



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202208159 中图分类号 X53 文献标识码 A

刘家旭, 潘剑伟, 孙旭, 等. 磷石膏渗滤液在不同渗漏运移模式下电阻率分布特征[J]. 环境工程学报, 2023, 17(2): 682-691. [LIU Jiaxu, PAN Jianwei, SUN Xu, et al. Resistivity of phosphogypsum leachate under different leakage migration modes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(2): 682-691.]

磷石膏渗滤液在不同渗漏运移模式下电阻率分布特征

刘家旭¹, 潘剑伟^{1,2,✉}, 孙旭³, 高健¹, 张成丽¹, 詹林¹

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵阳 550008

摘要 为评估电阻率法监测磷石膏堆场渗滤液运移过程的有效性, 首先采用自制电阻率四极装置测试渗滤液污染土的电性特征, 随后针对表层单点渗漏、内部岩溶管道多点渗漏 2 种模型开展不同时段渗滤液运移监测物理模拟实验, 并加入岩溶水进行空白对照实验。结果表明, 渗滤液及其污染土电阻率随渗滤液浓度增加呈递减趋势, 且低浓度区间变化更为剧烈; 在表层单点入渗过程中, 渗滤液主要进行横向运移, 并逐步形成漏斗状渗滤液形态, 而管道渗漏模式下渗滤液以四周扩散方式运移; 加入岩溶水后, 借助电阻率差异能够区分相同含水率下的污染区与未污染区; 最后借助一种常用的电阻率法——高密度电法 (ERT) 对贵州省某磷石膏堆场进行实测, 得到的低阻体范围与堆场位置存在较好对应关系, 验证了前述实验结果。电阻率法可用于监测磷石膏堆场渗滤液在地表及地下管道内的渗漏过程及污染分布。

关键词 磷石膏渗滤液; 电阻率法; 电性特征; 渗漏扩散模型

磷是地球生态构成的关键基础元素, 过量输入时会导致水体富营养化等问题^[1]。已有研究表明, 人类活动与磷污染密切相关, 其中, 磷化工三废处置不当是重要驱动力^[2-3]。作为磷酸工业的主要副产物, 磷石膏因产量大、利用率低被大量堆存处置。在缺乏规范管理的长期堆放过程中, 磷石膏中的毒性成分(可溶性 F、P₂O₅、Cr、Pb 等)可随雨水淋滤下渗, 污染库区周边土壤及水体^[4-6]。目前磷石膏堆场渗漏污染问题已相当严峻, 为高效修复治理污染, 需要准确判断出污染程度及范围。因此选取一种便捷的方式监控堆场渗滤液污染过程, 圈定污染边界以便进行针对治理是关乎磷化工产业可持续发展的重要课题。

目前常用的渗滤液污染监测方法有地下水监测井法、示踪剂法、取样分析法、电阻率法等^[7-8]。对于地下水监测井法、取样分析法, 其能直观反映出场地的污染物类别及污染程度, 但观测缺乏连续性, 且难以确定漏点及扩散范围大小。示踪剂法仅可定性判断渗漏方位, 无法对优势渗流通道边界进行识别, 使用不当易造成二次污染。基于渗漏体与周围介质的电学性质差异, 电阻率法可以高效、无损地获取污染场地的电阻率信息, 进而推测渗漏体空间分布^[9-10]。目前已有学者开展

收稿日期: 2022-08-31; 录用日期: 2022-12-29

基金项目: 贵州省科技计划资助项目 ([2020]1Y173); 贵州省地矿局地质科研资金资助项目 (黔地矿科合 [2020]14 号); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (42004122)

第一作者: 刘家旭 (1998—), 男, 硕士研究生, 806599389@qq.com; ✉通信作者: 潘剑伟 (1988—), 男, 博士, 副教授, jwpan@gzu.edu.cn

了相关方面的研究, 如 BALBARINI 等^[11] 在制药废渣填埋场开展了高密度电法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT) 监测实验, 并通过取样分析对比得出, 在化学采样点不足的情况下, ERT 结果相对更精准。CATERINA 等^[12] 对地下柴油泄露修复场地进行 3 年的 ERT 监测实验, 得出该方法更适用于长期监测污染羽流。潘玉英等^[13] 借助 ERT 监测模型箱内原油运移及重分布过程, 结果表明电阻率反演图像可以反映原油受污染后的运移情况。吕美彤等^[14] 对固化重金属污染土电阻率进行研究, 得出电阻率值与固化土碳化时间存在较好的一致性, 随着碳化过程进行, 污染土的电阻率值不断增加。李培华等^[15] 联合图像法与 ERT 对二维砂箱模型中重非水相液体 (DNAPL) 污染运移过程进行监测, 所拍摄实际污染区域图像与电阻率反演结果吻合, 证实了电阻率法的准确性。HELENE 等^[16] 在垃圾填埋场开展了 ERT 监测试验, 其二维反演图像清晰反映了电阻率随渗漏时间的变化过程, 且渗滤液渗透区域与低阻剖面吻合度较高。以上研究分别从污染物电性特征、物理模拟、污染场地监测等方面进行深入分析, 探讨了不同种类污染物的电阻率特性及电法污染监测的应用可能, 有力推动了电阻率法在污染调查领域的发展应用。

然而, 现阶段针对电阻率法在磷石膏堆场渗漏监测的系统研究相对较少, 特别是结合表层单点渗漏与岩溶管道多点渗漏情况的深入研究。在西南喀斯特地区, 碳酸盐岩广泛分布, 但成土过程缓慢导致土层较薄, 渗滤液极易溶穿碳酸盐岩地层进入岩溶管道, 并在快速运移过程中污染地下水, 造成更大范围的污染^[17-18]。基于此, 本研究拟首先在改变浓度条件下对滤液及其污染土样进行电阻率测试, 讨论稀释过程的电阻率变化规律。之后, 针对喀斯特地区常见的 2 种污染模式依次开展渗滤液表层单点渗漏、内部管道多点渗漏物理模拟监测实验, 通过分析电阻率剖面及切片, 总结渗滤液在不同渗漏模式下的运移特征, 并对比相同实验条件下岩溶水的渗漏过程。最终, 利用场地实验, 拟验证电阻率法在磷石膏堆场渗漏监测的应用效果。

1 材料与方法

1.1 实验原理

电阻率法是一种以岩土体电性差异为基础, 借助仪器测量地下介质导电性获取电阻率值, 通过分析电阻率变化推测地下介质异常分布的方法^[19]。在场地污染调查中, 传统电阻率测量主要采用点测方式, 其在圈定深部污染区域时难以确定电极布设方位与异常体是否达到最佳契合, 因此常需要多点位测量以圈定渗漏区域, 探测效果难以保障^[20-21]。为简化流程, 提高工作效率, 高密度电法 (ERT) 步入大众视野, 相较于传统方式的四电极阵列, ERT 能够同时布设几十至上百根电极, 通过一次测量即可获取区域内的连续性电阻率信息, 提高数据采集密度的同时减少了电极重复设置带来的误差, 在渗漏监测领域优势显著^[22-23]。基于此, 研究中电性实验采用对称四极法完成, 模拟实验及场地实验部分采用 ERT 完成。均匀介质条件下 ERT 电阻率计算方法如式 (1)^[24] 所示。

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; K 为装置系数, m , 与 AB 和 MN 之间的距离有关, 具体计算公式见式 (2); ΔU 为电极 MN 之间的电压, V ; I 为电极 AB 之间的电流, A 。

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

1.2 实验材料

实验用磷石膏渗滤液分别取自贵州省福泉摆纪磷石膏堆场 (107°32'22", 26°38'45") 及贵州省息烽县磷石膏堆场 (106°49'49.25", 27°15'23.09"), 岩溶水取自贵州大学校内地下河露头。为模拟西南地区主要土层结构, 实验选用红黏土作为多孔介质的代表, 黏土取样地点位于贵州大学物探

实验场 (106°39", 30.11", 26°26", 38.31"), 取土深度 1~3 m, 取样后过 3 mm 筛, 按照《土工实验规程》测定土壤基本参数, 结果见表 1。

1.3 实验装置

磷石膏渗滤液及污染土的电性实验采用多功能激电仪 (WDJD-4, 重庆奔腾数控技术研究所) 完成电阻率测量, 选择自制四极装置作为电阻率测试装置, 装置结构如图 1 (a) 所示。为模拟渗滤液在土体表层的人渗过程, 设计如图 1 (b) 所示的点渗漏模型, 装置采用 200 cm×100 cm×100 cm 的透明钢化玻璃制作, 内部填有 50 cm 厚红黏土以模拟西南地区土层结构, 渗漏源位于电极阵列中心, 通过加装流速控制阀的 7.5 L 容积水箱进行渗滤液注入。为模拟渗滤液下渗进入岩溶管道后的渗漏过程, 设计图 1 (c) 所示的管道渗漏模型, 该实验选择室外开拓尺寸 200 cm×70 cm×60 cm 的坑槽方式以避免玻璃边壁效应对反演结果造成影响, 选用直径 3 cm、长 150 cm 的 PVC 管模拟岩溶管道, 管道中部 65~85 cm 范围预制多排细孔用于污染物渗漏, 垂直测线走向将其埋至 15 cm 深处, 通过两端的注入管将滤液注入管道内。模拟实验采用集中式高密度电法测量系统 (WGMD-4, 重庆奔腾数控技术研究所) 完成电阻率数据采集, 由 4 列平行分布的微型电极组成测量阵列, 列间距 10 cm, 每列共 30 个电极, 相邻电极间距 5 cm, 数据采集方式选择 Wenner 装置。

表 1 实验土样基本物性参数

Table 1 Basic physical parameters of experimental soil samples

塑性指数	液性指数	土样天然密度	土粒相对密度	土壤最大干密度
20.9	0.29	1.86 g·cm ⁻³	2.74 g·cm ⁻³	1.9 cm ³

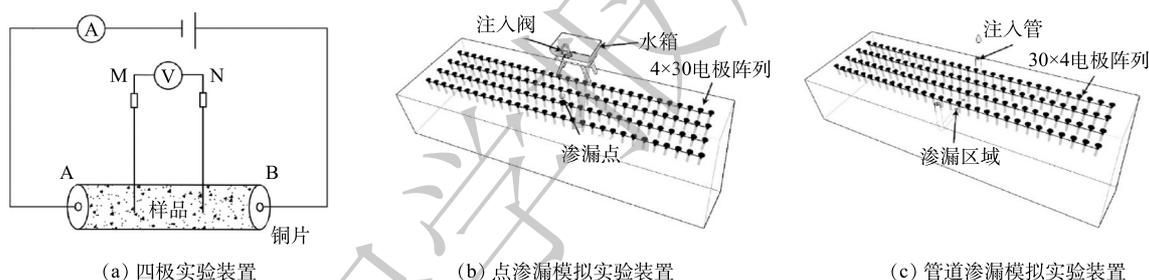


图 1 电性实验及物理模拟实验装置

Fig. 1 Electrical and physical simulation experimental apparatus

1.4 实验过程

电性实验采用纯净水对两种滤液进行梯度稀释, 首先配置以 10% 浓度梯度递进的 10%~100% 浓度区间滤液 20 组, 分别测试其电阻率值; 随后进行土样电阻率测定, 将采集土样按 105 °C 预设温度烘干 10 h, 冷却后进行颗粒级配筛分, 筛选出 0.2、0.5、1.0 mm 3 种粒径土各 100 g 组成混合土样。配置完成后将不同浓度滤液样品按 30% 土壤含水率喷洒至干土上, 搅拌均匀后压入四极装置中, 共配置不同浓度土壤样品 20 个。样品制作完成后静置 5 min, 待水气混合均匀后测量其电阻率值。

物理模拟实验方面, 模型装置准备完成后需首先开展一次背景值电阻率扫描作为空白对照, 之后开始注入滤液, 在注入 10、30、60、90、120 min, 停止注入后静置 60、120 min 各进行 1 次电阻率扫描。岩溶水对照实验的过程与滤液模拟实验一致。

2 结果与讨论

2.1 磷石膏渗滤液及其污染土电性特征分析

渗滤液浓度是引起介质电阻率差异的主控因素^[25]。图 2 (a) 为本研究中 2 个采样点所采集的渗滤液在不同稀释浓度情况下电阻率随浓度的变化关系曲线。由图可见, 尽管取样地点不同, 但 2 种渗滤液在 100% 初始浓度下的电阻率曲线非常接近, 说明不同堆场产生的渗滤液导电组分趋

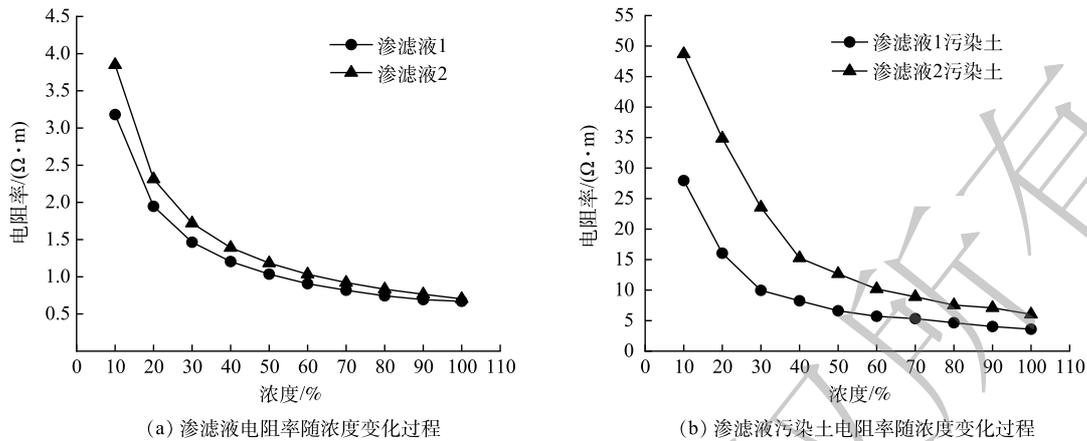


图 2 磷石膏渗滤液及其污染土体电阻率随浓度的变化曲线

Fig. 2 Change curve of electrical resistivity of phosphogypsum leachate and polluted soil with porosity

同。在提高浓度过程中，2种渗滤液的电阻率值均呈指数降低，且曲线拐点都在40%浓度附近，随着滤液浓度增加，在0~40%浓度区段，滤液电阻率对浓度的反映更灵敏，高于40%时电阻率曲线逐步趋缓。

图 2 (b) 为渗滤液污染土电阻率随浓度变化的关系曲线。由图可见，随着渗滤液浓度提高，土体电阻率呈指数降低。低浓度区段电阻率降幅最大，由于离子浓度发生变化，此时滤液浓度小幅变化也可导致试样电阻率值大幅降低，当滤液浓度较高时，提高浓度对电阻率无明显影响，该现象可以借助土体双电层理论进行解释^[26]。渗滤液污染土导电通路的形成是孔隙液、土颗粒共同作用的结果，土体被污染后，滤液充填土颗粒孔隙提高了孔隙液中的导电离子数量，由于离子载流导电作用导致电阻率出现降低。但由于黏土独特的双电层结构，当渗滤液浓度较低时导电离子会优先进入黏土表面的吸附层，增加土颗粒表面电荷数，导致黏土导电性明显提高，此阶段电阻率与浓度值之间的关联更为灵敏。伴随孔隙液浓度升高，渗滤液中导电离子浓度持续增加，进而加速导电离子扩散，此时孔隙传导占主体，导电离子进入扩散层。在此过程中，渗滤液与黏土颗粒发生理化反应，改变了土体结构及孔隙胶结状态，逐步形成孔隙大、接触面小的面-边絮状结构，增加了离子迁移阻力。因此，此阶段继续增加渗滤液浓度对土体电阻率影响较小，且渗滤液污染土电阻率会逐步趋于一个定值。

2.2 点渗漏模式下渗滤液运移过程分析

开展点渗漏模拟试验，选取靠近注入点的中心测线 L2 绘制二维电阻率剖面等值线图，如图 3 所示。0 min 为注入滤液前的土壤背景值，该剖面电阻率成层性较好，底部出现的大面积高阻异常分析是由于玻璃箱边壁效应导致测量结果偏高。注入滤液 10 min 后，在横向距离 (X) 0.60~0.80 m，深度 (Y) 0~0.05 m 处出现漏斗状低阻体，电阻率 (ρ_s) 由背景值的 200 $\Omega \cdot m$ 降至 40 $\Omega \cdot m$ ，且低阻体所处位置与注入点吻合，证实磷石膏渗滤液是以低阻形态赋存于多孔介质内。注入 30、60 min 阶段，低阻体面积出现横向拉伸，表明此时渗滤液主要进行以横向运移为主、垂向运移为辅的扩散，该现象一直维持到停止注入。分析是由于表层土壤密实、渗透性差，滤液在短时间内无法快速下渗到土壤内部，导致注入滤液沿土壤表层进行横向运移。注入 90、120 min 阶段，低阻体已达 12 cm 深度，并沿剖面横向运移 25 cm。停止注入滤液，静置 60 min 后再次观测，可以看出低阻体仍保持漏斗形态，但面积出现变化，表现为低阻分层增多且注入点位置的低阻面积减小。随着静置时间延长，在静置 120 min 后，渗漏源位置仅存在极小范围低阻带，这一过程说明在停止注入后 ERT 也能描绘出渗滤液在土体内的再分布过程。

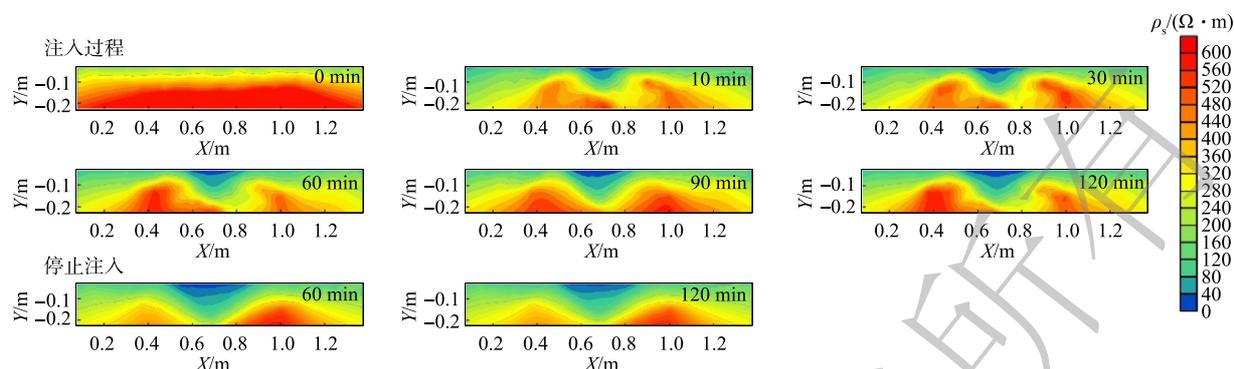


图3 磷石膏渗滤液点渗漏模型电阻率剖面

Fig. 3 Resistivity profile of phosphogypsum leachate under point leakage situation

为直观展示渗滤液在空间上的运移规律,选择0、10、60 min、停止注入60 min的电阻率监测结果绘制三维电阻率切片(图4)。由图4(a)、图4(b)可见,注入滤液10 min后,2条中心测线L2、L3已出现明显低阻异常,说明注入初期被污染的范围较小,仅限于注入位置周边浅表层。边界测线L1出现的轻微低阻异常分析是由于L1处填土高度略低于中心位置,滤液在重力作用下加快了向L1线的运移过程。注入60 min后(图4(c)),2条中心测线的电阻率变化更明显,且L1、L4也出现浅部低阻异常,验证了前述点渗漏模式下滤液主要沿土层表面发生横向运移的结论。停止注入60 min后(图4(d)),4条测线均呈现漏斗型低阻特征,说明随着深度的增加,污染区范围也在不断减小,电阻率切片清晰展现出滤液由浅入深,由中心向四周扩散的过程。

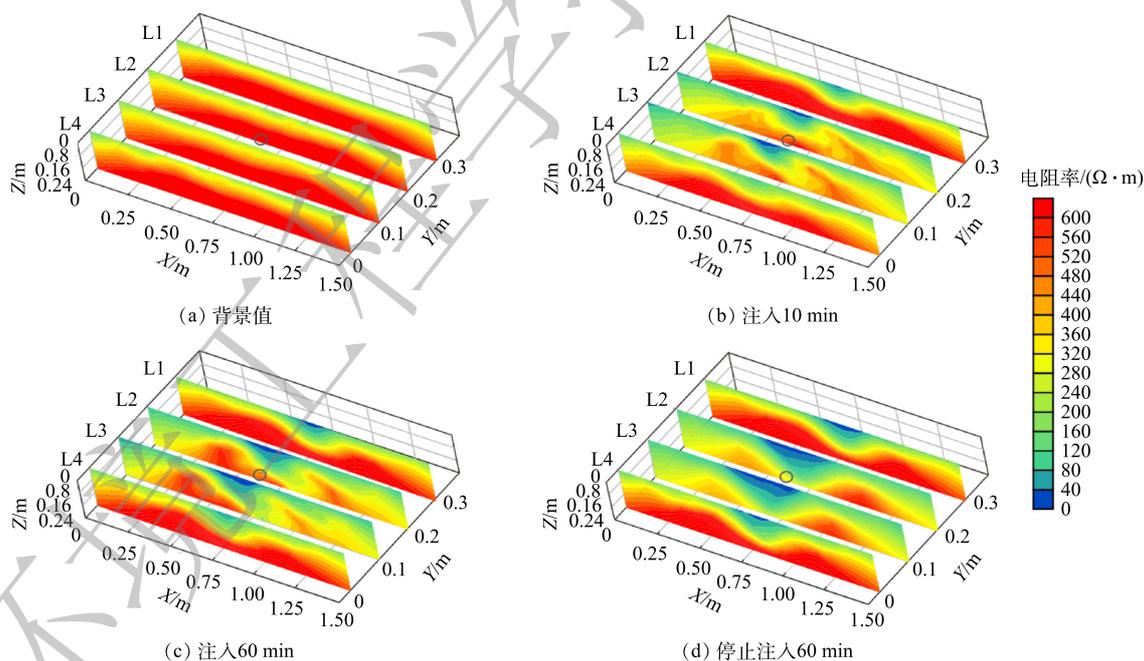


图4 磷石膏渗滤液点渗漏模型三维电阻率切片

Fig. 4 3D Resistivity slice of phosphogypsum leachate under point leakage situation

由于含水体的存在同样会引起低阻异常,为对比具有相同含水率但并未受到渗滤液污染时间同一剖面上电阻率的分布特征,我们将渗滤液替换为岩溶水开展了重复实验,结果如图5所示。由图可见,岩溶水在点渗漏模式下的渗漏形式与渗滤液一致,均以横向运移为主,但2者的低阻体面积及电阻率值存在显著差异,表现为相同时段内岩溶水的低阻面积更小,且电阻率更高。进一

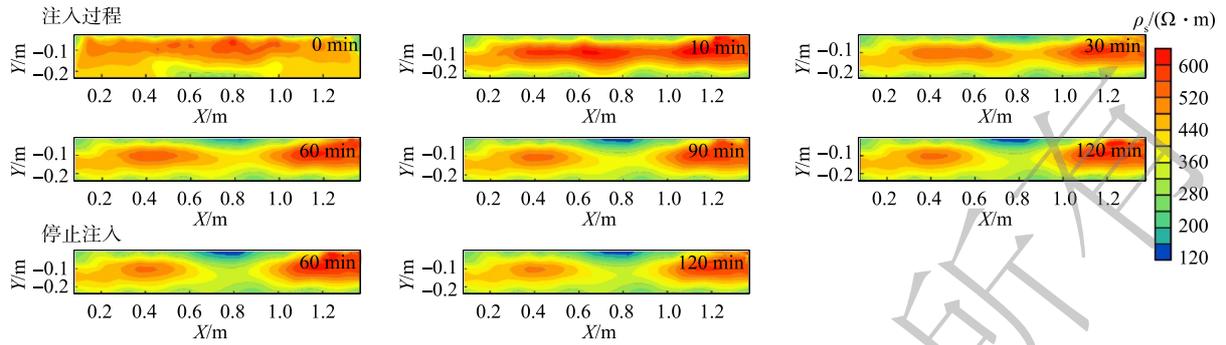


图 5 岩溶水点渗漏模型电阻率剖面

Fig. 5 Resistivity profile of karst water in point leakage experiment

步提取注入 120 min 时段渗滤液及岩溶水在渗漏中心处的电阻率数据，绘制图 6 所示的电阻率曲线图，可以看出滤液污染区域的电阻率最低值为 $40 \Omega \cdot m$ ，而注水剖面低阻区域的电阻率值高达 $185 \Omega \cdot m$ ，说明在场地含水情况下电阻率反演结果仍能准确识别出渗滤液污染区域。

2.3 管道渗漏模式下渗滤液运移过程分析

由于地下岩溶发育的隐蔽性、随机性，致使岩溶区污染渗漏通道的识别更为复杂^[27-28]。针对岩溶区堆场渗漏引发的环境风险问题，进一步开展了管道渗漏模拟实验，结果如图 7 所示。由图可见，0 min 时段电阻率背景值出现条带状高阻异常，这是管道引发的高阻响应。

与点渗漏相比，管道渗漏在注入 10 min 后剖面未出现低阻反映，仅电阻率出现小幅降低。分析是由于内部土壤密实度相对表层土较低导致土壤孔隙度高，滤液扩散速度较点渗漏更快，在注入初期难以汇聚成含水率高的滤液聚集区，故无法形成明显低阻异常反映。注入 30 min 后，横向距离 0.74 m，深度 0.12 m 处出现小范围低阻体，且伴随滤液注入，低阻体面积向四周迅速增大，并于注入 120 min 到达剖面底部。注入过程中渗滤液的扩散形式与点渗漏模型存在明显差别，剖面上表现为低阻体以四周扩散方式为主，并非沿某一方向扩展。

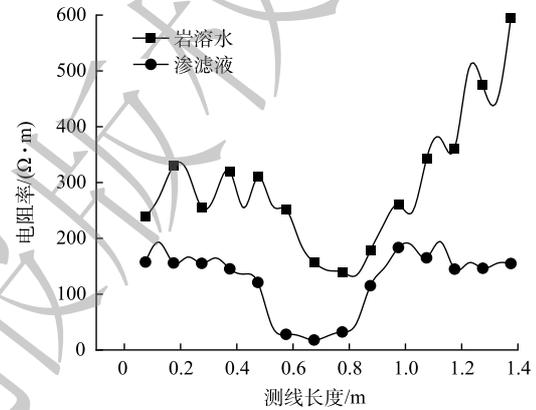


图 6 岩溶水与磷石膏渗滤液在点渗漏模式下的电阻率曲线对比

Fig. 6 Comparison of resistivity curves of karst water and phosphogypsum leachate under point leakage situation

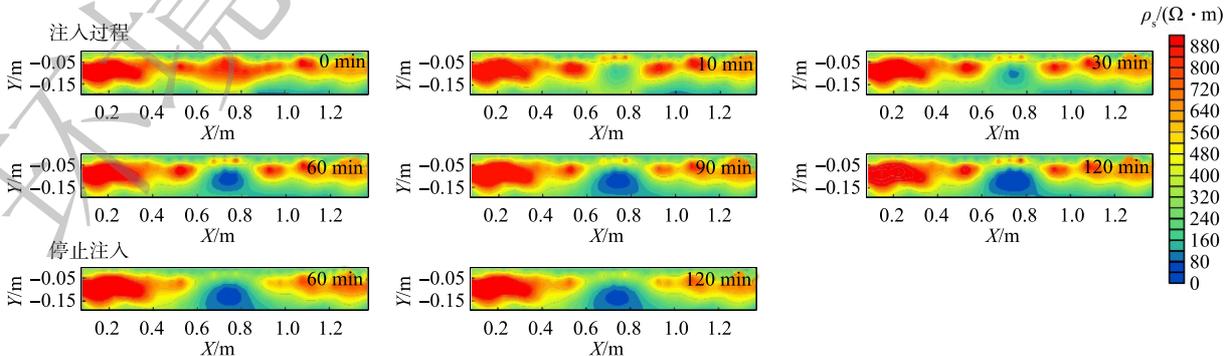


图 7 磷石膏渗滤液管道渗漏实验电阻率剖面

Fig. 7 Resistivity profile of phosphogypsum leachate under pipeline leakage situation

进一步分析渗滤液管道多点渗漏模型的电阻率切片,如图8(b)所示,相较于点渗漏,管道渗漏在注入10 min后4条测线的电阻率值均出现不同程度的降低,这是由于滤液在渗漏过程中并非沿单点渗漏源运移,而是通过管道预制的若干细孔向四周扩散。由图8(c)、图8(d)可见,随着实验进行,4条测线展现的低阻体形态在空间分布上无显著规律,与点渗漏过程形成的漏斗状模型形成鲜明对比。分析是土体非均质性导致其内部渗透性并非完全一致,当四向扩散的渗滤液在流经某一处渗透性较好的介质时会加速渗滤液流动,并在该处产生1个细微扰动,该扰动会随渗滤液注入量增多而发育形成优先流渗漏通道,在剖面上以低阻体呈现。以上结果可以得出,管道多点渗漏模式下,渗滤液在土体内的空间分布呈现非均匀性,且ERT能够清晰、无损地捕捉到渗滤液在此过程的空间分布。

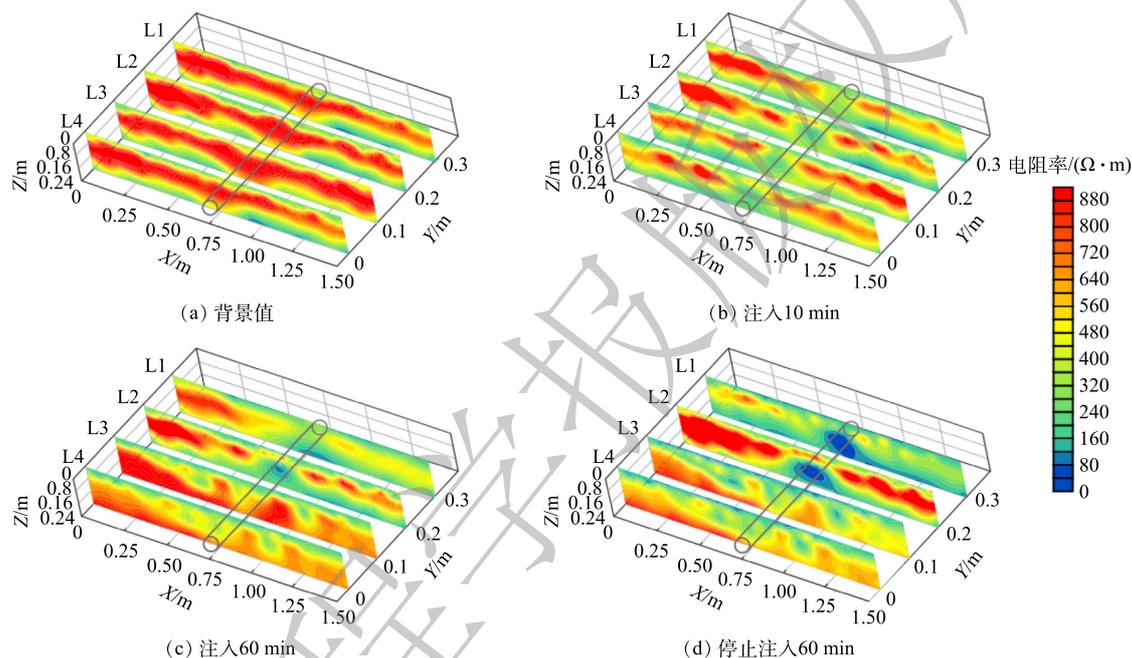


图8 磷石膏渗滤液管道渗漏模型三维电阻率切片

Fig. 8 3D Resistivity slice of phosphogypsum leachate under pipeline leakage situation

针对管道渗漏模型开展岩溶水对照实验,结果如图9所示。可以看出,管道渗漏模式下的岩溶水电阻率剖面低阻变化范围较小,在低阻分布上与岩溶水点渗漏过程趋同。结合图10所示的电阻率变化曲线讨论,管道位置处的低阻体电阻率为 $183.60 \Omega \cdot \text{m}$,而相同位置下渗滤液的电阻率为 $48.29 \Omega \cdot \text{m}$,2者仍存在明显差异。

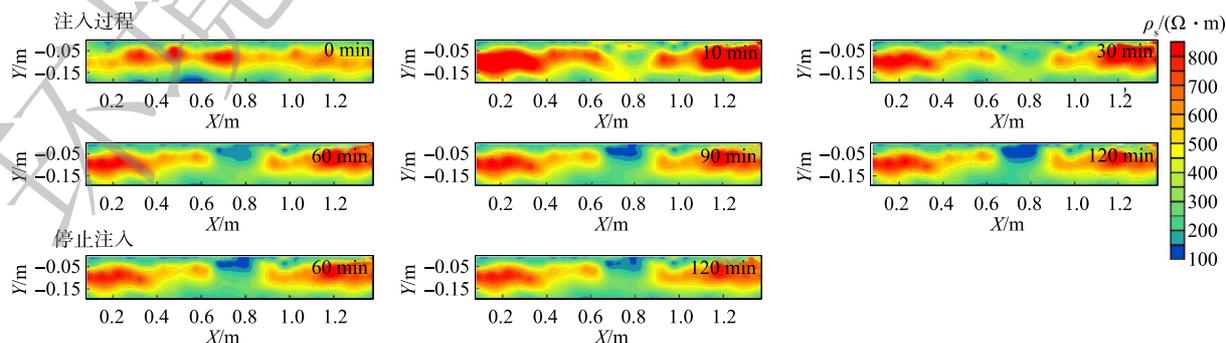


图9 岩溶水管道渗漏模型电阻率剖面

Fig. 9 Resistivity profile of karst water under pipeline leakage situation

2.4 堆场电阻率实测分析

为了进一步验证电阻率法在磷石膏堆场渗漏监测的应用效果，选取贵州省息烽县磷石膏堆场作为现场 ERT 测试对象，为直观反映堆场污染区与正常环境的电阻率差异，将测线前半段布设在堆场内，后半段布设在外界自然环境中。场地实验电极距设置为 1.5 m，共布设电极 60 根，采用 Wenner 装置进行数据采集，测试完成后对数据进行反演成像，结果见图 11。

图 11 反映了地表以下 14 m 深度内的土层电阻率差异，由图可见，测区电阻率分布跨度较大 (14~330 Ω·m)，并呈现出两极分化的

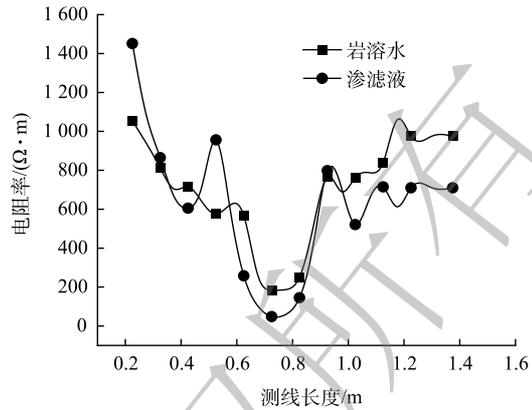


图 10 岩溶水与磷石膏渗滤液在管道渗漏模式下的电阻率曲线对比

Fig. 10 Comparison of resistivity curves of karst water and phosphogypsum leachate under pipeline leakage model

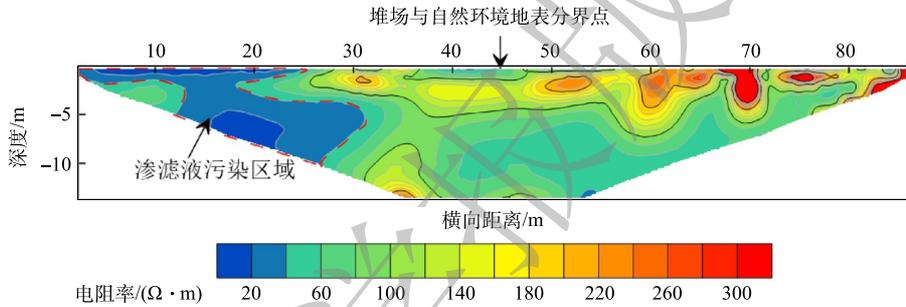


图 11 场地实验电阻率反演剖面

Fig. 11 Field experiment resistivity inversion profile

特点。在横向距离 47~90 m 和 0~5 m 深度处存在连续的高阻异常 ($\rho_s \geq 180 \Omega \cdot m$)，这是由于该处区域位于堆场外部，且地表覆盖有碎砾石。低阻异常分布在横向距离 0~27 m 范围的堆场内，该区域表层被磷石膏覆盖，且未见明显干扰物。参照前述实验结果，将电阻率低于 $40 \Omega \cdot m$ 的低阻异常界定为渗滤液污染区，并推测该处异常可能与磷石膏渗滤液侵入迁移有关。从深度角度分析，图中低阻区域已延伸至地下 10 m 处，依据低阻带深度，可以判断场地滤液污染深度约为 10 m。

为确定 ERT 剖面上的低阻异常所对应的地下含水层实际污染情况，在监测实验结束后，对堆场内监测井及外界环境中河流、监测井等水体进行取样分析，其结果如表 2 所示，结合表 2 与图 11 可知，堆场低阻异常区域对应的污染物浓度更高，而外界高阻区域对应污染物浓度较低，取样分析结果与 ERT 结论一致。

综上所述，场地实验证实了在土层情况不明确的情况下，ERT 仍能有效揭示渗滤液的运移路径、受污染区域的深度分布。

3 结论

1) 不同堆场采集渗滤液的电阻率测试结果一致。随着浓度增加，滤液及土样电阻率均出现先

表 2 堆场污染物浓度分析

Table 2 Analysis of pollutant concentration in storage yard

取样位置	堆场 监测井1	堆场 监测井2	堆场外充 水落水洞	堆场外 河流上游
总磷/(mg·L ⁻¹)	6.53	1.23	<0.02	<0.02
氟化物/(mg·L ⁻¹)	4.8	0.79	<0.1	<0.1

大幅下降,后逐步放缓的特点。

2) 渗滤液污染土体在电阻率图像上表现为低阻异常,点渗漏下渗滤液以横向运移为主,表现为漏斗型运移模式。管道渗漏下渗滤液向四周扩散趋势明显,且渗漏速率更快,但低阻体的空间分布较不均匀,ERT能够捕捉渗滤液在不同渗漏模式下的运移过程。

3) 由于岩溶水与渗滤液的电阻率数值相差较大,可以通过反演电阻率剖面划分相同含水条件下的污染区与未污染区,进而识别滤液在土层内的分布情况。

4) 场地实验反演结果中低阻体范围与堆场位置对应较好,且低阻体电阻率值与模拟实验结果一致,证实电阻率法能够识别磷石膏堆场渗滤液的渗漏范围。

参考文献

- [1] 黄镁宁, 宁寻安, 张建易, 等. 漫水河清远流域磷污染特征及富里酸对沉积物释磷的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5): 1549-1557.
- [2] TAYIBI H, CHOURA M, LOPEZ F A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2377-2386.
- [3] 黄绪泉, 赵小蓉, 唐次来, 等. 磷石膏基胶结材固结磷尾矿性能及浸出特征[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5957-5963.
- [4] 李曼, 敬红, 贾曼, 等. 2016—2019年长江经济带总磷污染及治理特征分析[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(5): 94-102.
- [5] 谢容生, 刘树根, 吕游, 等. 磷石膏窑外分解中试研究[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2633-2637.
- [6] 李静和, 何展翔, 杨俊, 等. 针对渗漏型目标的新型接触式激电法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(3): 659-669+418.
- [7] 杨坪, 姜涛, 李志成, 等. 填埋场防渗处理及渗漏检测方法研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(11): 129-132+142.
- [8] 能昌信, 徐亚, 刘景财, 等. 深度填埋条件下堆体表面电势分布特征及漏洞定位机理[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(9): 1344-1351.
- [9] MAURYA P K, RONDE V K, FIANDACA G, et al. Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography - with correlation to ionic strength measured in screens[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 138: 1-8.
- [10] WANG T P, CHEN C C, TONG L T, et al. Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 121: 21-30.
- [11] BALBARINI N, RONDE V, MAURYA P, et al. Geophysics-Based Contaminant Mass Discharge Quantification Downgradient of a Landfill and a Former Pharmaceutical Factory[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(8): 5436-5456.
- [12] CATERINA D, OROZCO A F, NGUYEN F. Long-term ERT monitoring of biogeochemical changes of an aged hydrocarbon contamination[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2017, 201(6): 19-29.
- [13] 潘玉英, 童奕涵, 朱根民, 等. 非均质含水土层中石油运移的电阻率监测[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 771-779.
- [14] 吕美彤, 曹智国, 章定文. 基于电阻率法的固化重金属污染土碳化深度评价方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(10): 3571-3580.
- [15] 李培华, 刘汉乐, 侯森戈. 融合电阻率成像法及图像法的DNAPL污染过程研究[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2185-2190.
- [16] HELENE L P I, MOREIRA C A, BOVI R C. Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill by means of electrical resistivity tomography (ERT)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(4): 249.
- [17] 邹晨阳, 张双喜, 陈芳. 垃圾填埋场垂直防渗帷幕综合检测方法研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(09): 194-199.
- [18] 赵玉婷, 李亚飞, 董林艳, 等. 长江经济带典型流域重化产业环境风险及对策[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1247-1253.
- [19] 张瑞城, 周念清, 江思珉, 等. ILUES算法融合ERT数据反演污染源参数与渗透系数场[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2): 223-230.
- [20] MAO D, REVIL A, HORT R D, et al. Resistivity and self-potential tomography applied to groundwater remediation and contaminant plumes: Sandbox and field experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 1-14.
- [21] FERNANDEZ P M, BLOEM E, BINLEY A, et al. Monitoring redox sensitive conditions at the groundwater interface using electrical resistivity and self-potential[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2019, 226(Oct.): 103517.
- [22] ZHAN L T, XU H, JIANG X M. Use of electrical resistivity tomography for detecting the distribution of leachate and gas in a large-scale IVSSW landfill cell[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20325-20343.
- [23] ZHA F S, ZHU F H, XU L, et al. Laboratory study of strength, leaching, and electrical resistivity characteristics of heavy-metal contaminated soil[J]. *Environmental earth sciences*, 2021, 80(5): 184.
- [24] 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.
- [25] LONG M, LIMACHER R, DONOHUE S, et al. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine

- clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(10): 1158-1168.
- [26] LIU X M, FENG B, TIAN R, et al. Electrical double layer interactions between soil colloidal particles: Polarization of water molecule and counterion[J]. *Geoderma: An International Journal of Soil Science*, 2020, 380: 114693.
- (责任编辑: 金曙光)
- [27] 罗炳佳, 杨胜元, 罗维, 等. 岩溶地下水有机污染特征分析——以贵阳市某加油站为例[J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 255-261.
- [28] 谭磊, 李红文, 江晓益, 等. 综合多维物探技术在岩溶堤防查漏中的应用研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(S1): 128-132.

Resistivity of phosphogypsum leachate under different leakage migration modes

LIU Jiayu¹, PAN Jianwei^{1,2,*}, SUN Xu³, GAO Jian¹, ZHANG Chengli¹, ZHAN Lin¹

1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. No.111 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550008, China

*Corresponding author, E-mail: jwpan@gzu.edu.cn

Abstract In order to evaluate the effectiveness of resistivity method in monitoring the migration process of leachate in phosphogypsum yard, a self-made resistivity quadrupole device was used to test the electrical characteristics of leachate-contaminated soil. Then, physical simulation experiments of leachate migration monitoring in different periods were carried out for two models: single point leakage of soil surface and multi-point leakage of karst pipeline, and karst water was added for blank control experiment. The results showed that the resistivity of leachate and its contaminated soil decreased with the increase of leachate concentration, and the change was more intense in the low concentration range. In the process of surface single point infiltration, the leachate mainly migrated horizontally and gradually formed a funnel-shaped leakage pattern, while the leachate migrated in a peripheral diffusion mode under the pipeline leakage mode. After adding karst water, the polluted area and unpolluted area under the same water content could be distinguished by resistivity difference. Finally, a common resistivity method, electrical resistivity tomography (ERT) was used to measure a phosphogypsum yard in Guizhou Province. The range of low resistivity body obtained had a good correspondence with the location of the yard, which verified the above experimental results. The study showed that the resistivity method can be used to monitor the leakage process and pollution distribution of leachate in phosphogypsum yard.

Keywords phosphogypsum leachate; electrical resistivity method; electrical property characteristics; leakage diffusion model