

# 苏北盆地金湖凹陷北港次洼

## 古近系阜宁组二段页岩油富集特征及主控因素

答 灵

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 南京 210019)

**摘要:**通过解剖苏北盆地金湖凹陷北港次洼古近系阜宁组二段泥灰质页岩油藏,分析了成藏条件,确定富集主控因素。北港泥灰质页岩油藏埋深 3 660~3 735 m,纵向上位于阜二段③~④亚段,属于典型的源储一体型油藏。油藏具有“四高一发育”特征,即高有机质丰度、高演化程度、高脆性矿物、高异常压力、天然裂缝发育。阜二段③~④亚段灰质泥岩和泥灰岩为优质烃源岩,实测有机碳含量平均为 1.83%, $S_1$ 平均为 0.59 mg/g,有机质类型为 I 型, $R_o$ 为 1.1%,成熟度较高。原油的植烷、伽马蜡烷、孕甾烷、三环萜烷含量中等,形成于半咸水的烃源岩。阜二段泥灰岩脆性矿物含量平均为 60.7%,以石英、白云石和方解石为主,实测孔隙度 4.24%~8.76%,平均为 7.04%;③亚段溶蚀孔发育,④亚段天然裂缝发育,声波时差计算压力系数为 1.3。大面积分布的优质烃源是页岩油藏形成的物质基础,地质甜点控制页岩油局部富集,高异常压力是页岩油藏高产的关键,阜二段泥灰质页岩油藏具有较好的勘探开发前景。

**关键词:**页岩油;泥灰质页岩;形成条件;富集特征;阜宁组二段;北港次洼;苏北盆地

**中图分类号:**TE122.11

**文献标识码:**A

## Enrichment characteristics and main controlling factors of shale oil reservoir in the second member of Paleogene Funing Formation, Beigang Subsag, Jinhu Sag, Subei Basin

ZAN Ling

(Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC East China Branch Company, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The accumulation conditions were studied and the main controlling factors were determined based on the analysis of marly shale reservoirs in the second member of Paleogene Funing Formation in the Beigang Subsag, Jinhu Sag, Subei Basin. The Beigang marly shale reservoir is buried 3 660–3 735 m, in the ③–④ subsections of the second member of Funing Formation. It is a typical self-sourced oil reservoir. The reservoir is characterized by “four high values and one development”, that is, high organic matter abundance, high thermal evolution degree, high brittle mineral content, high abnormal pressure and natural fracture development. The lime mudstones and marls of the ③–④ submembers of the second member of Funing Formation are high-quality source rocks. The average TOC content is 1.83%, and the average  $S_1$  value is 0.59 mg/g. The organic matter type is type I, and the  $R_o$  value is 1.1%, indicating a high maturity. The crude oil has moderate phytane, gammacerane, pregnane and tricyclic terpane contents indicating deposition in a relatively high salinity environment. The average content of brittle minerals is 60.7%, mainly consisting of quartz, dolomite and calcite. The measured porosity is 4.24%–8.76%, with an average of 7.04%. Solution pores are developed in subsection ③, while natural fractures are developed in subsection ④. The pressure coefficient calculated by acoustic time difference is 1.3. Widespread high-quality source rocks are the material basis for shale reservoir formation. Geological “sweet spots” control the local enrichment of shale oil. High abnormal pressure is critical for the high production of shale reservoir. The marly shale reservoir in the second member of Funing Formation has a good prospect for exploration and development.

**Key words:** shale oil; marly shale; formation condition; enrichment characteristics; second member of Funing Formation; Beigang Subsag; Subei Basin

近年来,随着北美海相页岩油实现商业开发,针对国内陆相页岩油的勘探开发也越来越引起油

气公司的重视。通过加强页岩油基础地质研究,中石油相继在准噶尔盆地的二叠系芦草沟组、渤海湾

盆地沧东凹陷古近系孔店组等探区获得页岩油勘探开发突破;中石化在渤海湾盆地济阳坳陷、南襄盆地泌阳凹陷、江汉盆地潜江凹陷、苏北盆地等也取得了页岩油勘探突破<sup>[1-5]</sup>。其中部署在苏北盆地金湖凹陷北港深凹带的大斜度井获得初产油 22 t/d,提交预测储量四百多万吨。苏北盆地位于郯庐断裂东侧,属于后生断陷盆地,整体划分为两坳一隆,其中东台坳陷是目前油气勘探开发的主战场。金湖凹陷北港次洼位于东台坳陷西侧,总面积 202 km<sup>2</sup>,热演化程度较高,是探索苏北盆地页岩油的有利区带。该区纵向上发育古近系阜二段、阜四段 2 套烃源岩,其中阜二段是探索页岩油藏最有利层系。阜二段自上而下划分为 5 个亚段:①亚段为深灰色泥岩;②亚段为深灰色泥岩和厚层泥灰岩;③~④亚段为灰质泥岩夹薄层泥灰岩;⑤亚段为灰色泥岩、粉砂岩和泥灰岩,岩性与芦苇沟组的碳酸盐岩、砂岩等有一定差异<sup>[6]</sup>。目前国内发现的陆相页岩油藏仍然较少,本文在对北港阜二段页岩油藏解剖的基础上,系统剖析烃源及储集条件,明确富集主控因素,总结富集规律,以期对评价苏北盆地页岩油勘探有利区与勘探部署决策提供参考。

## 1 地质背景

金湖凹陷是苏北盆地东台坳陷最西端的一个新生代沉积凹陷,总面积约 5 000 km<sup>2</sup>,经历了晚白垩世的初始拉张阶段、阜宁期的坳陷阶段、戴南—三垛期的断陷阶段和盐城期的萎缩阶段<sup>[7]</sup>;发育石港、铜城和杨村 3 条区域性大断层,平面上发育三河、汜涧、龙岗、汜水 4 个次凹;凹陷内自西向东依次为西部斜坡带、石港断裂带、汜涧斜坡带、卞冈杨构造带、唐港构造带、宝应斜坡带 6 个正向构造单元<sup>[8-9]</sup>,呈现南断北超、南陡北缓的构造格局。研究区位于石港断阶带的下降盘,紧邻西部斜坡带。阜二段岩性具三分性,上部发育灰黑色泥岩,中部为灰黑色泥灰岩、含灰—灰质泥岩及泥质白云岩互层,下部为粉、细砂岩与灰黑色泥岩、泥灰岩不等厚互层,沉积厚度 180~240 m;页岩油主要位于中部泥灰岩段,常规油主要聚集于下部砂泥岩互层段。

## 2 北港页岩油藏基本特征

### 2.1 北港页岩油藏概述

三河深凹是金湖凹陷 2 大沉积中心之一,东部以石港断阶带为界,西部向西逐渐过渡到金湖凹陷西斜坡(图1),阜二段埋深 3 000~4 000 m,是金湖

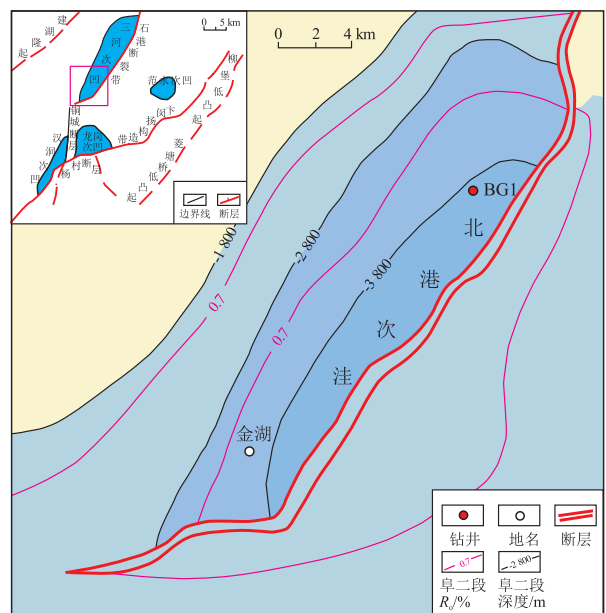


图1 苏北盆地金湖凹陷北港次洼构造及取样井位置  
Fig.1 Structural background and sampling well location of Beigang Subbasin, Jinhu Sag, Subei Basin

凹陷主要生油中心之一<sup>[10]</sup>。该深凹烃源岩厚度大,演化程度高,阜二段烃源岩  $R_0 > 1.0\%$ ,阜四段烃源岩  $R_0$  达 0.7%~1.0%,油源条件充足,是石港断阶带的主要油源区。北港次洼为三河深凹南部的次级凹陷,整体为一凹中隆构造,受数条北东东向展布的反向正断层分割,从而形成一系列鼻状构造。阜二段中部为泥灰岩、灰质泥岩,局部发育生屑灰岩和鲕粒灰岩,厚度 90~100 m,发育源储一体型泥灰质页岩油藏(图2)。目前钻遇北港深洼带阜二段的钻井仅 1 口——BG1 井,原油、烃源岩和储集性等数据均来自该井。油藏埋深 3 660~3 735 m,地面原油密度为 0.867 g/cm<sup>3</sup>,地面原油黏度 18.4 mPa·s,平均初馏点 116.43 °C,为轻质油;声波时差计算压力系数 1.3,页岩油藏具有“四高一发育”特征,即高有机质丰度、高脆性矿物、高演化程度、高异常压力,裂缝发育。

原油的饱和烃生物标志物特征反映成熟度较高,正构烷烃碳数呈双峰型,主峰碳为 C<sub>17</sub> 和 C<sub>21</sub>, Pr/Ph 为 1.17(图 3a,b);成熟度参数  $\alpha\alpha\alpha C_{29}$  甾烷 20S/(20S+20R) 为 0.24, C<sub>31</sub>S/(S+R) 为 0.57。原油形成于咸化烃源岩,伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷值为 0.25,三环萜烷含量中等, C<sub>20</sub>、C<sub>21</sub>、C<sub>23</sub> 三环萜烷呈上升型分布(图 3c);孕甾烷、升孕甾烷含量较高(图 3d),  $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 甾烷呈“V”型分布(图 3d),  $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}/C_{29}$  为 0.69。

### 2.2 烃源条件

阜二段顶部为灰黑色泥岩,底部为粉砂岩夹灰

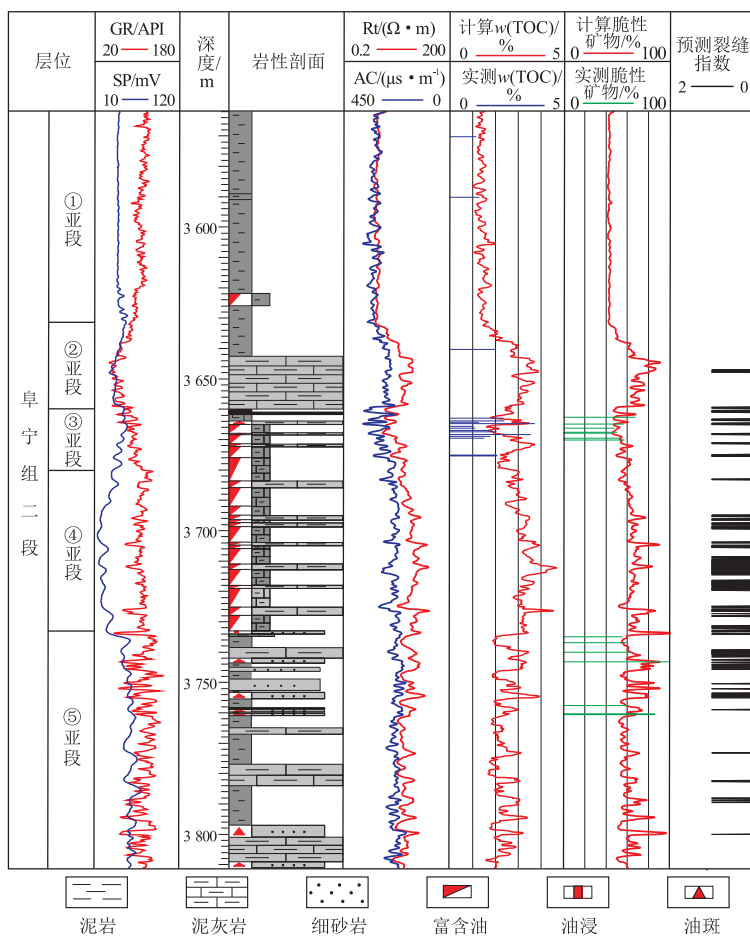


图 2 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜宁组二段综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic section of second member of Funing Formation, well BG1, Beigang Subgag, Jinhu Sag, Subei Basin

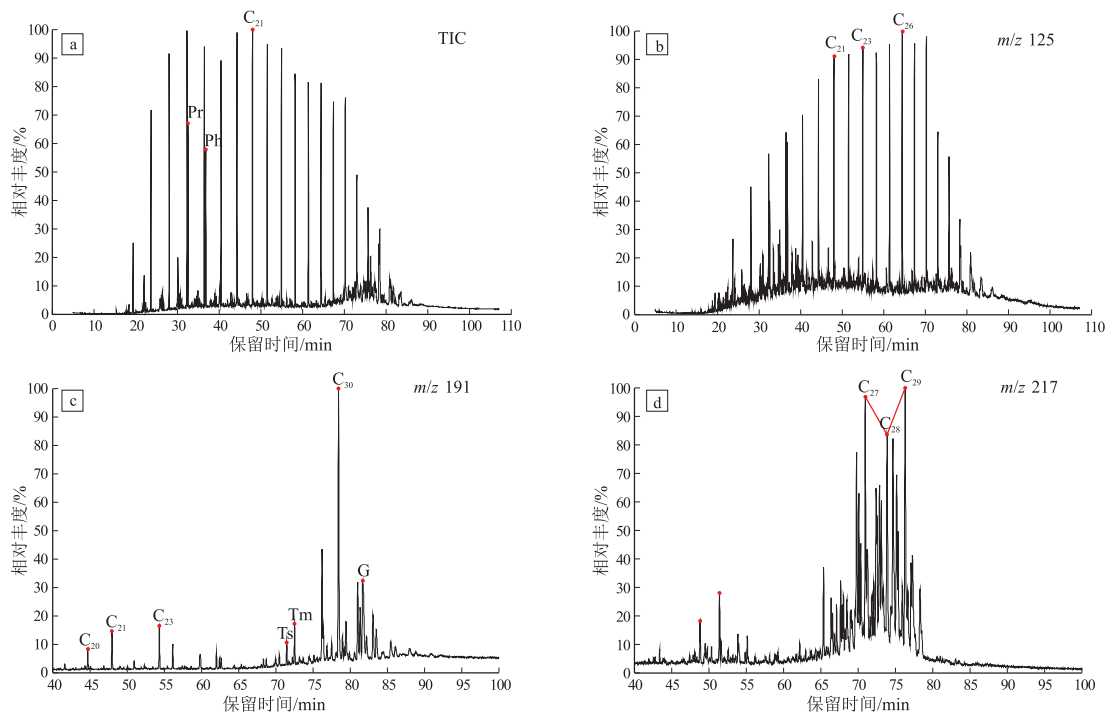


图 3 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜宁组二段原油(3 690~3 700 m)饱和烃生物标志物特征

Fig.3 Biomarker characteristics of saturated hydrocarbon in crude oil from second member of Funing Formation (3 690~3 700 m), well BG 1, Beigang Subgag, Jinhu Sag, Subei Basin

质泥岩、泥灰岩,中部为灰黑色灰质泥岩、泥晶灰岩,局部发育生物灰岩和鲕粒灰岩。烃源岩厚度90~100 m,阜二段中部优质烃源岩 TOC 为 0.53%~3.73%,平均为 1.83%( $n=34$ ); $S_1+S_2$ 为 0.96~34.27 mg/g,平均为 9.16 mg/g( $n=34$ ),含量大于 6 mg/g 的样品占总量的 62%;氢指数( $I_H$ )为 176~840 mg/g,平均为 523 mg/g( $n=34$ );饱芳比为 2.17~7.36,平均为 3.67( $n=11$ );硫含量为 0.44%~1.5%,平均为 0.98%( $n=12$ );黄铁矿含量为 1.3%~5.5%,平均为 3.6%( $n=12$ );锶钡比为 0.08~5.15,平均为 0.72( $n=51$ ),反映源岩形成于半咸水的还原环境<sup>[11]</sup>。

有机质类型以 II<sub>1</sub>型为主,有机显微组分中腐泥组平均为 70%( $n=11$ ),有机质以黄绿色荧光的层状藻类体为主,少量亮黄绿色荧光的结构藻类体(图 4a,b),含少量黄色荧光的富氢次生组分;壳质组平均为 12.7%( $n=11$ ),含有的镜质体呈条带状或碎屑状,反光下呈灰色(图 4c,d);少量棕色荧光的沥青质体,含有一定量贫氢次生组分,颗粒在反光下呈灰白色。阜二段泥灰岩在垛一段沉积末期达到低成熟,开始生油,在垛二段沉积中期达到成熟阶段,开始大量生烃,现今  $R_o$  为 1.1%,处于高成

熟阶段。

### 2.3 含油性特征

BG1 井阜二段泥页岩有机质丰度较高,因此含油性也较好,氯仿沥青“*A*”为 0.12%~0.54%,平均为 0.30%( $n=11$ );成熟度较高,滞留油和游离油含量均与 TOC 呈较好正相关关系(图 5a,b), $S_1$  为 0.03~2.26 mg/g,平均为 0.59 mg/g, $S_1>0.2$  mg/g 的样品占总量 82%, $S_1>0.5$  mg/g 的样品占总量 38%。现场钻井过程中气测异常层累计厚度达 91 m,异常值最高达 99.989 9%; $C_1-C_5$  组分齐全,以  $C_1$  为主,泥灰岩岩心普遍见裂隙含油。由于取心后未及时开展冷冻和热解分析,造成轻烃损失较大,后期实测  $S_1$  值偏低,含油饱和度(*OSI*)不高, $OSI>50$  mg/g 的样品占总样品的 12%(图 5c)。但现场的气测和岩心的含油显示均证实,北港阜二段泥灰岩具有较好的含油性。

### 2.4 储集特征

#### 2.4.1 矿物组成

阜二段泥灰岩、粉砂质泥岩的黏土矿物含量为 11.2%~54.8%,平均 39.3%( $n=11$ );脆性矿物含量较高,平均为 60.7%( $n=11$ ),以石英、白云石和方

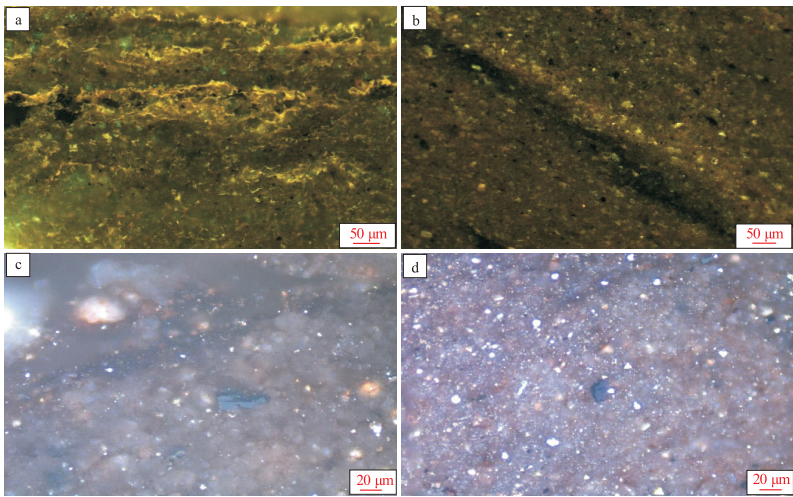


图4 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜二段(3 662~3 668 m)灰黑色灰质泥岩有机显微组分

Fig.4 Organic macerals of marls in second member of Funing Formation (3 662-3 668 m), well BG 1, Beigang Subsag, Jinhu Sag, Subei Basin

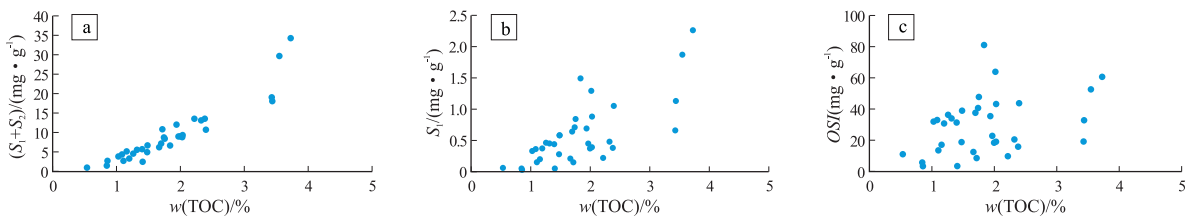


图5 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜二段泥页岩有机碳与含油性的相关性

Fig.5 Relationship between organic carbon content and oil-bearing capacity of shale in second member of Funing Formation, well BG 1, Beigang Subsag, Jinhu Sag, Subei Basin

解石为主,石英含量 8.0%~24.1%,平均为 18.8% ( $n=11$ ),白云石含量为 2.4%~35.1%,平均为 17.4% ( $n=11$ ),方解石含量 1.5%~72%,平均为 17% ( $n=11$ ),其他脆性矿物包括长石、黄铁矿、菱铁矿,含量低于 5.5%。北美页岩油产层脆性矿物含量为 65%~78.5%<sup>[12]</sup>,比北港阜二段略高,脆性矿物含量影响储集空间、含油性及后期改造方式。北港阜二段脆性矿物较富集,有利于后期压裂改造。

#### 2.4.2 储集物性与储集空间

泥灰岩实测孔隙度为 4.24%~8.76%,平均 7.04%。实测孔隙度为 6.94%的泥灰岩平均孔喉半径为 5 nm,孔喉半径 2~20 nm 之间的介孔占总孔隙的 50%,孔喉半径小于 2 nm 的微孔占总孔隙的 21%,孔喉半径大于 20 nm 孔隙占总孔隙的 27% (图 6)。渗透率为  $(0.005\sim 84.9)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,无天然裂缝发育段泥灰岩渗透率低于  $0.01\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,孔隙连通性较差 (图 7),裂缝控制泥页岩渗透性,3 695~3 720 m 偶极声波测井显示出良好的裂缝发育特征,实测渗透率达到  $84.9\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。泥灰

岩岩心可见大量溶蚀孔,孔内富含褐色原油 (图 8a),扫描电镜下溶蚀孔较发育 (图 8b)。泥灰岩镜下表现为晶粒结构,含少部分生屑,可见浮游类生物,纹层非常发育 (图 8c,d),层厚约 60  $\mu\text{m}$ ;发育多条层理缝 (图 8e,f),裂缝间近乎平行,裂缝宽约 10~15  $\mu\text{m}$ ,粉砂质泥岩镜下见粉晶方解石,裂隙含油。溶孔、黏土矿物晶(粒)间孔、碳酸盐晶(粒)间孔为主要微孔隙。生物灰岩、粉砂质泥岩、纹层状泥灰岩储集条件较好,主要分布在③、④亚段。

#### 2.5 封盖条件

北港阜二段泥灰质页岩油藏为源储一体型油藏,泥灰岩顶部的深湖相泥岩厚度 70~80 m,在整个金湖凹陷普遍发育;该泥岩突破压力高,达到 25.9 MPa,是金湖凹陷阜二段的良好盖层。阜二段底部为灰黑色泥岩、泥灰岩与灰色粉、细砂岩不等厚互层,地层厚度为 80~100 m,砂岩厚度为 1~4 m,渗透率为  $(0.146\sim 0.025)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,渗透性较差,油气显示不活跃,证实底板条件比较好。北港次洼位于金湖凹陷深凹带,后期活动性断层不发育<sup>[13]</sup>,

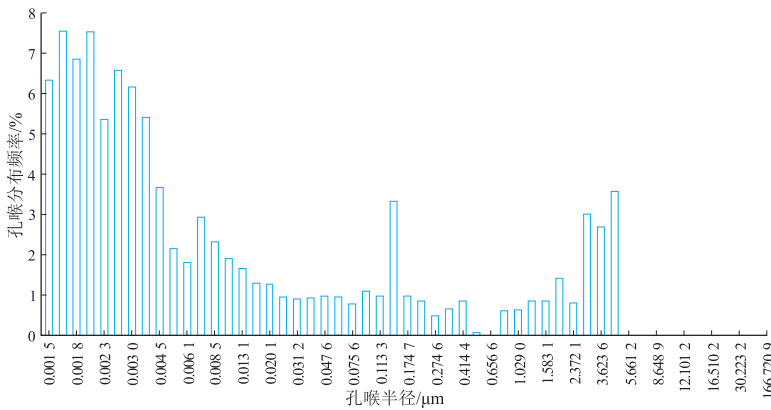


图 6 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜二段泥灰岩孔喉半径分布

Fig.6 Pore and throat radius of marl in second member of Funing Formation, well BG 1, Beigang Subsaq, Jinhu Sag, Subei Basin

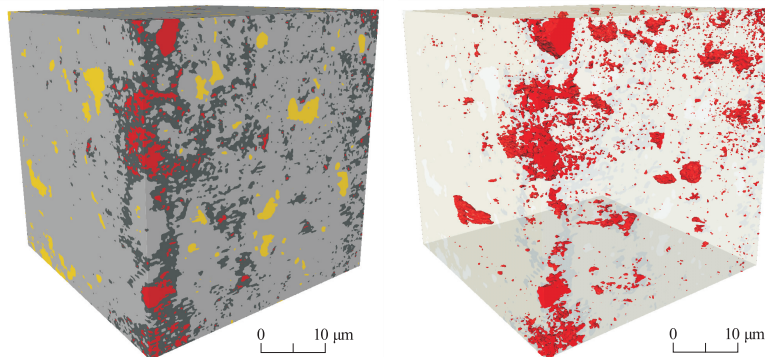


图 7 苏北盆地金湖凹陷北港次洼 BG1 井阜二段泥灰岩孔隙空间分布

红色表示孔隙;黑色表示低密度物质(有机质+部分黏土矿物);灰色表示矿物基质;黄色表示高密度物质(黄铁矿)

Fig.7 Pore and fracture distribution in marl in second member of Funing Formation, well BG 1, Beigang Subsaq, Jinhu Sag, Subei Basin

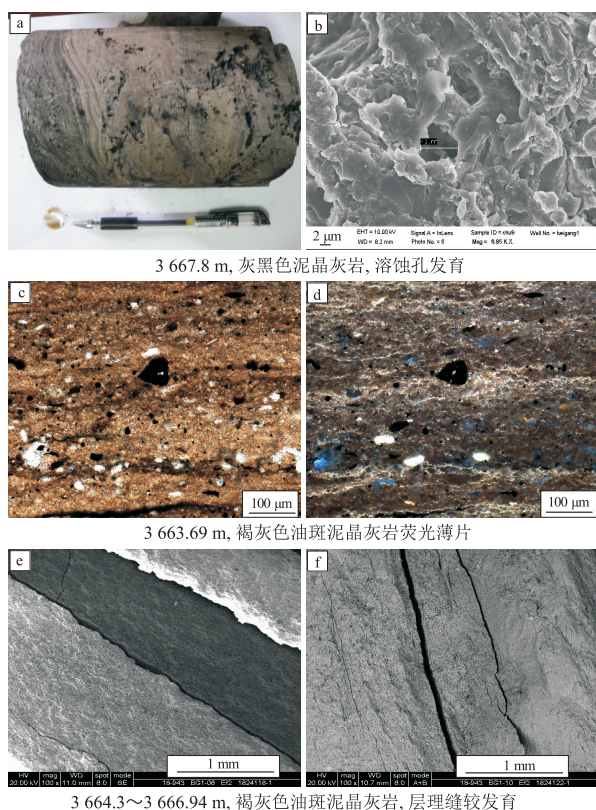


图8 苏北盆地金湖凹陷北港次洼BG1井阜二段泥灰岩微观储集特征

Fig.8 Microscopic features of marl reservoir in second member of Funing Formation, well BG 1, Beigang Subsasg, Jinhu Sag, Subei Basin

构造破坏作用小,因此北港阜二段页岩油藏保存条件好。

### 3 富集主控因素探讨

#### 3.1 大面积分布的优质烃源是页岩油藏形成的物质基础

北港次洼处于金湖凹陷生烃中心,阜二段优质烃源岩厚度大、分布范围广、成熟度高。阜二段沉积时期,浮游藻类、介形虫等生物发育,水体盐度适中,有利于有机质后期保存。研究表明,咸化烃源岩在低熟阶段即开始生烃<sup>[14]</sup>,早期生烃可以满足孔隙本身的吸附;在垛二段沉积时期已经达到成熟阶段,开始大规模生烃,油气以短距离运移为主,大多在原地聚集成藏;现今烃源岩处于高成熟阶段,因此原油油质轻,有利于流动。

#### 3.2 地质甜点控制页岩油局部富集

泥灰岩储层本身较致密,基质渗透率仅 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,但孔渗条件受到沉积微相、成岩作用及天然裂缝控制,空间上发育局部甜点。泥灰岩生烃过程中会生成大量有机酸,有利于形成次生孔隙,扫描电镜、薄片等揭示烃源岩内部发育大量

溶蚀孔。同时,早期生成的烃类进一步抑制烃源岩内部矿物的成岩作用,有利于原生孔隙保存<sup>[15-16]</sup>。岩石的组成和沉积结构是影响岩石物性的重要因素,富有机质的纹层状泥灰岩比块状泥岩具有更好的储集物性;石英、长石等脆性矿物发育的层段晶间孔也比较发育,为烃类聚集提供充足空间;后期的压裂改造也有利于沟通这些原生孔隙。

天然裂缝发育也有利于油气聚集和后期开发<sup>[17]</sup>。薄片下也可以见到北港次洼阜二段泥灰岩段水平裂缝发育,主要是有机质生烃过程中形成的。在有机质大量生烃阶段,生成的液态烃和天然气会使烃源岩孔隙中烃类体积增大,形成生烃增压微裂缝<sup>[1]</sup>,裂缝能显著提高泥页岩储层的渗透率。BG1井阜二段裂缝发育段实测渗透率达到 $84.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,既改善了储层渗透性,又有利于油气横向大面积运聚成藏,有机质生烃增压形成的天然裂缝为后期压裂增产提供了坚实基础。

#### 3.3 高异常压力是页岩油藏富集高产的关键

泥岩声波压实曲线表明,北港次洼阜二段存在明显的异常高压,压力系数达到1.3。阜二段属于细粒沉积,沉积速率低,不存在欠压实,异常高压主要由有机质生烃增压形成。异常高压使地层保持较高的能量,对于后期页岩油稳产很有帮助。BG1井后期实施的大斜度井单段(85 m)压裂后初产油达到22 t/d,截至目前累产油一千多吨,揭示了阜二段泥灰质页岩油藏具有较好的勘探开发前景。

### 4 结论

(1)北港泥灰质页岩油藏纵向上位于阜二段③~④亚段,具有高有机质丰度、高演化程度、高脆性矿物含量、高异常压力、天然裂缝发育的特征。

(2)阜二段③~④亚段灰质泥岩和泥灰岩为优质烃源岩,实测TOC含量平均为1.83%, $S_1$ 平均为0.59 mg/g,有机质类型为I型, $R_o$ 为1.1%,成熟度较高。原油的植烷、伽马蜡烷、孕甾烷、三环萜烷含量中等,形成于半咸水的烃源岩。

(3)阜二段泥灰岩脆性矿物含量平均为60.7%,以石英、白云石和方解石为主。实测孔隙度为4.24%~8.76%,平均为7.04%,局部溶蚀孔和天然裂缝发育。

(4)大面积分布的优质烃源是页岩油藏形成的物质基础,地质甜点控制了页岩油局部富集,高异常压力是页岩油藏高产的关键,阜二段泥灰质页岩油藏具有较好的勘探开发前景。

## 参考文献:

- [1] 黎茂稳, 马晓潇, 蒋启贵, 等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.  
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [2] 谢文泉, 刘招君, 肖丽佳, 等. 柴北缘鱼卡地区中侏罗统石门沟组油页岩资源潜力[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 78-83.  
XIE Wenquan, LIU Zhaojun, XIAO Lijia, et al. Oil shale resource potential of the Middle Jurassic Shimengou Formation in Yuka of the north rim in Qaidam Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 78-83.
- [3] 余涛, 卢双舫, 李俊乾, 等. 东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 16-21.  
YU Tao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 16-21.
- [4] 包友书. 渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油主要赋存空间探索[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 479-484.  
BAO Youshu. Effective reservoir spaces of Paleogene shale oil in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 479-484.
- [5] 雷浩, 何建华, 胡振国. 潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 94-98.  
LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 94-98.
- [6] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2008, 23(4): 76-85.  
YANG Zhi, HOU Lianhua, LIN Senhu, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2008, 23(4): 76-85.
- [7] 练铭祥, 薛冰, 杨盛良. 苏北新生代盆地断陷和坳陷的形成机理[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 256-260.  
LIAN Mingxiang, XUE Bing, YANG Shengliang. Formation mechanism of depressions and rifts in the Cenozoic basin of north Jiangsu province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 256-260.
- [8] 舒良树, 王博, 王良书, 等. 苏北盆地晚白垩世-新近纪原型盆地分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 534-543.  
SHU Liangshu, WANG Bo, WANG Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from Late Cretaceous to Neogene [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 534-543.
- [9] 刘喜欢, 杨芝文, 杨立干. 金湖凹陷构造特征及圈闭类型[J]. 复杂油气藏, 2018, 11(3): 6-11.  
LIU Xihuan, YANG Zhiwen, YANG Ligan. Structural characteristics and trap types of Jinhu Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11(3): 6-11.
- [10] 能源, 漆家福, 张春峰, 等. 金湖凹陷断裂特征及其石油地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 16-23.  
NENG Yuan, QI Jiafu, ZHANG Chunfeng, et al. Structural features of the Jinhu Sag in the Subei Basin and its petroleum geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(1): 16-23.
- [11] 毛光周, 刘晓通, 安鹏瑞, 等. 无机地球化学指标在古盐度恢复中的应用及展望[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 37(1): 92-102.  
MAO Guangzhou, LIU Xiaotong, AN Pengrui, et al. Application and outlook of inorganic geochemical indexes in reconstruction of Palaeosalinity [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 37(1): 92-102.
- [12] 高辉, 何梦卿, 赵鹏云, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 133-140.  
GAO Hui, HE Mengqing, ZHAO Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics of Chang 7 shale oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133-140.
- [13] 能源, 漆家福, 张春峰, 等. 金湖凹陷石港断层构造演化及油气聚集特征[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 667-671.  
NENG Yuan, QI Jiafu, ZHANG Chunfeng, et al. Structural evolution of Shigang Fault and features of hydrocarbon accumulation in Jinhu Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 667-671.
- [14] 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生界咸化湖相有机地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1): 65-70.  
ZHANG Zhihuan, YANG Fan, LI Dongming, et al. The organic geochemistry research progress in Cenozoic salified lake in China [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(1): 65-70.
- [15] 包友书. 济阳拗陷超压和应力场对页岩油富集的影响[J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 585-588.  
BAO Youshu. Influence of overpressure and stress on shale oil enrichment in Jiyang Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(5): 585-588.
- [16] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.  
SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [17] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段—亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 361-372.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: a case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361-372.