

磁化率测井响应特征及主控因素分析

杜威^{1,2},王红才²,马天骄¹,杨涛³,杨星辰²

(1.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2.中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
3.中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘要:磁化率测井是一种高效环保的测井手段,其理论和应用方法的不完善是未在油气田广泛应用的根本原因。以河套盆地第四系为研究对象,综合研究区A、B、C钻探孔取心资料和磁化率测井数据,结合沉积构型和地磁理论,确立磁化率测井与各项地质因素的关系,明确磁化率测井响应的主控因素,建立研究区磁化率测井与常规测井相结合的测井响应模式。结果表明:磁化率在有机质丰度高、(顺)磁性矿物丰富、泥质—粉砂质夹层发育和泥浆侵入段呈现高幅度异常;磁化率与有机质含量的变化趋势高度吻合,研究区钻探井段磁化率最大值为 137×10^{-5} SI,磁化率与磁性矿物相对含量的相关系数达0.87,与水平层理和泥浆侵入规模呈正相关;磁化率标准偏差百分比曲线反映沉积环境和水动力条件的变化。结合测井响应特征,磁化率测井可广泛应用于碎屑岩沉积层序研究、烃源岩评价、粘土矿物识别和精细储层表征。

关键词:磁化率测井 磁化率 响应特征 主控因素 第四系 测井解释 河套盆地

中图分类号:P631.82

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)02-0052-06

Response characteristics of magnetic susceptibility logging and controlling factors analysis

Du Wei^{1,2}, Wang Hongcai², Ma Tianjiao¹, Yang Tao³, Yang Xingchen²

(1.College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2.Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing City, 100081, China; 3.Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing City, 100081, China)

Abstract: Magnetic susceptibility logging is recognized as an efficient and eco-friendly logging method, nevertheless, which is barely used in oil and gas field fundamentally due to the imperfection of theoretical guidance and application methodology. Therefore, taking the Quaternary in Hetao basin as an example, combined with sedimentary architecture and theories of geomagnetism, relationship between magnetic susceptibility logging and geological factors was established based on core data from drilling holes of A, B and C in the study area and the measured magnetic susceptibility data from logging, and the main factors controlling response of magnetic susceptibility logging were determined. On this basis, well-logging interpretation pattern was established by combining both conventional well logging and magnetic susceptibility logging. The results manifest that the magnetic susceptibility is abnormally high when the formation has high abundance of organic matter and paramagnetic minerals, frequent occurrence of muddy-silty intercalations and drilling fluid penetration. The variation trend of magnetic susceptibility is highly consistent with the organic matter content. The maximum value of magnetic susceptibility is 137×10^{-5} SI in the study area, and the correlation coefficient between magnetic susceptibility and the relative content of paramagnetic minerals is 0.87. The magnetic susceptibility also has positive correlation with the scale of horizontal bedding and drilling fluid penetration. Moreover, curve φ , which represents the systematic error of magnetic susceptibility, can reflect the fluctuation of sedimentary environment and hydro-dynamic conditions. Combined with well-logging response characteristics, magnetic susceptibility logging could be widely applied in the research of sedimentation and se-

收稿日期:2016-12-09。

作者简介:杜威(1992—),男,山东东营人,在读硕士研究生,从事沉积学和储层地质学研究。联系电话:18801003186, E-mail: 135061055@qq.com。

基金项目:中国地质调查局项目“特殊地质地貌区填图试点岩石物性测量”(DD20160060)。

quence stratigraphy, evaluation of source rock, identification of clay minerals and fine reservoir description.

Key words: magnetic susceptibility logging; magnetic susceptibility; response characteristics; controlling factors; Quaternary; well logging interpretation; Hetao basin

磁化率测井可用于研究各种岩矿石的磁性差异以及由此引起的地磁场变化,多应用于固体矿物勘探和矿产品位确定。磁化率测井的探测项目可分为3类:总场、场分量和磁化率。自20世纪90年代以来,针对大陆钻探岩心的岩石磁学和磁各向异性^[1-2],地表岩浆岩、变质岩的磁化率和剩磁强度^[3-4],粒度组分与磁化率的关系^[5-7],有机质含量对磁性分布的影响^[8-10],含铁类粘土矿物对磁化率的影响^[11]和磁组构与古环境的关系^[12]进行了研究。近年来,研究了古地磁应用^[13-17]。Wang Xisheng等建立了黄土高原古地磁—古气候模式^[13]。Li Guanhua等论述了山脉磁化率差异形成机理和古土壤序列的磁性特征^[14]。Beata Górká-Kostrubiec等将磁性特征应用于黑钙土形成研究^[15]。Clara Gómez-García等将海湾尾矿磁化率应用于海湾沉积物充填研究^[16]。Monika Chudanicová等将磁化率应用于土壤环境和污染研究^[17]。研究成果证实岩石和沉积物的磁化率与各项地质因素存在相关关系,且可应用于其他领域。但前人仅简要讨论了磁化率与各类地质因素的关系,并未确定其规律,也未将磁化率应用于油气资源评价中;未建立磁化率测井响应与各类地质因素的关系,也未与传统测井技术相结合,不能达到指导地质资源勘探开发的目的。为此,笔者针对河套盆地第四系,运用磁化率测井与常规测井结合的方式,建立测井响应模式。

1 地质概况

研究区位于河套盆地,河套盆地位于华北克拉通的北缘,夹于阴山构造带与鄂尔多斯盆地之间,为一个近东西向的狭长型盆地。主要目的层为第四系全新统和更新统,主要发育扇三角洲、曲流河和湖泊相沉积,受2个方向物源控制,形成扇三角洲—曲流河二元结构:研究区北部山麓处冲积扇连片发育,向湖盆方向推进,形成大规模扇三角洲群;西南部山麓发育一条自西向东展布的曲流河,河道向湖盆方向迁移。扇三角洲沉积主要发育扇三角洲平原分流河道、前缘辫状水道和前缘河口坝沉积微相;曲流河沉积主要发育河道点砂坝、天然堤、决口扇、泛滥平原、河漫沼泽和废弃河道沉积微相。单一扇三角洲前缘辫状水道砂体厚度约为10~15

m,单一扇三角洲前缘河口坝砂体厚度约为5~20 m,单一曲流河河道点砂坝砂体厚度约为10~20 m,以分选中等—好的细砂和粉细砂为主,结构成熟度高,成分成熟度中等,石英含量约为50%~60%,长石含量约为20%~30%,其他矿物含量约为20%;部分层段(铁)黑云母含量达20%,其他粘土矿物含量为30%。研究区河道冲刷面砂砾岩普遍含有角闪石和(铁)黑云母等磁性矿物,生物化石常见贝壳、植物根系、生物遗体和虫孔。湖相泥岩富含丰富有机质,甚至碳化程度极高形成碳质层。砂岩以浅灰色、灰色和灰黑色为主,部分层段呈现棕黄色和杂色。研究区于2015年9月部署A、B、C共3个钻探孔。A钻探孔垂直深度为380 m,主要钻遇扇三角洲、湖泊和少量重力流沉积;B和C钻探孔垂直深度分别为186和180 m,主要钻遇曲流河沉积。

2 测井响应特征

由于现代磁化率测井仪器具备自动压力和温度校正功能,且100~2 000 m范围内地层压力对岩石磁化率的影响可以忽略^[18],所以地表实验室条件下的测量结果与地下地质条件下的测量结果相符。对研究区A、B和C钻探孔进行磁化率测井研究,其中对A和C钻探孔主要测量磁化率(K);对B钻探孔,除测量磁化率外,还取样获得天然剩磁强度(NRM)、饱和磁化强度(M_s)、剩余磁化强度(M_{rs})、矫顽力(B_c)和剩磁矫顽力(B_{cr})等磁性参数。由于碎屑岩剖面的磁化率数量级为 10^{-5} ,为了进行更为直观的解释,将磁化率单位调整为 10^{-5} SI,磁化率标准偏差百分比(φ)曲线区间以“0”对称。

研究发现,磁化率测井曲线在不同埋深均出现中—高幅度异常;磁化率标准偏差百分比曲线作为磁化率测量的衍生曲线,呈现平直背景下的局部小尖峰,且不同埋深处小尖峰的方向差异较大。对A钻探孔全井段磁化率分析发现,与相邻层段相比,湖泛面处有机质富集段表现为高幅度异常,其磁化率最大值为 137×10^{-5} SI,最小值为 32×10^{-5} SI,平均值为 $50 \times 10^{-5} \sim 90 \times 10^{-5}$ SI。其他层段因为含有少量有机质,磁化率显著增大(图1)。在B钻探孔钻遇的河漫沼泽和废弃河道的有机质富集带,磁化率和 NRM 变化趋势一致表现为高幅度异常,且矫顽力与

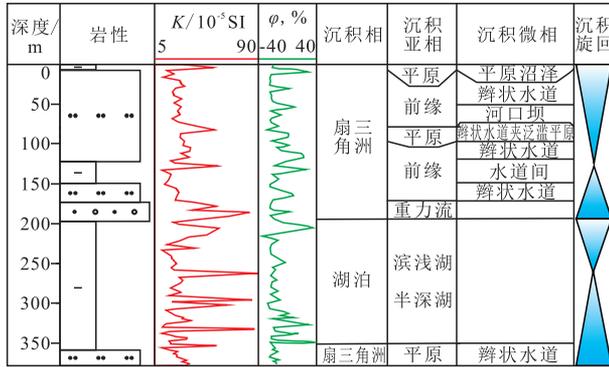


图1 沉积微相边界和湖泛面处测井响应特征

Fig.1 Logging response characteristics of micro-facies boundary and lacustrine flooding surface

剩磁矫顽力曲线接近(图2)。B和C钻探孔钻遇磁性矿物发育段,当粉—细砂岩中富含绿泥石、(铁)黑云母和角闪石等顺磁性矿物时,磁化率会出现高幅度异常(图3a);当中—粗砂岩中含有云母矿物时,磁化率值低平(图3b);当河床滞留砂砾岩中存在多种顺磁性矿物且相对含量较高时,也会出现高幅度异常(图3c)。B和C钻探孔钻遇泥质—粉砂质夹层和水平层理的磁化率具有明显异常响应。对于泥质—粉砂质夹层,当粉—细砂岩中泥质和粉砂质含量相差较大时,磁化率呈现中等幅度异常,而当两者含量接近时,磁化率则呈现高幅度异常(图4a)。B和C钻探孔钻遇的水平层理段的磁化率频繁出现幅度异常,且幅度波动较大(图4b)。研究区钻探地层极少发育斜层理,磁化率未呈现规律性变化(图4c)。另外,A,B,C钻探孔钻遇泥浆侵入段的磁化率常出现中—高幅度异常,且幅度变化较大(图4d)。

磁化率标准偏差百分比曲线在沉积微相边界呈现中等幅度尖峰,在沉积微相内部由于水动力和沉积物粒度的变化,会呈现小尖峰,而在最大湖泛

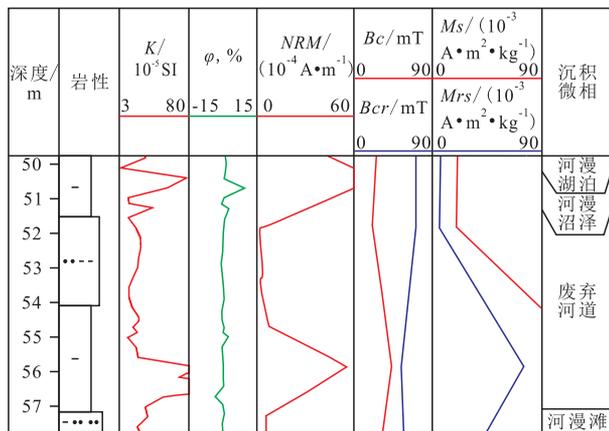
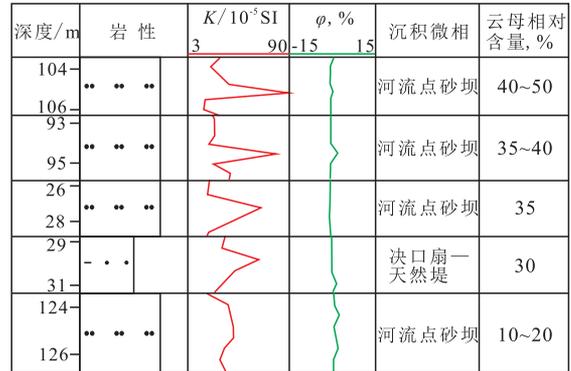
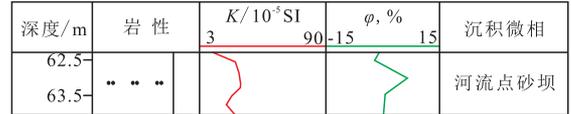


图2 有机质富集带测井响应特征

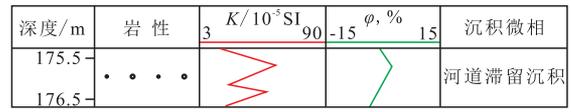
Fig.2 Logging response characteristics of organic-abundant sections



a—云母含量与磁化率的关系



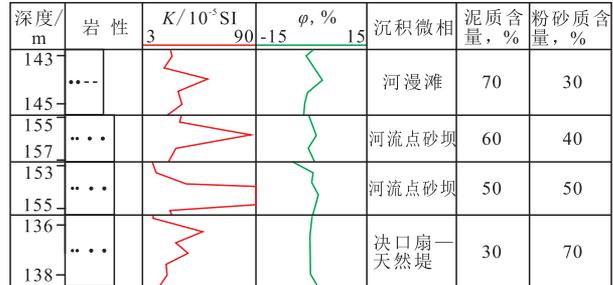
b—中—粗砂岩中含有云母时的磁化率



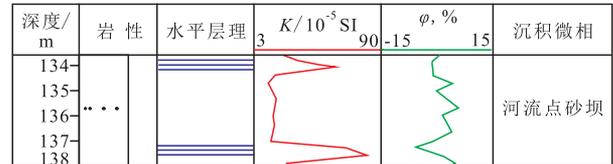
c—河床滞留砂砾岩中存在顺磁性矿物且相对含量较高时的磁化率

图3 磁性矿物发育段测井响应特征

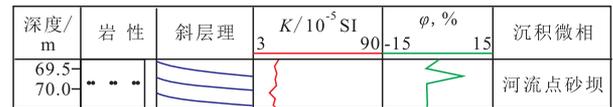
Fig.3 Logging response characteristics of sections where magnetic minerals dominate



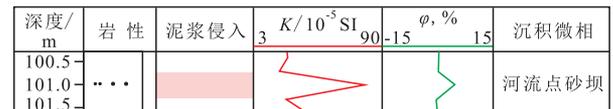
a—曲流河泥质—粉砂质夹层



b—水平层理



c—强水动力层理



d—泥浆侵入段

图4 泥质—粉砂质夹层、水平层理、强水动力层理和泥浆侵入段测井响应特征

Fig.4 Logging response characteristics of horizontal bedding, muddy-silty intercalations, strong hydraulic bedding and drilling fluid penetration

面附近则呈现低平(图4a)。微弱的能量变化也可以在磁化率标准偏差百分比曲线上表现出来,以曲线平直段为基线(“0”线),负异常表示沉积环境由氧化变为还原,水动力由强变弱,沉积物粒度由粗变细;正异常表示沉积环境由还原变为氧化,水动力由弱变强,沉积物粒度由细变粗。

3 主控因素分析

磁化率测井响应特征分析结果表明磁化率异常主要受有机质丰度、粘土矿物类型与含量、砂体内部发育水平层理和泥质—粉砂质夹层以及渗透层泥浆侵入等因素控制。通过对研究区岩心的描述和统计分析,确定了磁化率测井响应主控因素。

3.1 有机质丰度

烃源岩排烃是有机质转化为油气并运移至储层的过程。有机质发育层段作为潜力烃源岩,其磁化率高的原因是富含铁磁性硫化铁^[19],与有机质和油气本身无关,所以磁化率在烃源岩处会出现高幅度异常,储层则呈低平。磁化率与有机质含量的变化趋势一致,对应关系明显(图5a),表明高磁化率与烃源岩具有良好的对应关系。

3.2 粘土矿物类型与含量

在常见的沉积岩造岩矿物中,顺磁性矿物包括黑云母、角闪石和绿泥石。富含以上3种矿物的粉—细砂岩磁化率测井曲线常出现尖峰,其异常幅度与磁性矿物相对含量呈正相关(图5b)。在成分成熟度中等偏上的砂岩储层中,顺磁性矿物主要为云母和绿泥石,因其他粘土矿物磁化率偏低,磁化率测井过程中磁化率贡献均来源于以上2种矿物。

3.3 砂体内部发育水平层理和泥质—粉砂质夹层

河流相和扇三角洲相沉积是研究区油气勘探重点目标,点砂坝更是油气有利储集带。但无论何种类型河道,其沉积过程中均存在水动力条件变化。通过储层构型研究对研究区第四系河道砂体进行精细解剖,确定内部泥质—粉砂质夹层分布规律。当水动力条件减弱时,在点砂坝内部形成泥、粉砂质泥或泥质粉砂夹层,造成砂体内部非均质性较强,对油气开采不利。泥质—粉砂质夹层通常发育弱水动力层理,如水平层理和低角度斜层理。

磁性矿物在泥质—粉砂质沉积物中较为富集,普遍发育水平层理。水平层理处磁化率幅度异常频繁,波动较大,其异常幅度大小与水平层理的发育规模呈正相关(图5c)。对于泥质—粉砂质夹层(泥质与粉砂质相对含量之和为100%),当砂体以

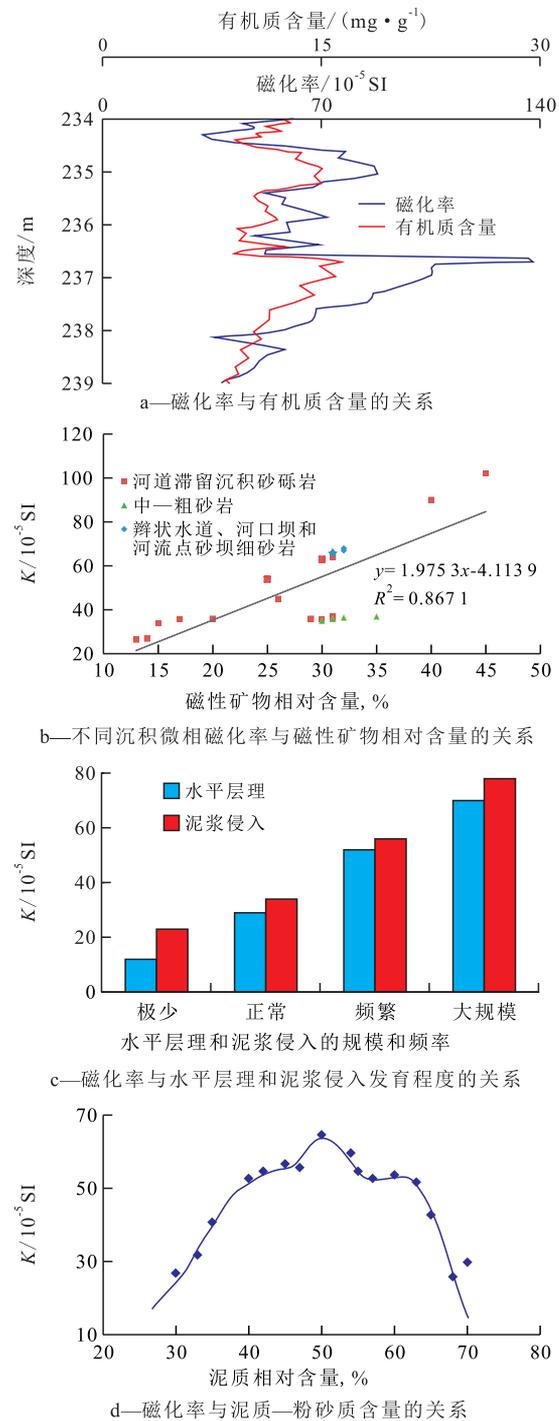


图5 测井响应主控因素定量分析

Fig.5 Quantitative analysis for dominant factors of well-logging response

细粒物质为主时,磁化率异常幅度与泥质—粉砂质含量呈以50%为对称轴的二次函数关系,即当泥质与粉砂质各占50%时,磁化率测井曲线异常幅度最大(图5d)。

3.4 渗透层泥浆侵入

当钻遇高渗透层时,常发生泥浆侵入,微电位和微梯度电阻率测井叠合是定性判断泥浆是否侵入地层的方法之一。泥浆侵入层段磁化率常出现

异常,其异常幅度与泥浆侵入的程度和规模呈正相关(图5c)。泥浆侵入造成磁化率异常的原因可能是钻井液中存在磁性矿物,所以,不同配方的钻井液导致的磁化率异常幅度有很大差异,即异常幅度也与泥浆的配方有关。

4 测井响应模式

单一测井曲线具有多解性,所以在解释过程中结合自然电位、自然伽马和电阻率系列测井,建立综合测井响应模式(图6)。

含顺磁性矿物砂岩段 砂岩作为储层若仅含有油气,则其磁化率呈现低平值,而杂基、胶结物和岩屑中常含有粘土矿物,导致储层磁性发生巨大改变。当绿泥石、角闪石或黑云母相对含量超过20%时,磁化率测井曲线出现明显异常。含顺磁性矿物砂岩段在测井曲线上表现为高磁化率,自然伽马曲线为钟形、箱形或漏斗形。

富有机质泥岩段 磁化率与有机质含量呈正相关性,富有机质泥岩段在测井曲线上表现为自然伽马曲线贴近基线和高磁化率。

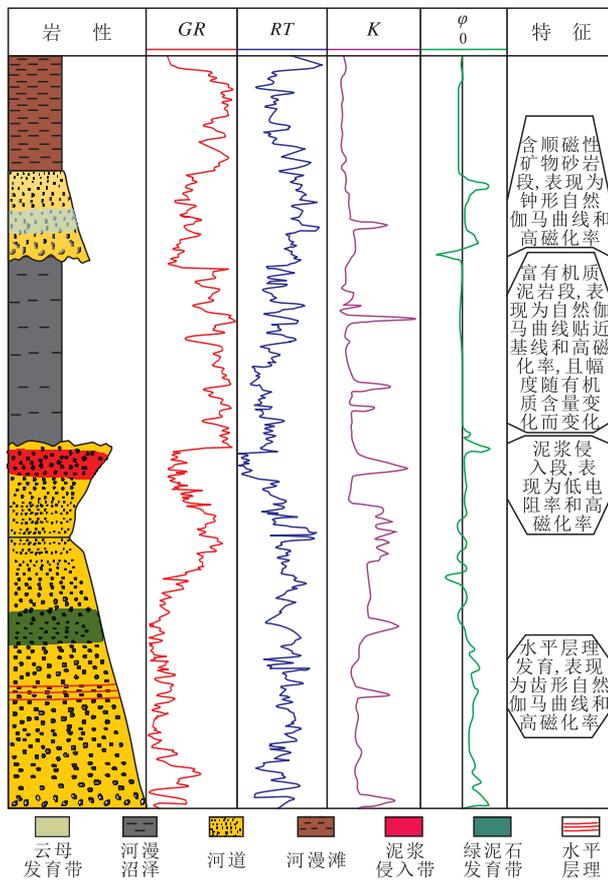


图6 测井响应模式

Fig.6 Comprehensive patterns of magnetic susceptibility logging interpretation

泥浆侵入砂岩段 砂岩作为渗透层,常发生泥浆侵入。泥浆侵入砂岩段在测井曲线上表现为低电阻率和高磁化率。

砂体内部发育水平层理和泥质—粉砂质夹层 泥质—粉砂质夹层是磁化率的主要贡献者,通常形成于弱水动力条件下,发育水平层理。在测井曲线上表现为高磁化率,自然伽马曲线为齿形。

此外,磁化率标准偏差百分比指示沉积环境与水动力变化,可作为辅助曲线,提高磁化率曲线的分辨能力,具体表现为:①纯泥岩段和砂岩段磁化率标准偏差百分比曲线呈低平,贴近基线;②泥质砂岩和砂质泥岩段磁化率标准偏差百分比曲线在基线左右偏移,偏移幅度代表环境变化的强度和快慢,负异常指示泥岩,正异常指示砂岩;③最大海(湖)泛面及附近表现为贴近基线或微弱波动;④磁化率标准偏差百分比曲线相邻高异常指示沉积微相渐变;⑤指示A/S和高频海(湖)平面变化。

5 结论

不同沉积微相的磁化率测井响应特征不同,主要受到有机质丰度、粘土矿物类型与含量、砂体内部发育水平层理与泥质—粉砂质夹层、渗透层泥浆侵入以及沉积环境和水动力条件影响。根据磁化率测井异常响应与上述地质因素具有的普遍相关关系,便可识别有机质含量高的地层,区分烃源岩和储层,识别最大海(湖)泛面,预测烃源岩或页岩储层,并半定量评价有机质丰度。在致密砂岩气勘探中,自生绿泥石对深埋藏条件下砂岩孔隙具有重要保存作用,利用磁化率测井异常可以识别绿泥石富集带,从而预测绿泥石衬边成岩相致密砂岩油气藏甜点区。综合磁化率测井曲线、磁化率标准偏差百分比曲线和自然伽马曲线,可以识别储层内部各种规模的泥质夹层或泥质条带,直观反映沉积物粒度、沉积环境和水动力变化,指导油气田开发。

综上所述,磁化率测井可用于对碎屑岩剖面的研究,但能否推广到深盆地层、碳酸盐岩、蒸发岩、火山岩和变质岩的研究中仍需进一步探讨。

参考文献:

[1] 张红杰,潘和平,骆森,等. 中国大陆科学钻探主孔100~2000 m测井磁化率和磁三分量分析[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 608-614.
Zhang Hongjie, Pan Heping, Luo Miao, et al. Analysis on magnetic susceptibility and magnetic tricomponent data from well log-

- ging in the main hole (100–2000 m) of CCSD [J]. *Geoscience*, 2005, 19(4): 608–614.
- [2] 杨振宇, Moreau M G. Montcornet 钻孔岩芯的古地磁研究[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(5): 652–657.
Yang Zhenyu, Moreau M G. Paleomagnetic study of the Montcornet drilled core [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(5): 652–657.
- [3] 孟小红, 余钦范, 郭友钊, 等. 毛北榴辉岩古地磁及岩石磁学初探[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 32(4): 533–539.
Meng Xiaohong, Yu Qinfan, Guo Youzhao, et al. A pilot study on paleomagnetism and rock magnetism of Maobei eclogite [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(4): 533–539.
- [4] 曾庆理, 刘庆生, 郑建平, 等. 中国大陆科学钻探主孔正片麻岩磁性及深部流体活动[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 39(12): 1915–1926.
Zeng Qingli, Liu Qingsheng, Zheng Jianping, et al. Magnetism of granitic gneiss from Chinese continental scientific drilling main hole and fluid activities [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(12): 1915–1926.
- [5] 李萍, 李培英, 张晓龙, 等. 冲绳海槽沉积物不同粒级的磁性特征及其与环境的关系[J]. *科学通报*, 2005, 50(3): 262–268.
Li Ping, Li Peiying, Zhang Xiaolong, et al. Magnetic characteristics of different grain size of sediments in Okinawa trough and its relationship with environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 262–268.
- [6] 舒强, 李吉均, 赵志军, 等. 苏北盆地XH-1#钻孔沉积物磁化率与粒度组分相关性变化特征及其意义研究[J]. *沉积学报*, 2006, 24(2): 276–281.
Shu Qiang, Li Jijun, Zhao Zhijun, et al. A correlation between magnetic susceptibility and the content of different grain sizes of XH-1# core in north Jiangsu basin and its significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(2): 276–281.
- [7] 张永栋, 王均平, 魏明建, 等. 北京市昌平区钻孔岩芯的磁化率与粒度组份变化的相关性研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 572–579.
Zhang Yongdong, Wang Junping, Wei Mingjian, et al. Correlation between the content of different grain size and magnetic susceptibility in core Changping [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 572–579.
- [8] 胡雪峰. “黄土-古土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 7–12.
Hu Xuefeng. Influence of iron oxides and organic matter on magnetic susceptibility in the loess-paleosol sequence [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 7–12.
- [9] 王秋良, 袁胜元, 李长安. 江汉平原江陵剖面有机碳含量、碳同位素和磁化率的古气候意义[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(4): 59–62.
Wang Qiuliang, Yuan Shengyuan, Li Changan. Paleoclimate significance of the total organic carbon and organic carbon isotope and magnetic susceptibility of the Jiangling section, Jianghan plain, Hubei Province [J]. *Geological Science and Technology Informa-*
- tion*, 2006, 25(4): 59–62.
- [10] 张俊辉, 夏敦胜, 张英, 等. 干旱区泥炭样品加热过程中磁学特征的变化研究[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(6): 938–945.
Zhang Junhui, Xia Dunsheng, Zhang Ying, et al. Magnetic properties during heating of the peat sediments in arid regions [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(6): 938–945.
- [11] 王建, 刘泽纯, 姜文英, 等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义[J]. *地理学报*, 1996, 51(2): 155–163.
Wang Jian, Liu Zechun, Jiang Wenying, et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(2): 155–163.
- [12] 李冠华, 夏敦胜, 赵爽, 等. 新疆塔城地区黄土沉积的磁学特征及其对古环境变化的指示[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1565–1575.
Li Guanhua, Xia Dunsheng, Zhao Shuang, et al. Magnetic properties and palaeoclimatic implication of the loess deposits in Tacheng, Northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(6): 1565–1575.
- [13] Wang Xisheng, Yang Zhenyu, Chen Yun, et al. Deciphering magnetoclimatological patterns of late Early to early Middle Pleistocene loess-paleosol sequences in the western Chinese Loess Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 130: 37–46.
- [14] Li Guanhua, Xia Dunsheng, Jin Ming, et al. Magnetic characteristics of loess-paleo-soil sequences in Tacheng, northwestern China, and their paleo-environmental implications [J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 87–96.
- [15] Beata Górka-Kostrubiec, Maria Teisseyre-Jeleńska, Sylwiak Dytłow. Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development [J]. *Catena*, 2016, (138): 91–102.
- [16] Clara Gómez-García, Fatima Martín-Hernandez, José Ángel López García, et al. Rock magnetic characterization of the mine tailings in Portman Bay (Murcia, Spain) and its contribution to the understanding of the bay infilling process [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 120: 48–59.
- [17] Monika Chudaničová, Simonm Hutchinson, Jan Hradecký, et al. Environmental magnetism as a dating proxy for recent overbank sediments of (peri-) industrial regions in the Czech Republic and UK [J]. *Catena*, 2016, (142): 21–35.
- [18] 杨涛, 刘庆生, 吴耀, 等. 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔100~2000m区间磁化率的变异特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 2089–2094.
Yang Tao, Liu Qingsheng, Wu Yao, et al. Characteristics of magnetic susceptibility in the depth of 100–2000m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 2089–2094.
- [19] 郎元强, 胡大千, 刘畅, 等. 南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 573–587.
Lang Yuanqiang, Hu Daqian, Liu Chang, et al. Mineralogy study of magnetic susceptibility of rocks along the coast of the northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(2): 573–587.