



自然伽马能谱测井在阜新盆地沙海组下段油层的应用 ——以辽阜地 2 井为例

张德军^{1,2}, 张晓川³, 赵洪伟¹, 陈树旺¹, 张 健¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 3. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032

摘 要: 阜新盆地油气调查与勘探历史悠久, 油气发现虽多, 有的井甚至初期获得了少量产能, 但却无一持续稳产。2017 年, 辽阜地 2 井在阜新盆地沙海组下段获得了高产工业油流, 日产 15.3 m³, 实现了油气调查勘探的重大突破。为了深入研究阜新盆地沙海组下段的地层特性, 运用自然伽马能谱测井资料, 对辽阜地 2 井沙海组下段的泥质含量、黏土矿物类型以及沉积环境等进行分析, 明确了沙海组下段的泥质含量及其变化情况, 查明沙海组下段形成于氧化与弱还原交互的沉积环境, 水动力条件弱(以低能为主)。本研究为进一步认识沙海组下段储层特征提供了依据, 有助于阜新盆地后续的油气勘探及理论研究。

关键词: 阜新盆地; 下白垩统; 沙海组; 自然伽马能谱; 黏土矿物; 沉积环境; 辽宁省

APPLICATION OF NATURAL GAMMA-RAY SPECTROMETRY LOGGING IN THE LOWER SHAHAI FORMATION IN FUXIN BASIN: A Case Study of LFD-2 Well

ZHANG De-jun^{1,2}, ZHANG Xiao-chuan³, ZHAO Hong-wei¹, CHEN Shu-wang¹, ZHANG Jian¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Liaoning Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: The oil-gas survey and exploration in Fuxin Basin has a long history. Despite quite a few oil-gas discoveries and even low production obtained from some wells in the beginning, none of them have sustainable and stable production. In 2017, high-yield industrial oil flow was obtained from LFD-2 well in the Lower Shahai Formation of Fuxin Basin, with a daily production of 15.3 m³, achieving a major breakthrough in oil-gas survey and exploration. To further study the stratigraphic characteristics of Lower Shahai Formation in Fuxin Basin, the natural gamma-ray spectrometry logging data are used to analyze the shale content, clay mineral type and sedimentary environment of Lower Shahai Formation in LFD-2 well, which ascertains the shale content and its variation. It is concluded that the Lower Shahai Formation was formed in a sedimentary environment of interactions between oxidation and weak reduction, with weak hydrodynamic conditions (mainly low energy). The study provides a basis for further understanding of the reservoir characteristics of Lower Shahai Formation and contributes to the following oil-gas exploration and theoretical research in Fuxin Basin.

Key words: Fuxin Basin; Lower Cretaceous; natural gamma-ray spectrometry; clay mineral; sedimentary environment; Liaoning Province

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-04-09. 编辑: 黄欣.

基金项目: 国家自然科学基金项目“石炭纪—三叠纪陆地生态系统的演变”(42294328014); 中国地质调查局项目“东部重点盆地新区新层系油气资源调查评价”(DD20230022)、“东北地区地层古生物地质调查”(DD20230220).

作者简介: 张德军(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事古生物学和地层学研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//532413639@qq.com

通信作者: 赵洪伟(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事油气地质研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//18972804@qq.com

0 引言

阜新盆地石油地质勘探历史悠久,其勘探历程可追溯到1934年日本人在阜新露天煤矿中发现“黏性油状物”^[1].据《阜新煤田之石油矿床概要》中的报道,阜新盆地东梁一带有4口井喷涌出天然气和少量的石油^[1-2].20世纪90年代,阜新盆东梁构造带和清河门-艾友构造带实施油气探井9口,虽有两口井(阜参2井、阜气1井)在沙海组获得了工业气流,但油气勘探一直没有重大发现^[3].近年,阜新盆地辽阜地2井在沙海组下段获得了油气勘探的重大突破,日产油15.3 m³,打破了盆地数十年来油气勘查的僵局^[4-7].针对性地开展辽阜地2井沙海组下段泥质含量、黏土矿物类型以及沉积环境等地层特性研究,对进一步认识沙海组下段储层特征、研究沉积环境以及评价生油岩潜力等具有重要的理论和现实意义.

有研究表明,黏土矿物可造成油气层产量下降70%^[8],因此,确定黏土矿物的成分与含量对油气层保护研究至关重要.自然伽马能谱测井(NGS)是在自然伽马测井(GR)基础上发展起来的一种地球物理研究方法,它不仅可以反映地层中总的伽马放射性强度,还能定量地测量地层中铀(U)、钍(Th)、钾(K)的含量^[9].大量研究证实,自然伽马能谱测井数据在计算地层中的泥质含量、识别高放射性渗透层、识别岩性、分析黏土矿物类型、研究沉积环境、评价生油岩等方面发挥着至关重要的作用^[10-14].本研究在阜新盆地辽阜地2井沙海组下段油气勘探获得重大突破的基础上,利用自然伽马能谱测井资料对沙海组下段开展泥质含量的计算、黏土矿物类型以及沉积环境等的分析研究,旨在为进一步认识和刻画沙海组下段的储层特征,探讨当时的沉积环境等基础地质理论研究和油气调查勘探提供可靠依据.

1 研究概况

阜新盆地地处中国辽宁省西部,呈北北东—北东向展布,南北长约130 km,东西宽10~20 km,面积约2 000 km²^[3].阜新盆地属陆内双断陷型地堑盆地,东侧的闾山断裂和西侧的松岭断裂是盆地的主体构造,二者均向盆内倾斜^[15].盆地总体历经了白垩纪断陷和走滑两个演化阶段,形成了洼隆相间的构造格局(图1),自北向南划分为新邱洼陷、阜新构造带、海州洼陷、

东梁构造带、伊吗图洼陷等多个次级构造单元^[3,16].盆地内白垩纪地层发育,自下而上为早白垩世义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组和孙家湾组,岩性主体为巨厚的火山岩建造、碎屑岩建造和煤系地层,最大沉积厚度约6 000 m,其中湖相沉积约2 800 m^[17].

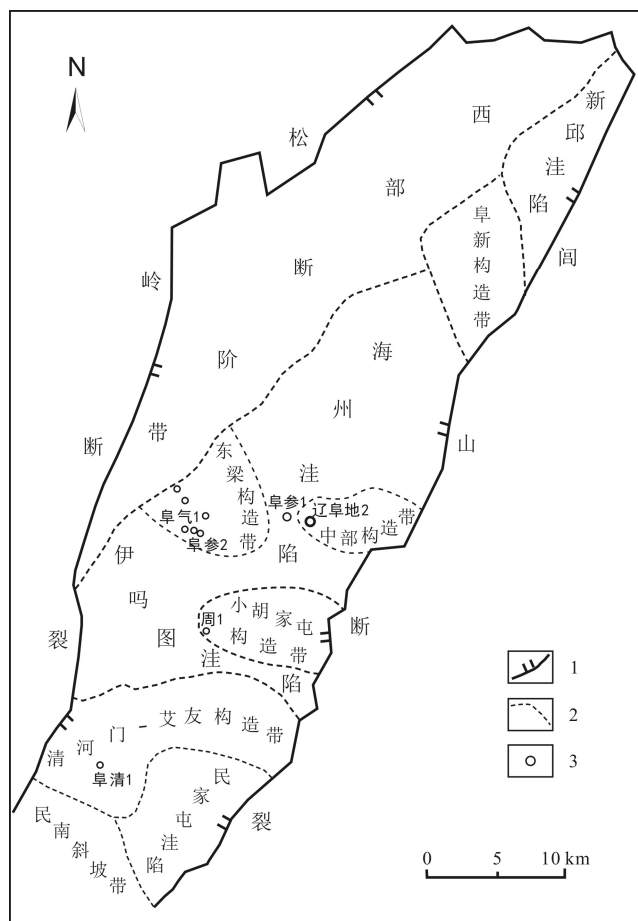


图1 阜新盆地构造区划图

(据文献[3]修改)

Fig. 1 Tectonic division map of Fuxin Basin

(Modified from Reference [3])

1—边界断层(border fault); 2—构造单元线(boundary of tectonic unit);
3—钻孔(borehole)

辽阜地2井位于阜新市东梁镇西五道桥子村西,地理坐标为41°52′55.2″N,121°36′28.6″E,地处阜新盆地海州洼陷中部构造带(图1).该井38.01~718.24 m使用PSJ2型测井仪采集常规9项测井数据;718.24~1 200.00 m使用ECLIPS-5700测井仪器采集自然伽马能谱(NGS)等组合测井数据.全井段岩屑录井,并在862.22~886.15 m井段进行取心(进尺23.93 m,心长22.97 m,收获率95.98%).自上而下钻遇第四系表土

(0~59.0 m);孙家湾组绿灰色和灰绿色含砾粗砂岩、粗砂岩、砂岩(59.0~106.0 m);阜新组灰绿色、灰色和深灰色粗砂岩、砂岩、粉砂岩和泥岩不等厚互层夹煤层和砾岩(106.0~334.0 m);沙海组上段的巨厚灰黑色、灰色泥岩夹薄层粉砂岩、细砂岩(334.0~703.0 m)以及沙海组下段(703.0~1 200.0 m,未穿)灰色砾岩、含砾粗砂岩、厚层泥岩夹多层煤层(图 2)。

辽阜地 2 井沙海组下段的 703.00~900.00 m 井段多处见油迹、油斑和油浸级别的岩屑,其中 862.22~886.15 m 取心段见油斑—油浸砂砾岩 10.36 m。测录井综合解释油层 7.4 m/1 层,差油层 8.5 m/3 层,油水同层 2 m/1 层^[4]。完钻后上提管柱时,管柱表面覆满原油,地面循环系统油花较多。用 QYB-120-2 电潜泵固定下深 500 m,对 718.24~930.00 m 裸眼段进行 24 小时连续抽汲实验(持续 8 天),累计排液 742.6 m³,累计产油 127.6 m³(抽排原油 96.3 m³,自溢原油 31.3 m³),折算日产液 89.1 m³,日产油 15.3 m³,实现了工业油流的突破。

为了更深入地认识阜新盆地辽阜地 2 井沙海组下段的沉积特征,本次研究利用自然伽马能谱(NGS)测井数据对 718.24~1 200.00 m 井段开展黏土矿物的含量、类型以及沉积环境分析。

2 自然伽马能谱测井的应用

2.1 计算泥质含量

砂泥岩地层中泥质含量一般用常规测井的自然伽马计算^[18]。然而,由于泥质岩石(富含黏土矿物)具有良好的吸附性^[10],其沉积时会吸附大量的铀离子^[19-20],且铀含量还与地层中有机质含量及含铀重矿物有关^[13],导致使用常规自然伽马曲线计算泥质含量时,结果易受铀含量及其放射性的影响而失真。自然伽马能谱测井资料中,钾含量和钍含量与泥质含量有较稳定的线性关系,且不受地层中放射性矿物的影响^[18]。因此,使用自然能谱测井中的无铀伽马(CGR)计算地层中的泥质含量更科学合理,计算方法采用周全等^[13]的公式。

使用无铀伽马计算辽阜地 2 井 718.24~1 200.00 m 井段的泥质(黏土矿物)含量,取心段(862.22~886.15 m)的计算结果与岩心具有高度的一致性(图 3),说明计算方法可行,结果可信。这对明确测试井段的泥质含量特征,识别和校正其余岩屑录井井段的岩性特征以

及岩性归位发挥了关键性的作用,研究结果为后续阜新盆地沙海组下段的勘探开发提供了科学合理的储层参数。

2.2 识别黏土矿物类型

常见的黏土矿物主要有蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石和云母等,不同类型的黏土矿物之间铀、钍、钾含量存在差异,如蒙脱石有低钾的特征;伊利石有明显的高钾特征;高岭石则有高钍低钾特征^[21]。利用斯伦贝谢公司黏土矿物分析图版^[22],通过 Th/K 比值定性确定黏土矿物类型。在 Th-K 交会图中,Th/K>12 的属高岭土型,3.5~12 属蒙脱石,2.0~3.5 为伊利石,1.5~2.0 为云母类,0.6~1.5 为海绿石,0.3~0.6 为长石,小于 0.3 的为蒸发岩^[23]。

对辽阜地 2 井沙海组下段(718.24~1 200 m)自然伽马能谱测量,识别了黏土矿物的类型——沙海组下段(油层)的黏土矿物类型以伊蒙混层和伊利石为主,含蒙脱石(图 4)。

2.3 分析沉积环境

地层中钍、铀、钾的含量与沉积环境的关系,通常高能环境下钍的含量高于低能环境,铀、钾含量低能环境高于高能环境^[23],Th/K 可以反映沉积能量大小,高能环境下 Th/K 值高,低能环境下 Th/K 值低,其中比值 10 以上为高能环境,10~6 为亚高能环境,6~3 为低能环境^[20]。此外,钍和钾的含量还与黏土密切相关。钍和钍的含量与氧化还原环境有关,它们的自身特性造成了在不同的沉积环境中分异堆积,一般情况下,钍在外生作用下常以钍酰离子的形式存在,易溶于水,随风化、淋滤作用迁移,遇还原环境沉淀堆积,而钍却正好相反,不溶于水的特性导致它在物源处存在更多残留^[21],导致富有机质的还原环境中,Th/U 值低;氧化环境下 Th/U 值高,因此,可以使用钍铀比值分析沉积环境。经验统计结果显示,Th/U>7 时,主要为陆相泥岩和铝土矿,属风化完全、有氧化和淋滤作用的陆相沉积;比值 2~7,指示为氧化-还原的过性沉积环境;Th/U<2 时,则为强还原环境下的海相沉积^[13, 18, 20]。

辽阜地 2 井沙海组下段地层岩性主要为深灰色—灰色砾岩、砂砾岩,灰黑色—深灰色泥岩夹含砾砂岩、细砂岩、粉砂和煤层。Th-K 和 Th-U 交会图显示,Th/K 值的范围为 2.5~8.0,表明水动力条件弱,以低能为主;Th-U 值大多数分布在 2.0~20.0 之间(图 5),指示沉积

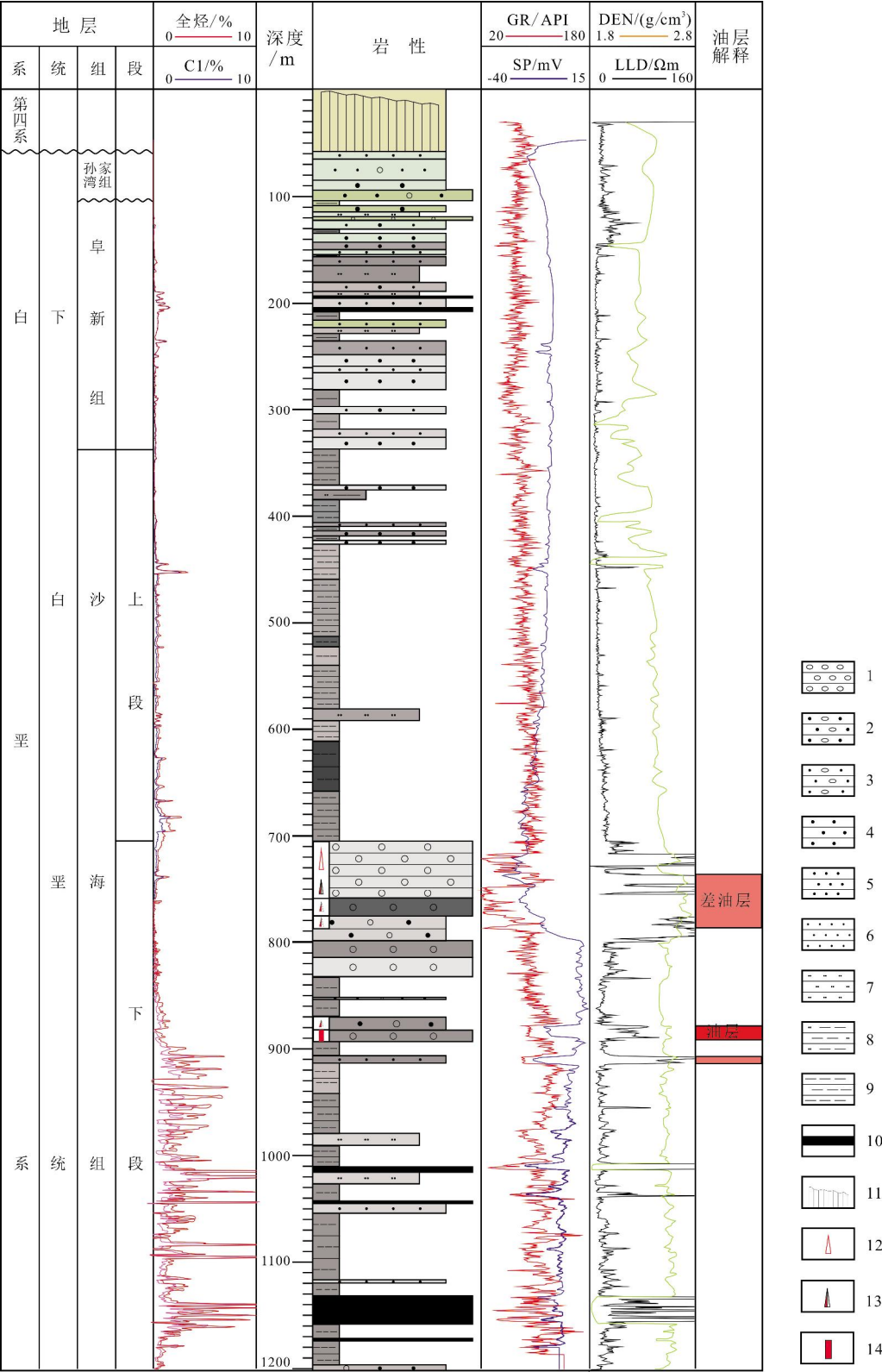


图 2 阜新盆地辽阜地 2 井综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of LFD-2 well in Fuxin Basin

1—砾岩(conglomerate); 2—含砾粗砂岩(gravel coarse sandstone); 3—含砾中砂岩(gravel medium sandstone); 4—粗砂岩(coarse sandstone); 5—中砂岩(medium sandstone); 6—细砂岩(fine sandstone); 7—粉砂岩(siltstone); 8—粉砂质泥岩(silty mudstone); 9—泥岩(mudstone); 10—煤(coal); 11—表土(topsoil); 12—荧光(fluorescence); 13—油斑(oil spot); 14—油浸(oil immersion)

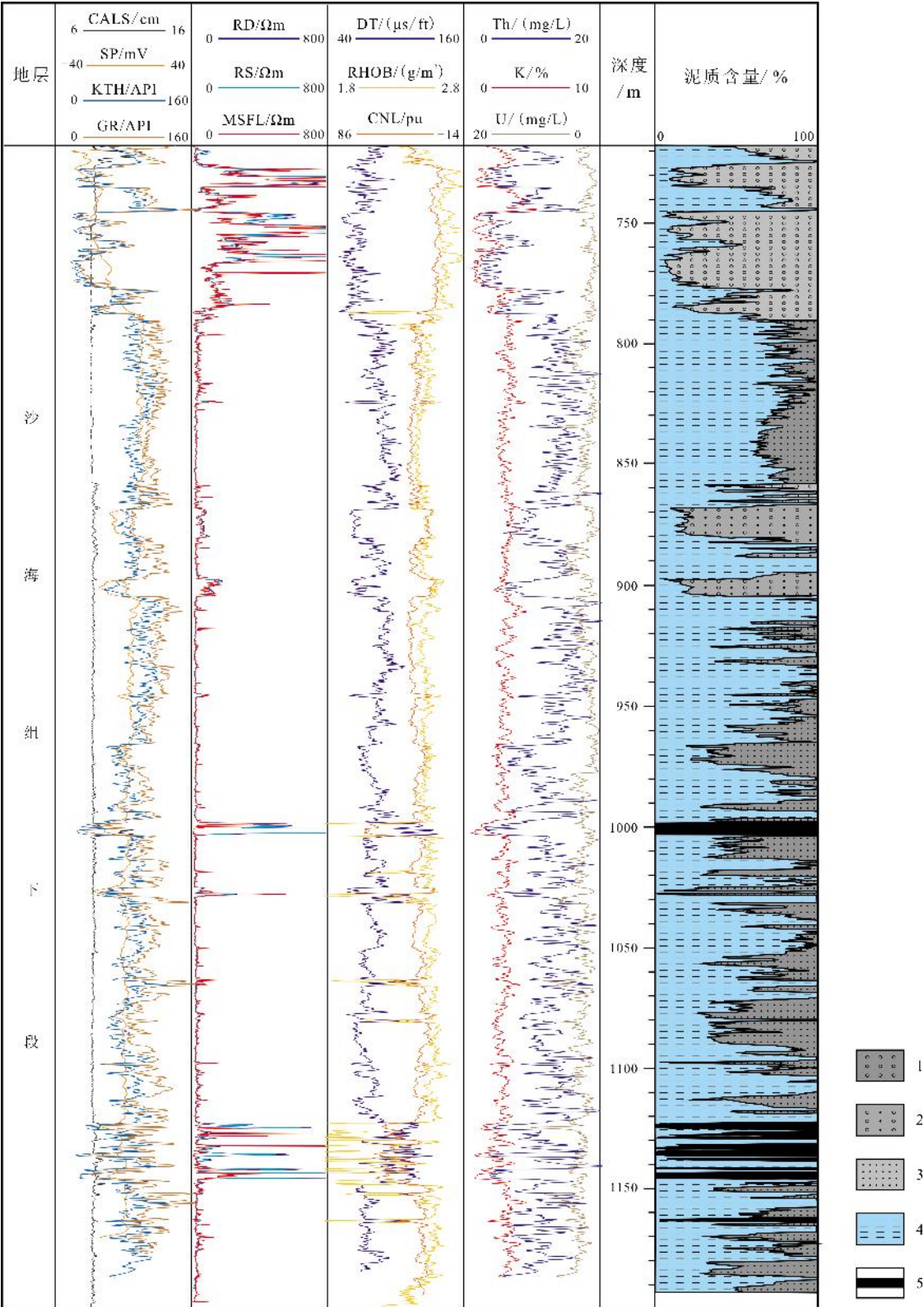


图 3 辽阜地 2 井沙海组下段泥质(黏土矿物)含量随井深分布

Fig. 3 Distribution of muddy (clay) minerals of Lower Shaihai Formation along the depth in LFD-2 well
1—砾岩 (conglomerate); 2—砂砾岩 (glutenite); 3—砂岩 (sandstone); 4—泥岩 (mudstone); 5—煤 (coal)

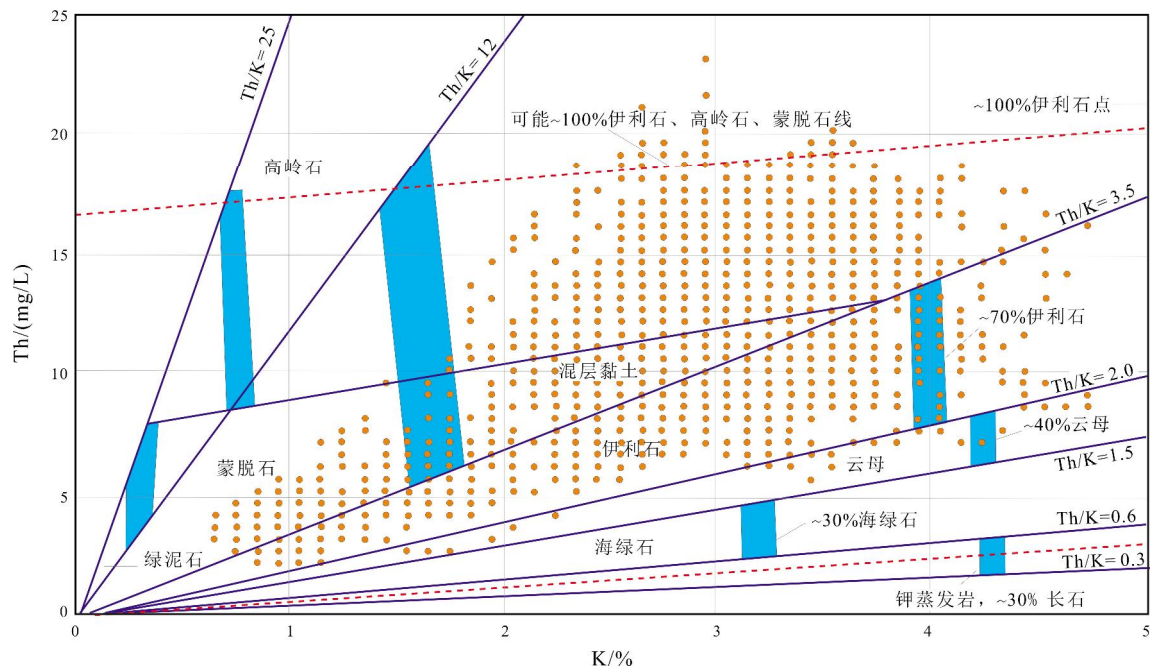


图 4 辽阜地 2 井沙海组下段黏土矿物分布图

Fig. 4 Distribution diagram of clay minerals from Lower Shahai Formation in LFD-2 well

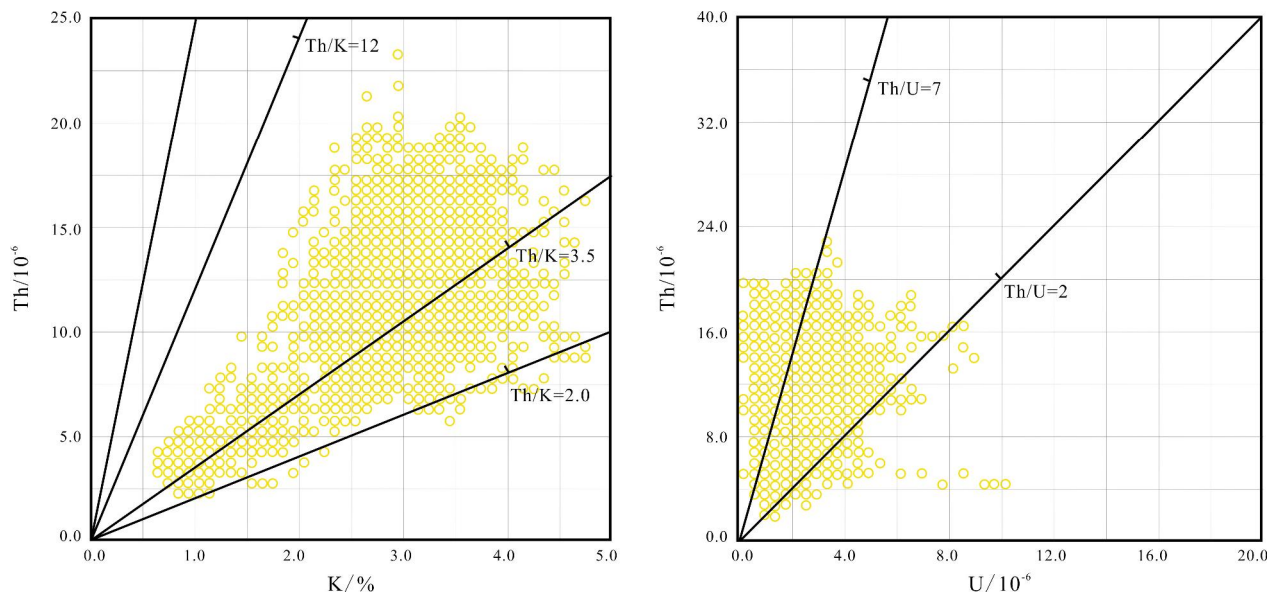


图 5 辽阜地 2 井沙海组下段钍-钾、钍-铀交会图

Fig. 5 Th-K and Th-U crossplots of Lower Shahai Formation in LFD-2 well

环境为氧化与弱还原环境交互沉积。

3 结论

(1)运用自然伽马能谱测井的无铀伽马值计算了阜新盆地辽阜地 2 井产油层(沙海组下段)的泥质含量,为岩屑录井岩性识别、岩性归位以及后续计算储层

参数提供了可靠的依据。

(2)辽阜地 2 井沙海组下段黏土矿物类型以伊蒙混层和伊利石为主,含蒙脱石,为进一步评价储层特征以及指导钻探调配钻井液等提供了有效支撑。

(3)沙海组下段处于一种氧化与弱还原交互、水动力条件弱(以低能为主)的沉积环境,这为进一步开展

沙海组下段沉积环境、油气成藏条件等相关研究奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 宫柯. 日本在我国东北钻探石油始末(下)[J]. 石油知识, 2016, 31(4): 32-35.
Gong K. The whole story of Japan drilling oil in Northeast China (Part 2)[J]. Petroleum Knowledge, 2016, 31(4): 32-35. (in Chinese)
- [2] 田在艺, 张庆春. 论改造型盆地与油气成藏——以华北东部盆地为例[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 110-116.
Tian Z Y, Zhang Q C. Modified basin and its oil and gas generation and accumulation — Case study: eastern part of the North China Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 110-116.
- [3] 吴炳伟, 郭彦民, 王新, 等. 辽宁阜新盆地油气勘探方向[J]. 地质与资源, 2015, 24(5): 473-477.
Wu B W, Guo Y M, Wang X, et al. The oil-gas exploration direction of Fuxin Basin[J]. Geology and Resources, 2015, 24(5): 473-477.
- [4] 赵洪伟, 陈树旺, 汪大明, 等. 阜新盆地油气勘探获得重大突破[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 857-858.
Zhao H W, Chen S W, Wang D M, et al. Major breakthroughs in oil and gas exploration in the Fuxin Basin[J]. Geology in China, 2018, 45(4): 857-858.
- [5] 陈树旺, 许光, 杨建国, 等. 松辽盆地及外围油气资源基础地质调查——“十三五”阶段进展与未来工作展望[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 221-231, 248.
Chen S W, Xu G, Yang J G, et al. Foundational geological survey for oil and gas resources in Songliao Basin and its periphery areas: Progress and prospect [J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 221-231, 248.
- [6] 赵洪伟, 张德军. 阜新改造型盆地油气评价及勘探方向[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 306-316.
Zhao H W, Zhang D J. Hydrocarbon evaluation and exploration direction of Fuxin reformed basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 306-316.
- [7] 张德军, 赵洪伟, 陈树旺, 等. 阜新盆地辽旱地 2 井下白垩统岩石地层特征[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 325-332.
Zhang D J, Zhao H W, Chen S W, et al. Lithostratigraphic characteristics of LFD-2 well in Fuxin Basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 325-332.
- [8] 刘菁华, 王祝文, 易清平. 利用自然 γ 能谱测井资料确定粘土矿物的含量及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 215-221.
- [9] 陈中红, 查明, 金强. 自然伽玛及自然伽玛能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1145-1150.
Chen Z H, Zha M, Jin Q. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1145-1150.
- [10] 黄茜, 刘菁华, 王祝文. 自然伽玛能谱测井资料在确定粘土矿物含量中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(S1): 143-146, 150.
Liu J H, Wang Z W, Yi Q P. Determinating clay mineral content by natural gamma-ray spectral logging data [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(1): 215-221.
- [11] 郭春杰, 王迪, 王保军. 自然伽玛能谱测井在沉积学中的应用研究[J]. 国外测井技术, 2013, 34(1): 34-36.
Guo C J, Wang D, Wang B J. Application of natural Gama-ray spectrometry in research of sedimentary [J]. World Well Logging Technology, 2013, 34(1): 34-36.
- [12] 曹茜, 周文, 刘岩, 等. 西湖凹陷斜坡带深层异常高孔隙储层特征及成因[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(3): 751-760.
Cao Q, Zhou W, Liu Y, et al. Characteristics and origin of deep high-porosity zones in slope of Xihu Sag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(3): 751-760.
- [13] 周全, 刘秋颖. 自然伽玛能谱测井在伊拉克 A 区块 α 井中的应用[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(3): 76-79.
Zhou Q, Liu Q Y. The application of natural gamma-ray logging data in the Well α of Block A, Iraq [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(3): 76-79. (in Chinese)
- [14] 蒲晓强, 姜在兴, 黄鑫, 等. 泥页岩储层测井沉积学分析——以泌阳凹陷泌页 HF-1 井核桃园组为例[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(5): 115-121.
Pu X Q, Jiang Z X, Huang X, et al. Logging sedimentology analysis of shale reservoir: A case study of Biye HF-1 well of Hetaoyuan Formation in Biyang Depression on [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(5): 115-121.
- [15] 路爱平, 杨子荣, 陈兆山. 阜新煤盆地油气地质条件分析[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(S1): 28-29, 42.
Lu A P, Yang Z R, Chen Z S. Analysis on oil reservoir geological setting in Fuxin Basin [J]. Coal Geology of China, 2004, 16(S1): 28-29, 42.
- [16] 龚建明, 温珍河, 戴春山. 阜新盆地的储层特征及其勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 82-91.
Gong J M, Wen Z H, Dai C S. Reservoir characteristics and exploratory targets of Fuxin Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(2): 82-91.

- (5): 434–442.
- [13] Zhang Y, Wang Y D, Hong Y, et al. *Pleuromeia* discovered from the Middle Triassic Linjia Formation of Benxi, Northeast China [J]. *Palaeoworld*, 2020, 29(4): 706–714.
- [14] 洪友崇. 辽宁本溪林家组的蜚蠊化石(昆虫纲)及时代讨论[C]//中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 1983, 8: 57–61.
Hong Y C. Fossil Blattods (Insecta) from Linjia Formation of Benxi in Liaoning Province and discussion about their age[C]//Bulletin of the Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 1983, 8: 57–61.
- [15] 徐亦知, 岳宁, 刘石, 等. 辽宁本溪中三叠统林家瓣轮叶(新种)[J]. *古生物学报*, 2020, 51(3): 329–344.
Xu Y Z, Yue N, Liu S, et al. *Lobatannularia linjiaensis* sp. nov. from the Middle Triassic of Benxi, Liaoning[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2020, 51(3): 329–344.
- [16] 孙革. 准苏铁果属(*Cycadocarpidium*)在吉林汪清县晚三叠世地层的发现[J]. *古生物学报*, 1979, 18(3): 312–325.
Sun G. On the discovery of *Cycadocarpidium* from the Upper Triassic of eastern Jilin[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1979, 18(3): 312–325.
- [17] 吴水波, 孙革, 刘渭州, 等. 吉林东部托盘沟地区的上三叠统[J]. *地层学杂志*, 1980, 4(3): 191–200.
Wu S B, Sun G, Liu W Z, et al. The Upper Triassic of Tuopangou, Wangqing of eastern Jilin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1980, 4(3): 191–200. (in Chinese)
- [18] 孙克勤, 崔金钟, 王士俊. 中国化石植物志(第三卷): 中国化石裸子植物 I [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 1–382.
Sun K Q, Cui J Z, Wang S J. Fossil flora of China (V. III): Fossil gymnosperms in China I. [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016: 1–382.
- [19] 任守勤, 陈芬. 内蒙古海拉尔五九煤盆地早白垩世大磨拐河组植物化石[J]. *古生物学报*, 1989, 28(5): 634–638, 705–707.
Ren S Q, Chen F. Fossil plants from Early Cretaceous Damoguaihe Formation in Wujiu coal basin, Hailar, Inner Mongolia [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1989, 28(5): 634–638, 705–707. (in Chinese)
- [20] 陈芬, 孟祥营, 任守勤, 等. 辽宁阜新和铁法盆地早白垩世植物群及含煤地层[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1–180.
Chen F, Meng X Y, Ren S Q, et al. The Early Cretaceous flora of Fuxin Basin and Tieda Basin, Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1–180. (in Chinese)
- [21] Halle T G. Paleozoic plants from central Shanxi [J]. *Palaeontologia Sinica: Series A*, 1927, 2(1): 1–316.
- [22] Carruthers W. I.— On *Beania*, a new genus of Cycadean fruit, from the Yorkshire Oolites [J]. *Geological Magazine*, 1869, 6(57): 97–99.
- [23] Schimper W P. *Traité de paléontologie végétal* [M]. Paris: JB Baillière et Fils, 1870–1872: 1–966.
- [24] Boucot A J, Xu C, Scotese C R. Phanerozoic paleoclimate: an atlas of lithologic indicators of climate [M]. Oklahoma: Society for Sedimentary Geology, 2013: 1–478.

(上接第 224 页/Continued from Page 224)

- [17] 王伟锋, 陆诗阔, 谢向阳, 等. 阜新盆地的油气保存条件[J]. *新疆石油地质*, 1998, 19(3): 202–206.
Wang W F, Lu S K, Xie X Y, et al. Evaluation of hydrocarbon preservation conditions in Fuxin Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1998, 19(3): 202–206.
- [18] 李凤琴, 秦菲莉, 陈汉林, 等. 自然伽马能谱资料在油田勘探中的应用[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2005, 27(6): 874–876.
Li F Q, Qin F L, Chen H L, et al. Application of natural gamma-ray spectrum data in oilfield exploration [J]. *Journal of Oil and Gas Technology (JJPI)*, 2005, 27(6): 874–876. (in Chinese)
- [19] 王贵文, 朱振宇, 朱广宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 50–52.
Wang G W, Zhu Z Y, Zhu G Y. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 50–52.
- [20] 董慧超. 自然伽马能谱测井的应用[J]. *石化技术*, 2017, 24(4): 260.
Dong H C. The application of natural gamma-ray logging [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2017, 24(4): 260. (in Chinese)
- [21] 刘峰, 李军, 缪定云. 自然伽马能谱测井在吐哈盆地盖层评价中的应用[J]. *测井技术*, 2003, 27(3): 238–241.
Liu F, Li J, Miao D Y. Application of natural gamma ray spectrometry log to the shale cap rock character evaluation in Tuha Basin [J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(3): 238–241.
- [22] 黄隆基. 放射性测井原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 1–261.
Huang L J. Theory of radioactive well logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 1–261. (in Chinese)
- [23] 丁永浩, 任莉. 中东 T 油田灰岩储层自然伽马能谱测井的应用[J]. *物探与化探*, 2014, 38(5): 890–894.
Ding Y H, Ren L. The application of natural gamma spectrometry log to limestone reservoir in T Oilfield of Middle East [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2014, 38(5): 890–894.