

基于电阻率法的充填裂隙-基质中盐热运移试验研究

丁 瑞, 邓亚平, 钱家忠, 杨 雷, 马 雷

An experimental study of salt/heat transport in a fracture-matrix system based on the resistivity method

DING Rui, DENG Yaping, QIAN Jiazhong, YANG Ze, and MA Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用示踪试验时间-浓度曲线分析岩溶管道结构特征

Analysis of structural characteristics of karst conduit by time-concentration curve of tracer test

陈亚洲, 董维红 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 41-47

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199

裂隙宽度空间变异性和泄漏条件对网络裂隙中DNAPLs运移影响研究

Effects of spatial variability of fracture width and leakage conditions on the migration of DNAPLs in network fractures

常兴, 骆乾坤, 邓亚平, 马雷, 钱家忠 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 174-181

井间分溶示踪估计重非水相污染物残留量的影响因素数值分析

Numerical analysis of the influencing factors for estimating DNAPL residual by the partitioning interwell tracer tests

郭琮泽, 施小清, 王慧婷, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 165-172

基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 罗玉磊, 郭幔 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 117-125



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111055

丁瑞, 邓亚平, 钱家忠, 等. 基于电阻率法的充填裂隙-基质中盐热运移试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 51-59.
DING Rui, DENG Yaping, QIAN Jiazhong, *et al.* An experimental study of salt/heat transport in a fracture-matrix system based on the resistivity method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 51-59.

基于电阻率法的充填裂隙-基质中盐热运移试验研究

丁 瑞, 邓亚平, 钱家忠, 杨 贇, 马 雷

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为探究盐、热示踪剂在裂隙-基质中示踪的有效性, 设计了充填裂隙-基质试验模型, 开展了不同示踪剂下的试验, 结合不同测点的实时动态电阻率监测数据, 研究充填裂隙-基质中示踪剂运移过程, 并讨论基于电阻率法的盐、热示踪的有效性结果表明: (1) 电阻率法可以揭示 3 种不同示踪剂注入充填裂隙-基质系统的过程以及裂隙-基质系统中裂隙的存在; (2) 盐热示踪剂下裂隙与基质内的体积电导率变化率差异最为显著; (3) 质量浓度与体积电导率拟合效果要优于温度与体积电导率拟合效果。这说明了基于电阻率法的示踪剂对刻画裂隙-基质中裂隙与基质位置的有效性, 且盐热联合示踪剂效果最好。数据成果对野外电法勘探裂隙位置及其他非均质地层构造研究具有一定的参考价值。

关键词: 裂隙-基质系统; 盐热示踪剂; 示踪试验; 电阻率法

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0051-09

An experimental study of salt/heat transport in a fracture-matrix system based on the resistivity method

DING Rui, DENG Yaping, QIAN Jiazhong, YANG Ze, MA Lei

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: In order to explore the effectiveness of salt and heat tracers in a fracture-matrix system, a fracture-matrix test model is designed. The tracer tests with different tracers are carried out. The transport process of tracer is described in the fracture-matrix with the real-time dynamic resistivity monitoring data at different measuring points, and the effectiveness of salt and heat tracers based on the resistivity method is discussed. The results show that the process of injecting three different tracers into the fracture-matrix system and the existence of fracture can be seen by the resistivity method. Under the salt-heat tracer, the difference between the volume conductivity in the fracture and the matrix is the largest, and the change rate of the volume conductivity in the fracture and the matrix decreases with the increasing depth. The fitting effect of concentration and volume conductivity is better than that of temperature and volume conductivity. These indicate that the tracer based on the resistivity method is effective in describing the positions of the fracture and matrix in the fracture-matrix system, and the salt-heat combined tracer has the best effect. The results are of certain reference for the field electrical exploration of the positions of

收稿日期: 2021-11-19; 修订日期: 2022-01-07

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41831289; 42072276); 中央高校基本科研费专项资助项目(JZ2021HGTA0170)

第一作者: 丁瑞(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质研究。E-mail: 2019110644@mail.hfut.edu.cn

通讯作者: 钱家忠(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事基岩裂隙水非达西流和非费克运移理论等领域的研究。

E-mail: qianjiazhong@hfut.edu.cn

fractures and other heterogeneous layers.

Keywords: fracture-matrix system; salt heat tracer; tracer test; resistivity method

研究地下水在裂隙岩体中的流动和溶质运移具有实际意义,包括地下水污染预测及污染物处理等^[1-3]。裂隙中可能会充填松散沉积物,导致其中水流及溶质运移特征与非充填裂隙和多孔介质有一定差别^[4]。野外裂隙岩体的有效识别能够帮助解决交通、建筑等土建工程中遇到的岩土工程问题。

前人研究发现示踪试验可以估计裂隙岩体中的特征参数如长度、大小、流动方向、路径以及溶质运移过程等^[5-6]。Gardien 等^[7]利用盐示踪来研究裂隙几何形状对示踪响应曲线形状的影响;Elahi 等^[8]研究了裂隙长度和导流能力对示踪剂运移的影响。与传统的盐示踪相比,热示踪污染较小,热示踪逐渐成为研究裂隙介质的重要手段^[9],例如计算地下水的流量和渗透率^[10],表征裂隙基质中的热传导^[11]等。

人们对于含水层介质中溶质运移的试验研究大多采用取样分析法^[12],但取样往往会影响水流的局部场,同时影响溶质质量守恒,引起的误差较大。目前地球物理勘探方法以其经济、快速、非侵入性等优点,正逐渐应用到水文地质领域中^[13-16]。通过适当的方式(例如注入盐示踪剂)改变这些区域的电阻率,电阻率层析成像(electrical resistivity tomography, ERT)可通过监测电阻率的变化来圈定这种优先流动路径并估计含水层的动态特性^[17]。在过去的几十年中,ERT 已经广泛用于监测相对均匀的水文地质系统中的示踪试验^[18]。另外有研究表明温度的变化也会对体积或流体电导率产生影响^[19],并且已有学者们基于电阻率

法成功监测含水层的温度变化,并表征包括裂隙介质在内的含水层中的热影响区^[20-21]。

近年来 ERT 在研究地下水流、传热、溶质运移等方面展现优势,该方法已经应用于地下含水介质渗透系数估算、热传导表征及模型校准等^[22-23],但仍缺乏基于电阻率法监测示踪剂刻画裂隙-基质系统有效性的定量评估。鉴于此,本文基于 ERT 监测数据分析了不同示踪剂在裂隙-基质系统中的运移过程,确定了盐示踪和盐热示踪刻画裂隙的有效性,对野外电法勘察裂隙位置具有一定的参考作用。

1 方法与材料

1.1 试验装置

试验装置为 $0.20\text{ m} \times 0.02\text{ m} \times 0.44\text{ m}$ (长×宽×高)亚克力板构成的二维砂箱(图 1)。砂箱由裂隙基质部分与上下各一个布流器构成。裂隙基质部分两侧为基质,中间为裂隙(宽 2 cm),基质与裂隙部分通过厚度为 2 mm 的多孔板隔开。布流器内部填充直径为 1 cm 的玻璃珠,使水流经玻璃珠后均匀通过直径 2 mm 的多孔挡板后进入裂隙基质部分,最后水流由最下面的布流器均匀流出砂箱。

本试验采用的电法测定系统为 ERT21S(南京九州勘探技术有限公司,中国)。如图 1(b)所示,在砂箱正面布设了 3 条测线,每条 20 个电极,电极间距为 2 cm ,每条测线长为 40 cm ,有效探测深度约为 1 cm ,测线间距为 2 cm ,电极为黄铜棒,插入深度为 2 mm 。

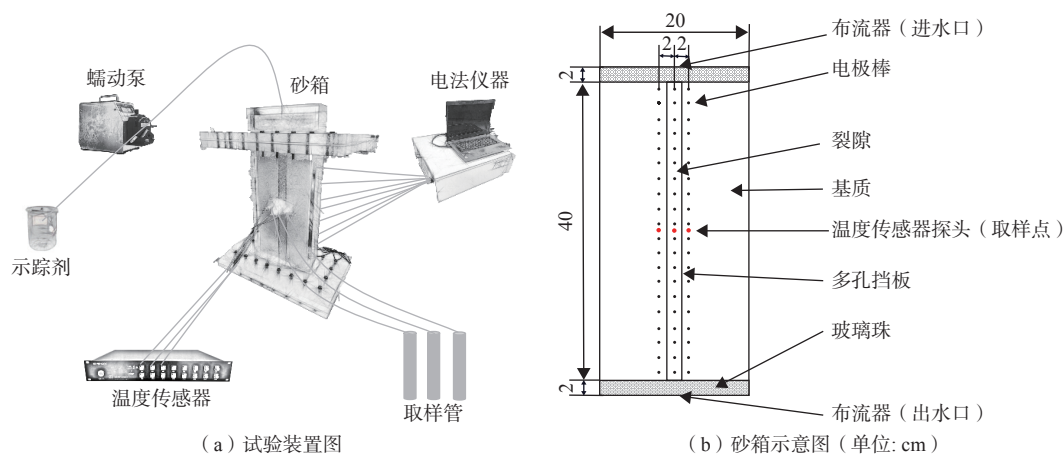


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram test device

电极排列方式采用温纳法, 单条测线采集, 每条测线采集 17 个点的电阻数据, 采集顺序为由上到下, 测量由裂隙到左基质到右基质, 共采集 51 个数据, 单次采集时间约 5min, 包括电阻数据采集和不同测线转换的时间。试验过程中共采集 4 次电阻数据, 即 0, 20, 40, 60 min 时的电阻数据。电阻率公式为:

$$\rho_r = K_r \cdot \frac{\Delta U}{I}$$

(1)

式中: ρ_r ——介质电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$;
 K_r ——装置系数;
 ΔU ——测量电极电位差/V;
 I ——供电电极电流/A。

温度测量采用 NZS-FBG-A01(D) 型柜式光纤光栅解调仪(苏州南智传感科技有限公司, 中国)。该仪器是一种基于光学频域反射技术的高精度温度传感器, 通过模型内置温度传感器探头, 对试验过程中模型内不同位置处水流温度变化情况进行实时连续监测。温度传感监测系统由传感器探头、光纤光栅解调仪和数据存储电脑组成。3 根温度探针布置于模型中央, 监测左基质、裂隙、右裂隙位置的实际温度, 每根探针长 6 cm, 其测点的位置在传感器的末端, 温度的测量范围在 0 ~ 100 °C, 精度在 ± 0.1 °C。将传感器探头通过固定通道接口连入解调仪, 解调仪与数据存储电脑

通过数据线进行波长监测数据的传输, 通过波长与温度关系得到实际温度值。

1.2 试验材料

本试验选用的介质为石英砂, 其主要成分为二氧化硅, 物化性质较为稳定且不溶于酸, 在示踪试验中, 不会对示踪剂产生吸附作用。参考前人研究^[24-27], 结合购买条件, 选取 6 ~ 7 目的石英砂作为充填裂隙基质, 30 ~ 40 目、80 ~ 100 目及 140 ~ 160 目石英砂作为基质介质, 裂隙与基质中填充的石英砂渗透率值的差距在 2 个量级以上, 模拟盐热示踪中裂隙与基质的物质能量交换, 其具体物理性质见表 1。为确定示踪剂质量浓度和温度与溶液电导率的关系, 测量了 25 ~ 85 °C 间 7 种温度下自来水的电导率值, 以及常温(25 °C)下 0 ~ 1.3 g/L 间 6 种质量浓度下 NaCl 溶液的电导率值, 见图 2。

表 1 材料参数表
Table 1 Parameters of materials

平均粒径 /mm	真密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙率 /%	渗透系数 /(m·s ⁻¹)	石英砂类别 ^[28]
3.000	2.52	53	5.5×10 ⁻⁴	粗砂(6 ~ 7目)
0.270	2.68	48	8.9×10 ⁻⁶	细砂(30 ~ 40目)
0.128	2.67	42	4.8×10 ⁻⁷	特细砂(80 ~ 100目)
0.092	2.74	38	4.2×10 ⁻⁸	特细砂(140 ~ 160目)

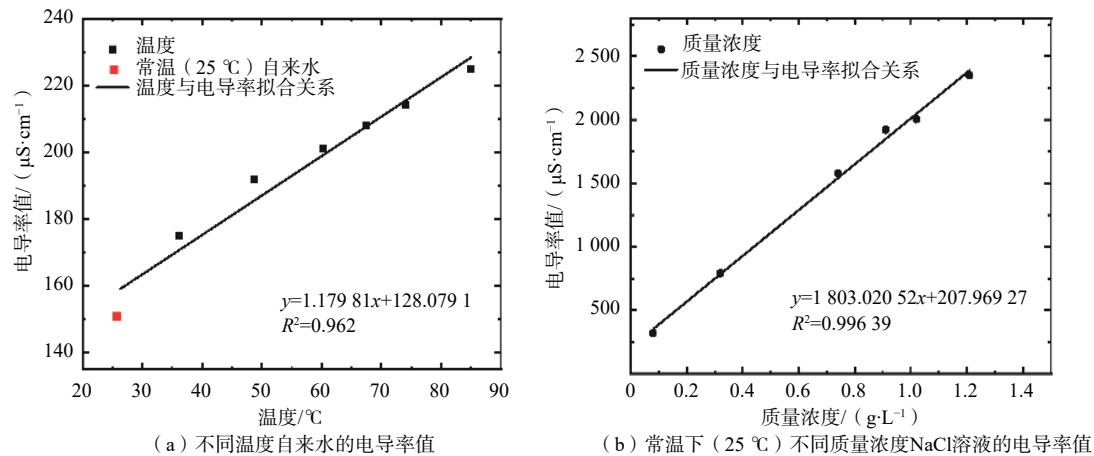


图 2 不同温度自来水和常温下(25 °C)不同质量浓度 NaCl 溶液的电导率

Fig. 2 Conductivity of tap water at different temperatures and NaCl solution at different concentrations at room temperature (25 °C)

1.3 试验方案

砂箱装填完成后, 蠕动泵以 1 rpm(流量约为 0.083 3 mL/s)转速将 25 °C 的自来水(电导率约为 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$)从顶端注入到砂箱内最后从底部的布流器流出, 持续 8 ~ 12 h, 确保砂箱的中所填充石英砂均匀并达到稳定

状态。试验在 3 种具有不同渗透性基质填充下的裂隙-基质系统中分别通入盐示踪剂(NaCl 溶液)、热示踪剂(热自来水)、盐热示踪剂(热 NaCl 溶液)共 9 组试验(表 2)。在正式试验中蠕动泵同样以定转速 1 rpm 分别通入 3 种示踪剂。涉及热示踪剂以及盐热示踪

剂时,通过中央空调将实验室温度控制在 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,避免温度变化对试验过程的影响,并且使用一层厚 2 cm 的热绝缘泡沫层包裹住砂箱,以减少试验中的热量损耗。试验首先采集初始状态下的电阻率、温度与质量浓度数据作为背景值。

表 2 盐热示踪试验的参数设置

Table 2 Parameters setting for thermal and solute tracer experiments

基质填充	试验	示踪剂	温度/ $^\circ\text{C}$	质量浓度/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$
30~40目	1	热	80	0	220
	2	盐	25	1	2 017
	3	盐热	80	1	2 532
80~100目	4	热	80	0	228
	5	盐	25	1	2 011
	6	盐热	80	1	2 492
140~160目	7	热	80	0	218
	8	盐	25	1	2 023
	9	盐热	80	1	2 562

2 结果

2.1 示踪剂运移的电阻率成像

图 3 展示了 9 组示踪试验以及背景对照的电阻率反演图像,随着示踪剂的注入,整个装置中电阻率下降明显,并且基质中电阻率的降低要小于裂隙内电阻率的降低,形成了较为明显的优势通道。前人研究表明饱和石英砂介质的体积电阻率主要受孔隙中溶液电导率影响,溶液温度和质量浓度越高,体积电阻率越低^[19,29],与本试验结果一致。以 30~40 目石英砂填充基质的系统(试验 1、2、3)为例,背景电阻率值为 $260\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

对比不同示踪剂在相同渗透率模型中的运移情况。对比图 3(b)(c)(d),在 20 min 时,热示踪剂下整个裂隙中电阻率的平均值降低至 $150\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,两侧基质内电阻率值降低至 $190\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右;在盐示踪剂下,垂向深度 0~0.3 m 裂隙区域内的平均电阻率值降低至 $120\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,垂向深度 0~0.1 m 区域电阻率值降低至 $60\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,两侧基质内电阻率值降低至 $170\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右;在盐热示踪剂中,垂向深度 0~0.32 m 裂隙区域内平均电阻率值降低至 $90\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,垂向深度 0~0.25 m 区域电阻率值降低至 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,两侧基质内电阻率值降低至 $150\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右。

对比相同示踪剂在不同渗透率充填裂隙-基质模型中的运移情况。在热示踪条件下,如图 3(b)(f)(j)所示,在 20 min 时,30~40 目下裂隙中较深处位置(0.3 m

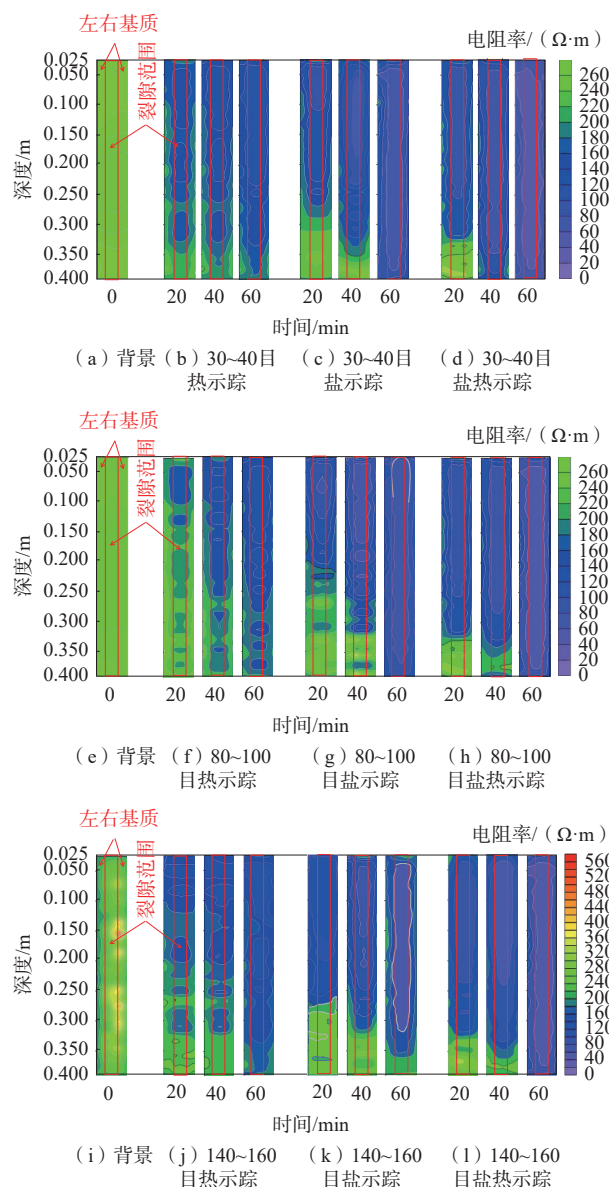


图 3 九组试验电阻率反演结果

Fig. 3 Resistivity inversion results of nine groups of tests

处)已经能够看出热示踪剂的到达;在 40 min 时,80~100 目中裂隙通道才被较好的刻画出来;在 60 min 时,140~160 目下发现裂隙与基质有明显的电阻率数值上的差别。在盐示踪条件下,如图 3(c)(g)(k)所示,裂隙内的电阻率普遍降低较快,但在 140~160 目以及 80~100 目石英砂组的基质内部电阻率要高于 30~40 目。如图 3(d)(h)(l)所示,盐热示踪剂在整个运移过程,裂隙与左右基质内的电阻率数值均下降较快,而不同渗透率下的裂隙-基质系统中类似于上述盐示踪剂通入的过程。

在 30~40 目填充基质的裂隙-基质系统中示踪剂对裂隙通道的刻画效果较好,限于篇幅,下文中以

30~40 目石英砂填充试验下 3 种示踪剂的示踪效果进行定量分析。

2.2 体积电导率值随时间的变化

图 4 以 30~40 目石英砂组为例,对比了通入 3 种示踪剂过程中取样点位置测点体积电导率(体积电阻率倒数)随时间(0, 20, 40, 60 min)的变化关系。由图 4(a)可知,在热示踪剂下,随着时间的增加,裂隙内与基质内的体积电导率值均稳定上升,裂隙内拟合关系斜率 k_1 与基质内拟合关系斜率 k_2 、 k_3 相近。裂隙内

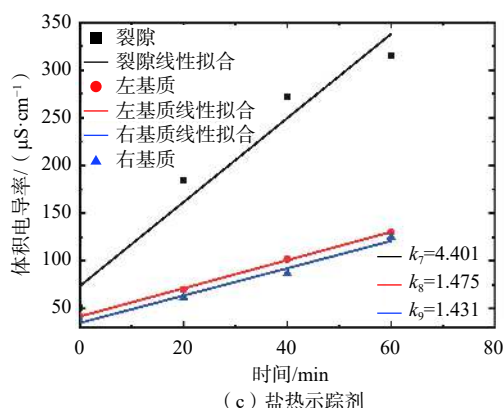
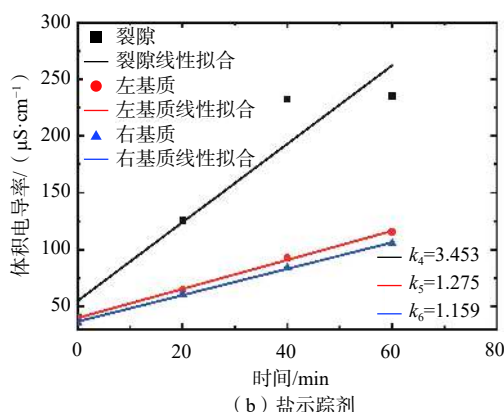
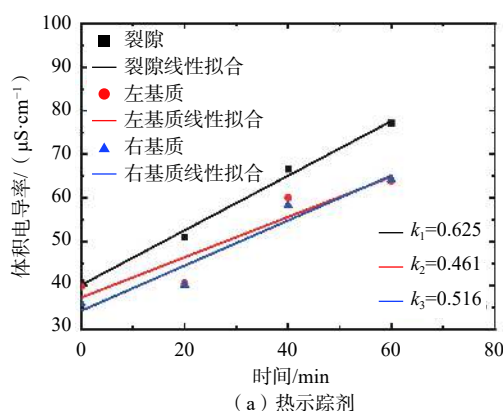


图 4 30~40 目填充基质取样点体积电导率随时间的变化

Fig. 4 Change of volume conductivity with time at sampling point under 30~40 sand filled matrix

体积电导率总是大于左右基质内,裂隙内最大值为 $80 \mu\text{S}/\text{cm}$,左右基质最大值为 $60 \mu\text{S}/\text{cm}$ 左右。如图 4(b)所示,在盐示踪剂下,裂隙内体积电导率变化率明显大于左右基质内,裂隙内体积电导率值达到 $230 \mu\text{S}/\text{cm}$,基质内为 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 左右;如图 4(c)所示,对比盐热示踪剂下,裂隙内的拟合关系斜率 k_7 远大于左右基质内斜率 k_8 、 k_9 ,裂隙内取样点体积电导率值达到最大值 $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

对于 80~100 目(试验 4、5、6)、140~160 目(试验 7、8、9)石英砂填充的裂隙-基质系统中 3 种示踪剂运移试验结果显示,裂隙的体积电导率随时间的变化率均大于基质内,3 种示踪剂的变化趋势与 30~40 目结果基本一致,不过随着基质渗透率降低,裂隙-基质整个系统中测点在各个时间点之间的体积电导率值差值逐渐变小,体积电导率峰值降低。因此,盐示踪剂与盐热示踪剂区分裂隙与基质位置的效果较好,能够有效确定裂隙所在的位置。

2.3 体积电导率值变化率随深度的变化

根据 ERT 所测的 30~40 目石英砂组中 20 min 时的体积电导率值,绘制不同深度的体积电导率值的变化率(图 5)。在相同的水力条件下分别通入 3 种示踪剂,左右基质中的体积电导率变化率均小于裂隙中体积电导率变化率,且左右基质中平均体积电导率值变化率的变化较为稳定。热示踪下,基质内变化率与裂隙内变化率均没有大于 1%,并且在深度 $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$,发现有裂隙内的变化率小于基质内的情况;对比盐示踪下,在深度大于 0.3 m 之后,裂隙内的变化率与基质内变化率保持一致;对比盐热示踪剂

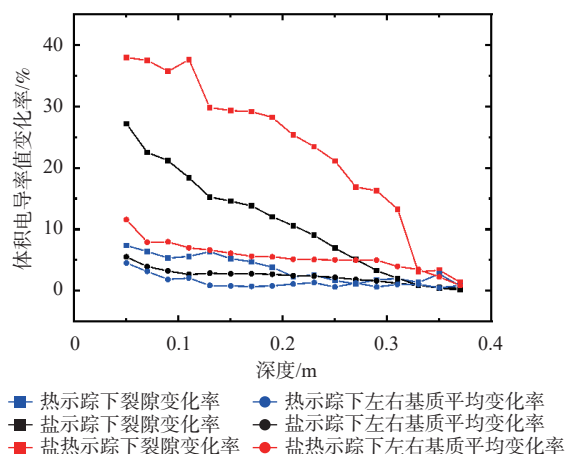


图 5 30~40 目填充基质在不同示踪剂下体积电导率值变化率随深度的变化

Fig. 5 Change rate of volume conductivity value with depth of 30~40 sand filled matrix under different tracers

下,在深度 0.35 m 左右,出现有裂隙内的变化率与基质内变化率一致的情况。

在 80~100 目、140~160 目石英砂填充的裂隙-基质系统的测量数据显示,随着深度的增加,裂隙与基质之间体积电导率的变化率差距逐渐减小,相比于高渗透率基质下,低渗透率基质下出现裂隙内的变化率与基质内变化率一致的情况较早。盐示踪剂和盐热示踪剂能够较快引起装置内电阻率的变化,尤其是在裂隙中。因此,盐示踪剂和盐热示踪剂可以快速确定裂隙所在的位置。

2.4 温度/盐度与体积电导率值的相关性

图 6 是以 30~40 目石英砂填充基质试验组下温度/盐的质量浓度与体积电导率的关系。试验的最高

温度在 60 °C,符合线性关系的使用范围,故使用线性关系拟合温度与体积电导率的关系^[19]。如图 6(a)所示,随着热示踪剂的通入,裂隙与左右基质内的体积电导率值逐渐增大,左右基质中温度与体积电导率拟合关系斜率几乎一致且大于裂隙内。如图 6(c)所示,裂隙内体积电导率峰值为 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,远大于热示踪剂下裂隙内峰值,基质内体积电导率峰值为 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,大于热示踪剂下的基质内体积电导率峰值。对比图 6(b)(d),在盐热共同影响下,裂隙内体积电导率峰值为 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,基质内体积电导率峰值为 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,总体变化规律与盐示踪剂下类似。

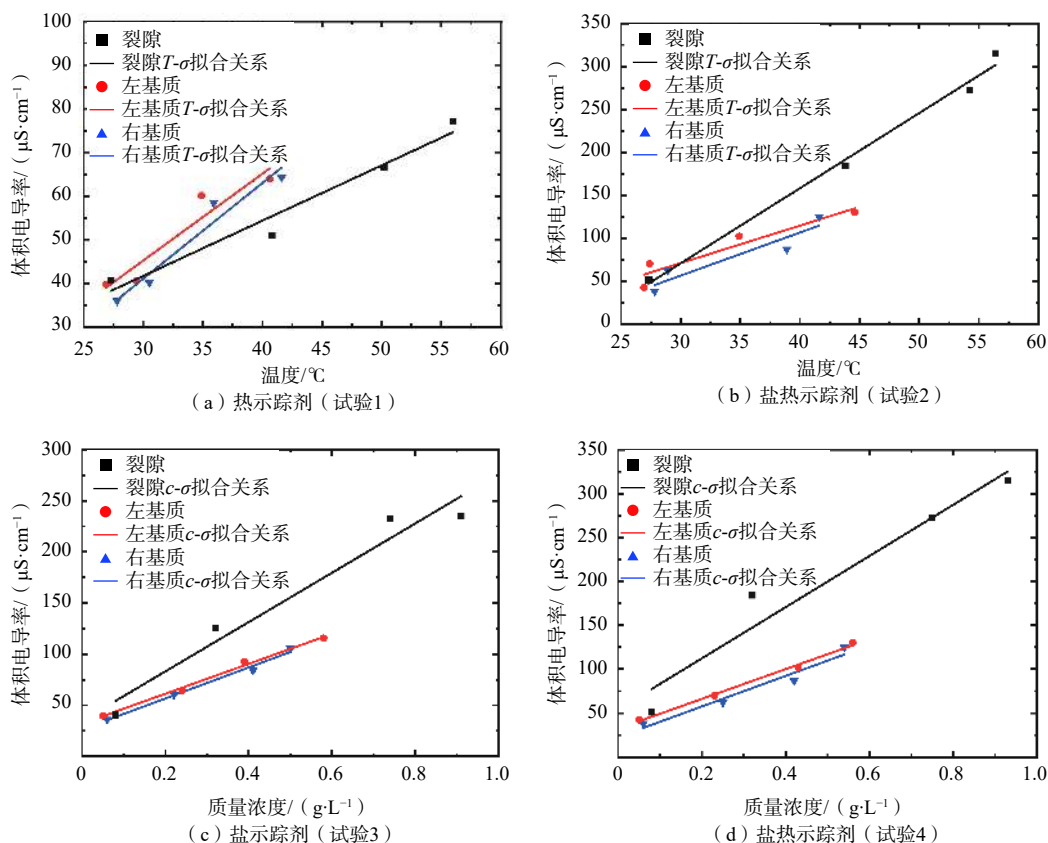


图 6 30~40 目填充基质取样点温度/质量浓度与体积电导率的关系

Fig. 6 Scatter plot of sample temperature/concentration and volume conductivity in a 30~40 sand filled matrix

在上述研究的基础上,比较温度与体积电导率的拟合关系、质量浓度与体积电导率的拟合关系。在热示踪以及盐热示踪中的温度与体积电导率拟合相关系数(R^2)平均值为 0.93,盐示踪以及盐热示踪中的质量浓度与体积电导率 R^2 平均值为 0.975。

80~100 目、140~160 目石英砂填充的裂隙-基质

系统中,热示踪以及盐热示踪中的温度与体积电导率 R^2 平均值分别为 0.934, 0.918,盐示踪以及盐热示踪中的质量浓度与体积电导率 R^2 平均值分别为 0.981, 0.967,可见结果与 30~40 目条件下基本一致。ERT 在监测示踪过程中,盐的质量浓度对于电阻率的影响大于温度,裂隙中电阻率远大于基质内,盐示踪剂和

盐热示踪剂确定裂隙位置较快。

3 讨论

对比分析不同示踪剂在相同渗透率模型中的运移情况(图3),可知,通入示踪剂后,高渗透性裂隙通道内电阻率的降低相较于两侧基质中的电阻率的降低要更为显著,说明3种示踪剂条件下,电阻率法均能够有效识别地下介质中的优势通道。但是,对比盐示踪剂和热示踪剂,盐热示踪剂下两侧基质与裂隙的电阻率差异更大,表明盐热联合示踪剂对于电阻率法探测裂隙分布的效果更好。

通过定量分析体积电导率随时间和深度的变化(图4、图5),可知,盐示踪、热示踪和盐热示踪剂条件下裂隙内体积电导率变化率均大于两侧基质,再次说明电阻率法探测裂隙存在的有效性。对比盐示踪、热示踪和盐热示踪剂,可以发现,盐热示踪剂下裂隙与基质间体积电导率变化率差异更为显著,盐示踪次之。说明盐热示踪剂下,裂隙内与左右基质内的电信号响应的差距最大,电阻率法探测效果最佳。

通过分析体积电导率与温度和质量浓度相关性(图6),可以发现,体积电导率随着温度升高和质量浓度增大呈现线性增大的趋势。前人研究表明,当表面电导率可忽略时,体积电导率与溶液电导率成正比^[30],而溶液电导率又与温度和溶液质量浓度呈线性关系(图2),因此溶液的质量浓度与体积电导率呈现一定线性关系。此外,盐示踪以及盐热示踪中的质量浓度与体积电导率 R^2 高于热示踪以及盐热示踪中的温度与体积电导率 R^2 ,这说明相较于温度,电信号的响应对盐的质量浓度变化更敏感。

4 结论

(1)裂隙内体积电导率均大于左右基质内,盐热示踪剂下的裂隙与基质内的差异更为明显,说明盐热示踪剂探测裂隙位置的效果最好。

(2)裂隙与基质内的体积电导率变化率随着深度的增加而逐渐减小,且裂隙中的变化率要远大于基质内。比较3种示踪剂下数据,说明ERT能够快速监测到盐示踪剂和盐热示踪剂下裂隙中的电阻率数值的变化,从而确定裂隙位置,示踪效果较好。

(3)体积电导率与温度/质量浓度线性相关良好,且温度拟合相关系数小于质量浓度拟合相关系数。因此在ERT监测过程中,电阻率值变化受盐的质量浓度影响较大,裂隙与基质中电阻率值差值明显,能够

快速确定裂隙位置,证明了电法勘探中盐示踪剂和盐热示踪剂确定裂隙位置的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 王月,安达,席北斗,等.某基岩裂隙水型危险废物填埋场地下水污染特征分析[J].环境化学,2016,35(6):1196-1202. [WANG Yue, AN Da, XI Beidou, et al. Groundwater pollution characteristics of the hazardous waste landfill built upon bedrock fissure water[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(6): 1196-1202. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 姜宝良,陈宁宁,李小建,等.河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析[J].水文地质工程地质,2021,48(2):37-43. [JIANG Baoliang, CHEN Ningning, LI Xiaojian, et al. A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 37-43. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王礼恒,李国敏,董艳辉.裂隙介质水流与溶质运移数值模拟研究综述[J].水利水电科技进展,2013,33(4):84-88. [WANG Liheng, LI Guomin, DONG Yanhui. Review of numerical simulation of flow and solute transport in fractured media[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 84-88. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陶同康.充填裂隙水流特性研究[J].水利运科学研究所,1995(1):23-32. [TAO Tongkang. On flow property of filling fractures[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995(1): 23-32. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 牛子豪,束龙仓,林欢,等.不同补给条件下裂隙-管道介质间水流交换的示踪试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):6-11. [NIU Zihao, SHU Longcang, LIN Huan, et al. Experimental study of water quantity exchange between fissures and sinkholes under different recharge modes in the fissure-conduit media[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 6-11. (in Chinese with English abstract)]
- [6] PTAK T. Tracer tests for the investigation of heterogeneous porous media and stochastic modelling of flow and transport: A review of some recent developments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 294(1/2/3): 122-163.
- [7] GARDIEN C J, POPE G A, HILL A D. Hydraulic fracture diagnosis using chemical tracers[C]//SPE Annual

- Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers, 1996, 36675: 925-932.
- [8] ELAHI S H, JAFARPOUR B. Dynamic fracture characterization from tracer-test and flow-rate data with ensemble Kalman filter[J]. *SPE Journal*, 2018, 23(2): 449 – 466.
- [9] 符韵梅, 董艳辉, 徐志方, 等. 分布式光纤温度示踪识别裂隙地下水流动研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(3): 86 – 94. [FU Yunmei, DONG Yanhui, XU Zhifang, et al. Advances of DTS-based heat tracer tests in characterization of groundwater flow in fractured media[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(3): 86 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [10] DANN R L, CLOSE M E, PANG L, et al. Complementary use of tracer and pumping tests to characterize a heterogeneous channelized aquifer system in New Zealand[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(6): 1177 – 1191.
- [11] KLEPIKOVA M V, LE BORGNE T, BOUR O, et al. Heat as a tracer for understanding transport processes in fractured media: Theory and field assessment from multiscale thermal push-pull tracer tests[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5442 – 5457.
- [12] QIAN Jiazhong. Experimental study of solute transport under non-Darcian flow in a single fracture[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 246 – 254.
- [13] 金爱芳, 刘磊, 殷秀兰. 不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 171 – 178. [JIN Aifang, LIU Lei, YIN Xiulan. Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 171 – 178. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 朱建友, 邓亚平, 施小清, 等. 高密度电阻率法探测 DNAPLs 污染的适宜性探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1): 144 – 151. [ZHU Jianyou, DENG Yaping, SHI Xiaoqing, et al. Discussion on the suitability of electrical resistivity tomography method to detect DNAPLs contaminant[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 144 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 齐信, 黎清华, 张再天, 等. 海南省琼中县花岗岩地区含水层电性特征及地下水赋存规律[J]. *地质通报*, 2021, 40(6): 1001 – 1009. [QI Xin, LI Qinghua, ZHANG Zaitian, et al. Electrical characteristics and storage rules of groundwater in granite area of Qiongzong County, Hainan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 1001 – 1009. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 范雨霏, 潘保芝, 郭宇航, 等. 利用数字岩心技术评价含黏土砂岩导电模型[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 919 – 926. [FAN Yufei, PAN Baozhi, GUO Yuhang, et al. Evaluate electrical conductivity models of clay-bearing sandstones by digital core technology[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 919 – 926. (in Chinese with English abstract)]
- [17] KEMNAA A, JAN VANDERBORGHTA J, KULESSA B, et al. Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(3/4): 125 – 146.
- [18] KOESTEL J, KEMNA A, JAVAUX M, et al. Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): W12411.
- [19] HAYLEY K, BENTLEY L R, GHARIBI M, et al. Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18402.
- [20] GIORDANO N, ARATO A, COMINA C, et al. Time-lapse electrical resistivity imaging of the thermally affected zone of a borehole thermal energy storage system near Torino(Northern Italy)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 140: 123 – 134.
- [21] 孟银生, 张光之, 刘瑞德. 电阻率参数预测地热田深部温度方法技术研究[J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(1): 31 – 34. [MENG Yinsheng, ZHANG Guangzhi, LIU Ruide. The deep temperature prediction by resistivity in exploration of the geothermal field system[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(1): 31 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 孙红亮. 高密度电阻率法延时性勘探的研究与实践[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. [SUN Hongliang. A study on the electrical imaging time-delay surveys[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电法响应特征的影响研究[J]. *水文地质工程地*

- 质, 2016, 43(5): 161 – 165. [ZHENG Zhijie, ZENG Jie, GAN Fuping. Research on the effect of device and electrode distance on the characteristics of high-density resistivity method in karst pipeline[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 161 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [24] YANG Ze, DENG Yaping, QIAN Jiazhong, et al. Characterizing temporal behavior of a thermal tracer in porous media by time-lapse electrical resistivity measurements[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(3): 1173 – 1188.
- [25] 涂羽娇, 王波, 冯荣, 等. 堆积石英砂导热性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3492 – 3497. [TU Yujiao, WANG Bo, FENG Rong, et al. Thermal conductivity of accumulated quartz sand[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(12): 3492 – 3497. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李刚, 李超, 李小森, 等. 石英砂中甲烷水合物渗透率实验与模型验证[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 53 – 60. [LI Gang, LI Chao, LI Xiaosen, et al. The permeability experiment on the methane hydrate in quartz sands and its model verification[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(12): 53 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [27] LI Xianjie, SONG Xinwang, YUE Xiang'an, et al. Effects of shear fracture on in-depth profile modification of weak gels[J]. *Petroleum Science*, 2007, 4(1): 55 – 60.
- [28] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52— 2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)]
- [29] 陈丽梅, 程敏熙, 肖晓芳, 等. 盐溶液电导率与浓度和温度的关系测量[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 39 – 42. [CHEN Limei, CHENG Minxi, XIAO Xiaofang, et al. Measurement of the relationship between conductivity of salt solution and concentration and temperature[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2010, 29(5): 39 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [30] HERMANS T, NGUYEN F, ROBERT T, et al. Geophysical methods for monitoring temperature changes in shallow low enthalpy geothermal systems[J]. *Energies*, 2014, 7(8): 5083 – 5118.

编辑: 宗 爽