

基于 X 射线和伽马源的密度测井数值模拟

张 锋^{1,2}, 李亚芬^{1,2}, 信 毅³, 苏 波⁴, 吴 赫^{1,2},
张泉滢^{1,2}, 刘军涛^{1,2}

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000;
4. 中国石油集团测井有限公司塔里木事业部, 新疆库尔勒 841001)

摘要:通过 XCOM 程序计算和分析不同介质发生光电效应和康普顿散射的衰减系数随射线能量的变化规律, 并利用蒙特卡罗模拟方法研究基于 X 射线和¹³⁷Cs 伽马源的地层散射能谱以及密度测井响应和精度。结果表明, 由于所采用的 X 射线能量比 0.662 MeV 的伽马射线低, 对于同种地层介质, X 射线衰减快, 密度越大, 差异越明显; 在源距相同的条件下, 较低能量的 X 射线源地层密度响应灵敏度比¹³⁷Cs 伽马源的高, 但受岩性影响更大; 在考虑源强的情况下, 当 X 射线源对应源距为 33 cm、伽马源对应源距为 38 cm 时, X 射线源的计数统计性与伽马源的计数统计性相当, X 射线源的密度响应灵敏度比伽马源的高, 且 X 射线源的密度测量不确定度小, 测量精度高, 而伽马源的密度测量不确定度大, 测量精度低。X 射线源可以替代¹³⁷Cs 伽马源进行密度测井, 但在仪器设计、能谱处理和密度计算等方面还需要进行深入研究。

关键词:X 射线源; 伽马源; 密度测井; 衰减系数; 蒙特卡罗方法

中图分类号:P 631 **文献标志码:**A

引用格式:张锋, 李亚芬, 信毅, 等. 基于 X 射线和伽马源的密度测井数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 60-66.

ZHANG Feng, LI Yafen, XIN Yi, et al. Numerical simulation of density logging based on X-ray and gamma ray sources [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 60-66.

Numerical simulation of density logging based on X-ray and gamma ray sources

ZHANG Feng^{1,2}, LI Yafen^{1,2}, XIN Yi³, SU Bo⁴, WU He^{1,2},
ZHANG Quanying^{1,2}, LIU Juntao^{1,2}

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla 841000, China;
4. CNPC Logging Tarim Business Division, Korla 841001, China)

Abstract: The attenuation coefficient of photoelectric absorption and Compton scattering for different energy rays with the medium are calculated and analyzed by XCOM. The Monte Carlo method is used to compare the scattering spectrum, the response of density logging, and the precision of X-ray and Cs-137 sources. The results show that because the X-ray energy is lower than that of the 0.662 MeV gamma rays, the X-ray attenuation is faster in the same formation, and this difference is more obvious with increased density. At the same source-detector distance, the sensitivity to the density of the lower energy

收稿日期: 2017-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374125, 41574119); 国家科技重大专项(2017ZX05019005-005); 中央高校基本科研业务费专项(14CX05011A, 15CX06008A)

作者简介: 张锋(1970-), 男, 教授, 博士, 研究方向为核测井方法、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟。E-mail: zhxfy_cn@upc.edu.cn。

X-ray source is higher than that of the Cs-137 source, but is dependent on lithology. Considering the source intensity, when the source-detector distance is 33 cm for the X-ray source and 38 cm for the Cs-137 source, respectively, the counting statistics is equal between the two sources. The sensitivity to the density of the X-ray source is higher than that of the Cs-137 source, and the uncertainty of density measurements of the X-ray source is lower than that of the Cs-137 source, which indicates that the density logging precision of the X-ray source is higher than that of the Cs-137 source. It is concluded that X-ray source can replace gamma ray source for density logging, but further research in instrument design, energy spectrum processing and density calculation is needed.

Keywords: X-ray source; gamma ray source; density logging; attenuation coefficient; Monte Carlo method

X 射线产生于高速电子与高原子序数物质相互作用的轫致辐射^[1-2],已广泛应用于众多学科和领域,如 X 射线衍射技术可用来识别矿物,研究晶体特性^[3-5];X 射线 CT 扫描技术可用于疾病的诊断和治疗^[6-7]、材料的物理分析等^[8-10]。近年来,X 射线技术已被应用于地球物理测井领域,进行岩石物质的有效原子序数及密度确定^[11-12]、岩石孔隙结构分析^[13-15]等。由于高强度的 X 射线源在辐射安全和有效改善测井速度方面具有优势^[16],Bayless 等^[17]设计了用于密度测井的 X 射线源的产生装置,Badrizzaman 等^[18]初步模拟研究了 X 射线源密度测井的可行性,但对密度测井中的散射伽马能谱、密度响应及测量精度等还缺乏深入研究。笔者从光子与物质作用的衰减规律入手,分析不同能量的射线与物质的光电效应和康普顿散射差异,并利用蒙特卡罗方法模拟研究 X 射线源和伽马源产生的射线在地层中的散射能谱,对比密度测井响应、计数统计性以及测量精度,为利用 X 射线源进行密度测井的应用奠定基础。

1 不同介质的射线衰减特性

X 射线和伽马光子与地层物质作用过程主要包括光电效应、康普顿效应和电子对效应^[17],而对于能量较低的 X 射线,电子对效应可以忽略。

根据射线与介质的衰减规律,假设入射光子的强度为 I_0 ,经过厚度为 x cm 的地层介质时光子强度为 I ,则有

$$I=I_0\exp[-\rho x(\mu/\rho)].\tag{1}$$

式中, ρ 为介质密度; μ 为总衰减系数; μ/ρ 为质量衰减系数。

显然地层介质的质量衰减系数不同,对射线的衰减吸收不同。为了对比不同介质射线的衰减特性,利用 XCOM 程序^[19]计算了不同能量射线在纯砂岩(SiO_2)、白云岩($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)和石灰岩(CaCO_3)3 种地层介质的总质量衰减系数(μ/ρ)、质量康普顿衰减系数(μ_c/ρ)和光电吸收系数(μ_{ph}),得到

与能量的变化关系如图 1~3 所示。

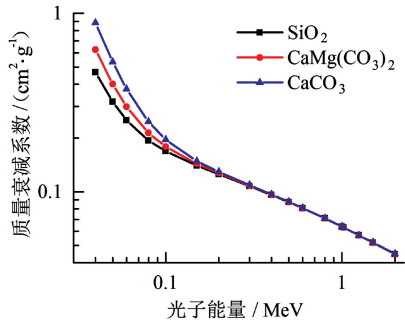


图 1 μ/ρ 与射线能量的关系

Fig. 1 Relationship between total attenuation coefficient and photon energy

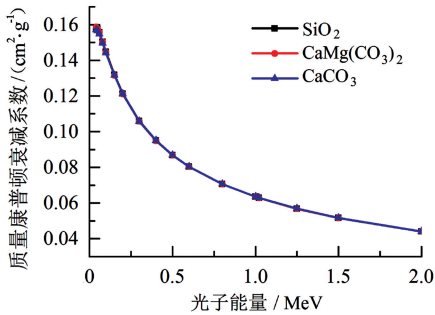


图 2 μ_c/ρ 与射线能量的关系

Fig. 2 Relationship between μ_c/ρ and photon energy

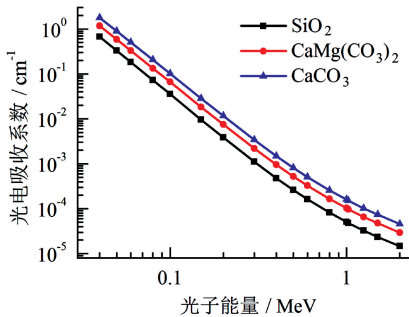


图 3 μ_{ph} 与射线能量的关系

Fig. 3 Relationship between μ_{ph} and photon energy

由图 1 可以看出,总质量衰减系数随光子能量的增加而减小。当光子能量小于 0.1 MeV 时,岩性不同的介质总质量衰减系数存在差异,石灰岩衰减

系数最大,而石英砂岩最小;当光子能量约大于 0.1 MeV 时,岩性不同的介质总质量衰减系数近似相同。

由图 2 可以看出,射线与介质发生康普顿散射的质量衰减系数也随着光子能量的增加而减小,且入射光子的能量一定时 3 种岩性介质的质量康普顿衰减系数近似为常数,即康普顿吸收系数与介质密度成正比。

由图 3 可以看出,光电吸收系数随着光子能量的增加而减小;在能量较低时,不同岩性地层之间的光电吸收系数差异较大,而在能量较高时,不同岩性地层之间的光电吸收系数差异较小。

显然,质量衰减系数、康普顿吸收系数、光电吸收系数都随着光子能量的增加而减小,即低能量的 X 射线源在地层中的衰减吸收比伽马源在地层中的衰减吸收强;且低能量的 X 射线在不同岩性地层中的光电吸收系数差异比伽马射线的大。

2 X 射线和伽马射线源的密度响应模拟

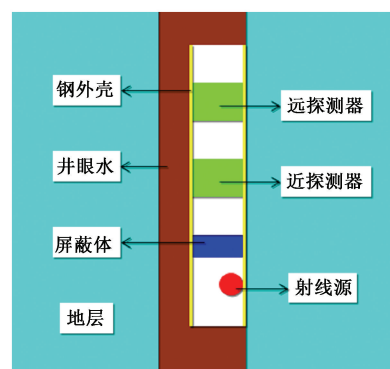
2.1 计算模型

利用蒙特卡罗方法建立地层密度测井模型(图 4(a)),计算模型中,地层尺寸设置为 100 cm×100 cm×100 cm;井眼直径为 21 cm,充满轻钻井液,仪器贴井壁测量;设置地层为纯砂岩、白云岩、石灰岩等物质组成;仪器外壳材料为钢,密度是 7.78 g/cm³;屏蔽体为钨镍铁,密度是 17.78 g/cm³;远近探测器选用 NaI 晶体探测器;采用 MCNP6 程序的 F4 计数方式,计算误差小于 2%。其中 X 射线源是主要能量为 0.15 MeV^[2]的分布源,如图 4(b)所示;Cs-137 伽马源产生的伽马射线能量为 0.662 MeV。

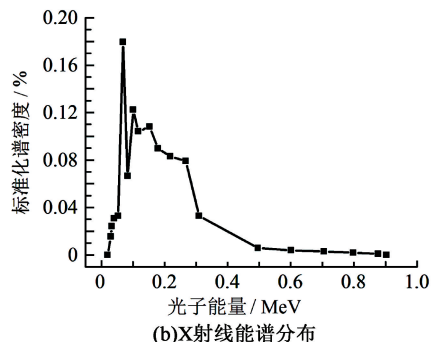
2.2 散射能谱

源距为 25 cm 情况下,在孔隙度分别为 10% 和 35% 的纯石灰岩地层,利用蒙特卡罗方法模拟可得 X 射线分布源和伽马源的地层散射能谱,如图 5 所示,左面为伽马源对应的散射能谱的纵坐标,右面为 X 射线源对应的散射能谱的纵坐标。

从图中可以看出,在源距相同条件下,X 射线源对应的散射能谱的光子计数率较低,探测到的光子的能量范围较小;而伽马源对应的散射能谱的光子计数率较高,探测到的光子的能量范围较大。X 射线在地层中的衰减吸收比伽马射线在地层中的衰减吸收快。在源能量一定的情况下,孔隙度越大(密度越小),探测器的计数率越大。



(a)地层密度测井 Monte Carlo 计算模型



(b)X射线能谱分布

图 4 地层密度测井 Monte Carlo 计算模型及 X 射线能谱分布

Fig. 4 Monte Carlo calculation model for formation density logging and X-ray energy spectrum

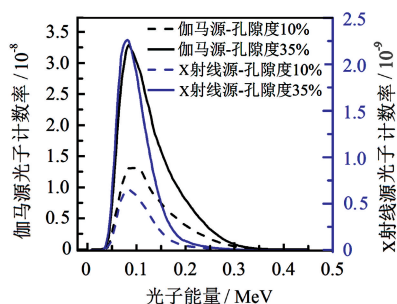


图 5 X 射线源和伽马源在一定地层条件下的散射能谱

Fig. 5 Scattering spectrum of X-ray and gamma ray sources

分析可知,X 射线源能量较低而伽马源能量较高,因此 X 射线在地层中的衰减吸收较强,即康普顿效应和光电吸收效果增强,从而导致总体计数率降低,且地层介质的密度越小,对光子的衰减吸收越弱。

源距为 25 cm、孔隙度为 10% 情况下,X 射线分布源和伽马源分别在砂岩、石灰岩、白云岩地层的散射能谱如图 6 所示。从图 6 可以看出,在低能谱段,砂岩计数率最大,石灰岩计数率最小,在高能谱段,砂岩计数率最大,白云岩计数率最小;在不同岩性地层,谱峰所对应的能量值也不同;砂岩的总计数最

大,石灰岩的总计数最小。

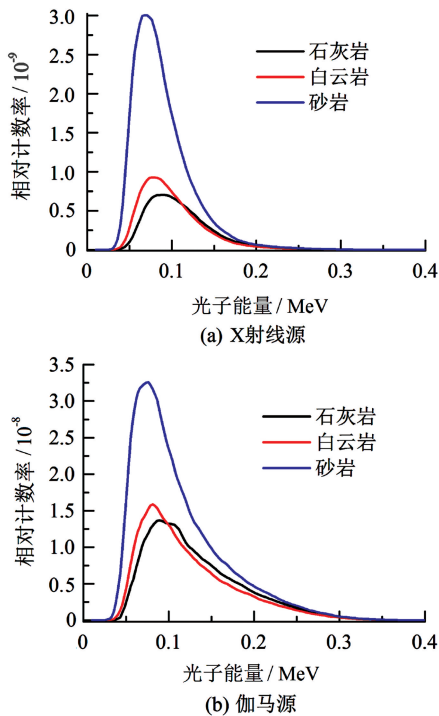


图 6 X 射线源和伽马源分别在不同岩性地层的散射能谱

Fig. 6 Scattering spectrum of X-ray and gamma ray sources in different formations

分析可知,低能谱段计数率主要与光电吸收截面有关,砂岩的光电吸收截面最小,白云岩次之,石灰岩最大;光电吸收截面越大,计数率越小。高能谱段的计数率主要与地层密度有关,孔隙度相同时,砂岩的密度最小,石灰岩次之,白云岩最大;密度越大,计数率越小。由于石灰岩的光电吸收截面最大,所以低能谱段光电吸收效果较强,导致谱峰右移,白云岩右移程度较小(与砂岩地层的散射能谱对比)。

由图 6 可知,伽马源在石灰岩和白云岩地层的散射能谱的交点靠左,而 X 射线源在石灰岩和白云岩地层的散射能谱交点右移。低能谱段的计数主要反映地层岩性,高能谱段的计数主要反映地层密度。分析可知,与伽马源相比,X 射线经地层散射的计数率在更大的能量范围内受岩性影响,如图 3 所示,源能量越低,光电吸收系数越大,且不同岩性地层所对应的光电吸收系数之间的差异越大。

2.3 密度响应

选取源距为 25 cm,孔隙度分别为 0、10%、20%、30%、40% 和 50% 的纯石灰岩和纯砂岩地层,分别模拟 X 射线源和伽马射线源的地层散射能谱,计算密度时 X 射线源选择的能量窗为 0.10 ~ 0.20

MeV,而伽马源能量窗为 0.12 ~ 0.30 MeV,可得到图 7 所示的密度响应关系。

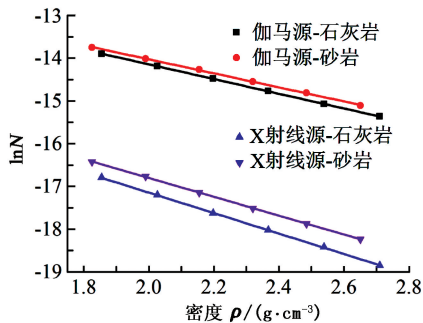


图 7 X 射线源和伽马源的密度响应

Fig. 7 Density response of tool with different sources

根据探测器探测光子计数率 N 与地层密度 ρ 的关系^[20]:

$$\ln N = A\rho + B. \tag{2}$$

其中

$$A = -L\mu_m, B = \ln N_0.$$

式中, L 为源距; μ_m 为质量康普顿衰减系数。密度响应灵敏度为 $\frac{\partial \ln N}{\partial \rho} = A$,该值越大,说明测量装置对地层密度的分辨率越高。

由图 7 可知,光子计数率随密度的增大而减小,且利用 X 射线源计算的不同岩性地层的密度响应差异比利用伽马源计算的差异(响应曲线之间的间隙)大;因此较低能量的 X 射线源密度测井受岩性的影响比伽马源的大。在石灰岩地层,X 射线源对应的密度响应灵敏度为 2.394,而伽马源对应的密度响应灵敏度为 1.720;在砂岩地层,X 射线源对应的密度响应灵敏度为 2.204,而伽马源对应的密度响应灵敏度为 1.641。因此,源距一定时,较低能量的 X 射线源比伽马源的密度测井响应灵敏度高。由图 2 也可以看出,源能量越小, μ_m 越大,密度响应灵敏度越高。

2.4 计数统计性和测量精度

2.4.1 计数统计性与源距

Bayless^[17] 和 Lii^[21] 等人通过实验证明 X 射线源的强度相当于大于 1.11×10^{12} 的放射源,而伽马源的强度一般为 $(0.37 \sim 1.11) \times 10^{11}$,即 X 射线源和伽马源的强度至少差 1 个数量级。

在纯石灰岩地层,取 X 射线源的密度窗为 0.10 ~ 0.20 MeV,伽马源密度窗为 0.12 ~ 0.30 MeV。考虑源强,假定 X 射线源的强度相当于 1.11×10^{12} 的放射源,伽马源的强度为 7.4×10^{10} ;利用蒙特卡罗方法计算得到密度测井计数与源距的关系,结果如图

8 所示。

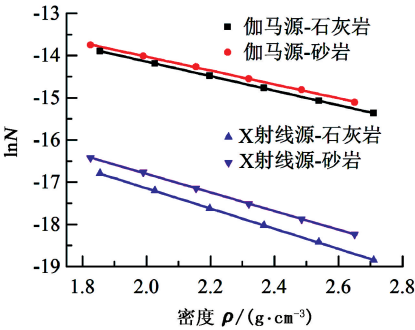


图 8 X 射线源和伽马源的密度测井
计数与源距的关系

Fig. 8 Relationship between photon counting
and spacing of X-ray and gamma ray sources

从图 8 可以看出,X 射线源密度测井计数随源距变化较快,而伽马源的密度测井计数随源距变化较慢;由于较低能量的 X 射线源所对应的 μ_m 值比伽马源所对应的 μ_m 值大,即 X 射线源所对应的 A 值比伽马源所对应的 A 值大。考虑射线源的强度时,当 X 射线源所对应的源距为 33 cm、伽马源所对应的源距为 38 cm 时,X 射线源的计数统计性与伽马源的计数统计性相当。

2. 4. 2 密度响应灵敏度与源距

在孔隙度分别为 0、10%、20%、30%、40% 和 50% 的纯石灰岩地层,取 X 射线源的密度窗为 0. 10 ~ 0. 20 MeV,伽马源密度窗为 0. 12 ~ 0. 30 MeV。利用蒙特卡罗方法计算得出密度响应灵敏度与源距的关系,结果如图 9 所示。

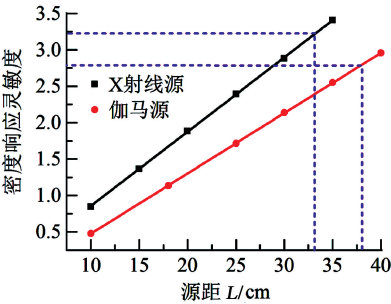


图 9 X 射线源和伽马源的密度响应
灵敏度与源距的关系

Fig. 9 Relationship between density response
sensitivity and spacing of X-ray and gamma
ray sources

由图 9 可以看出,X 射线源对应的密度响应灵敏度随源距的增加而增大得快,而伽马源所对应的密度响应灵敏度随源距的增加而增大得慢;且当 X 射线源所对应的源距为 33 cm、伽马源所对应的源

距为 38 cm 时,X 射线源的密度响应灵敏度比伽马源的高。

2. 4. 3 测量精度

由图 8 和图 9 可知,X 射线源对应源距为 33 cm、伽马源对应源距为 38 cm 时,计数统计性相当,且 X 射线源的密度响应灵敏度比伽马源的密度响应灵敏度高。因此,可以计算并对比 X 射线源对应源距为 33 cm、伽马源对应源距为 38 cm 时的密度测井不确定度,不确定度计算公式^[22]如下:

$$\Delta\rho=\frac{1}{A\sqrt{N_t}}. \tag{3}$$

式中, $\Delta\rho$ 为密度测量不确定度; N_t 为密度窗总计数。

计算结果如表 1 所示。

表 1 X 射线源和伽马源密度测井的不确定度
Table 1 Uncertainty of X-ray and gamma
ray sources density logging

地层密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	X 射线源密度测井不 确定度 $\Delta\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	伽马源密度测井不 确定度 $\Delta\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
2. 710	0. 037	0. 043
2. 539	0. 028	0. 034
2. 368	0. 021	0. 027
2. 197	0. 016	0. 021
2. 026	0. 012	0. 016
1. 855	0. 009	0. 013

由表 1 可知,源距为 33 cm 时 X 射线源密度测井的不确定度值要比源距为 38 cm 时伽马源密度测井的不确定度值小;分析可知,不确定度值越小,密度测量精度越高,即源距为 33 cm 时 X 射线源的密度测量精度要比源距为 38 cm 时伽马源的密度测量精度高。

3 结 论

(1)X 射线源和¹³⁷Cs 伽马源的能量不同,地层介质对其的衰减吸收不同。用 XCOM 程序计算所得的不同能量的射线与介质相互作用的衰减规律可知,质量衰减系数、康普顿吸收系数、光电吸收系数都随着光子能量的增加而减小,即低能量的 X 射线源在地层中的衰减吸收比伽马源在地层中的衰减吸收强;入射光子的能量一定时,质量康普顿吸收系数几乎不受介质岩性的影响,康普顿吸收系数与地层介质密度成正比;且低能量的 X 射线在不同岩性地层中的光电吸收系数差异比伽马射线的差异大。

(2)从利用蒙特卡罗方法模拟所得的 X 射线源和伽马源在不同密度地层介质以及不同岩性地层介质中的散射能谱可知,地层密度越大,光子的衰减吸

收越明显;X射线比伽马射线在地层介质中的衰减吸收强;与伽马源相比,X射线经地层介质散射的光子计数率在更大的能量范围内受岩性影响。

(3)在源距一定条件下,较低能量的X射线源比伽马源的地层密度响应灵敏度高,且X射线源密度测井受岩性的影响比伽马源大。在考虑源强的情况下,当X射线源密度测井所对应的源距为33 cm、伽马源密度测井所对应的源距为38 cm时,X射线源密度测井的计数统计性和伽马源密度测井的计数统计性相当,X射线源密度响应灵敏度、密度测量精度比伽马源的高。

(4)X射线源可以替代伽马射线源进行地层密度测井,但在仪器设计、能谱处理和密度计算等方面还需进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] JOHNS C M, LIN R P. The derivation of parent electron spectra from bremsstrahlung hard X-ray spectra [J]. *Solar Physics*, 1992,137(1):121-140.
- [2] 蒯斌,邱爱慈,王亮平,等. 强脉冲超硬X射线产生技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(11): 1739-1743.
KUAI Bin, QIU Aici, WANG Liangping, et al. Study on the technology of strong pulsed X-ray generation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11): 1739-1743.
- [3] BISH D L, BLAKE D F, VANIMAN D T, et al. First X-Ray diffraction results from Mars Science Laboratory: mineralogy of rocknest Aeolian bedform at Gale Crater[C//OL]//44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013[2017-12-12]. <https://ntrs.nasa.gov/search>.
- [4] KOROVKIN M, ANANIEVA L, NEBERA T, et al. Assessment of quartz materials crystallinity by X-ray diffraction [C]//Materials Science and Engineering Conference Series. Materials Science and Engineering Conference Series. Bristol:IOP Publishing, 2016.
- [5] GABRIELIAN R T. Features of X-ray diffraction in monolithic crystal systems [J]. *Journal of Contemporary Physics*, 2016,51(1):65-72.
- [6] FUKUTAKE K, ISHIWATARI T, TAKAHASHI H, et al. Investigation of ossification in the posterior longitudinal ligament using micro-focus X-ray CT scanning and histological examination [J]. *Diagnostic Pathology*, 2014,10(1):1-11.
- [7] OLLIER M, GARCIER J M, NAUGHTON G, et al. CT scan procedure for lung cancer screening in asbestos-exposed workers [J]. *Chest*, 2014,146(2):76-77.
- [8] KELKAR S, BOUSHEY C J, OKOS M. A method to determine the density of foods using X-ray imaging [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015,159:36-41.
- [9] CESAREO R, BRUNETTI A, GOLOSIO B, et al. Material analysis with a multiple X-ray tomography scanner using transmitted and scattered radiation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004,525(1/2):336-341.
- [10] TABATA M, HATAKEYAMA Y, ADACHI I, et al. X-ray radiographic technique for measuring density uniformity of silica aerogel [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013,697(1):52-58.
- [11] JUSSIANI E I, APPOLONI C R. Effective atomic number and density determination of rocks by X-ray microtomography [J]. *Micron*, 2015,70:1-6.
- [12] LI F, LIU Z, SUN T, et al. A confocal three-dimensional micro X-ray scattering technology based on Rayleigh to Compton ratio for identifying materials with similar density and different weight percentages of low-Z elements [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, 112:163-168.
- [13] OLIVEIRA M F S, LIMA I, BORGHI L, et al. X-ray microtomography application in pore space reservoir rock [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012,70(7):1376-1378.
- [14] OLIVEIRA M F S, LIMA I, FERRUCIO P L, et al. Petrophysical analysis of limestone rocks by nuclear logging and 3D high-resolution X-ray computed microtomography [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011,652(1):905-910.
- [15] 罗瑞,查明,何皓,等. 南堡凹陷古近系泥页岩孔隙结构特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(2):23-33.
LUO Rui, ZHA Ming, HE Hao, et al. Characteristics of pore structures in Paleogene shales in Nanpu Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016,40(2):23-33.
- [16] 于华伟,杨锦州,张锋. 随钻 D-T 中子孔隙度测井低灵敏度和岩性影响校正方法研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014,38(3):45-49.
YU Huawei, YANG Jinzhou, ZHANG Feng. Correction method of low sensitivity and lithology effect of D-T neutron porosity logging-while-drilling [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014,38(3):45-49.
- [17] BAYLESS J R, BURKHART C P, KUTHI A. Advances in X-ray and neutron source technologies for logging applications [C]//SPWLA 34th Annual Logging Symposi-

- um, 1993. Calgary: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1993.
- [18] ADRUZZAMAN A. An assessment of fundamentals of nuclear-based alternatives to conventional chemical-source bulk-density measurement [J]. *Petrophysics*, 2014, 55(5): 415-434.
- [19] BERGER M J, HUBBELL J H, SELTZER S M, et al. XCOM: photon cross sections database, NIST standard reference database 8 (XGAM) [EB/OL]. [2011-11-25]. <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
- [20] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001.
- [21] LII G K, BECKER A J, CORRIS G W, et al. Density logging using an electron linear accelerator as the X-ray source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1987, S24-25(3): 990-994.
- [22] KNOLL G F. Radiation detection and measurement [M]. Hamilton: Wiley, 1989.

(编辑 修荣荣)