

Wu W S, Huang L J. Monte Carlo simulation of three-detector density logging. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1):164 ~ 170

三探测器密度测井的 Monte Carlo 模拟

吴文圣¹ 黄隆基²

¹ 清华大学工程物理系 3-8#, 北京 100084

² 石油大学(华东)资源与信息学院, 山东东营 257061

摘要 为了改善传统岩性密度测井仪的缺陷, 本文基于传统的双源距探测器密度测井仪, 提出在负源距范围内增加一个反散射探测器, 构成新的三探测器密度测井仪器. 利用 Monte Carlo 方法通用程序 MCNP(3B), 从光子与地层相互作用的机理出发, 计算得到了反散射探测器、长源距探测器和短源距探测器的光子通量的能谱分布、光子通量与源距的关系、光子通量与地层密度的关系、源距与探测深度的关系以及计数能窗等. 从结果看, 三探测器密度测井仪的长、短源距探测器对地层的响应关系与双源距密度测井仪的长、短源距探测器一致, 而反散射探测器对地层具有明确的响应关系, 其响应关系与长、短源距探测器近似相反, 且其计数率很高. 因此, 在负源距范围内增加第三个探测器是可行的, 这有利于提高密度测井的测量精度和垂向分辨率. 同时表明了 Monte Carlo 方法在核测井仪器早期研制中的有效性, 对仪器设计具有指导作用.

关键词 放射性测井 Monte Carlo 方法 三探测器密度测井 可行性

文章编号 0001-5733(2004)01-164-07 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2002-10-25, 2003-06-15 收修定稿

MONTE CARLO SIMULATION OF THREE-DETECTOR DENSITY LOGGING

WU Wen-Sheng¹ HUANG Long-Ji²

¹ Engineering Physics Department of Tsinghua University 3-8#, Beijing 100084, China

² Resource and Information college of the University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China

Abstract To amend the defects of traditional litho-density logging tool, we propose a scheme of three-detector density logging tool. It adds a backscatter detector in negative spacing range on the basis of traditional dual-detector density tool. With Monte Carlo general program MCNP(3B), it starts from the mechanism of the interaction between photon and formation. Then it calculates various responses of backscatter detector, long spacing detector and short spacing detector, gains photon flux spectrum distribution, the change rules of photon flux with spacing, the relations between photon flux and formation density, the relations between spacing and detecting depth, and count window. Results show that the responses to formation of long and short spacing detectors of the three-detector density tool are the same as that of traditional dual-detector density tool. The backscatter detector has a high count rate and a clear response to formation, which is almost reverse to that of long and short spacing detectors. Therefore, it is feasible to put the third detector in negative spacing range, which will improve measuring precision and vertical resolution. At the same time, it indicates that the Monte Carlo method is effective in the early research of nuclear logging tool, and can direct tool design.

Key words Radioactive logging, Monte Carlo method, Three-detector density logging, Feasibility.

基金项目 国家 973 项目 (G199043311).

作者简介 吴文圣, 男, 1972 年生, 现在清华大学工程物理系博士后研究, 主要从事核测井方法和数据处理研究. E-mail: wwslog@hotmail.com

1 引言

现有的双探测器密度测井仪或改进的岩性密度测井仪均存在明显的缺陷^[1]:垂向分辨率差;测量精度不高;仍受井眼和泥饼的影响;当井眼内有重晶石时,测得的地层光电吸收截面指数 P_e 极不准确;在孔隙度较低的地层中统计起伏较大。

针对这些缺陷,我们设计了一种新的三探测器密度测井仪器,即仪器极板上有 3 个探测器,其中长、短源距探测器与传统密度仪器相类似,第三个探测器是反散射探测器,放置在离放射源很近的位置上,如图 1 所示。加入第三个探测器有如下优势:高计数率会改善测量的统计起伏;增强了垂向分辨率;提高了在低孔隙度地层的测量精度;可对泥饼进行定量补偿^[2]。

本文利用 Monte Carlo 方法^[3]通用程序 MCNP (3B)对三探测器密度测井的可行性进行研究。

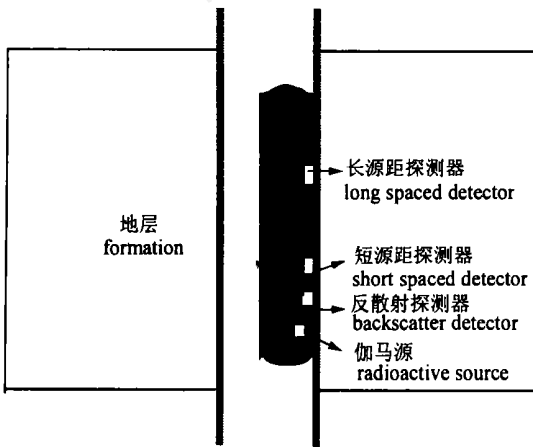


图 1 三探测器密度仪器结构示意图

Fig. 1 The configuration of three-detector density instrument

2 计算模型

考虑到实际情况和计算方便,模型建立为半圆柱状^[4](见图 2)。地层高 75cm,半径从 10~43cm。仪器推靠井壁,外壳厚 5mm,源仓材料是钢,探测器承压壳为铍。源为 0.661MeV¹³⁷Cs 点源,距井壁 1cm,距下屏蔽体 1cm。两块半圆柱状理想屏蔽体,半径 10cm,厚度随源距改变。用距井壁 1cm 的点探测器记录光子通量能谱,探测器距下屏蔽体 4.9cm,距上屏蔽体 5cm。模型之外的空间充满理想屏蔽体。计算中使用了多种方差减小技巧^[5]。记录能量大于

0.150MeV 光子通量,并且保证统计相对误差均小于 1%。计算中用到的物质见表 1。

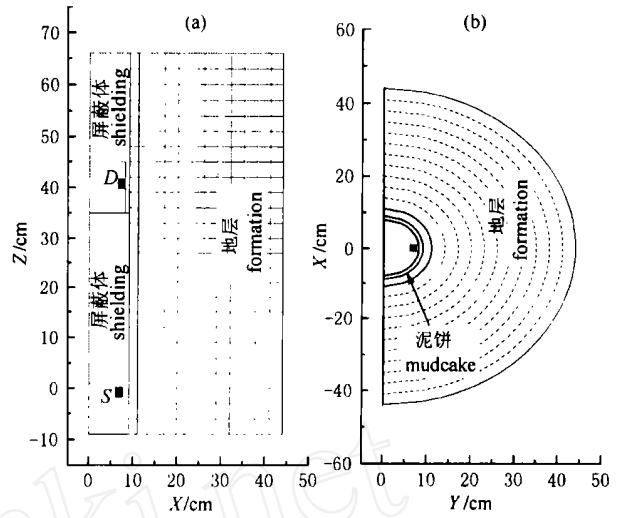


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculating model

表 1 计算中用到的岩性或物质的密度

Table 1 The densities of lithology or material used in the calculation

岩性(物质)	密度(g/cm ³)	电子密度(cm ³)
砂岩	2.650	2.646
石灰岩	2.710	2.708
白云岩	2.870	2.863
蒙脱石	2.060	2.068
钾长石	2.560	2.540
石膏	2.310	2.361
盐岩	2.165	2.074

为了节省计算时间,计算时选择了 3 个具有代表性的源距,即长源距探测器的源距为 40cm,短源距探测器的源距为 20cm,反散射探测器的源距为 4cm。

3 光子通量与源距的关系

考虑纯石灰岩地层骨架,含淡水,对源距 $L = 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60$ cm 计算孔隙度 $\phi = 0, 0.2$ 和 0.4 时光子通量 N_r 与源距 L 的关系。在计算时忽略井眼的影响,只考虑光子在地层中的输运过程。计算结果见图 3 所示。

从图 3a 中可以看出当源距 L 在 10~60cm 之间时,在半对数坐标系下,不同密度的光子通量与源距呈很好的线性关系,随源距增大,密度相同的地层探测器处光子通量几乎呈线性下降,而不同密度地层探测器处光子通量的差异逐渐增大。地层密度越大,光子通量越小。从图 3b 可以看出,当源距 L 在

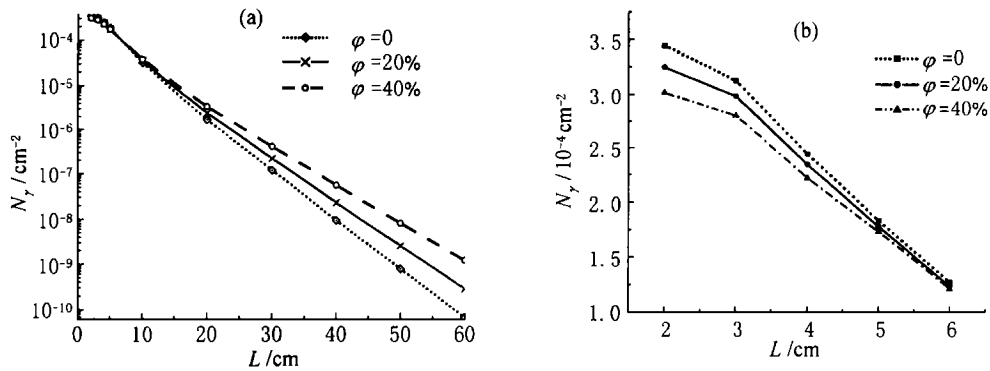


图3 光子通量和源距的关系曲线

(a) $L = 10 \sim 60\text{cm}$; (b) $L = 2 \sim 6\text{cm}$.

Fig. 3 The relationship between photon flux and spacing

3 ~ 6cm 之间,光子通量与源距也呈现良好的线性关系,并且地层密度越大,光子通量越大.

4 光子通量能谱

光子通量能谱的能量范围是 0.010 ~ 0.665 MeV,每道 0.001MeV. 尽管能谱积分计数的相对误差小于 1%,但统计涨落仍较大,在处理能谱时,做了 7 点 FFT 平滑处理.

图 4 显示了纯石灰岩地层条件下几种源距处的

光子通量能谱,由于这些能谱的总计数率相差好几个数量级,为方便比较,对它们以能量 $E = 0.1\text{MeV}$ 光子计数为基准做了归一化. 如图 4a 所示,源距 $L = 10\text{cm}$ 时,不同源距的能谱形状变化较大:随着源距增大, $E > 0.25\text{MeV}$ 能区的计数率对总谱的贡献明显增加, $0.08 \sim 0.25\text{MeV}$ 部分变化规律比较复杂, 0.08MeV 以下部分变化不大; $L = 2\text{cm}$ 的能谱中,在 $E = 0.19\text{MeV}$ 处有明显的单次 Compton 反散射峰,随着源距增加,这一峰的峰位逐渐向高能方向移动,峰高下降,峰宽也明显增加.

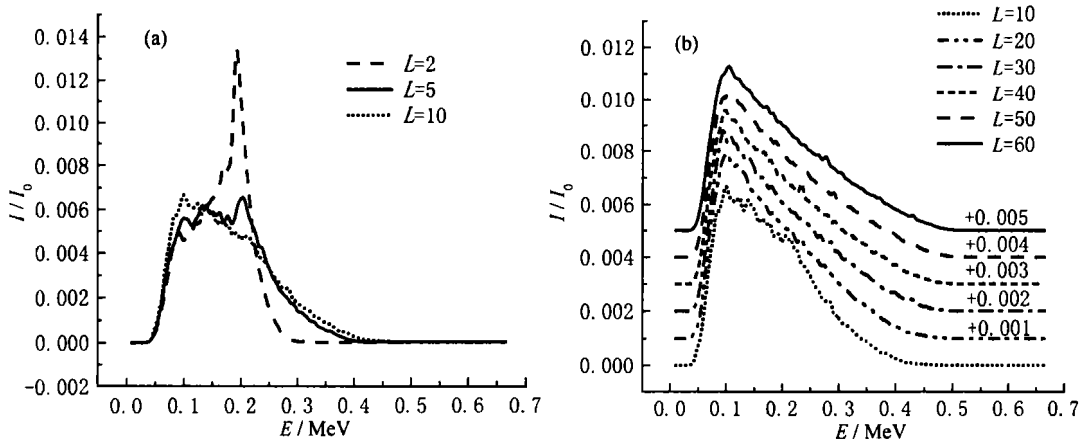


图4 石灰岩地层不同源距处光子通量能谱

图中 I 为各能量段的计数, I_0 为能量 $E = 0.100\text{MeV}$ 光子计数总和;

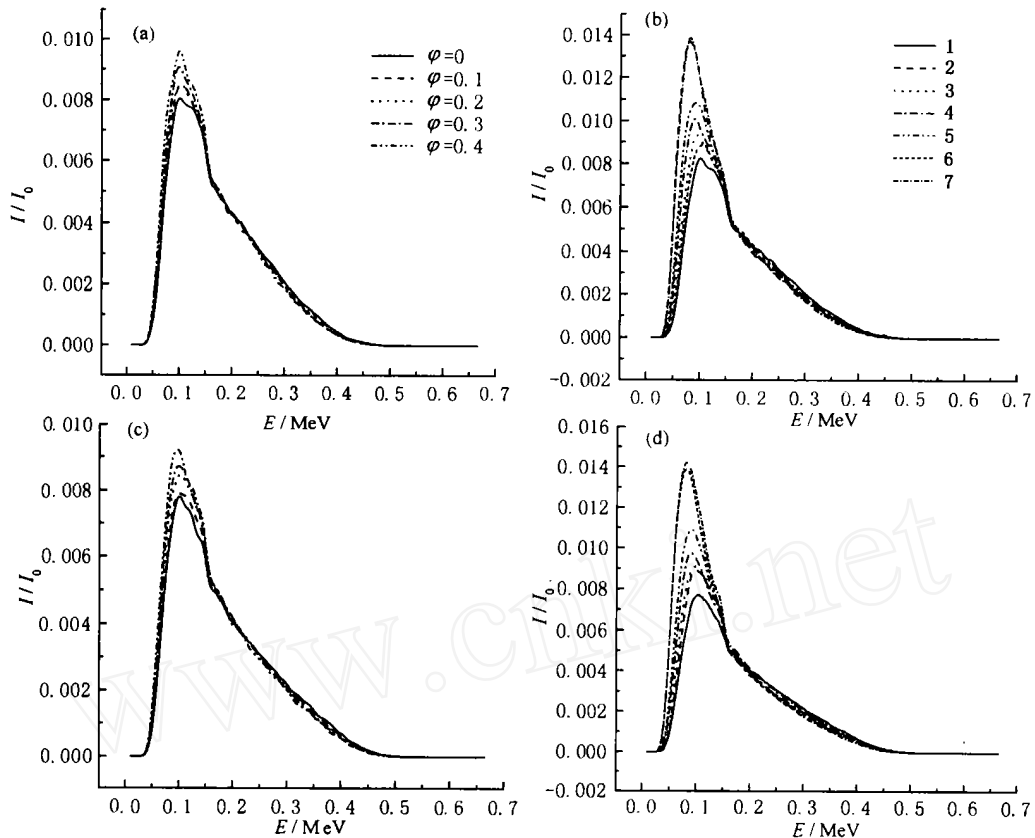
(a) $L = 10\text{cm}$; (b) $L = 10\text{cm}$.

Fig. 4 Photon flux spectrums of various spacing in limestone formation

源距 $L = 10\text{cm}$ 的光子通量能谱见图 4b. 可以看出, $L > 20\text{cm}$ 后能谱形状已经基本稳定,即达到了谱平衡,这些能谱都在 $E = 0.1\text{MeV}$ 处出现极大值. 在 $E > 0.1\text{MeV}$ 段, 0.48MeV 以上部分相对计数率都很低,随着能量降低,光子相对计数率逐渐增大,反应出多次散射后能谱的软化现象;在 $E < 0.1\text{MeV}$ 段,随着能量降低,光子相对计数率逐渐减小,说明光电吸收

逐渐成为主要的作用, 0.04MeV 以下部分相对计数率也很低. 仔细比较后发现, $L > 20\text{cm}$ 后,随着源距增大,能谱在以下方面有着细微变化: $0.08 \sim 0.24\text{MeV}$ 部分略有降低, 0.24MeV 以上部分略有增高.

图 5 显示了不同地层条件下的光子通量能谱. 图 5(a, b) 为源距 $L = 20\text{cm}$ 的能谱图. 图 5a 是孔隙度为零的纯石灰岩和几种孔隙度淡水石灰岩的能谱



1 石灰岩 limestone; 2 盐岩 rocksalt; 3 石膏 gypsum; 4 白云岩 dolomite; 5 钾长石 potassium feldspar;
6 砂岩 sand; 7 蒙脱石 montmorillonite. 下同

图 5 不同地层的光子通量能谱

图中 I 为各能量段的计数, I_0 为能量 $E = 0.100\text{MeV}$ 光子计数总和;

(a, b) $L = 20\text{cm}$; (c, d) $L = 40\text{cm}$.

Fig. 5 Photon flux spectrums of different formations

比较,随着水的体积含量相对增高, $0.04 \sim 0.15\text{MeV}$ 能段相对计数率增高,这主要反映了密度对低能散射谱段的影响. 图 5b 是不同岩性地层的能谱比较,从中明显看出 $0.04 \sim 0.15\text{MeV}$ 能段的相对计数率有明显差异,主要反映地层光电吸收指数 P_e 的影响,这是用散射伽马能谱测井识别岩性的依据,如砂岩和蒙脱石泥岩地层的能谱中这段很高,还可以看出 $E > 0.20\text{MeV}$ 能段的相对计数率受 P_e 影响很小. 图 5(c, d) 显示了不同地层条件下,源距 $L = 40\text{cm}$ 的光子通量能谱,可以看出 40cm 源距处的光子能谱与 20cm 源距处的能谱形状非常相似.

5 光子通量与地层密度的关系

在源距 $L = 4, 20\text{cm}$ 和 40cm 条件下,计算了孔隙度 $\phi = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 含水石灰岩地层以及蒙脱石、岩盐、石膏岩、钾长石、砂岩、白云岩地层的

光子通量. 令孔隙度为零的纯石灰岩地层探测器处通量为 N^* ,任一地层情况下探测器处通量为 N ,光子通量相对变化量 $\ln(N/N^*) = \ln N - \ln N^*$ 与地层密度 ρ_b 关系见图 6. 图中实线对应于不同孔隙度的含水石灰岩点拟合的直线,空心点为石灰岩点,实心点对应其他岩性的地层.

从图 6(a, b) 中可以看出,密度越大相对通量越小;对于不同孔隙度的石灰岩, $\ln(N/N^*)$ 与 ρ_b 呈极好的线性关系;其他岩性地层时, $\ln(N/N^*) \sim \rho_b$ 点则多数偏离这条直线,蒙脱石泥岩、岩盐、钾长石、砂岩、白云岩时的通量偏高,对应测量密度值偏小,石膏的通量偏低,对应测量密度值偏大. 由于淡水的电子密度指数 ρ_e 比它的密度值大,孔隙度较大的地层 ρ_b 值比 ρ_e 大. 对石灰岩地层,刻度时这一偏差已得到校正,而对其他岩性的地层,电子密度指数与密度的偏离就会显示出来. 比较图 6(a, b) 的直线斜率可以看出, $L = 40\text{cm}$ 时斜率的绝对值大一些,

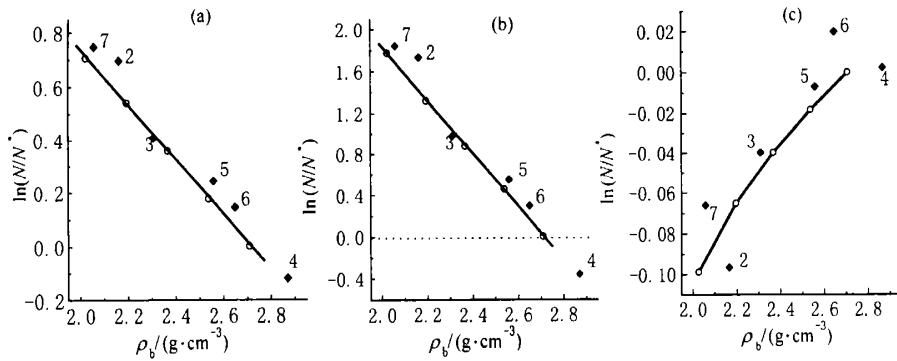


图 6 不同源距时,相对通量与地层密度的关系
(a) $L = 20\text{cm}$; (b) $L = 40\text{cm}$; (c) $L = 4\text{cm}$.

Fig. 6 Relationship between relative photon flux and density in various spacing

说明对地层的分辨率高. 图 6c 是反散射探测器的结果,可以看出,密度越大,相对通量越大,也就是说,探测器计数随密度增加而增加. 不同孔隙度含水的石灰岩点,不在一条直线上.

6 源距与探测深度

在密度测井中记录的光子主要是从井眼出发经地层散射再回到井眼探测器处的光子. 探测器源距不同时,不同探测深度的地层对探测器计数的贡献大小不同,于是就可以得到相应的探测深度. 在优化仪器设计过程中,可以利用这些计算结果,选择合理的源距.

计算时,地层为孔隙度 20% 含淡水的石灰岩,把伽马源放在 (9, 0, 0) 点. 半径从距井轴 10cm 开始增加,依次为 0.3、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30cm 和 33cm. 对源距 $L = 10、20、30、40\text{cm}$,记录探测器处的光子通量,结果见图 7a 所示.

从图 7a 中可以看出,地层径向厚度比较小时,随地层径向厚度的增加,探测器计数增加很快,说明这部分地层对探测器计数贡献很大;而随着地层径向厚度的逐渐增加,探测器计数变化缓慢,到一定距离呈饱和状态(即地层径向厚度的增加已不能带来探测器计数的变化). 从图 7a 中还可以看出不同源距探测器的探测深度是不同的,源距越大其探测深度越大,源距越小其探测深度越小. 这样就可以选择适当的源距,使短源距的探测深度比较浅,尽量多地反映井眼的信息;而长源距探测器在保证统计精度的前提下,可尽量远一些,以更多地反映地层的信息. 实际上源距的选择要受到仪器实际条件的限制.

对于负源距的情况,计算模型的地层仍为孔隙度 20% 含淡水的石灰岩,把伽马源放在 (9, 0, 0) 点. 半径从距井轴 10cm 开始增加,依次为 0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5cm 和 6cm. 对源距 $L = 3、4、5、6\text{cm}$,记录探测器处的光子通量,结果见图 7b 所示.

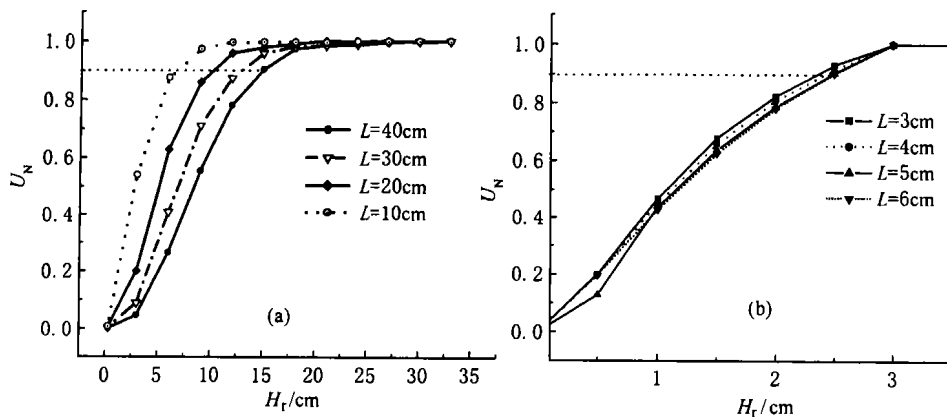


图 7 不同源距探测器计数随地层径向厚度变化的关系曲线
图中 U_N 为归一化计数, H_r 为地层径向厚度.

Fig. 7 Chart for various spacing detector count changing with formation radial thickness

从图 7b 可知,负源距探测器的源距较小,探测深度很浅,这样就能很好地反映泥饼的性质.同时它们的探测深度相差不大.

7 能窗选择

用 Monte Carlo 方法进行能窗选择有两点好处:第一是可以得到单能伽马射线能谱,提高能窗选择的精度,这是实验方法无法达到的;第二是通过模拟计算不同能量分辨率情况下的能谱,以备实际使用中,当探测器能量分辨率变化时可以给出相应的能窗.

在光子通量与地层密度关系的讨论中,均用了 $E > 0.15\text{MeV}$ 的光子通量计数.从图5可以看出,

0.15~0.20MeV 能段受地层光电吸收指数 P_e 影响仍较大,需要重新考虑用 $E > 0.15\text{MeV}$ 的光子通量计数率讨论上述问题.从图 5 还看出,地层 P_e 从小到大的顺序为砂岩、蒙脱石、钾长石、白云岩、石膏、岩盐、灰岩,图 6 中偏离含淡水石灰岩刻度线较大的正是砂岩、蒙脱石、钾长石和白云岩.

图 8 显示了不同能窗的光子通量与 ρ_e 关系曲线.从图中可以看出,随着能窗下限的提高,含淡水石灰岩刻度直线斜率的绝对值逐渐减小,而砂岩、蒙脱石和钾长石地层的光子通量与 ρ_e 交会点却逐渐靠近含水石灰岩刻度直线.但是,能窗下限提高后,光子通量计数率也会下降,适当增加能窗宽度有利于提高统计精度,而 ρ_e 测量的偏差可通过对 P_e 测量来修正.

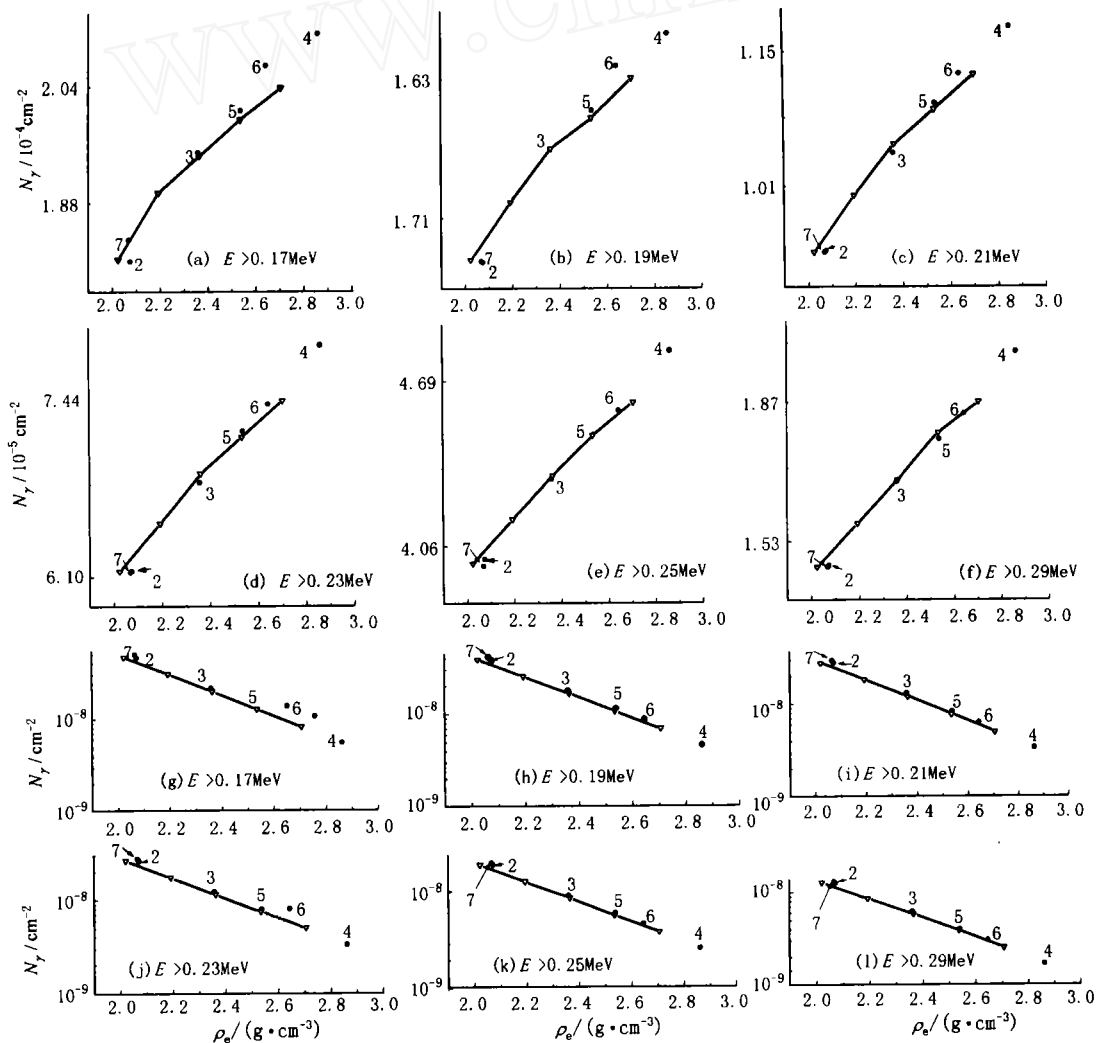


图 8 不同源距处不同能窗的光子通量与电子密度的关系

(a, b, c, d, e, f) $L = 4\text{cm}$; (g, h, i, j, k, l) $L = 40\text{cm}$.

Fig. 8 Relationship between photon flux of different energy window and electronic density at various spacing point

8 结 论

8.1 三探测器密度测井仪的长、短源距探测器对地层的响应关系与双源距密度测井仪的长、短源距探测器一致,而反散射探测器对地层具有明确的响应关系,其响应关系与长、短源距探测器近似相反,且其计数率很高。因此,在负源距范围内增加第三个探测器是可行的,这将有利于提高密度测井的测量精度和垂向分辨率。

8.2 表明 Monte Carlo 方法在核测井仪器早期研制中的有效性,对仪器设计具有指导作用^[6]。

本工作得到了大庆测试技术服务分公司生产测井研究所郑华博士的帮助,特此致谢。

参考文献

[1] 黄隆基. 核测井原理. 山东石油大学出版社, 2000

Huang L J. Nuclear Logging Theory. Shandong: Petroleum University Press, 2000

[2] K A Eyl. High-resolution density logging using a three detector device. SPE28407, 1994

[3] 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. Beijing: Science Press, 1980

[4] 石玉江. 泥浆侵入储集层的动力学特征及其对密度、中子测井响应的研究[硕士学位论文]. 山东: 石油大学勘探系, 1996

Shi Y J. Reservoir dynamics characteristic after mud invasion and its influence on density and compensated neutron log [Master's thesis]. Shandong: Exploration Department of Petroleum University, 1996

[5] L L Carter, E D Cashwell. Particle-transport simulation with the Monte Carlo method. Los Alamos Scientific Laboratory, 1975

[6] 彭 琥. 20 世纪 90 年代核测井进展. 测井技术, 2000, 25(1): 5 ~ 11

Peng H. Nuclear logging progress in 1990's. Well Logging Technology, 2000, 25(1): 5 ~ 11

启 事

1 《地球物理学报》英文网络版查询和浏览方法.

请读者按以下方式查阅 AGU 上的《Chinese Journal of Geophysics》简称 (CHINESE J GEOPHYS) 电子版:

(1) 登录美国地球物理学会 (AGU) 网站, 网址为: <http://www.agu.org>

(2) 点击 AGU 首页左侧栏目中的“Publications”(出版物)项, 进入 AGU 出版物 Publication 页面, 此页面包含所有 AGU 所属刊物和由其登载的中国英文版地球物理刊物。

(3) 在此页面向下滚动至 Journals distributed on-line by AGU 栏目, 即可找到《Chinese Journal of Geophysics》, 点击可进入该刊主页面, 即可查阅摘要和全文。

(4) 阅读全文需要安装 Acrobat Reader (PDF) 软件, 可从网上许多地方下载。

2 在 AGU 阅读或下载 CHINESE J GEOPHYS 文章, 需缴纳一定费用, 每年 100 元人民币, 请跟编辑部联系购买事宜. 电话: 010 - 62007700, 62007696, 62007709.

通信地址: 北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编 100029

E-mail: actageop@mail.icgas.ac.cn