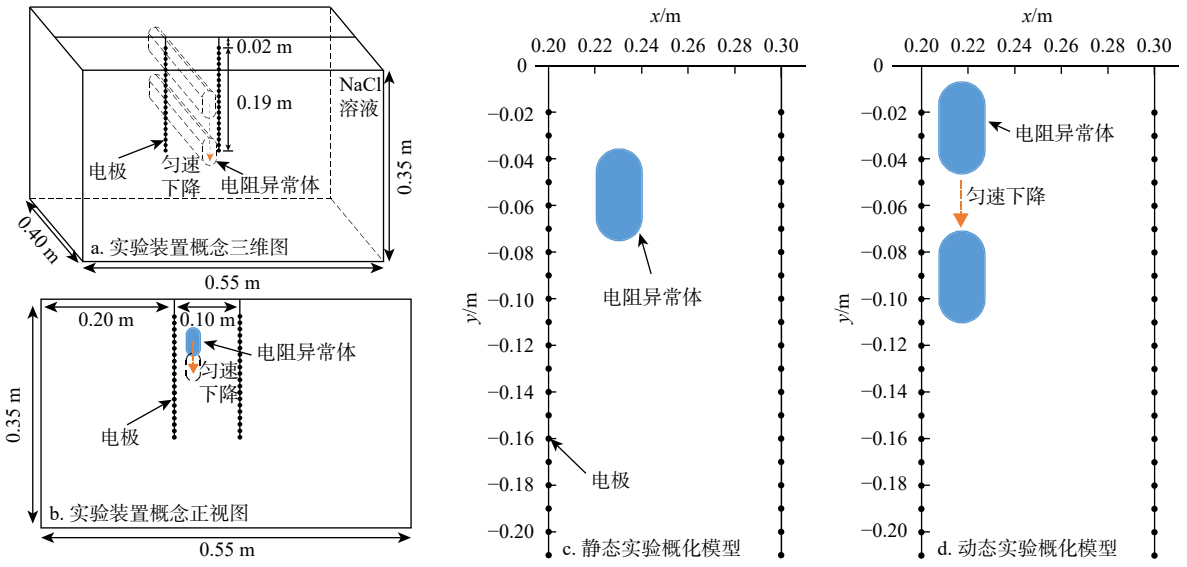


图 1 实验设置概念图

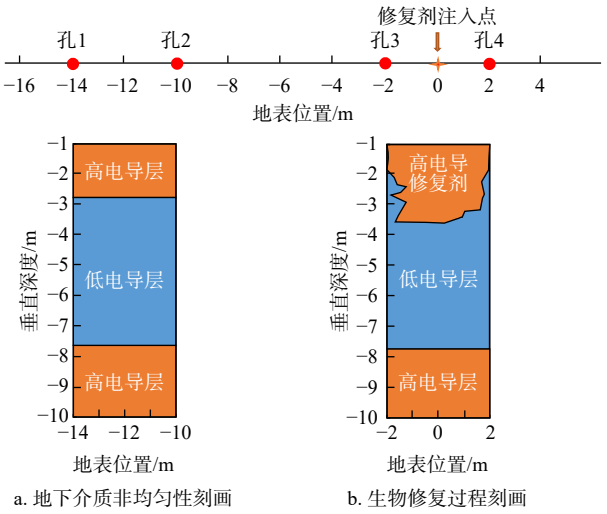
Fig. 1 Conceptual diagrams of the test setup

每隔 1 h 测 1 次数据，共测 5 次。通过对比优化电极排列和传统电极排列所测数据反演的异常体与实际异常体质心坐标以及质心距的均方根误差判断优化效果。

1.3.2　野外场地

本研究以野外场地美国 Brandywine 州的前 MD Defense Reutilization and Marketing Office (DRMO) 的开源 ERT 数据进行优化方案验证。该场地数据来自 KESSOURI 等[32] 进行的跨孔 ERT 生物修复效果调查。该野外场地地层分布情况如下：上层为高电导率的三氯乙烯(TCE)污染物层，下层为低电导率 Brandywine 含水层以及下伏深度约 8 m 的高电导率 Calvert 粉砂–黏土层构成[32-33]。

基于文献 [32-33] 中开源提供的 ERT 测量数据，选择了位于测线不同位置的孔 1、孔 2 和孔 3、孔 4 之间的区域为研究目标区域，将此处跨孔 ERT 反演结果的概化模型作为对照的真实结果。由图 2 可知，左侧孔 1 和孔 2 之间的区域未受示踪剂注入影响，地层分布规律呈现高电导–低电导–高电导的分层现象，与野外场地实际地层分布情况一致。而对于右侧孔 3 和孔 4 之间示踪剂注入点附近的区域，其在近地表出现了明显的由示踪剂注入引起的高电导反应，这也与实际情况一致。



a. 地下介质非均匀性刻画　b. 生物修复过程刻画

图 2　研究场地跨孔 ERT 数据概化模型

Fig. 2　Generalized model with cross-hole ERT data in the study site

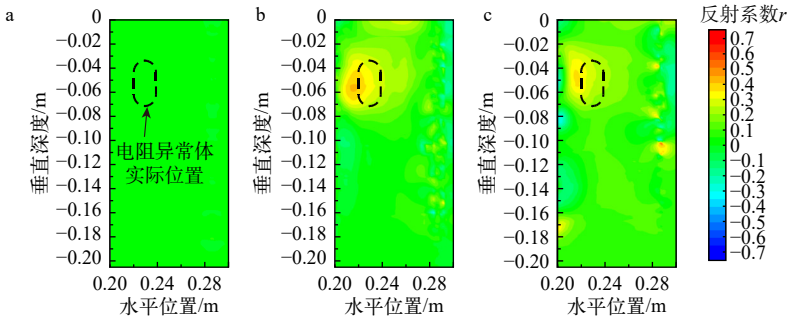
通过对比传统 Dipole-Dipole 排列与优化排列的反演效果，对贝叶斯电极排列优化方法进行测试。由于 2022 年 KESSOURI 等[32] 在进行场地实验时使用 Dipole-Dipole 排列进行了 2 340 次测量，因此，我们将这 2 340 个数据作为完整数据集(100% 数据点)，并遵循均匀取样原则，选取了其中 110 个数据点(约 4.7% 的数据点)作为缩减数据集，以保证缩减数据集的地下分辨率分布均匀。作为对比，优化方案的电极排列则基于贝叶斯实验设计优化算法从完整数据集中选出，其数量与缩减数据集一致。

2　结果与分析

2.1　室内静态/动态实验结果与分析

在静态实验中，通过对比 2 种电极排列所测数据反演的电阻异常体位置(图 3)可知，经贝叶斯优化过的电极排列可通过约 20% 的数据点得到与完整跨孔 ERT 测线(100% 数据点)类似的电阻异常体刻画效果，与概念图所示的异常体位置基本一致，而相同数量缩减后的传统 Bipole-Bipole 电极排列数据则无法反演出异常体位置。因此在对目标物具有足够分辨率的情况下，基于贝叶斯优化改进的电极排列较 Bipole-Bipole 电极排列用时更短。若需分辨出目标物需要 Bipole-Bipole 电极排列进行完整测量，耗时 42.93 min，而基于贝叶斯设计优化改进的电极排列则仅需其约 20% 的电极排列，耗时 10.26 min，监测时间减少了 76.1%。

在动态实验中，通过对比 2 种电极排列所测数



a. 250 组Bipole-Bipole电极排列; b. 1 249 组Bipole-Bipole电极排列; c. 250 组优化电极排列

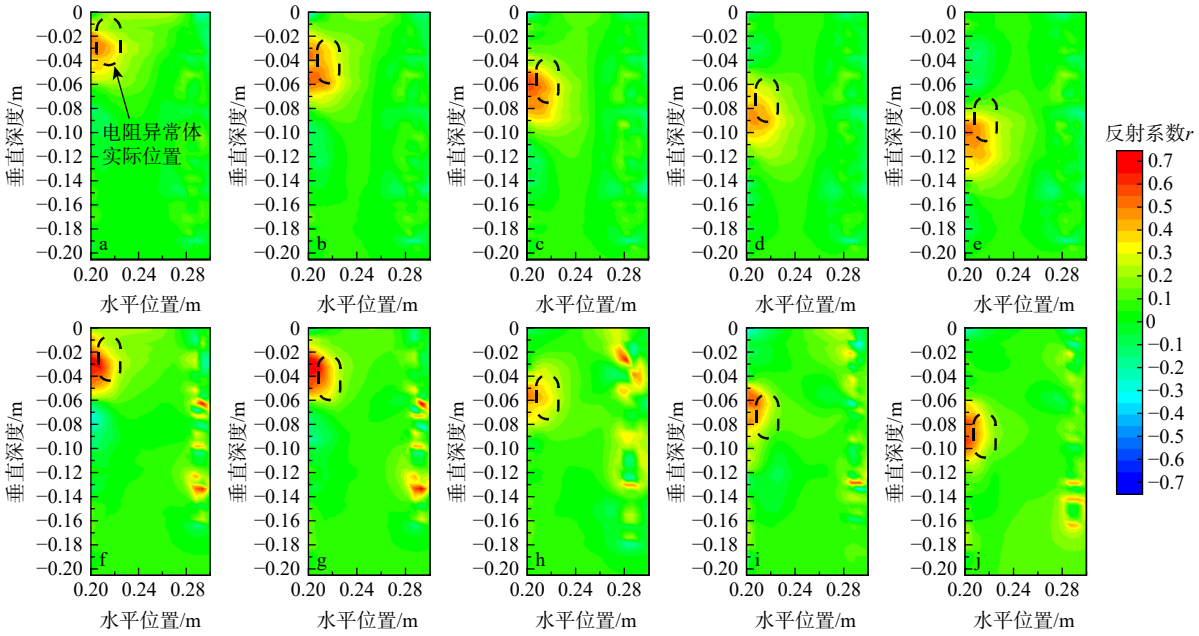
图 3　静态实验电阻异常体反演结果标准化图

Fig. 3　Normalized inversion results for the resistivity anomaly in the static test

据反演的电阻异常体位置(图 4)可知, 基于贝叶斯优化改进的电极排列在与目标相关的变化区域附近, 有良好的分辨率, 而图像其他区域的分辨率有所降低。对比分析不同电极排列与实际观测异常体的质心坐标以及质心距(图 5, 6), 测量运动中的电阻异常体时, Biopole-Bipole 电极排列反演出的异常体质心纵坐标和质心距的均方根误差都随着运动时间变长而增大, 而优化电极排列反演出的异常体质心纵坐标偏移量更小, 并随运动时间变长而减少。这是因为在动态过程中, 数据采集时间过长会导致所测数据反演结果产生“延迟效应”, 反演电阻异常体纵向体积会增大, 质心纵坐标就会发生偏移。优化电极排列数据采集用时较短于 Bipole-Bipole 电极排列, 因此削弱了“延迟效应”, 质心纵坐标均方根误差 *RMSE* 偏小。此外, 虽然优化电极排列反演出的异常体质心横向偏移量相对偏大, 但是纵向偏移量相对更小, 导致质心位置偏移量相对偏小。因此在监测动态目标时, 优化电极排列监测精度略高于 Biopole-Bipole 电极排列。

2.2 室内实验灵敏度结果与分析

通过电极排列的灵敏度分布可以判断该电极排列监测方案对研究区域内电阻率变化的响应程度。灵敏度越大的区域, 电阻率变化对测量值的影响越大。



a~e. 1249 组 Bipole-Bipole 电极排列; f~j. 250 组优化电极排列

图 4　动态实验电阻异常体反演结果标准化图

Fig. 4　Normalized inversion results for the resistivity anomaly in the dynamic test

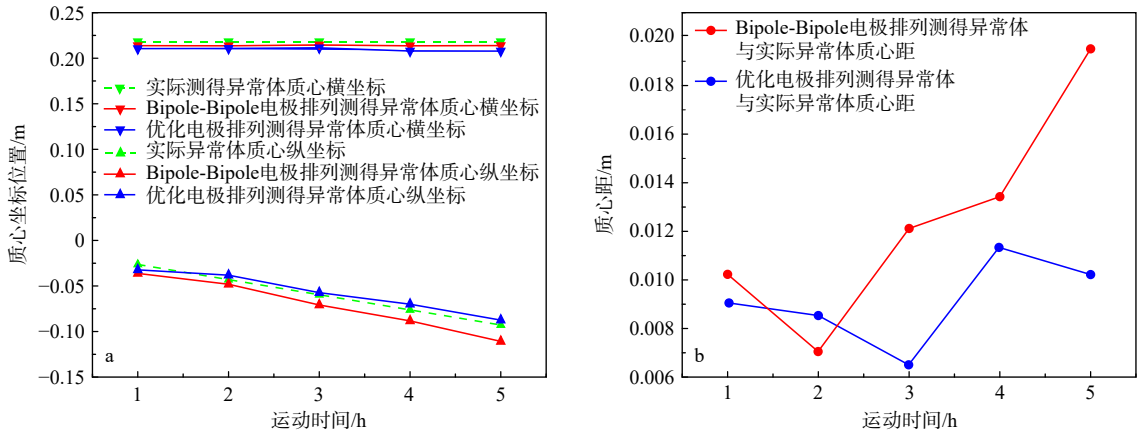


图 5　不同电极排列测得异常体与实际异常体的质心坐标 (a) 及其之间的质心距 (b)

Fig. 5　Centroid coordinates of the anomaly measured by different electrode configurations and the actual anomaly(a) and centroid distances between the anomaly measured by different electrode configurations and the actual anomaly (b)

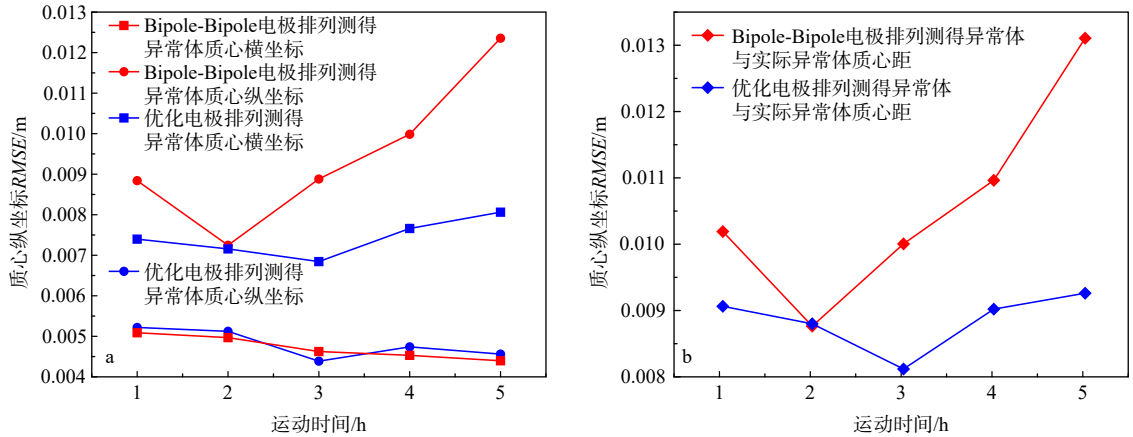
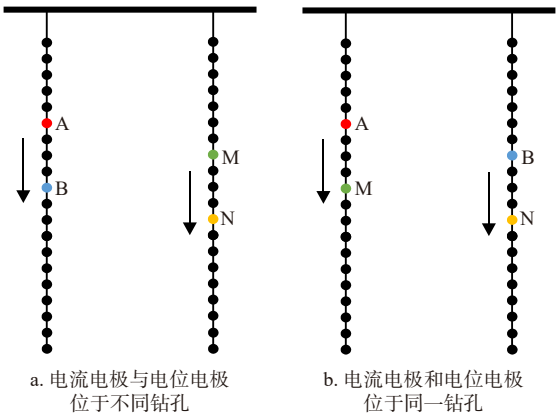


图 6　不同电极排列测得异常体质心坐标 (a) 及其与实际异常体质心距 (b) 的均方根误差（*RMSE*）

Fig. 6　Root-mean-square errors of centroid coordinates of the anomaly measured by different electrode configurations (a) and root-mean-square errors of centroid distances between the anomaly measured by different electrode configurations and the actual anomaly (b)

Bipole-Bipole 排列通常采用 2 种电极排列方式，分别是电流电极与电位电极分别位于不同钻孔(图 7a)，电流电极和电位电极位于同一钻孔(图 7b)。通过单组电极排列灵敏度分布图(图 8)分析，可见其灵敏度主要分布在钻孔中间与电极附近，越靠近测量电极，灵敏度越大。通过对比 Bipole-Bipole 电极排列与基于贝叶斯实验设计优化电极排列的总灵敏度分布图(图 9)可以看出，优化电极排列在测量时会更集中于异常体所在区域，从而以更少的电极排列数量，获得质量相当的测量效果。

在静态和动态实验中，无论是 Bipole-Bipole 电极排列还是优化电极排列的反演结果在电极柱附近都会出现电阻异常的情况(图 3, 4)，这是因为 Bipole-Bipole 电极排列的灵敏度在电极柱附近偏大(图 8)，对电阻率变化的响应更敏感，所以在电极柱附近会出现电阻异常的情况。优化电极排列则是以 Bipole-Bipole 电极排列测量数据为基准筛选而出，因此除在异常体所在区域灵敏度值偏大以外，其电极柱附近的灵敏度也偏大，并且由于筛选后的测量数据主要分布于异常体所在区域，电极柱附近的测量数据偏少，从而导致电极柱附近产生的电阻异常情况也偏严重(图 9b)。



A, B. 电流电极; M, N. 电位电极; 下同

图 7　Bipole-Bipole 电极排列的 2 种不同排列方式

Fig. 7　Two arrangements for Bipole-Bipole electrode configurations

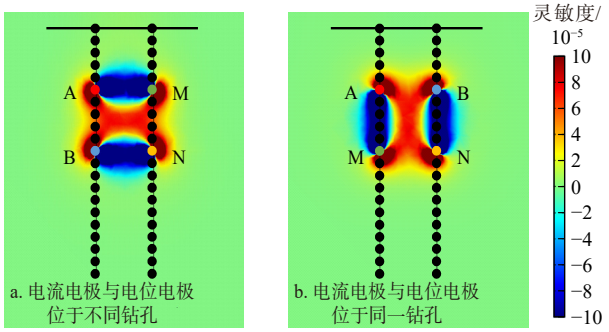


图 8　Bipole-Bipole 电极排列的 2 种不同排列方式的灵敏度分布图

Fig. 8　Sensitivity distributions of two arrangements for Bipole-Bipole electrode configurations

2.3　野外场地结果与分析

通过对比 2 种电极排列所测数据地表 ERT 反演结果(图 10)可知，经贝叶斯优化过的电极排列可通过约 4.7% 的数据点得到与完整数据集(100% 数据点)类似的地层刻画效果，与概化模型的地层分界位置基本一致，整体剖面呈现高电导–低电导–高电导的分层现象。而相同数量缩减后的传统 Dipole-Dipole 数据点则无法还原地层的分层效果。对于修复剂注入点附近的区域(图 10f~h)，基于贝叶斯实验设计优化的电极排列同样以约 4.7% 的数据点刻画

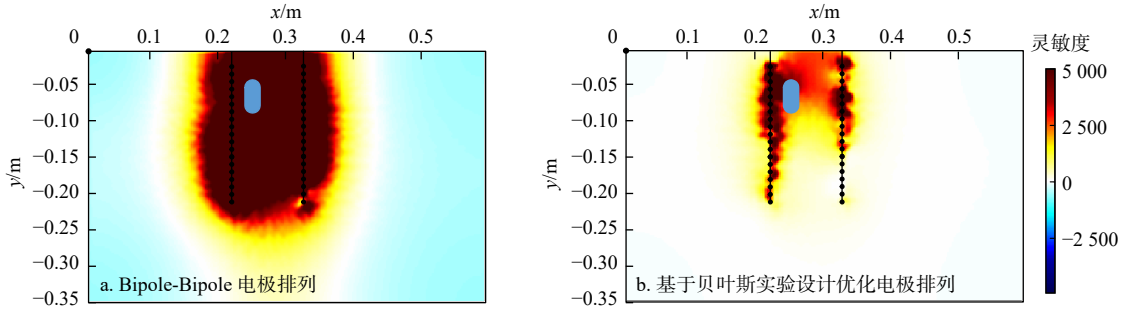
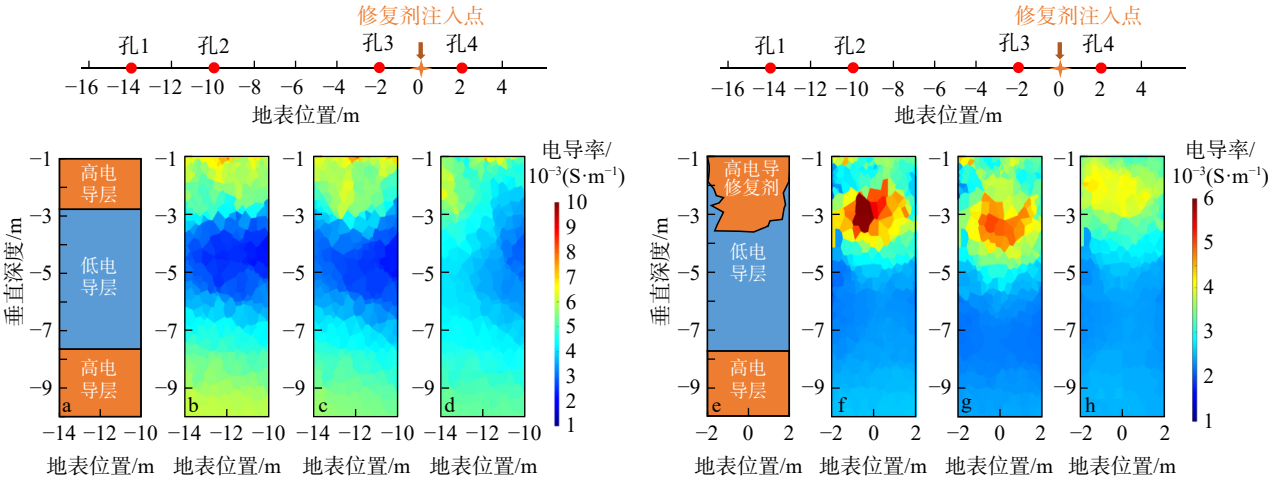


图 9　不同电极排列的总灵敏度分布图

Fig. 9　Total sensitivity distributions for different electrode configurations



a~d. 孔 1 和孔 2 之间的监测结果; e~h. 孔 3 和孔 4 之间的监测结果. a, e. 研究场地跨孔 ERT 数据概化模型; b, f. 使用 Dipole-Dipole 电极排列完整数据集(100%)的反演结果; c, g. 使用优化电极排列数据集(4.7%)的反演结果; d, h. 使用 Dipole-Dipole 电极排列缩减数据集(4.7%)的反演结果。

图 10　研究场地地表 ERT 数据反演结果

Fig. 10　Inversion results from surface ERT data in the study site

出了修复剂注入引起的地下高电导反应, 其电学响应明显高于同样数据量的传统电极排列, 与完整测线反演结果较为一致。

值得注意的是, 3 种电极排列均未能刻画出此区域地下 8 m 附近的高电导层, 这也反映了地表 ERT 相对跨孔 ERT 对地下较深位置刻画分辨率较低的劣势。不过, 研究结果仍可表明, 本研究所述的方法能够优化传统地球物理监测方案, 使其能以更少的监测数据量(监测时间)来得到与大量监测数据相同的水文过程监测效果。

3　结　论

(1)基于贝叶斯实验设计的跨孔 ERT 优化监测方案监测静态目标时, 能以较少数据点获取与传统监测方案精度相当的监测结果, 缩短了监测时间。监测动态目标时, 基于优化监测方案监测数据反演出的电阻异常体位置结果的纵向偏移量更小, 均方根误差在 0.006 m 以下, 能够有效提高跨孔 ERT 的监测精度。

(2)基于贝叶斯实验设计的跨孔 ERT 优化监测方案更集中刻画目标区域的电阻率变化, 因此会导致其他区域的刻画精确度降低。由于所用数据点较少, 优化监测方案的数据反演结果容易受到电极柱附近灵敏度大的影响, 相较于传统电极排列其横向偏移量更大。

(3)基于贝叶斯实验设计的跨孔 ERT 优化监测方案既能缩短监测用时, 提高监测效率, 又能改善传统监测方案响应地下流体快速迁移运动过程的滞后性, 能获得更精准的刻画效果, 为四维水文地质过程的高效、高精度监测提供新的手段, 在未来具有广阔的发展和应用前景。

所有作者声明无利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] HERMANS T, GODERNIAUX P, JOUGNOT D, et al. Advancing measurements and representations of subsurface heterogeneity and

dynamic processes: Towards 4D hydrogeology[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(1): 255-287.

[2] ROBERT T, PAULUS C, BOLLY P Y, et al. Heat as a proxy to image dynamic processes with 4D electrical resistivity tomography[J]. Geosciences, 2019, 9(10): 414.

[3] 焦如义. 高密度电法在水平定向钻穿越孔壁稳定性检测中的应用 [J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 108-112.
JIAO R Y. Feasibility study on borehole collapse detection of HDD by high density electrical method[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 108-112. (in Chinese with English abstract)

[4] JOHNSON T C, HAMMOND G E, CHEN X Y. PFLOTRAN-E4D: A parallel open source PFLOTRAN module for simulating time-lapse electrical resistivity data[J]. Computers & Geosciences, 2017, 99: 72-80.

[5] 高畅, 邢程, 郭秀军, 等. 不同演化阶段的 NAPLs 污染区高密度电阻率法探测效果分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(增刊 1): 128-136.
GAO C, XING C, GUO X J, et al. Effect analysis of electrical resistivity tomography (ERT) detection in NAPLs contaminated areas at different evolutionary stages[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(S1): 128-136. (in Chinese with English abstract)

[6] DIMECH A, CHENG L Z, CHOUTEAU M, et al. A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years: Perspectives for mining waste monitoring[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(6): 1699-1759.

[7] 苏永军, 范翠松, 赵更新, 等. 综合电法在探测海水入侵界面中的研究与应用: 以莱州湾地区为例 [J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 704-708.
SU Y J, FAN C S, ZHAO G X, et al. Research and application of comprehensive electrical method in detecting saltwater intrusion interface: A case study of Laizhou Bay area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 704-708. (in Chinese with English abstract)

[8] ASARE A, APPIAH-ADJEI E K, OWUSU-NIMO F, et al. Lateral and vertical mapping of salinity along the coast of Ghana using electrical resistivity tomography: The case of Central Region[J]. Results in Geophysical Sciences, 2022, 12: 100048.

[9] 李继兴, 严松, 杨春健, 等. 泥质砂岩残积土边坡降雨冲刷特性 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 26-33.
LI J X, YAN S, YANG C J, et al. Rainfall erosion characteristics of argillaceous sandstone residual soil slopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 26-33. (in Chinese with English abstract)

[10] WILKINSON P, CHAMBERS J, UHLEMANN S, et al. Reconstruction of landslide movements by inversion of 4D electrical resistivity tomography monitoring data[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(3): 1166-1174.

[11] TORRESE P. Investigating karst aquifers: Using pseudo 3D electrical resistivity tomography to identify major karst features[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124257.

[12] 刘金涛, 胡晓明. 高密度电法勘探在岩溶查找中的应用 [J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 100-102.
LIU J T, HU X M. Application of the distributed multi-electrode resistivity imaging method in finding the karst[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(2): 100-102. (in Chinese with English abstract)

[13] 郭蕾蕾, 魏良帅, 黄安邦, 等. 乌蒙山地区岩溶地下水流系统结构及其找水应用 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 146-157.
GUO L L, WEI L S, HUANG A B, et al. Structure of karst groundwater system and its water exploration in Wumeng Mountain area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 146-157. (in Chinese with English abstract)

[14] 潘剑伟, 占嘉诚, 洪涛, 等. 地面核磁共振方法和高密度电阻率法联合找水 [J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 253-262.
PAN J W, ZHAN J C, HONG T, et al. Combined use of surface nuclear magnetic resonance and electrical resistivity imaging in detecting groundwater[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 253-262. (in Chinese with English abstract)

[15] ABDULLAH F M, LOKE M H, NAWAWI M, et al. Assessing the reliability and performance of optimized and conventional resistivity arrays for shallow subsurface investigations[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 155: 237-245.

[16] BELLMUNT F, MARCUELLO A, LEDO J, et al. Capability of cross-hole electrical configurations for monitoring rapid plume migration experiments[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 124: 73-82.

[17] SINGHA K, GORELICK S M. Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis[J]. Water Resources Research, 2005, 41(5): W05023.

[18] FURMAN A, FERRÉ T P A, WARRICK A W. Optimization of ERT surveys for monitoring transient hydrological events using perturbation sensitivity and genetic algorithms[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1230-1239.

[19] STUMMER P, MAURER H, GREEN A G. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information[J]. Geophysics, 2004, 69(1): 120-139.

[20] WILKINSON P B, LOKE M H, MELDRUM P I, et al. Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography[J]. Geophysical Journal International, 2012, 189(1): 428-440.

[21] LOKE M H, WILKINSON P B, CHAMBERS J E, et al. Optimized arrays for 2D resistivity survey lines with a large number of electrodes[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 112: 136-146.

[22] QIANG S Y, SHI X Q, KANG X Y, et al. Optimized arrays for electrical resistivity tomography survey using Bayesian experimental design[J]. Geophysics, 2022, 87(4): 189-203.

[23] WANG H R, LIN C P, LIU H C. Pitfalls and refinement of 2D cross-hole electrical resistivity tomography[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 181: 104143.

[24] 柴伦炜. 井间超高密度电法探测基桩的模拟及应用 [J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1283-1288.
CHAI L W. A simulation and application of cross-well ultra-high-density resistivity imaging in the detection of foundation piles[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1283-1288. (in Chinese with English abstract)

[25] WANG T P, CHEN Y T, CHEN C C, et al. Application of cross-

hole electrical resistivity tomography to groundwater contaminated remediation site[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2020, 31(5): 507-521.

[26] LEONTARAKIS K, APOSTOLOPOULOS G V. Laboratory study of the cross-hole resistivity tomography: The Model Stacking (MOST) technique[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 80: 67-82.

[27] GOES B J M, MEEKES J A C. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2004, 9(3): 127-141.

[28] BING Z, GREENHALGH S A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(5): 887-912.

[29] LINDLEY D V. On a measure of the information provided by an experiment[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1956, 27(4): 986-1005.

[30] HUAN X, MARZOUK Y M. Simulation-based optimal Bayesian experimental design for nonlinear systems[J]. Journal of Computational Physics, 2013, 232(1): 288-317.

[31] WILKINSON P B, UHLEMANN S, MELDRUM P I, et al. Adaptive time-lapse optimized survey design for electrical resistivity tomography monitoring[J]. Geophysical Journal International, 2015, 203(1): 755-766.

[32] KESSOURI P, JOHNSON T, DAY-LEWIS F D, et al. Post-remediation geophysical assessment: Investigating long-term electrical geophysical signatures resulting from bioremediation at a chlorinated solvent contaminated site[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: 113944.

[33] JOHNSON T C, VERSTEEG R J, DAY-LEWIS F D, et al. Time-lapse electrical geophysical monitoring of amendment-based biostimulation[J]. Groundwater, 2015, 53(6): 920-932.

Summary for “基于贝叶斯实验设计优化跨孔高密度电阻率法监测四维水文地质过程”

Optimizing 4D hydrogeological process monitoring using cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) via Bayesian experimental design

PENG Bo[a,b], QIANG Siyuan[a,b], SHI Xiaoqing[a,b*]

a. School of Earth Sciences and Engineering; b. Key Laboratory of Surficial Geochemistry of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China

First author, E-mail: peng_bo@smail.nju.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: shixq@nju.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Geophysical methods can effectively monitor the dynamics of water flow and material transport in 4D hydrogeological processes, and its imaging accuracy is often closely related to the monitoring scheme. Taking the commonly used electrical resistivity tomography (ERT) as an example, obtaining good imaging accuracy often requires a large number of electrode arrays, leading to a long data acquisition time and inability to respond in a timely manner to 4D hydrogeological dynamics. Previous optimization studies of ERT monitoring schemes have mainly focused on surface ERT, whereas cross-hole ERT (CHERT) has received far less attention. [**Methods**] Due to the advantages of CHERT in high-precision characterization, this study proposes using Bayesian experimental design to optimize CHERT monitoring scheme. Through laboratory static and dynamic tests and a field application, data acquisition time and imaging accuracy between the optimized and traditional electrode configurations to evaluate the effectiveness of the Bayesian-based optimization. [**Results**] Laboratory tests demonstrate that the optimized monitoring scheme can reduce acquisition time by approximately 75%, and the inversion results more accurately delineate the evolving resistivity anomaly zones, thereby mitigating the lag effect observed in traditional schemes. The field application shows that the optimized scheme can reduce monitoring time by approximately 95%. [**Conclusion**] The optimization of CHERT electrode configurations based on Bayesian experimental design provides a technical basis for efficient monitoring of 4D hydrogeological processes.

Key words: cross-hole electrical resistivity tomography; electrode arrays optimization; geophysics; Bayesian experimental design; 4D hydrogeological monitoring

Received: 2023-10-27; Revised: 2024-01-06; Accepted: 2024-01-18

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230600