

吴文圣,付 赓,张 智等.小井径双源距碳氧比 C/O 测井的影响因素及处理.地球物理学报,2005,48(2):459~464

Wu W S, Fu G, Zhang Z, et al. Study of influence factor for dual-detector C/O logging in slim holes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(2):459~464

# 小井径双源距碳氧比 C/O 测井的影响因素及处理

吴文圣<sup>1,2</sup>, 付 赓<sup>2</sup>, 张 智<sup>2</sup>, 庄人遴<sup>2</sup>

1 石油大学资源与信息学院, 昌平 102249

2 清华大学工程物理系, 北京 100084

**摘 要** 研究各种地层和井眼环境因素对碳氧比 C/O 测井长、短源距探测器的影响规律, 可以为 C/O 测井仪器的刻度方法提供指导, 为解释模型的建立和数据处理提供依据. 本文用 Monte Carlo 方法, 计算了 C/O 值随井眼直径、水泥环厚度、套管直径、孔隙度、含油饱和度、地层岩性和油密度的变化规律. 从中看出, 当井内流体为油时, 井径或套管直径增大, C/O 值增大, 井眼影响增大; 当井内流体为水时, 井径或套管直径的增大, C/O 值减小; 水泥环厚度增加时 C/O 值减小; 当井眼条件不变时, 地层孔隙度越大, 含油饱和度越大, C/O 值越大, 对测井越有利; 反之, 地层孔隙度越小, 含油饱和度越小, C/O 值越小, 对测井不利; 地层岩性对 C/O 值的影响显著, 相同条件下, 碳酸盐岩比砂岩的 C/O 值高; 油密度越大, C/O 值越大. 文中还提出了一种消除这些因素影响的数据处理方法

**关键词** 小井径, 碳氧比测井, Monte Carlo 方法

**文章编号** 0001-5733(2005)02-0459-06 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2003-10-09, 2004-11-02 收修定稿

## Study of influence factor for dual-detector C/O logging in slim holes

WU Wen-Sheng<sup>1,2</sup>, FU Geng<sup>2</sup>, ZHANG Zhi<sup>2</sup>, ZHUANG Ren-Lin<sup>2</sup>

1 Resource and Information College in University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Engineering Physics Department of Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** It helps to design scale schemes and interpretation model to study the influence of borehole and formation environments in C/O logging on two detectors. The paper investigates the rules of C/O values changing with borehole diameter, cement thickness, case size, formation porosity, oil saturation, formation lithology and oil density. The results indicate that when a borehole is full of oil, C/O values increase with increasing borehole diameter or case size, and the influence of borehole increases. When a borehole is full of water, C/O values decrease with increasing borehole diameter or case size. C/O values decrease with increasing cement thickness. The higher porosity and water saturation, the higher C/O values when borehole condition is invariable, which is useful for C/O logging. Contrarily, the less porosity and water saturation, the less C/O values, and which is bad for C/O logging. Formation lithology influences seriously C/O values, limestone has higher C/O value than that of sand when other conditions are the same. The higher oil density, the higher C/O value. The paper also introduces a data-processing method that can remove the influence of borehole and formation environment on the two detectors.

**Key words** Slim hole, C/O Logging, Monte Carlo method

**基金项目** 中国海洋石油总公司重点研究项目“脉冲中子寿命和碳氧比能谱测井研制”资助。

**作者简介** 吴文圣,男,1972年生,清华大学工程物理系在站博士后,主要从事核测井方法和数值模拟研究. E-mail:wmz2001@vip.sina.com

# 1 引言

小井径双源距碳氧比测井在各油田越来越受到重视,主要是因为它能有效评价地层的剩余油饱和度和岩性和油层水淹级别。目前,国际上投入商业应用的小井径双源距碳氧比测井仪器主要有4种,分别是 Schlumberger 公司的储层饱和度测井仪 RST<sup>[1]</sup>, Halliburton 公司的油藏监测仪 RMT, Atlas 公司的储层特性监测仪 RPM 和 Computalog 公司的脉冲中子衰减能谱测井仪 PND-S<sup>[2]</sup>。

与传统的单源距碳氧比能谱测井比较,小井径双源距碳氧比测井具有明显的优势<sup>[3]</sup>:更准确地得到地层碳氧比测井资料;可以过油管测量,可以在井筒流体是钻井液、清水、石油的混合物以及套管壁上粘有石蜡和石油的情况下进行测量,而不需要洗井、刮蜡等作业,把生产损失降到最低。但是,在 C/O 测井中,井眼环境多样(井径、套管、井内流体、水泥环厚度不同),地层条件复杂(不同的岩性、孔隙度、饱和度等),这些都对测量结果产生影响,其刻度和解释一直是核测井中的一大难题<sup>[4]</sup>。研究这些因素对 C/O 测井两个探测器的影响规律,可以为刻度方法提供指导和解释模型的建立提供依据。本文利用 Monte Carlo 方法<sup>[5]</sup>通用程序 MCNP(3B)对小井径双源距 C/O 测井的影响因素进行研究,并给出了一种能有效消除这些影响因素的数据处理方法。

# 2 计算模型

计算模型<sup>[6]</sup>如图 1 所示,只考虑测井仪器在套管内居中的情形。该模型为高 100cm 的均质地层,地层径向厚度为 60cm。地层是孔隙度为 35% 的砂岩,

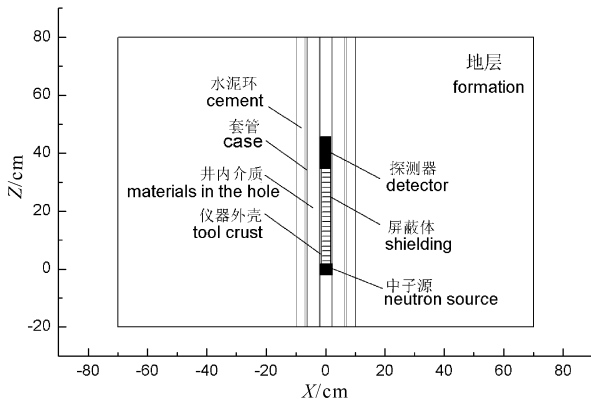


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

孔隙中充满水或油。水泥环为 CaSiO<sub>3</sub>, 厚度 30mm。套管为铁, 外径 140mm, 厚 7mm。井内介质分别为水或油。仪器外壳为铁, 外径 44mm, 厚度 2mm。中子源位于 (0, 0, 0) 处, 各向同性地发射能量为 14MeV 的中子, 探测器和中子源之间充满理想屏蔽体。计算中使用能窗法, 选择 4. 125 ~ 4. 875MeV 作为碳区计数, 5. 875 ~ 6. 625MeV 作为氧区计数。计算中未考虑探测器效应。统计误差控制在 2% 以内。

# 3 各种影响因素的理论研究

影响双源距碳氧比能谱测井的因素很多, 主要有井眼尺寸、井眼流体、套管尺寸、水泥环厚度、地层岩性和孔隙度、地层流体等。

## 3.1 井径的影响

图 2 给出了井径 R 对长、短源距 C/O 值的影响, 图中 Y 表示井眼持油率, Y=1 表示井内为油, Y=0 表示井内为水, (C/O) 为当前井径处的 C/O 值减去井径为 10cm 处的 C/O 值所得差值。从图中可以看出, 当井内流体是水时, 随着井径的增大, 长、短源距 C/O 值均线性降低; 当井内流体是油时, 随着井径的增大, 长、短源距 C/O 值均线性增大; 短源距 C/O 值变化幅度大, 说明井径对短源距的影响大。

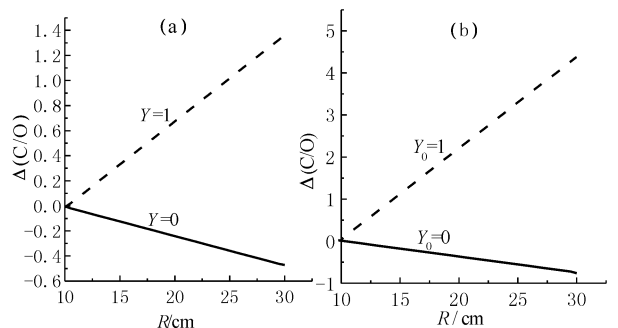


图 2 井径对 C/O 值的影响

(a) 长源距; (b) 短源距。

Fig. 2 The influence of borehole diameter on C/O values

(a) Long spacing detector ; (b) Short spacing detector.

## 3.2 水泥环厚度的影响

图 3 显示的是水泥环厚度 H<sub>c</sub> 对长、短源距 C/O 值的影响, 图中 (C/O) 为当前水泥环厚度处的 C/O 值减去水泥环厚度为零时 C/O 值所得差值。从中看出, 随着水泥环厚度的增大, 长、短源距 C/O 值均线性降低。其中, 短源距的降低幅度大, 当水泥环厚度增加到 5cm 时, 长源距的 C/O 值降低了 0.39, 而短源距的 C/O 值降低了 0.43, 说明水泥环厚度对短源距的影响比长源距大。

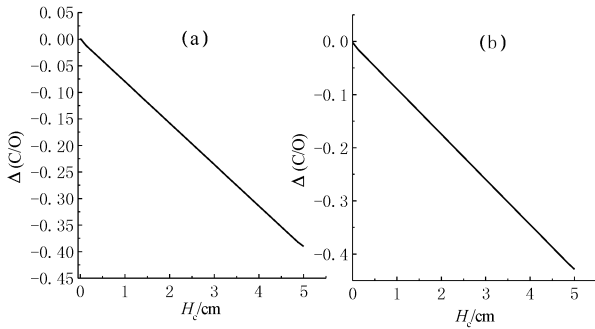


图 3 水泥环厚度对 C/O 值的影响  
(a)长源距;(b)短源距.

Fig. 3 The influence of cement depth on C/O values  
(a)Long spacing detector; (b) Short spacing detector.

### 3.3 套管尺寸和孔隙度的影响

从图 4、5 中可以看出,当地层情况相同,井眼流体为油( $Y=1$ )时的 C/O 值比井眼流体是水( $Y=0$ )时的 C/O 值大,说明井眼流体是油时,仪器对地层的分辨能力强.孔隙度越大,含油饱和度越大,C/O 值越大,对测井越有利,反之,地层孔隙度越小,含油饱和度越小,C/O 值越小,对测井越不利.

图 4 与图 5 比较可以看出,随着套管尺寸的增加,井内流体是油时的 C/O 值增加,井内流体为水时的 C/O 值减小,说明井内流体油对 C/O 贡献增加,地层的贡献响应减小,分层能力减弱.

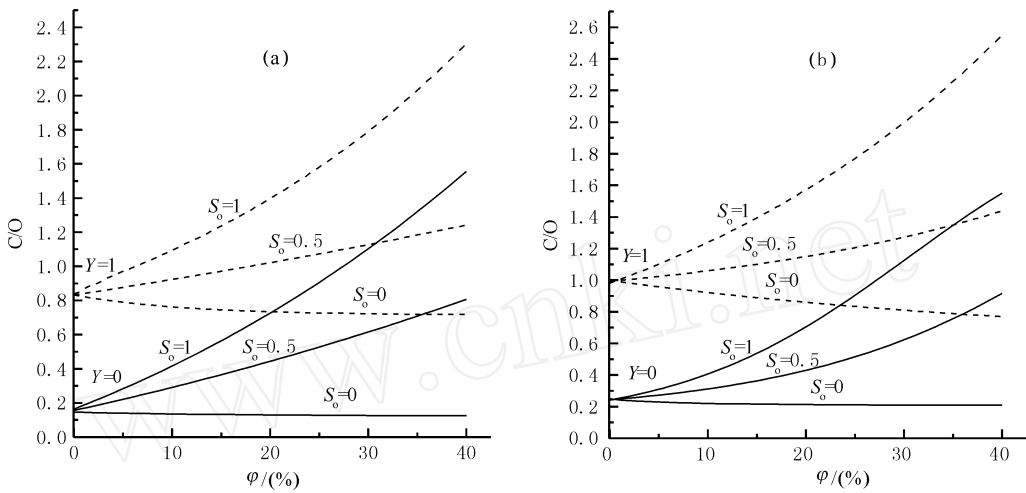


图 4 套管尺寸为 140mm,C/O 值、孔隙度 和地层含油饱和度  $S_o$  的关系  
(a)长源距;(b)短源距.

Fig. 4 The relationship between C/O value and porosity or oil saturation in the case hole with the diameter of 140mm  
(a)Long spacing detector; (b) Short spacing detector.

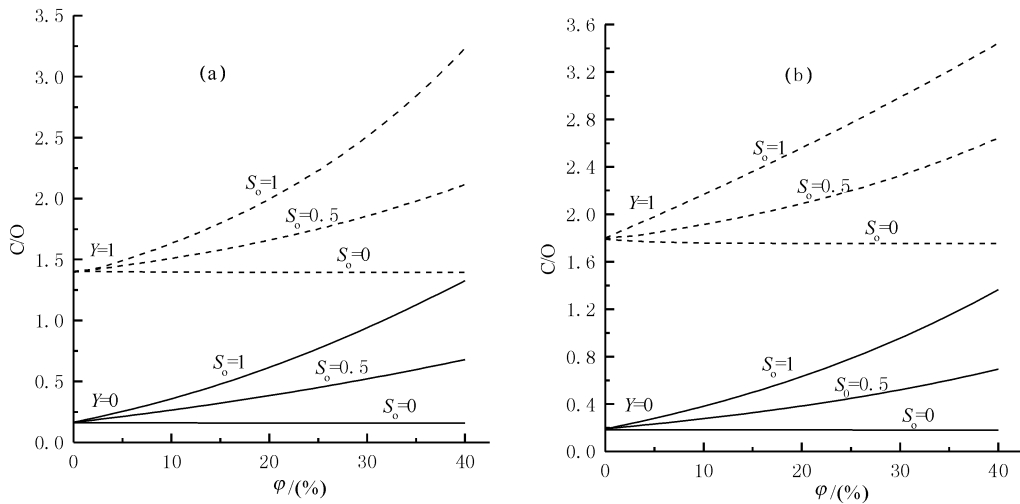


图 5 套管尺寸为 219mm,C/O 值、孔隙度 和地层含油饱和度  $S_o$  的关系  
(a)长源距;(b)短源距.

Fig. 5 The relationship between C/O value and porosity or oil saturation in the case hole with the diameter of 219mm  
(a)Long spacing detector; (b) Short spacing detector.

### 3.4 含油饱和度的影响

图 6 显示了  $S_o$  对长、短源距 C/O 值的影响,可以看出,随着含油饱和度  $S_o$  的增加,长、短源距 C/O 值均增大,地层孔隙度越大,C/O 值增幅越大,仪器

测定含油饱和度灵敏度高.对于孔隙度相同的地层,含油饱和度越大,C/O 值越大,仪器灵敏度高;也就是说,高孔隙度和高含油饱和度对测井有利,而低孔隙度和低含油饱和度地层得不到理想效果.

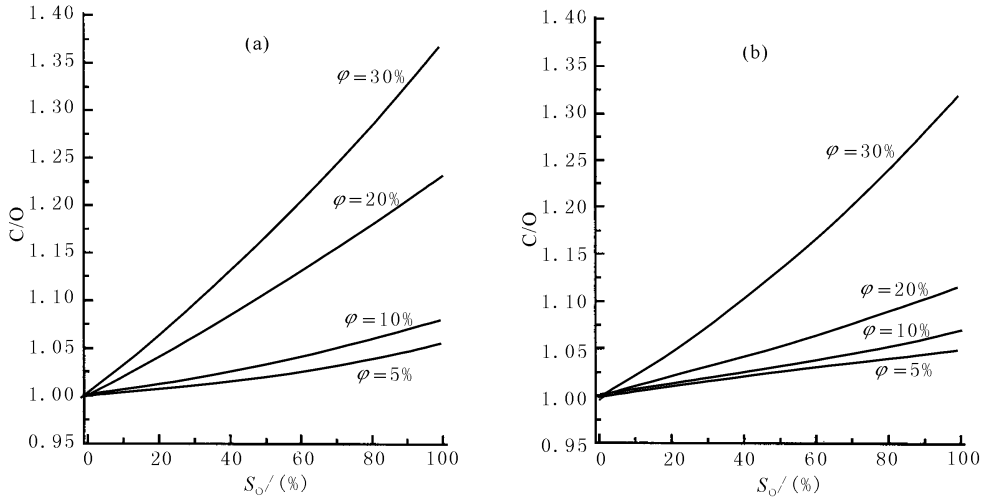


图 6 C/O 值与含油饱和度  $S_o$  的关系

(a) 长源距 ;(b) 短源距.

Fig. 6 The relationship between C/O value and oil saturation

(a) Long spacing detector ;(b) Short spacing detector.

### 3.5 地层岩性的影响

图 7 显示的是在砂岩和碳酸盐岩地层中,当井眼为油 ( $Y=1$ ) 时,C/O 值随含油饱和度和孔隙度的变化关系.从图中可以看出,当地层孔隙度和含油饱和度相同时,碳酸盐岩地层的 C/O 值高于砂岩地层的 C/O 值.以长源距为例,当孔隙度为 20%,含油饱和度为 0.5 时,碳酸盐岩的 C/O 值是 3.331,砂岩的

C/O 值为 0.973.这种岩性上的差别,主要是由地层化学成分的不同造成的.

### 3.6 油密度的影响

图 8 显示的是当油密度为  $0.87、1.00\text{g/cm}^3$ ,井眼为水 ( $Y=0$ ) 时,C/O 值随含油饱和度和孔隙度的变化关系.从图中可以看出,当油密度不同时,地层 C/O 值出现差别,地层孔隙度越大,这种差别逐渐增

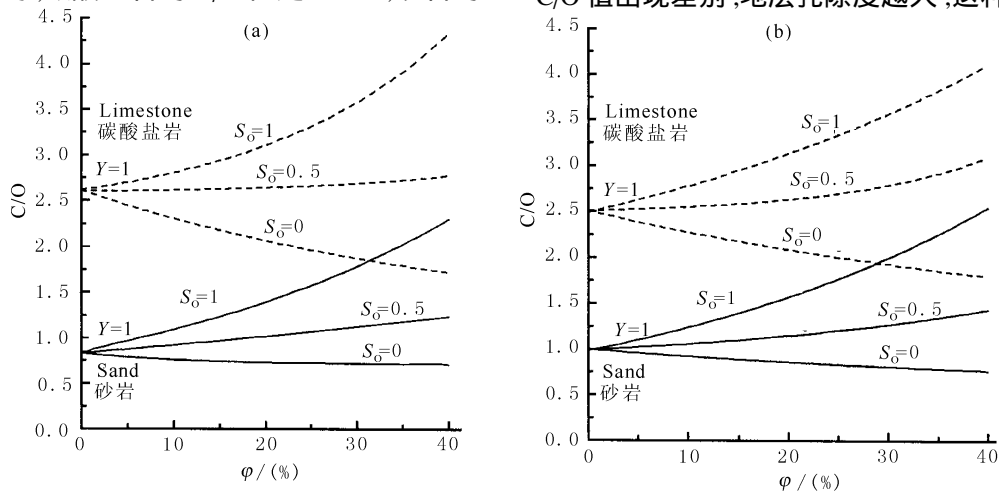


图 7 岩性的影响

(a) 长源距 ;(b) 短源距.

Fig. 7 The influence of formation lithology on C/O values

(a) Long spacing detector ;(b) Short spacing detector.

大.以长源距为例,当孔隙度为 30%、含油饱和度为 0.5、油密度为 1.00g/cm<sup>3</sup> 时的 C/O 值是 0.689,油密

度为 0.87g/cm<sup>3</sup> 时的 C/O 值为 0.59.

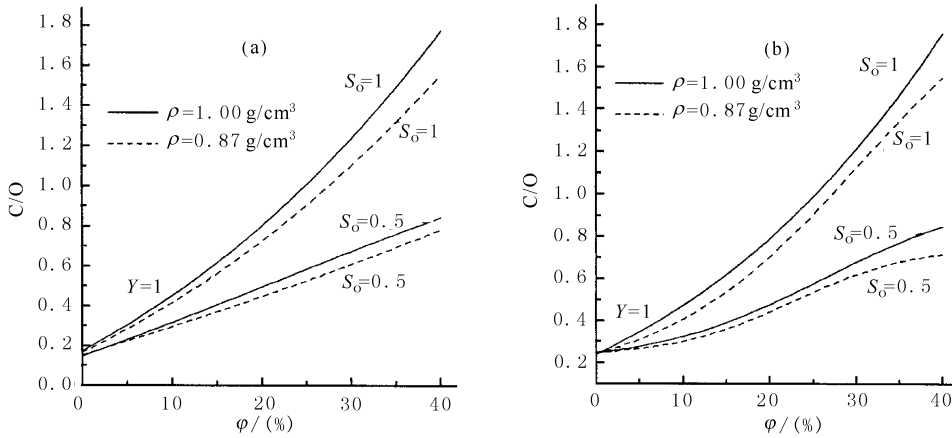


图 8 油密度 的影响

(a) 长源距; (b) 短源距.

Fig. 8 The influence of oil density on C/O values

(a) Long spacing detector; (b) Short spacing detector.

### 4 数据处理

从以上计算结果可以看出,岩性、井眼、套管、水泥环、井内流体和地层流体等均影响小井径双源距 C/O 测量结果.双源距碳氧比测井长、短源距 C/O 响应分为井筒响应、环境响应和流体响应三部分.

由于碳和氧的相对产额是地层和井眼特性的函数,如果测井数据正常,那么每个测井数据点都可以用四组刻度数据来描述,如图 9 所示的 4 个端点,图中纵坐标为长源距 C/O 值,横坐标为短源距 C/O 值, P 点为测井数据点, a、b、c、d 为 4 个刻度点. ww 表示井眼流体和地层流体均为水,含油饱和度

So = 1, 持油率 Y = 0; wo 表示井眼流体为水,地层流体为油, So = 0, Y = 0; ow 表示井眼流体为油,地层流体为水, So = 1, Y = 1; oo 表示井眼流体为油,地层流体为油. So = 0, Y = 1; 这样不同的地层和井眼特性组合是一个庞大的特征系数数据库. C/O 测井仪器的刻度就是用仪器实际测量和数值模拟的方法建立不同地层和井眼组合的特征系数库.有了这个特征系数库以后,再输入已知的地层和井眼信息,就可以求出每个测井数据点的含油饱和度等参数,这就是四边形法.

### 5 结 论

(1) 碳氧比 C/O 测井的影响因素多.井眼、套管、水泥环、井内流体和地层岩性、流体等均影响测量结果.这就是为什么碳氧比 C/O 测井是目前数据处理最难、最难解释的测井方法之一.在进行碳氧比 C/O 测井时,尽可能选择较有利的地层和井眼环境,如选择孔隙度大(一般大于 10%)的地层,这样有利于获得好的测井效果.

(2) 在建立仪器刻度方法和解释模型时,必须考虑这些井眼和地层因素的影响.如果采用对每种影响因素逐一校正,工作量巨大;采用一般的双源距补偿原理(如密度测井)达不到补偿效果;根据碳氧比 C/O 的井眼和地层特性,四边形法是一种可行的选择,即通过建立不同地层和井眼组合的特征系数

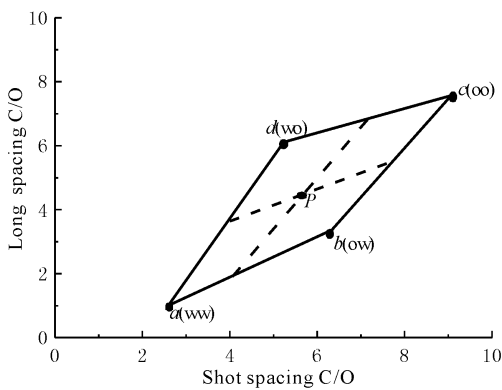


图 9 双源距碳氧比测井长、短源距交汇图

Fig. 9 The cross plot between long spacing C/O values and short spacing values in C/O logging

库来求取储层参数.

致 谢 感谢石油大学黄隆基教授的指导.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 谢荣华. 生产测井技术应用与进展. 北京:石油工业出版社, 1998. 192 ~ 198  
Xie R H. The Use and Development of Production Logging Technology (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. 192 ~ 198
- [ 2 ] 陈序三. 一种新型储层饱和度测井方法及应用. 测井技术, 2001, 25(2):105 ~ 109  
Chen X S. A new reservoir saturation log and use. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2001, 25(2):105 ~ 109
- [ 3 ] 刘宪伟, 李淑苹. 双源距碳氧比能谱测井解释方法研究. 见: 第六次核测井学术会议论文集. 北京:石油工业出版社, 2002. 135 ~ 142  
Liu X W, Li S P. Interpretation methods study of dual-detector C/O spectrum logging. In: The Sixth Nuclear Logging Congress Report (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. 135 ~ 142
- [ 4 ] 黄隆基. 核测井原理. 山东:石油大学出版社, 2000  
Huang L J. Nuclear Logging Theory (in Chinese). Shandong: Petroleum University Press, 2000
- [ 5 ] 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运中的应用. 北京:科学出版社, 1980  
Pei L C, Zhang X Z. Monte Carlo Method and Its Use in Particle Transport (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980
- [ 6 ] 郑华, 陈景霞, 张 谦等. C/O 测井响应随源距变化的理论研究. 测井技术, 1998, 22(2):79 ~ 83  
Zheng H, Chen J X, Zhang Q, et al. A theoretical study on the spacing dependent responses of C/O log. *Well Logging Technology* (in Chinese), 1998, 22(2):79 ~ 83

www.cnki.net