

# 盐溶液入渗过程的电阻率成像法时空监测

伍开江<sup>1</sup>, 周启友<sup>2</sup>

(1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 采用电阻率成像法探讨了室内实验尺度上岩体中盐溶液的入渗过程。在岩柱试样上进行蒸馏水和盐溶液的入渗实验, 在入渗过程中通过多通道高密度电阻率勘测系统对岩柱的电性特征在三维空间上进行动态监测。然后对入渗过程岩柱进行电阻率成像, 从而获得不同时刻岩柱中的电阻率分布。各勘测截面上电阻率的分布和变化基本反映了岩柱内盐溶液的时空变化特征, 表明电阻率成像法动态监测室内实验尺度岩石中盐溶液的入渗是可行的, 岩柱5个截面的电阻率图像表明溶液的入渗是不均匀的。

**关键词:** 电阻率成像法; 盐溶液; 电阻率; 入渗过程

**中图分类号:** P631.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 6561(2007)01 0095 04

## Spatial and Temporal Monitoring of Salt Solution Infiltration Using Electrical Resistivity Tomography

WU Kai jiang<sup>1</sup>, ZHOU Qi you<sup>2</sup>

(1. *Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China;*

*2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)*

**Abstract** The infiltration process of salt solution is investigated in a laboratory scale rock block using electrical resistivity tomography. First, an infiltration experiment with distilled water and salt solution is made on a rock column, and the infiltration process is monitored with a multi channels high density electrical resistivity tomography system. Then, an electrical resistivity tomography for the rock column is constructed. The electrical resistivity distributions at different planes reflects the spatial variations of salt solute in the rock block. The results indicate that actively monitoring salt solution infiltration process in a sample scale rock block with high density electrical resistivity tomography is feasible. The electrical resistivity images indicate that the infiltration in the rock block is an asymmetrical process.

**Key words:** electrical resistivity tomography; salt solution; electrical resistivity; infiltration process

## 0 引言

将物探方法应用于对勘测体实施高密度的非破坏性勘测, 是利用勘测体内部的物理性质(弹性、导电性等)进行成像, 即通过成像技术获取勘测体内部信息。在众多的成像方法中, 电阻率成像(ERT)应用较为广泛。ERT在20世纪70年代后期首先应用于医学成像<sup>[1]</sup>和地质勘探<sup>[2]</sup>。经过20

多年的发展和完善, ERT在研究水文过程及非破坏性勘测方面已经取得了一定的成果。野外实验中, ERT已成功地应用于探测渗流区中优势流的路径<sup>[3]</sup>、确定地下水流的流动方向和地下水流速<sup>[4]</sup>、在三维空间上对土壤的含水量进行时空监测<sup>[5]</sup>、基于无量纲的电阻率穿透曲线估算介质的弥散度<sup>[6]</sup>。由于电法勘测数据获取手段和反演方法的改进, ERT对小尺度试样进行非破坏性探测(如

收稿日期: 2006 04 02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371021)

作者简介: 伍开江(1979), 男, 四川双流人, 从事高密度电阻率成像法应用研究。E-mail: wukaijiang@nju.org.cn

探测试样的内部结构特征, 水分、溶质的空间分布状况等) 也可取得良好的效果。目前 ERT 已经能够对岩样内部的微细结构进行探测<sup>[7]</sup>, 确定多孔介质中有机物流体的饱和度<sup>[8]</sup>。

岩石的电阻率与其结构、组分、温度、含水量及所含水体的电阻率之间有着密切的关系。通过分析岩石电阻率大小及随时间的变化就可获得岩石的物性特征, 这对于研究多孔介质中流体的流动过程及确定相关参数具有重要意义。笔者应用动态监测室内实验尺度岩石中盐溶液入渗过程, 并通过岩石电阻率在三维空间分布及随时间的变化分析盐溶液的入渗特征。

### 1 实验材料与方法

盐溶液入渗实验, 在入渗过程中, 通过高密度电阻率勘测系统对岩石的导电性在三维空间上进行了动态监测。实验中使用的主要仪器为高密度电阻率勘测系统。实验使用日本兴和株式会社研制的多通道高密度电阻率勘测系统 (Next 400 型)。实验装置见图 1。



图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental Equipment

实验使用的岩样为一直径为 60 mm、高为 335 mm 的石英砂岩岩柱。岩石天然重度为 23.62 kN/m<sup>3</sup>, 平均孔隙度为 6.75%。在岩柱顶端中心位置安置 2 个塑料环进行溶液的入渗(图 2)。塑料内环内径为 21 mm, 环壁厚度 3 mm, 外环内径 37 mm。

高密度电法勘测在岩柱周围不同高度的 5 个截面布设电极进行测量。截面间距为 10 mm, 截面 1 距离岩柱顶端为 20 mm, 在每一测线上等距布置 20 个电极, 电极间距为 9.4 mm, 电法勘测测线布置见图 3。

勘测中采用 Wenner 装置, 共用到 5 种不同的电极间距, 测量电极间隔数依次从 2 增长到 6, 按图 4 的电极组合方式进行供电和测量。

勘测中, 根据预先准备的测量电极组合文件, 按截面的顺序从高到低依次进行。这样, 每次测量可获得 500 组电压、电流测量数据。

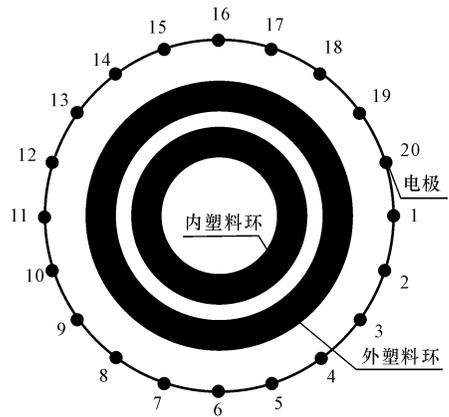


图 2 入渗环及电极布置

Fig. 2 Sketch Map of Infiltration Rings and Electrodes Arrangement

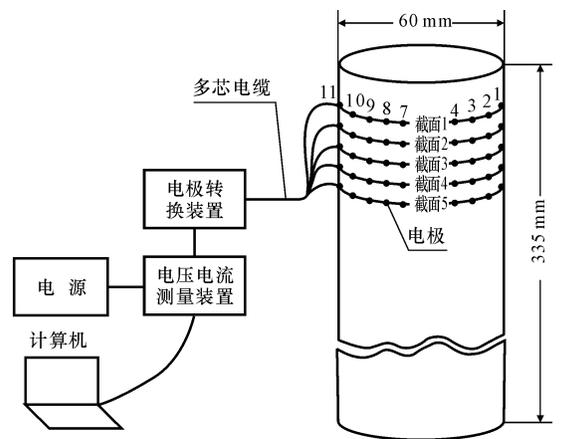


图 3 高密度电法勘测测量布置

Fig. 3 Measurement Layout of High Density ERT Survey

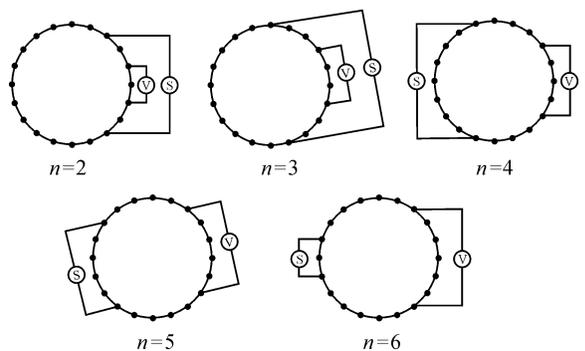


图 4 电极分布及测量方式

Fig. 4 Schematic Diagrams of Electrode Arrangement and the Measurement Patterns

在入渗实验中, 通过高密度电阻率勘测系统测量控制软件对电法勘测电流频率、电流大小及测量时间间隔等参数进行设置, 并调用电极测量文件对不同电极组合进行供电和测量。实验中使用电流为 0.83~3.0 mA、频率为 2 Hz 的低频正负方波交

变电流作为供电电流。在 高密度电阻率勘测系统启动以后, 将蒸馏水(电导率为  $7.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ ) 倒入岩柱顶端的内外塑料环内进行水体入渗, 并对蒸馏水入渗过程实验岩柱进行了电阻率成像<sup>[9]</sup>。在渗水基本达到稳定, 即在蒸馏水入渗进行 114 h, 将电导率为  $9\ 030.0 \mu\text{s}/\text{cm}$  的盐溶液倒入岩柱顶端塑料内环中, 进行盐溶液入渗, 在外环继续进行蒸馏水入渗。在溶液入渗过程中, 按照上述方法对岩柱 5 个截面的电性特征进行了动态监测。

## 2 电阻率成像

在此电阻率成像正演计算采用三维点电源二维地体模型, 用有限元法对电流场正演问题进行求解; 反演计算采用基于序列二次规划(SQP)方法建立的电阻率反演算法。设高密度电法勘测得到  $n$  组电压  $d=(d_1, d_2, \dots, d_m)^T$  和电流  $I=(I_1, I_2, \dots, I_n)^T$  数据, 正演计算求解区域被剖分为  $m$  个单元,  $\rho=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T$ ,  $\rho_i$  为各单元的电阻率值, 则由正演计算得到电压与电法勘测实测电压可建立优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\rho) = \sum_{i=1}^n [D_i(\rho) - d_i]^2 \quad (1) \\ \text{s. t.} \quad & a < \rho_i < b \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

式中:  $D=(D_1, D_2, \dots, D_n)^T$ , 为正演计算电压值;  $a$ 、 $b$  为根据实际问题确定的模型参数取值范围(本文取  $a=5 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $b=1\ 500 \Omega \cdot \text{m}$ )。这样求解式(1)就可由电法实测数据反演得到研究区域内各单元详细的电阻率图像的正演和反演问题的求解过程<sup>[10]</sup>。

在这里采用电压的均方根相对误差对电阻率反演结果进行评价。按照上述方法对溶液入渗过

程中高密度电法勘测实测数据进行反演, 得到的结果对应的电压均方根相对误差最大为 3.23%, 小于 1.66% 的占 90% 以上, 已经满足一般的高密度电法勘测精度要求。

由于外界温度对岩石的电阻率也具有一定影响, 需要对反演得到的电阻率进行温度校正。温度校正为<sup>[11]</sup>

$$\rho_T = \rho_t e^{-k(T-t)} \quad (2)$$

式中:  $T$  为电阻率校正温度;  $\rho_T$  为温度为  $T$  时所对应的电阻率;  $k$  为衰减系数, 一般取  $k=0.026 \sim 0.02$ ;  $\rho_t$  为温度为  $t$  时的实际电阻率。本文中取  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k=0.022$  进行温度校正。这样就可得到经过温度校正后各截面每个单元电阻率, 再进行 Kriging 插值即可得到岩柱 5 个勘测截面上任意点上的电阻率, 从而作出电阻率图像。

## 3 结果分析与讨论

采用电阻率成像方法, 即可由溶液入渗过程高密度电法勘测实测数据反演得到勘测截面上的电阻率空间分布。图 5 为盐溶液入渗过程中岩柱上 5 个勘测截面上的电阻率图像。

由岩柱 5 个截面上的电阻率分布可以看出, 在盐溶液入渗进行到 16 h(09 22T02:00) 时, 截面 1 和截面 2 中心部位的电阻率即发生了明显下降。在整个溶液入渗过程中, 截面 4 和截面 5 上的电阻率只是在整体上发生了略微下降, 并且电阻率在空间上的分布模式没有发生大的改变。同时还可看出, 岩柱电阻率的变化幅度在空间上分布不均匀, 在截面 1 和截面 2 上沿 9<sup>#</sup> 和 19<sup>#</sup> 电极方向上岩石电

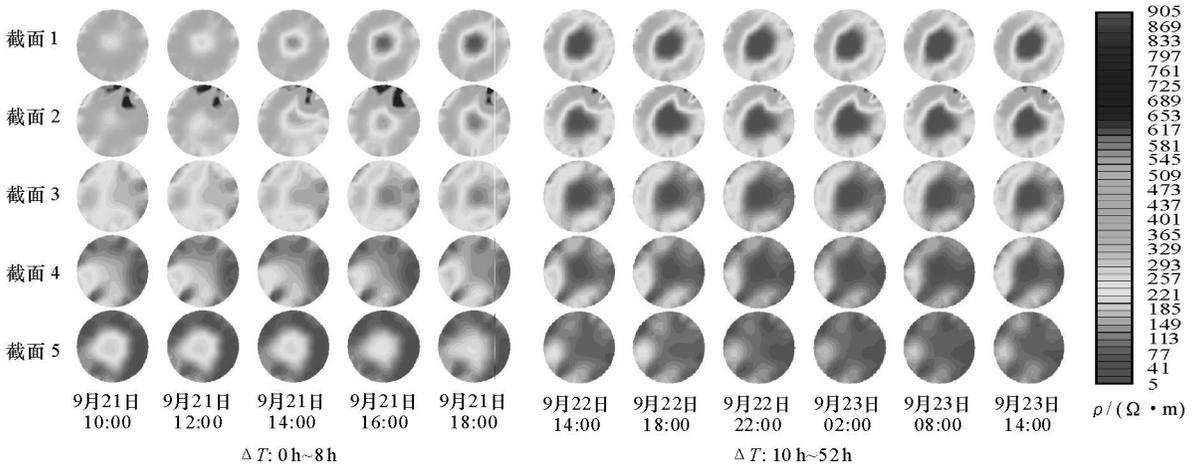


图 5 溶液入渗过程中岩柱 5 个截面的电阻率图像

Fig. 5 Electrical Resistivity Images at the Five Planes During the Solution Infiltration Period

阻率下降相对较快, 截面 1 ~ 3 中部电阻率的变化显示了盐溶液沿岩柱的中部入渗, 并逐渐向周围扩散的过程。岩柱各截面电阻率的下降幅度在空间的分布不均匀, 若岩石的电阻率变化主要是由溶液入渗引起, 岩柱空间上电阻率变化则说明溶质运移并不均匀, 在其运移中存在优势路径。

在溶液入渗实验开始时, 岩石中水体的入渗已经达到稳定状态, 可以假设在溶液入渗过程中实验岩柱上部岩石的饱和度  $S$  和孔隙度  $\varphi$  不变; 岩石的电阻率(温度校正后)变化仅由岩石孔隙中水溶液的电阻率  $\rho_w$  变化引起, 且服从 Archie 公式<sup>[12]</sup>

$$\rho = a \rho_w \varphi^m S^{-n} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为岩石的电阻率;  $S$  为岩石饱和度;  $\varphi$  为孔隙度;  $\rho_w$  为岩石孔隙中水溶液电阻率;  $a$  为比例系数;  $m$  为 Archie 指数;  $n$  为饱和度指数, 其中  $a, m, n$  是由多孔介质性质决定的常数。现就对各岩柱各勘测截面上几个像素点(图 6)处岩石电阻率的变化进行分析。

图 7 为各截面 7 个像素点上岩石电阻率随时间的变化曲线。可以看出, 在溶液入渗初期的 9 ~ 10 h, 岩柱上部 3 个截面上岩石的电阻率减小较为明显。由于盐溶液的渗入, 截面 1 的中部(像素点 1、2、5)电阻率由初始时刻的  $270 \Omega \cdot m$  左右迅速降低到约  $30 \Omega \cdot m$ 。在靠近岩柱表层像素点 7 处电阻率的变化较小, 入渗过程中出现了略微的降低, 基本保持在  $300 \Omega \cdot m$  左右。由 Archie 公式可知, 对于同一饱水岩样, 岩石的电阻率与其孔隙中所含水体的电阻率成正比, 这样岩石的电阻率变化可以基本反映岩石孔隙中水体电阻率。而对于低浓度电解质溶液, 在恒温条件下, 其电阻率又与浓度呈一一对应关系, 这样确定水溶液的电阻率对于定量分析溶液的入渗过程具有一定意义。从图 7 还可看出, 入渗进行 20 h 时各截面的电阻率变化基本达到稳定。在盐

溶液入渗过程中岩柱电阻率的变化从上到下具有明显地先后顺序, 5 个截面电阻率的变化梯度从上到下逐步降低。截面 4 和截面 5 中部的像素点和表层的电阻率变化差异比较小, 这说明此处岩石孔隙中水体溶质的含量逐渐趋于均匀,

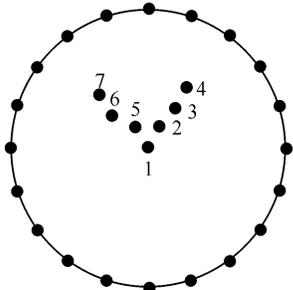


图 6 各勘测截面上选取的像素点的位置

Fig. 6 Selected Pixels Locations in the Planes Surveyed

溶液浓度的空间差异已经减小。

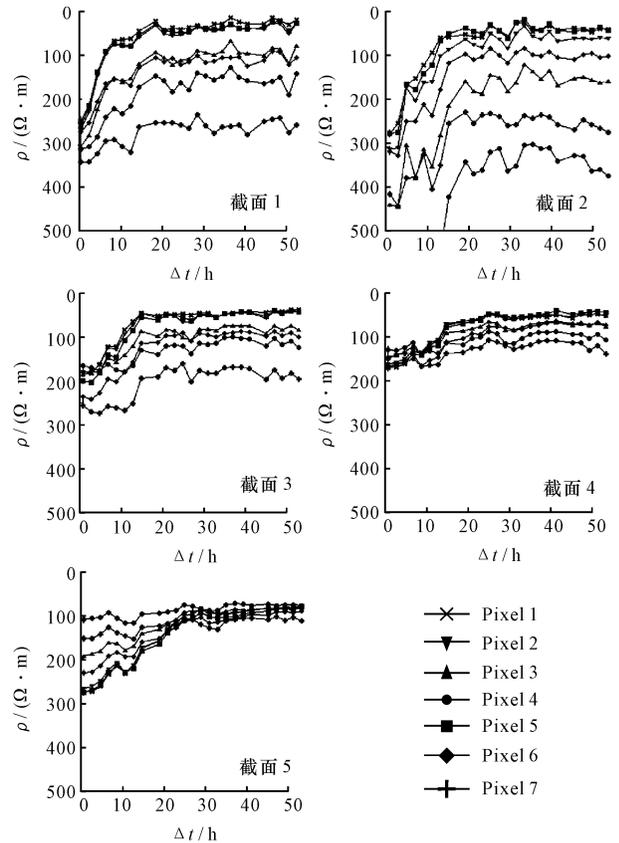


图 7 各勘测截面 7 个像素点处的岩石电阻率变化  
Fig. 7 Resistivity Breakthrough Curves at 7 Pixel Points of the Planes Surveyed

### 4 结语

(1) 入渗过程中岩柱各截面上电阻率图像的变化反映了溶质在三维空间上的迁移过程, 表明应用 ERT 非破坏性的动态监测岩石中水盐溶液的入渗过程是可行的。

(2) 岩柱在三维空间上电阻率的分布和变化表明, 水盐溶液的入渗是不均匀的, 存在优势渗流现象, 说明即便在看似均匀的岩石中, 溶质的运移过程也具有非均匀性。

参考文献:

[ 1 ] Henderson R P, Webster J G. An Impedance Camera for Spatially Specific Measurements of Thorax[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 1978, BME 25: 250-254.  
[ 2 ] Lytle R J, Dines K A. An Impedance Camera; A System for Determining the Spatial Variation of Electrical Conductivity [R]. California: Lawrence Livermore Laboratory Paper, UCLRL 52413, 1978.

(下转第 106 页)

缘检测器来实现边缘处理:

```
i = imread('jyg45.tif');
bw = edge(i, 'canny');
imshow(bw); % 识别边界见图 6c.
```



图 7 鲸鱼沟 4 波段的二值图像

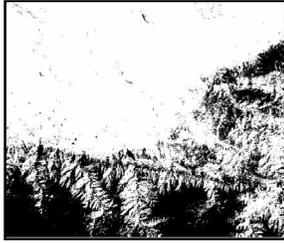


图 8 鲸鱼沟 4、5 合成波段的二值图像

Fig. 7 4 Band Image of Binary in Jingyugou Area

Fig. 8 4 and 5 Fusion Images of Binary in Jingyugou Area

## 4 结语

从图 4~图 8 可以看出,图 4a 与图 4b 影像变化彩色效果比较明显,图 7 和图 8 分别是 jyg4 原图像图 5a 与 jyg45 融合的图像图 6a 都进行取阈值 0.35 的二值化处理。为了看清更细微的差别,取两图鲸鱼沟水库 A 区  $64 \times 64$  子图并进行放大和边缘检测,结果两图细节上差别明显,图 6b 库区后部分长,图 5b 库区后部丢失。图 6b 与图 6c 相比细节要比图 5b 与图 5c 效果要好一些,但图 6b 周围也出现一些阴影噪声。

小波变换融合方法对西安地区鲸鱼沟水库影像进行融合,并进行水库的边缘检测试验,可以看到,小波变换在遥感影像融合应用可以获取清晰影像。还可将不同传感器、不同时段、不同分辨率遥感影像,经小波变换后将遥感影像分解为 4,经处理组合,可以融合成所需要的图像,这对遥感影像的特征提取和模式识别研究起很大的作用。

参考文献:

- [1] 李德仁,周月琴,金为铣. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京:测绘出版社, 2003.
- [2] Broussard R B, Rogers S K, Oxley M E. Physiologically Motive Image Fusion for Object Detection Using a Pulse Coupled Neural Network[J]. IEEE Trans: Neural Networks, 1999, 10(3): 624-625.
- [3] 韩玲,武汉宁,杜子涛. 多源遥感影像数据融合方法在地质中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 78-81.
- [4] 孙文锋,孙强,焦季成. 改进多尺度融合结合小波域 HMT 模型的遥感图像分割[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 528-532.
- [5] 陶洪久,柳健,田金文. 基于小波变换和数学形态学的遥感图像边缘检测[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 154-157.
- [6] Tupin F, Bloch I, Maiter H. A First Step Toward Automatic Interpretation of SAR Images Using Evidential Fusion of Several Structure Detectors[J]. IEEE Trans: Geosciences Remote Sensing, 1999, 37(3): 1327-1343.
- [7] [日]谷口庆治. 数字图像处理[M]. 朱虹,译. 北京:科学出版社, 2002.

(上接第 98 页)

- [3] Hagrey S A, Michaelsen J. Resistivity and Percolation Study of Preferential Flow in Vadose Zone at Bokhorst, Gemany [J]. Geophysics, 1994, 64(3): 746-753.
- [4] White P A. Electrode Arrays for Measuring Groundwater Flow Direction and Velocity[J]. Geophysics, 1994, 59(2): 192-201.
- [5] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three Dimensional Spatial and Temporal Monitoring of Soil Water Content Using Electrical Resistivity Tomography [J]. Water Resources Research, 2001, 37(2): 763-769.
- [6] 周启友. 从高密度电阻率成像法到三维空间上的包气带水文学[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(6): 97-104.
- [7] 郝锦琦,冯锐,周建国,等. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 426-434.
- [8] Chambers J E, Loke M H, Ogilvy R D, et al. Noninvasive

Monitoring of DNAPL Migration through a Saturated Porous Medium Using Electrical Impedance Tomography [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 68: 1-22.

- [9] 伍开江,周启友. 岩柱中水体入渗过程的高密度电阻率成像法研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 76-81.
- [10] 伍开江,周启友. 基于序列二次规划方法的高密度电阻率反演[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 63-67.
- [11] Zhou Q Y. Study on Groundwater Movement Around Cavity in Fractured Rocks Using Electrical Resistivity Tomography [R]. Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute. JNC Report, JNC TN7400 2002 001, 2002.
- [12] Archie G E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics [J]. Trans AIME, 1942, 146: 54-62.