

渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践

周立宏, 韩国猛, 杨 飞, 马建英, 牟连刚, 周可佳, 王昌丽, 孟立娜

(中国石油 大港油田分公司, 天津 300280)

摘要: 歧口凹陷沙河街组三段一亚段[Es³⁽¹⁾]页岩油勘探获得高产、稳产工业油流,证实湖相页岩油具有较大勘探潜力,并形成亿吨级规模战场,对渤海湾盆地广泛分布的沙河街组页岩油勘探具有重要借鉴意义。针对歧口凹陷沙河街组三段页岩层系沉积环境、岩性、储集性、脆性和含油性等方面展开综合研究,Es³⁽¹⁾半深湖-深湖区泥页岩孔缝发育,脆性指数高、储层敏感性差、含油气性好,具备页岩油富集的生烃、储集、含油和工程改造条件,页岩油成藏地质条件优越。纵向上,将Es³⁽¹⁾划分6个甜点段,由上至下依次为C1—C6,平面分布稳定,单段厚度分布在7~96 m,累计厚度434 m,分布面积在87.4~194.3 km²,平面甜点叠加面积为256 km²,采用体积含油率法,初步计算资源量为4.1×10⁸ t。按“老井控面、水平井提产”的原则,在Bin60-56和F38x1两口大斜度井试油获工业油流,针对C1甜点段部署水平井勘探,QY10-1-1井获得日产百吨高产油气流,Bin56-1H井自喷试采206 d后,累产油3 043.11 t,反排率为7.77%,歧口凹陷沙三段页岩油勘探取得重大突破。

关键词: 沉积环境; 甜点评价; 页岩油; 沙三段一亚段; 歧口凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Geological characteristics and shale oil exploration of Es³⁽¹⁾ in Qikou Sag, Bohai Bay Basin

Zhou Lihong, Han Guomeng, Yang Fei, Ma Jianying, Mou Liangang, Zhou Kejia, Wang Changli, Meng Lina

(Dagang Oilfield Branch Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: The high and stable industrial shale oil flow from the first submember of the third member of Shahejie Formation (Es³⁽¹⁾) in Qikou Sag, Bohai Bay Basin, reveals a possible 100 million tons of oil resource in the lacustrine shale of the member and serves as a significant reference for shale oil exploration in the whole Shahejie Formation of the basin. Based on a comprehensive study of sedimentary setting, lithology, reservoir properties, brittleness and oil-bearing property of the shale series in the member, we found that the shale series are of semi-deep lake-deep lake environment and characterized by well-developed pores and fractures, high brittleness, low reservoir sensitivity and high oil-gas bearing potential. They are favorable for hydrocarbon generation and accumulation and can be easily stimulated. Longitudinally, the member can be divided into 6 sweet-spot sections, namely sections C1 to C6 downwards of 7 to 96 m thick and 434 m in total. Horizontally, the sections are distributed in areas from 87.4 to 194.3 km² with a cumulative area of 256 km². Preliminary assessment using volumetric oil content method indicates the sections have a resource of 4.1×10⁸ t. Guided by the development strategy of “using old wells to control the range of sweet spots and horizontal wells to increase production”, two highly deviated wells, Wells Bin 60-56 and F38x1 were tested with industrial oil flows. Deploy horizontal well exploration for C1 sweet spot, Well QY10-1-1 was tested with 100 equivalent tons of hydrocarbon per day. Furthermore, Bin56-1H produced 3 043.11 t in total after 206 days of production, and the reverse drainage rate was 7.77%, indicating a major breakthrough in the shale oil exploration of Es³⁽¹⁾ in Qikou Sag, Bohai Bay Basin.

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2021-03-03。

第一作者简介: 周立宏(1968—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探研究与生产管理。E-mail: zhoulh@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2018E-11-01)。

Key words: depositional setting, sweet spot evaluation, shale oil, the first submember of the third member of Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin

致密油气和页岩油气等非常规油气已成为当前乃至今后油气工业发展的主要方向之一^[1-2],是现阶段石油和天然气勘探开发的重点领域^[3]。在致密油气领域,中国鄂尔多斯盆地延长组^[1]、准噶尔盆地二叠系^[4]、四川盆地侏罗系^[5]等地层中均有发现并已成为重要的原油生产基地。页岩油领域起步相对较晚,如鄂尔多斯盆地延长组半深湖-深湖页岩^[6-7]、准噶尔盆地二叠系半深湖-深湖页岩、云质泥岩等^[8-9]均发育一定规模页岩油储量。近年来,渤海湾盆地沧东凹陷页岩油勘探获得较大突破,KN9和GD6x1等多口井相继获得工业油流^[10],以技术创新破解勘探盲区,打造甜点体识别评价、水平井钻井提速、密切割体积压裂增产等系列技术^[11]率先实现陆相页岩油的突破引起国内外学者广泛关注^[10],截止到2020年1月8日,沧东凹陷孔店组二段(孔二段)页岩油GD1702H水平井体积压裂后连续自喷591 d,累计产油 1.1×10^4 t,实现了陆相页岩油高产稳产,目前沧东凹陷孔二段页岩油已进入工业化开发阶段。

沙河街组泥页岩是渤海湾盆地歧口凹陷主要烃源岩^[12-14],其中沙河街组三段一亚段[沙三一亚段, $Es^{3(1)}$]、沙一段下亚段[$Es^{1(下)}$]^[15-16]泥页岩累计厚度大、平面分布广、生烃条件优越,具备页岩油勘探潜力。2019年,借鉴沧东凹陷孔二段页岩油勘探实践经验,针对歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 泥页岩开展老井复查工作,先期实施的F38X1井和Bin60-56井在该层段均获得工业油流:F38x1井试油井段3 978.8~4 227.0 m(垂深3 907.8~4 220.1 m),分3段(15簇)共103.9 m压裂改造,6 mm油嘴自喷,初期日产油50.1 t、日产气17 240 m³;Bin60-56井射开3 902.6~3 992.5 m(垂深3 587.43~3 677.2 m),分2段68.9 m压裂后6 mm油嘴自喷,初期日产油23.59 t。2口大斜度井均具有初期产量高、递减快的特点,为进一步探索歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油富集规律,本文利用F39x1, F39x1y, QY10-1-1和Bin56-1H等井资料针对歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩段沉积环境、岩性组合特征、生烃特征、储层及含油性特征、甜点评价等方面展开论述,以期对古近系沙河街组页岩油勘探评价具有一定的指导意义。

1 地质背景

渤海湾盆地发育多个坳陷,黄骅坳陷于中生代

末-新生代初开始拉张裂陷,新生代断陷盆地出现,西、东边界分别为沧东断裂系和羊二庄断裂系,二者构成双断的地堑式结构^[17]。黄骅坳陷被沧县隆起和埕宁-海中隆起夹持,具北宽南窄、东北深、西南浅的结构特点。坳陷内部以孔店凸起为界分为沧东凹陷和歧口凹陷2个不同的沉降单元,沧东凹陷发育古近系孔店组、沙河街组和东营组,歧口凹陷孔店组不发育,沙河街组和东营组相对较厚。近年勘探证实,沧东凹陷孔二段由于高丰度的泥页岩发育,在泥页岩及其夹层中页岩油勘探取得良好勘探成效^[10]。歧口凹陷古近系发育沙三段(Es^3)、沙二段(Es^2)、沙一段(Es^1)和东营组(Ed^1)多套生烃层系,主力生烃层系以 $Es^{3(1)}$ 和 $Es^{1(下)}$ 为主(图1)。

2 岩石学特征

2.1 沉积环境

沙三段是歧口凹陷古近系最先发育的一个完整三级层序单元, $Es^{3(3)}$, $Es^{3(2)}$, $Es^{3(1)}$ 分别为低位体系域、湖泛体系域和高位体系域^[15]。 $Es^{3(1)}$ 沉积时期,凹陷周缘大神堂地区、歧北、歧南-埕北斜坡高部位遭受大面积剥蚀,目前为残留沉积状态。西部沧县隆起物源控制范围内继承性发育沈青庄-增福台、小站和葛沽3个扇体,葛沽和小站地区地形较陡,发育近岸水下扇沉积,而沈青庄-增福台物源波及区水体较浅,发育扇三角洲沉积。歧北-歧南、埕北斜坡及埕海地区现存砂体规模相对较小,只在斜坡的中低部位保留了部分辫状河三角洲前缘及远岸水下扇沉积。歧口主凹的深水区域则继承性发育远岸水下扇沉积与滑塌浊积透镜体(图1)。湖盆内部物源供给能力相对较弱,仅在凸起周缘形成小型扇三角洲砂体,孔店-羊三木凸起周缘以湖浪改造型滩坝沉积为主。

板桥高斜坡、歧北中-低斜坡和歧南中-低斜坡区构成的“C”环带(图1中蓝色虚线限定范围)由三级坡折逐渐过渡的多阶挠曲斜坡^[18-19],总体上呈现西高东低、北深南浅且北翼陡南翼缓的不对称结构^[20-21]。 $Es^{3(1)}$ 北部燕山褶皱带、港西凸起物源砂体顺断层转换带汇入箕状断陷区形成远岸水下扇,扇体影响范围至QS1井区。 $Es^{3(1)}$ 南部孔店-羊三木凸起物源砂体沿着断槽在斜坡区形成扇三角洲,砂体纵向叠置,平面叠加连片,受重力因素影响,扇体前缘滑塌

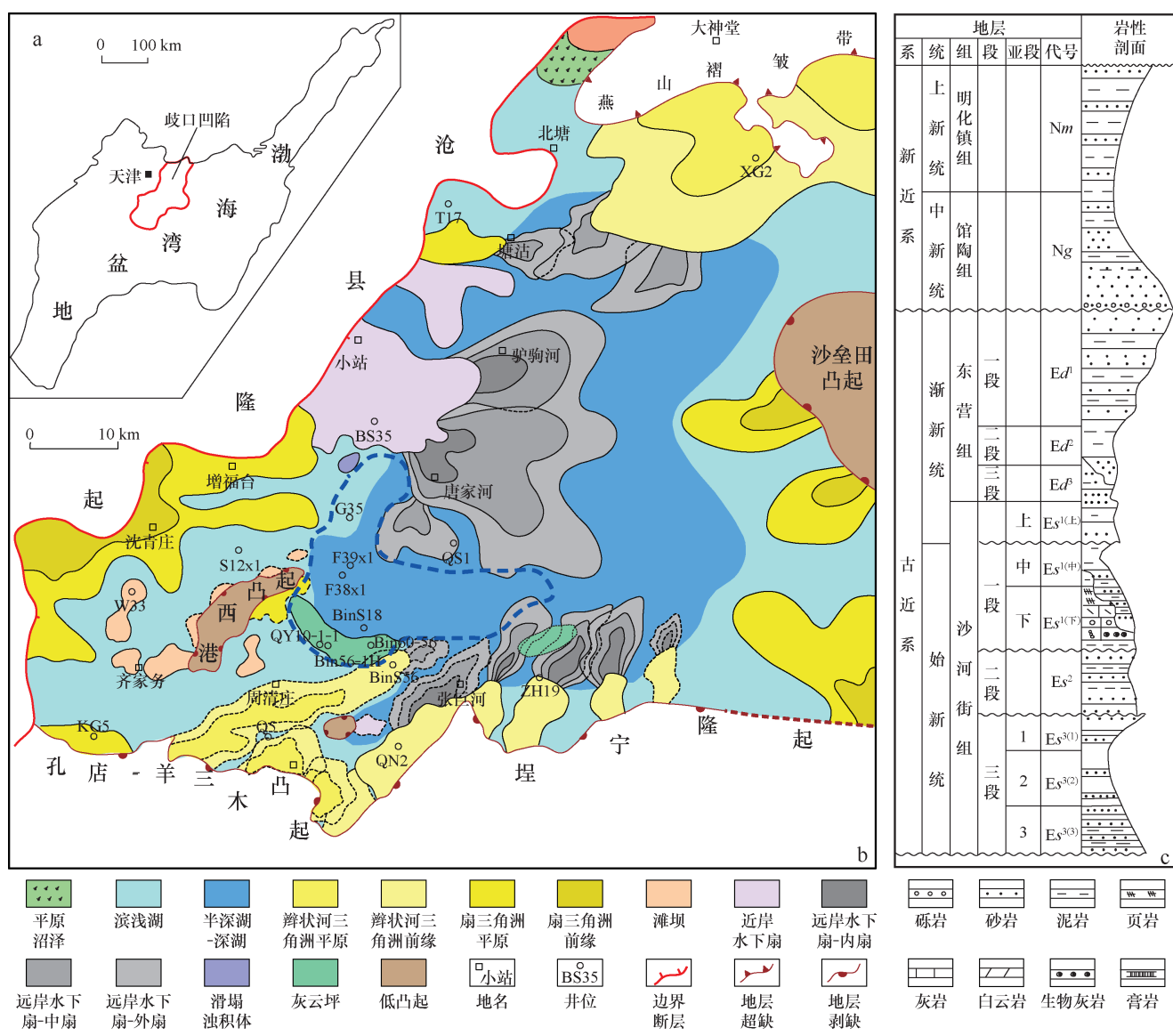


图1 歧口凹陷区域位置(a)、Es³⁽¹⁾沉积体系(b)及古近系地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Sketch map showing the location of the Qikou Sag (a) and Es³⁽¹⁾ sedimentary system (b), and composite stratigraphic column of the Paleogene strata (c)

(图中蓝色虚线限定范围为板桥高斜坡、歧北中-低斜坡和歧南中-低斜坡区构成的“C”环带。)

形成远岸水下扇沉积。“C”环带处于碎屑岩沉积体系侧缘和前缘相,碎屑岩砂体呈条带状产出,与半深湖-深湖区泥页岩组成一套细粒沉积岩。孔店-羊三木物源和港西凸起等物源对 Bin27 和 Bin60-56 井区影响较弱,该区 Es³⁽¹⁾早期以泥页岩沉积为主,Es³⁽¹⁾晚期湖平面相对下降,该区形成一个相对闭塞的沉积环境,湖水蒸发量大于汇入量,生物化学沉积占优势,云灰质成分增加,形成一个近东西向展布的灰云坪沉积体。

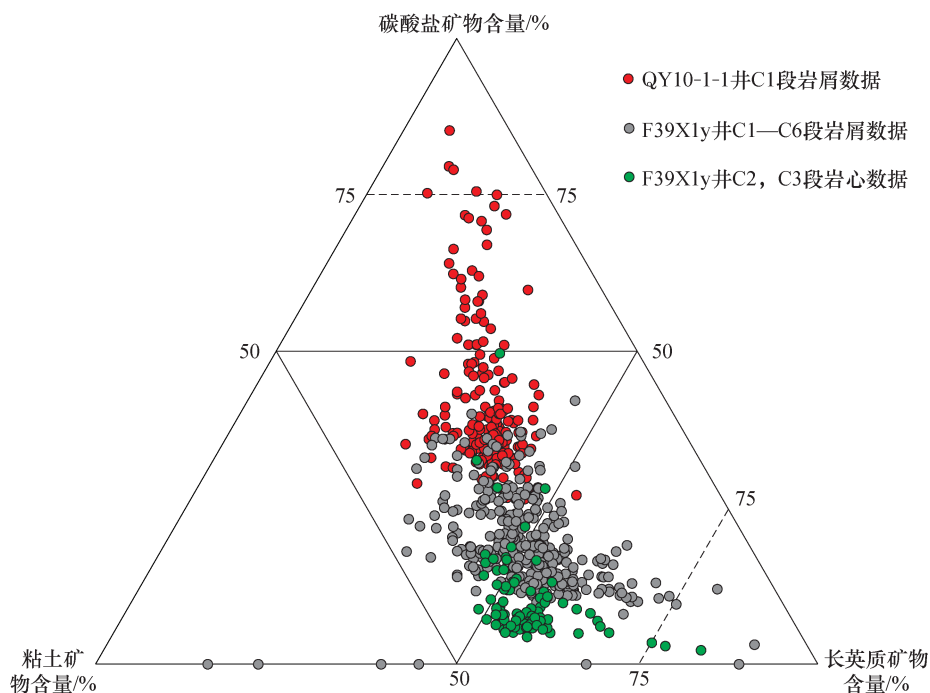
2.2 矿物成分

F39x1y 井 Es³⁽¹⁾ 40.1 m 取心段(87 块岩心样品)和 F39x1y(351 个岩屑样品)、QY10-1-1 井(210 个

岩屑样品)全岩 X 衍射分析数据显示,Es³⁽¹⁾泥页岩段粘土矿物含量主体分布在 20%~40%,采用三端元四组分命名方法^[15],Es³⁽¹⁾泥页岩岩性主要包括混合质页岩、长英质页岩和碳酸盐质页岩 3 种类型(图 2)。

“C”环带平面面积约 324 km²,根据矿物成分,可划分为长英质页岩区(约 285 km²,半深湖-深湖相)和碳酸盐质页岩区(约 39 km²,灰云坪相)(图 1)。

长英质页岩区面积相对较大,长英质矿物占优势,粘土矿物含量次之,碳酸盐矿物含量较少。岩石矿物组成以 F39x1y 井(岩心全岩 X 衍射矿物成分)最具有代表意义,该井 Es³⁽¹⁾泥页岩段长英质矿物含量为 28.4%~70.4%(平均 46%)、粘土矿物为 12.9%~

图 2 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 泥页岩全岩 X 衍射矿物三端元图Fig. 2 Ternary diagram of X-ray diffraction minerals of whole shale rock from the $Es^{3(1)}$ in the Qikou Sag

36.8% (平均 29.7%)、碳酸盐矿物为 1.9% ~ 45.4% (平均 8.7%)。

碳酸盐质页岩区面积相对局限,碳酸盐矿物含量占优势,长英质矿物和粘土矿物含量次之。岩石矿物组成以歧页 10-1-1 井(岩屑录井全岩 X 衍射矿物成分)最具有代表意义,该井 $Es^{3(1)}$ 泥页岩段长英质矿物含量为 6% ~ 53% (平均 31%)、粘土矿物为 7% ~ 37% (平均 23.5%)、碳酸盐矿物为 24% ~ 81% (平均 39%)。

2.3 岩性特征

长英质页岩区主要受陆源碎屑控制,岩性主要包括长英质页岩和以长英质矿物占优势的混合质页岩。岩心尺度下,粘土矿物、长英质纹层和粘土质纹层呈韵律互层或厚层状产出(图 3a)。长英质矿物占优势的层段,岩心较完整、层理不发育、以块状构造为主,薄片视域下厚层状长英质纹层相对较厚(图 3b,c)。长英质矿物大于 75% 的样品,薄片视域下层理不发育、块状结构,重力流成因砂质条带颗粒分选和磨圆较差(图 3d),牵引流成因砂体颗粒分选和磨圆相对较高,局部可见鲕粒(图 3e)。粘土矿物含量较高的层段,纹层较发育,岩心层理缝、低角度裂缝和高角度裂缝较发育,岩心破碎。

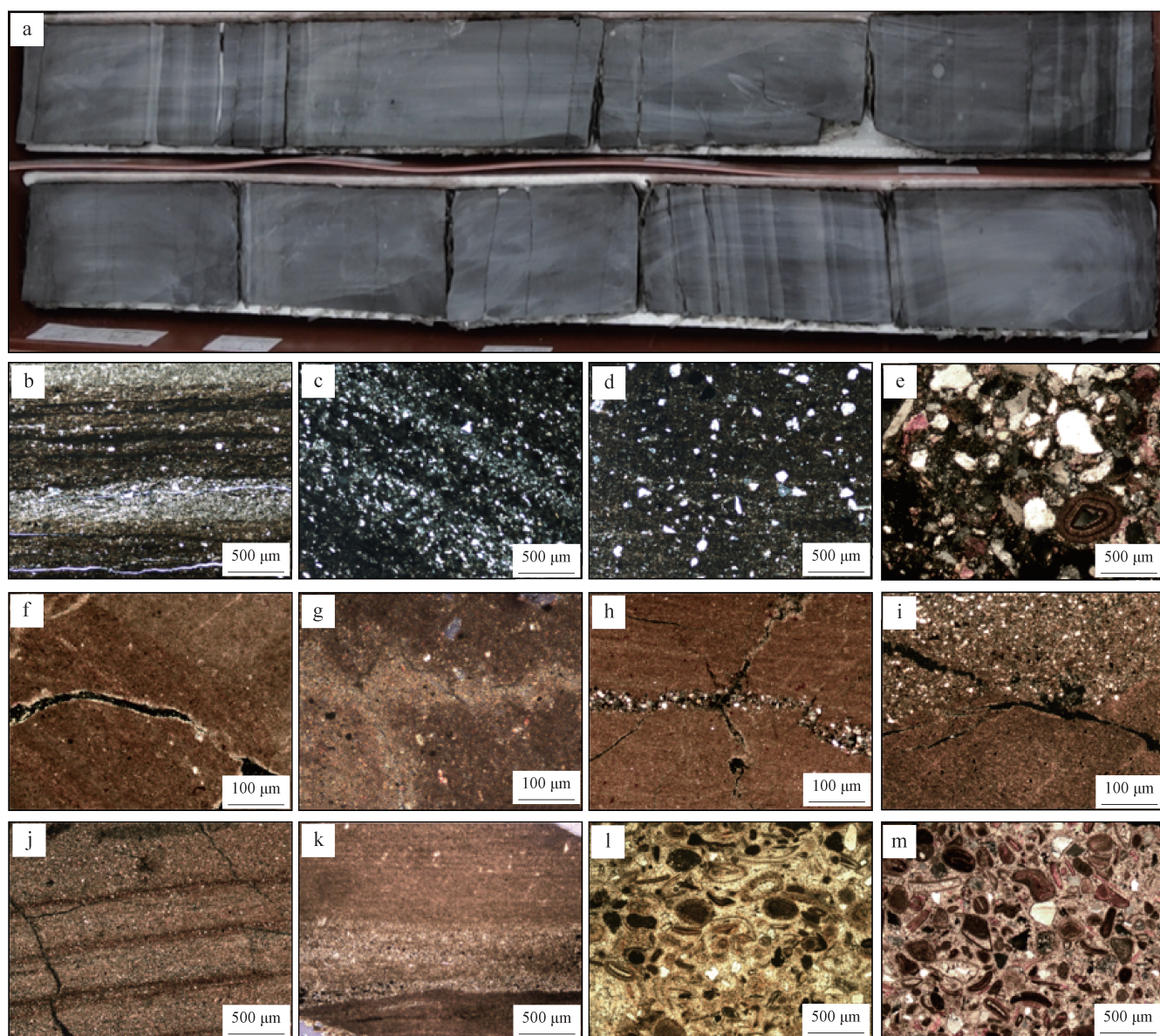
云质页岩区处于滨浅湖区沉积环境,生物化学沉积作用占优势,水动力较强,碳酸盐矿物占优势,沙三段埋深一般大于 3 000 m,白云岩化程度高。发育亮晶生物碎屑白云岩(图 3f,g)、泥晶白云岩(图 3h-j)、泥

质白云岩、含白云石泥岩、泥岩等多种岩性。薄片视域下,块状构造占优势,亦见有层理构造,水平层理少见,层理见有扰动、软沉积物变形等同沉积现象,总体为浅水高能沉积环境,受陆源碎屑影响较弱,以盆内生物化学沉积为主,碳酸盐矿物成分占优势,后期发生白云岩化,方解石含量较少,以白云石为主。湖泛期,陆源碎屑能够影响到该区域,砂质混染现象普遍(图 3j,k),砂质碎屑在高能环境下构成鲕粒核心。湖泛期长英质纹层、碳酸盐质纹层和粘土质纹层韵律互层,粘土质纹层相对较薄。

2.4 岩性组合特征

F39x1y 井 $Es^{3(1)}$ 录井资料显示,细粒沉积区 $Es^{3(1)}$ 岩性以泥页岩为主,夹有薄层(厚度 < 1m)泥质粉砂岩、白云岩,具有高自然伽马、低电阻特征(图 4)。不同岩性随钻测井曲线特征具有一定差异性,泥岩高自然伽马、低电阻特征明显,灰质泥页岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩具有低自然伽马、高电阻特征。

现场岩屑录井全岩 X 衍射分析技术在岩性识别过程中取得较好应用效果^[22-23],实现泥页岩岩性现场快速识别,弥补了常规岩心测试数据量较少的缺陷。根据垂向岩性组合关系,将该井 $Es^{3(1)}$ 划分为 6 个相对低伽马、高电阻组合段,由上至下依次命名为 C1—C6,其中 C6 仅在 F38x1 井钻遇。C 段内以长英质页岩占优势,C 段间以长英质混合页岩为主。C1—C6 内部岩

图3 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 泥页岩岩性特征Fig.3 Shale lithology of the $Es^{3(1)}$ in the Qikou Sag

a. F39x1井,埋深3 995.83~3 997.73 m,岩心照片,块状长英质页岩夹纹层状长英质混合页岩、沿层裂缝较发育;b. F39x1井,埋深3 983.85 m,普通薄片,长英质纹层与粘土质纹层互层;c. F39x1井,埋深3 983.85 m,普通薄片,长英质纹层与粘土质纹层互层;d. F39x1井,埋深3 891.54 m,普通薄片,长英质颗粒分散在泥质基质中;e. Bin28x1井,埋深3 532.8 m,普通薄片,长英质页岩,见鲕粒,浅水低能环境;f. Bin27井,埋深3 455 m,普通薄片,白云岩,裂缝发育;g. QY10-1-1井,埋深3 700 m,普通薄片,白云岩裂缝泥质充填物白云母化;h. Bin27井,埋深3 545.5 m,普通薄片,白云岩,裂缝发育,见长英质条带;i. Bin27井,埋深3 652.8 m,普通薄片,白云岩层向长英质层过度,裂缝发育;j. Bin27井,埋深3 661.8 m普通薄片,长英质云层、粘土质云层互层,裂缝;k. QY10-1-1井,埋深3 698 m,普通薄片,由下至上粘土质层、长英质层、云质层;l. QY10-1-1井,埋深3 702 m,普通薄片,鲕粒生物灰白云岩化,砂质混染;m. Bin56x1H井,埋深3 642 m,普通薄片,鲕粒生物灰白云岩化,砂质混染

性组合特征亦具有一定差异性,其中C1段长英质页岩为主,碳酸盐矿物含量较低 C2和C6段碳酸盐质混合页岩含量相对增加;C3、C4和C5段长英质页岩占优势(图4)。

$Es^{3(1)}$ 沉积末期,湖平面进一步退缩,QY10-1-1和Bin27井区C1段发育灰云坪沉积,岩性以混合质页岩和云(灰)质页岩为主,夹有少量薄层白云岩。整体

上, $Es^{3(1)}$ 以长英质页岩和长英质混合页岩为主,碳酸盐分布范围相对局限。

3 生烃特征

歧口凹陷经历多期构造运动,生烃环境优越,歧口凹陷古近系烃源岩以沙三段和沙一段为主,其次

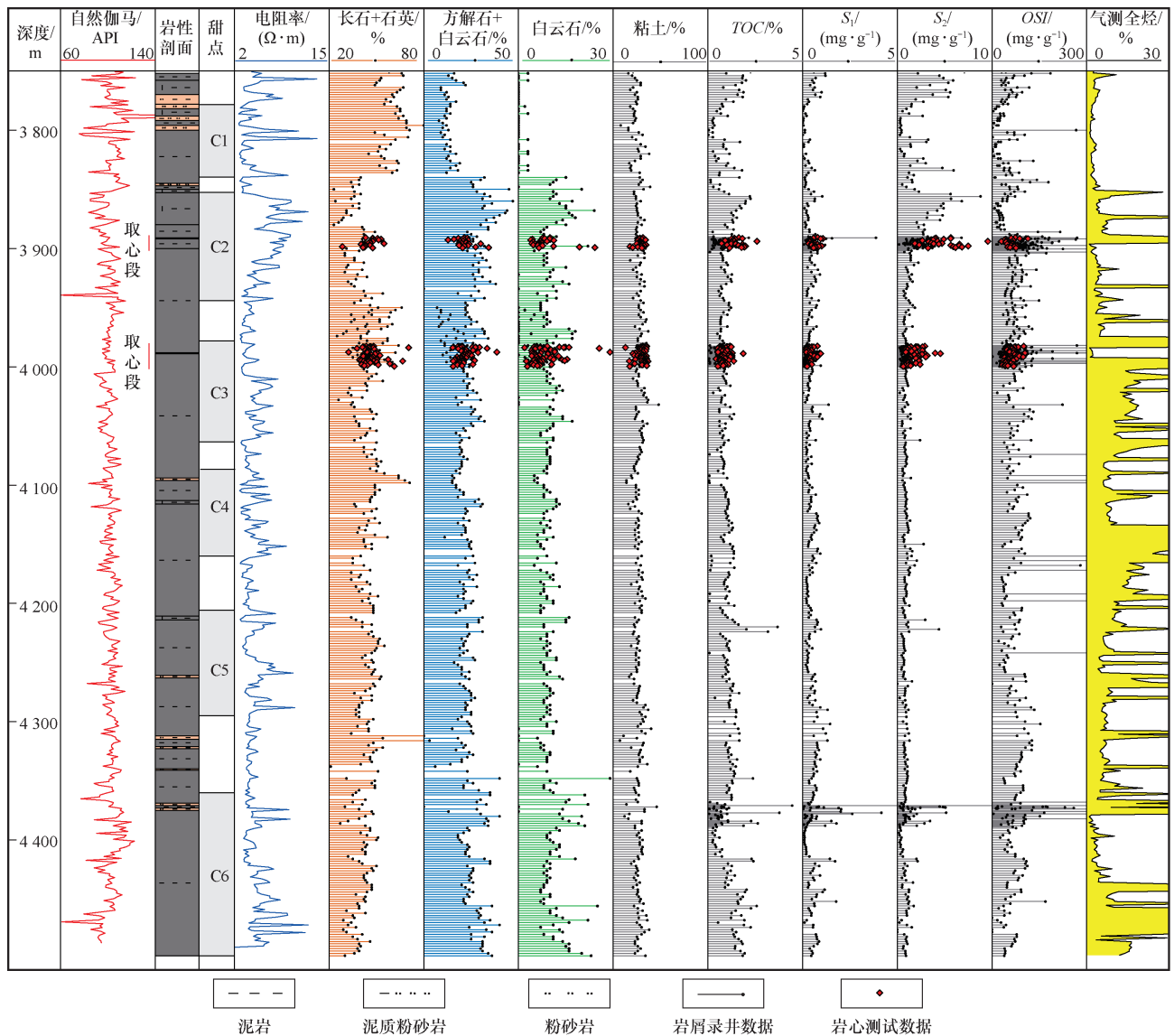


图 4 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 岩性组合特征 (F39x1y 井)

Fig. 4 Lithological combination characteristics of the $Es^{3(1)}$ in the Qikou Sag (Well F39x1y)

是沙二段和东营组,有效烃源岩总厚度为 1 500 ~ 3 300 m^[24]。 $Es^{3(1)}$ 有效烃源岩最大厚度达 1 500 m,面积近 4 000 km²,以 II 型有机质为主, $Es^{3(1)}$ 埋藏深度 2 800 ~ 5 500 m,热演化序列完整,烃源岩在歧口凹陷基本都已进入大量生气阶段。

3.1 有机质丰度

F39x1y 井 $Es^{3(1)}$ 页岩油 C2,C3 甜点段,长度分别为 9.5,17.6 m,共计 87 块次进行有机碳和热解分析联测样品总有机碳丰度 (TOC) 分布在 0.43% ~ 2.59% (平均 1.03%),0.5% < TOC ≤ 1% 的样品占 55.2%,1% < TOC ≤ 2% 的样品占 42.5%,TOC > 2% 的样品仅占 1.1%。F38x1 井 3 870 ~ 4 291 m 深度段 14 个岩屑样品实验室热解数据 TOC 分布在 0.96% ~

2.37% (平均 1.53%),TOC > 2% 的样品占 28.6%。

$Es^{3(1)}$ 有机质丰度一般小于 2%,TOC > 2% 区域分布相对局限,因此暂将 TOC > 1% 作为歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油优质源岩下限。

3.2 干酪根类型

F39x1y 和 F38x1 井 $Es^{3(1)}$ 共 101 个热解 S_2 峰值对应温度 (T_{max}) 分布在 438 ~ 460 °C,氢指数 $HI (S_2/TOC \times 100\%)$ 分布在 122.8 ~ 376.5 mg/g,有机质类型以 II 型为主。

3.3 成熟度

歧口凹陷沙三段 42 口井 125 个样品镜质体反射率及其对应取样深度数据分析结果显示,有机质成熟

度 R_o 值为 0.6% 时对应深度 3 100 m 左右, R_o 值为 1.1% 时对应深度 4 400 m 左右(图 5)。埋深在 3 100 ~ 4 400 m, 烃源岩处于大量生油阶段, 是页岩油勘探的有利层段。

4 储集特征

歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 早成岩 B 期埋深在 3 000 ~ 3 500 m, 中成岩 A 期埋深在 3 500 ~ 4 750 m, 中成岩 B 期埋深大于 4 750 m^[25-26]。以往 $Es^{3(1)}$ 泥页岩多集中在封闭能力评价, 认为 $Es^{3(1)}$ 泥页岩厚度大、分布面积广、排驱压力大、封闭性好, 是好的区域性盖层^[27-28]。从页岩油参数出发, $Es^{3(1)}$ 泥页岩基质孔和裂缝较为发育, 具有一定储集空间。

4.1 储集空间类型

歧口凹陷中生代经历多期构造改造, 断裂特征复杂^[29], 发育港东断裂、港东断裂分支、唐家河断裂等主干断裂及其两侧派生的一系列次级断裂^[30]。在断裂活动影响下, 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 裂缝系统十分发育, 在岩心和薄片尺度下裂缝普遍存在。F39x1 井 40.1 m 岩心中, 见有 12 条高角度裂缝, 裂缝长度 8.5 ~ 26 cm, 开度 1 mm 左右, 裂缝处于半充填状态。岩心完整程度受岩性控制明显, 粘土矿物富集段岩心较为破碎, 长英质矿物占优势段, 岩心保存相对完整。薄片视域下, 见有 2 条或多条裂缝相交构成复杂裂缝网络。除构造裂缝外, 纹层缝是发育于纹层内部的裂缝, 主要存在

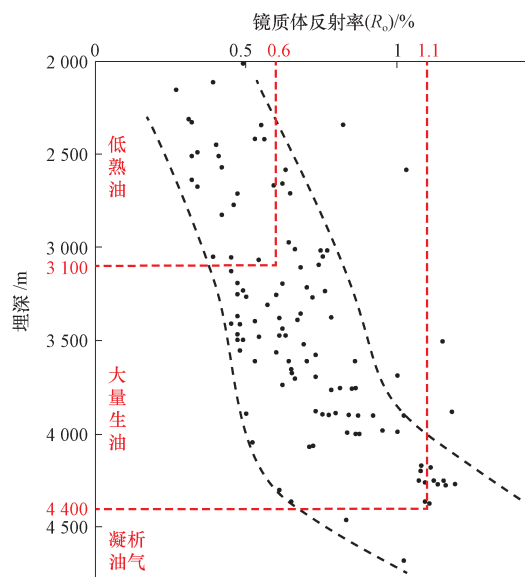


图 5 歧口凹陷 Es^3 成熟度与深度关系曲线

Fig. 5 Maturity vs. depth curve of the Es^3 in the Qikou Sag

于细粒长英沉积岩和和细粒混合沉积岩中, 是由于富长石和石英矿物层与富碳酸盐或富含粘土矿物层在垂向上互层而产生的, 是细粒沉积岩有利储集空间和油气运移通道。

基质孔隙和裂缝是歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩主要储集空间类型, 除此之外, 有机质孔亦占有一定比例。基质孔类型主要包括粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和晶内孔 4 种类型(图 6)。泥页岩主要由粒径小于 62.5 μm 的细粒沉积物经成岩转化后形成, 持续的压实作用和间歇性

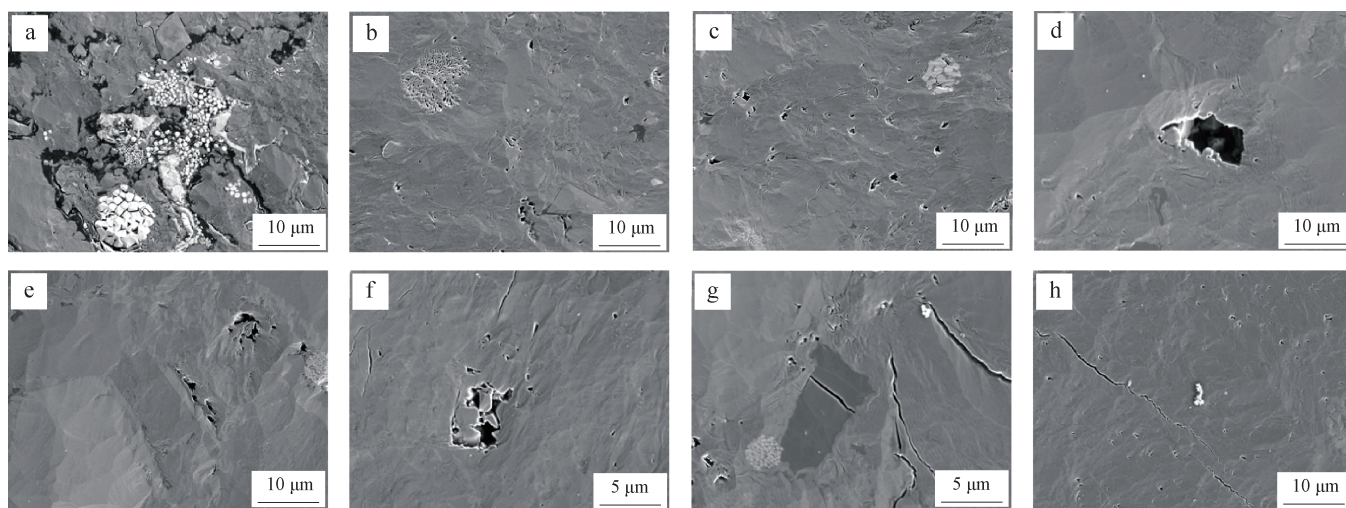


图 6 歧口凹陷 F39x1y 井 $Es^{3(1)}$ 泥页岩扫描电镜照片

Fig. 6 SEM images of the $Es^{3(1)}$ shale in Well F39x1y, Qikou Sag

a. 埋深 3 891.18 m, 黄铁矿晶间孔、碎屑颗粒间孔、微裂缝; b. 埋深 3 891.18 m, 溶蚀孔、残余粒间孔、伊利石晶间孔; c. 埋深 3 891.18 m, 溶蚀孔、残余粒间孔、黄铁矿晶间孔; d. 埋深 3 983.61 m, 粒内溶蚀孔内充填次生石英, 残余粒间孔; e. 埋深 3 983.36 m, 残余粒间孔、粒内溶蚀孔、黄铁矿晶间孔; f. 埋深 3 990.35 m, 颗粒溶蚀孔内充填次生石英、残余粒间孔、溶蚀孔; g. 埋深 3 988.06 m, 碎屑颗粒间孔、颗粒碎裂缝、残余粒间孔、溶蚀孔; h. 埋深 3 991.73 m, 微裂缝、残余粒间孔、溶蚀孔

胶结作用使得泥页岩逐渐致密化。歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 处于中成岩阶段,成岩演化程度高、压实作用强,组成泥页岩颗粒较细,粒间孔孔径一般分布在 $0.2 \sim 2.3 \mu\text{m}$,扫描电镜下颗粒之间排列较为紧密,颗粒周缘被软沉积物包围,粒间孔呈长条状展布,形成粒间缝。伊利石、高岭石和黄铁矿等片状或簇状分布的矿物中多发于井内孔,矿物在生长过程中不紧密堆积而形成晶间孔,晶内孔和晶间孔均以纳米级孔为主。成岩演化过程中长石、白云石和方解石等不稳定矿物易被生烃作用产生的有机酸溶蚀,形成次生溶蚀孔,溶蚀孔是 $Es^{3(1)}$ 主要的孔隙类型,占比达 50% 以上,在扫描电镜下可观察到大量颗粒内部溶蚀孔及粒间溶蚀孔,粒内溶蚀孔孔径一般分布在 $0.01 \sim 1.5 \mu\text{m}$,粒间溶蚀孔孔径一般分布在 $0.05 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 。在成岩演化过程中,胶结与溶蚀作用交替发生,部分溶蚀孔内见有自生石英矿物,基质孔之间的组合关系复杂。

歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 泥页岩是该区主要生烃源岩,普遍进入生油阶段,歧口主凹和板桥次凹已进入大量生气阶段,有机质在热解生烃过程中形成孔隙亦是该区主要孔隙类型之一。

4.2 储集物性特征

$Es^{3(1)}$ 处于中成岩阶段,长英质页岩和碳酸盐质页岩

岩内次生溶蚀基质孔隙发育,且经历多期构造改造,断裂特征复杂,裂缝较发育,基质孔、层理缝和构造缝组成复杂孔缝网络,改善了页岩储集物性,长英质页岩和碳酸盐质页岩为优势储集岩相。F39x1 井 4 371.95 ~ 4 386.23 m 泥页岩段岩石密度为 $2.51 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ (平均 2.59 g/cm^3),颗粒密度为 $2.6 \sim 2.76 \text{ g/cm}^3$ (平均 2.66 g/cm^3),孔隙度为 $1.19\% \sim 4.27\%$ (平均 2.67%),脉冲渗透率为 $(0.08 \sim 69.7) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均 $6.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) (表 1)。试验结果显示,岩石密度与岩石颗粒密度成正比,石英和长石矿物含量增加,在一定程度上改善了泥页岩储层孔隙度。

4.3 脆性特征

F39x1y 井 $Es^{3(1)}$ 泥页岩 93 块次粘土矿物分析结果显示,伊利石含量为 $17\% \sim 78\%$ (平均 50.2%),伊/蒙混层含量为 $9\% \sim 39\%$ (平均 22.4%),绿泥石含量为 $5\% \sim 43\%$ (平均 19.4%),高岭石含量为 $0 \sim 26\%$ (平均 7.6%),绿/蒙混层含量为 $0 \sim 10\%$ (平均 0.4%)。 $Es^{3(1)}$ 伊利石、绿泥石和伊/蒙混层为主,高岭石含量相对较少,个别样品含有绿/蒙混层,总体以为膨胀性低的脆性页岩。

工程力学试验结果能够直观反映页岩脆性特征,矿物成分与工程脆性指数之间满足下列经验公式:脆

表 1 歧口凹陷 F39x1 井 $Es^{3(1)}$ 泥页岩储集物性
Table 1 Physical properties of shale reservoirs in the $Es^{3(1)}$ in Well F39x1y, Qikou Sag

编号	埋深/m	长度/cm	直径/cm	颗粒体积/ cm^3	颗粒密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	岩石密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙度/ %	脉冲渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$
1	4 371.95	4.83	2.515	23.217	2.65	2.56	3.2	0.6
2	4 372.58	2.46	2.508	11.656	2.66	2.55	4.1	0.2
3	4 372.97	2.393	2.520	11.524	2.60	2.51	3.4	69.7
4	4 373.26	2.237	2.516	10.782	2.66	2.58	3.1	0.5
5	4 377.03	2.552	2.514	12.453	2.61	2.57	1.7	2.4
6	4 377.07	1.712	2.516	8.292	2.62	2.56	2.6	0.2
7	4 377.09	4.906	2.513	23.763	2.61	2.54	2.3	4.8
8	4 377.57	2.629	2.519	12.686	2.65	2.56	3.2	1.6
9	4 377.99	2.21	2.513	10.718	2.66	2.60	2.2	0.1
10	4 378.25	2.307	2.510	11.213	2.68	2.63	1.8	0.3
11	4 378.57	1.574	2.519	7.509	2.65	2.53	4.3	32.5
12	4 379.03	2.271	2.525	11.200	2.76	2.72	1.5	0.3
13	4 379.04	2.469	2.521	12.177	2.76	2.73	1.2	0.3
14	4 379.21	2.454	2.515	11.999	2.76	2.72	1.6	0.2
15	4 380.20	2.312	2.519	11.185	2.61	2.53	2.9	0.2
16	4 381.50	2.131	2.519	10.227	2.66	2.56	3.7	0.3
17	4 383.32	2.529	2.545	12.556	2.62	2.56	2.4	3.5
18	4 384.77	2.498	2.541	12.391	2.62	2.56	2.2	0.5
19	4 386.23	2.650	2.539	12.981	2.64	2.55	3.3	—

性指数 = 石英 + 0.63 × 白云石 + 0.52 × 长石 + 0.25 × 方解石 + 0.2 × 黄铁矿 + 0.18 × 方沸石 + 0.02 × 粘土^[23]。F39x1 井 93 块全岩 X 衍射矿物成分显示,该段样品矿物脆性指数分布在 63.2 ~ 87.1 (平均 70.3)。脆性指数为 30 时,易形成多缝,脆性指数大于 40 时易形成缝网和多缝过渡态^[31]。Es³⁽¹⁾ 矿物脆性指数均大于 63.2,工程脆性指数大于 47.6,压裂易形成缝网和多缝过渡态。

5 含油性

歧口凹陷 Es³⁽¹⁾ 泥页岩在岩心和薄片尺度下均见有不同程度荧光显示:F39x1 井 4 380.15 ~ 4 380.52 m 岩心段,白光下长英质纹层与粘土质纹层呈互层状产出,荧光下岩心发褐色荧光,薄互层段荧光相对较亮(图 7a);岩心沿理缝破裂面滴水不渗(图 7b),荧光下呈亮

蓝褐色荧光,裂缝内残留胶质沥青;薄片尺度下,在裂缝(图 7d)、层理缝(图 7e)和基质孔中(图 7f,g)均见有较强的蓝褐色荧光显示,Es³⁽¹⁾ 页岩具有较好含油性。

利用 MacroMR12-110H-1 核磁共振成像岩心驱替系统,执行 SY/T 6490-2014《岩样核磁共振参数实验室测量规范》,对 F39x1 井 Es³⁽¹⁾ 密闭取心样品进行核磁共振分析,样品深度 4 380.22 m,直径 2.521 cm,长度 4.844 cm,测试温度 25 °C,接受增益 100%,等待时间 6s,回波个数 18 000,回波间隔 0.12 ms,扫描次数 32。试验结果:该泥页岩样品核磁孔隙度 3.5%,含油体积 0.04 ml,含水体积 0.06 ml,含水饱和度 52.4%,含油饱和度 29.2%,可动油率 6.22%。

6 甜点评价

歧口凹陷 Es³⁽¹⁾ 半深湖-深湖区泥页岩厚度大、平

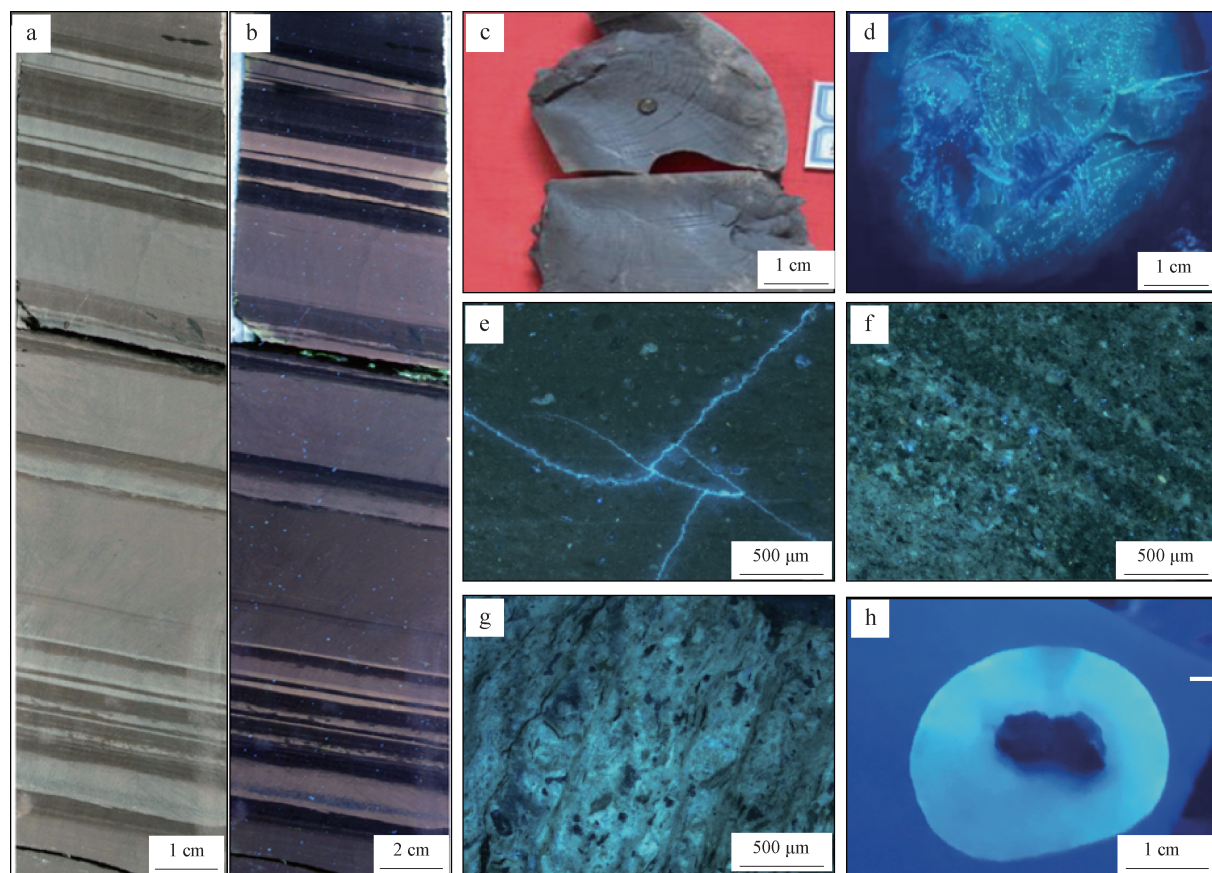


图 7 歧口凹陷 Es³⁽¹⁾ 泥页岩荧光显示特征

Fig. 7 Fluorescence micrographs of the Es³⁽¹⁾ shale in Qikou Sag

a. F39x1 井,埋深 4 380.15 ~ 4 380.52 m,岩心普光照片,长英质页岩与长英质混合页岩韵律互层;b. F39x1 井,埋深 4 380.15 ~ 4 380.52 m,岩心荧光照片,有机质纹层发黄褐色荧光;c. F39x1 井,埋深 3 891.45 m,岩心照片,断裂面含油、滴水不渗;d. F39x1 井,埋深 3 891.45 m,岩心照片,断裂面发蓝褐色荧光;e. F39x1 井,埋深 3 891.54 m,荧光薄片,裂缝被有机质充填,中-亮荧光;f. F39x1 井,埋深 3 983.85 m,荧光薄片,层理缝内黄褐色荧光;g. QY10-1-1 井,埋深 3 707 m,荧光薄片,生物碎屑灰岩白云岩化,基质孔内富含有机质,黄褐色强-中亮荧光;h. Bin56-1H 井,埋深 4 536 m,泥页岩岩屑滴照试验,油迹显示,亮荧光

面分布范围广,泥岩蒙脱石含量低、长英质和碳酸盐矿物含量较高,孔缝发育、储集物性好,页岩生烃条件优越,含油气性好。甜点分布主要受岩性和成熟度等条件控制。

1) 岩性组合条件控制页岩油甜点垂向分布

长英质页岩和碳酸盐质页岩富集段具有低自然伽马、高电阻、低声波时差、高气测异常特征,垂向甜点受岩性控制作用明显。根据岩性组合特征,将 $Es^{3(1)}$ 划分为 C1—C6 共 6 个页岩油甜点段,单层厚度分布在 7 ~ 96 m,累计厚度 434 m,不同甜点段垂向厚度具有一定差异性:其中, C1 甜点厚 36 ~ 70 m, C2 甜点厚 55 ~ 86 m, C3 甜点厚 7 ~ 52 m, C4 甜点厚 22 ~ 77 m, C5 甜点厚 15 ~ 62 m, C6 甜点厚 13 ~ 96 m(图 8)。

2) 埋深和岩性条件控制页岩油甜点平面分布

埋深在 3 100 ~ 4 400 m(对应 $R_o = 0.6\% \sim 1.1\%$),泥页岩处于大量生油阶段。平面上页岩与常规砂岩和致密砂岩储层相邻,泥页岩段粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩单层厚度不大于 5 m、累计厚度占页岩层系总厚度比例小于 30%(GB/T 38718—2020)。综合上述条件,划分 $Es^{3(1)}$ 页岩油与页岩气有利勘探区: C1 甜点面积 188.9 km²,其中页岩油有利勘探面积 160.3 km²,页岩气有利勘探面积 28.6 km²(图 8); C2 甜点面积 187 km²,其中页岩油有利勘探面积 172.3 km²,页岩气有利勘探面积 14.7 km²; C3 甜点面积 84.2 km²,其中页岩油有利勘探面积 73.4 km²,页岩气有利勘探面积 10.8 km²; C4 甜点面积 142.3 km²,其中页岩油有利勘探面积 53.2 km²,页岩气有利勘探面积 89.1 km²; C5 甜点面积 123.1 km²,其中页岩油有利勘探面积 31.2 km²,页岩气有利勘探面积 91.9 km²; C6 甜点面积 194.3 km²,其中页岩油有利勘探面积 57.8 km²,页岩气有利勘探面积 136.5 km²。利用体积含油率法^[32],计算歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油资源量,预测资源量约 4.1×10^8 t。

7 勘探实践

针对歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油,按“直井—大斜度井定垂向甜点,水平井钻探提产”的原则,寻求 $Es^{3(1)}$ 页岩油勘探突破。

在 F38x1 井 C3—C5 甜点段老井试油获得工业油流基础上,针对长英质页岩发育的 C3 甜点实施水平井 F39X1,水平段长 416 m,综合解释 I 类甜点 186.4 m/22 层, II 类甜点 133.9 m/21 层,压裂液 3 558.36 m³,加砂 135.7 m³。2019 年 8 月,油压 28.11 MPa,日产油 27.7 t,日产气 4 944 m³;2021 年 3 月间开生产,油压

1.21 MPa,日产油 0.3 t,日产气 622 m³;截止到 3 月份,累计试采 292 d,累产油 679 t,累产气 37.97×10^4 m³,反排率 61.22%。

在 Bin60—56 井 C1, C2 甜点段老井试油获得工业油流基础上,针对灰云坪区 C1 甜点实施水平井 QY10—1—1,水平段长 313 m,射开 3 692 ~ 3 714 m(垂深 3 470.7 ~ 3 474.8 m),5 mm 油嘴自喷,初期日产油 115.2 m³,日产气 5 891 m³,油压 7.5 MPa,套压 9 MPa。原油密度 0.881 g/cm³,粘度 27.05 mPa·s(50℃),凝固点 23℃,含蜡量 14.19%,含硫 0.16%,压力系数 1.4。

Bin56—1H 井 C1 甜点段,压裂液 26 214.25 m³,加砂 1 467.19 m³,2020 年 9 月 12 日 2 mm 油嘴放喷求产:9 月 12 日,油压 32 MPa,日产液 72.9 m³,日产油 10.79 t;2021 年 2 月 24 日,油压 0.82 MPa,日产液 11.39 m³,日产油 9.11 t;2021 年 3 月 7 日钻塞后,油压恢复到 21.11 MPa,日产液 79.52 m³,日产油恢复到 20.28 t;截止到 4 月 5 日,试采 206 d,累产压裂液 2 036.55 m³,累产油 3 043.11 t,反排率 7.77%, $Es^{3(1)}$ 页岩油勘探获得重要突破。

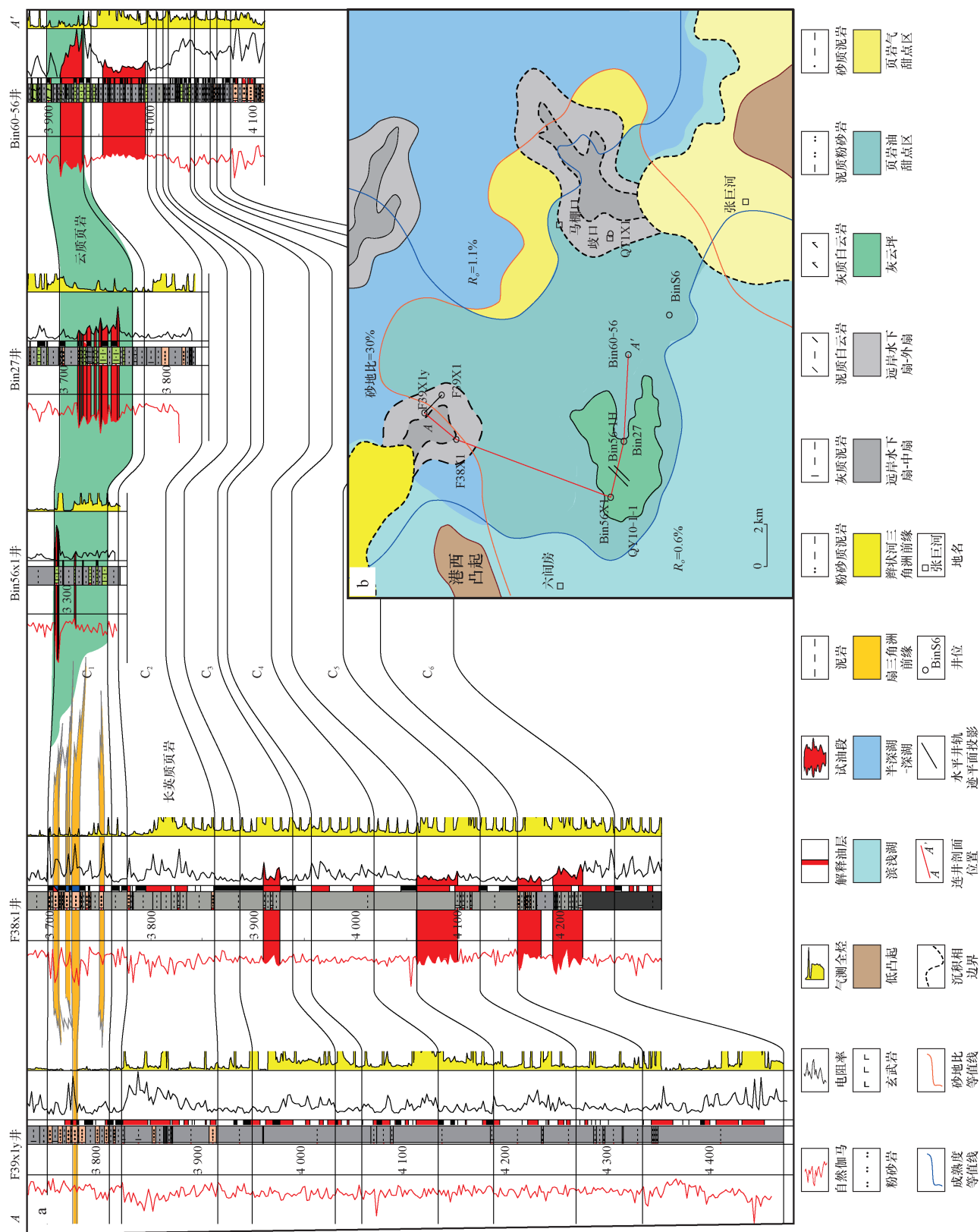
大港油田继沧东凹陷孔二段页岩油实现工业化开发突破后,歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油勘探再获重要突破,落实亿吨级规模战场。同时作为主力勘探层系之一的沙河街组在渤海湾盆地广泛发育,歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 页岩油研究认识与勘探实践对渤海湾盆地其他油田页岩油勘探具有重要借鉴意义。

8 结论

1) 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 发育稳定湖盆,半深湖—深湖区泥页岩广泛发育,泥页岩段孔缝发育,脆性指数高、储层敏感性差、含油气性好,具备页岩油富集的生烃、储集、含油和工程改造条件。

2) 歧口凹陷 $Es^{3(1)}$ 纵向划分 6 个甜点段,由上至下依次为 C1—C6,甜点段平面稳定,单层厚度分布在 7 ~ 96 m,累计厚度 434 m,平面分布面积在 87.4 ~ 194.3 km²,平面甜点叠加面积 256 km²,初步计算资源量 4.1×10^8 t。

3) 按“老井控面、水平井提产”的原则,首先在 Bin60—56 和 F38x1 两口大斜度井试油获工业油流,针对直井—大斜度井锁定垂向甜点段部署水平井勘探, QY10—1—1 井获得日产百吨高产油气流, Bin56—1H 井自喷试采 206 d 后,累产油 3 043.11 t,反排率为 7.77%,证实该区 $Es^{3(1)}$ 页岩油具有较大勘探潜力。



4) 沙三段在渤海湾盆广泛分布,歧口凹陷 Es³⁽¹⁾页岩油勘探突破对渤海湾盆地页岩油勘探具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] 袁选俊,林森虎,刘群,等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7 油层组为例[J]. 石油勘探与开发,2015,42(1):34-43.
Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.
- [2] 贾承造,庞雄奇,姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报,2016,1(1):2-23.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi, Jiang Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 2-23.
- [3] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184.
Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [4] 张逊,庄新国,涂其军,等. 准噶尔盆地南缘芦草沟组页岩的沉积过程及有机质富集机理[J]. 地球科学,2018,43(2):538-550.
Zhang Xun, Zhuang Xinguo, Tu Qijun, et al. Deposition process and mechanism of organic matter accumulation of Lucaogou shale in Southern Junggar basin, Northwest China[J]. Earth Science, 2018, 43(2): 538-550.
- [5] 陈世加,张焕旭,路俊刚,等. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):186-193.
Chen Shijia, Zhang Huanxu, Lu Jungang, et al. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 186-193.
- [6] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学:内涵与展望[J]. 沉积学报,2020,38(1):1-29.
Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.
- [7] 王翔. 鄂尔多斯盆地西部页岩油水平井井壁稳定技术[J]. 石油地质与工程,2019,33(4):88-91.
Wang Xiang. Wellbore stability technique in horizontal wells for shale oil reservoirs in western Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 33(4): 88-91.
- [8] 许琳,常秋生,冯玲丽,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):649-660.
Xu Lin, Chang Qiusheng, Feng Liling, et al. The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 649-660.
- [9] 许琳,常秋生,杨成克,等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层特征及含油性[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):535-549.
Xu Lin, Chang Qiusheng, Yang Chenke. Characteristics and oil-bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 535-549.
- [10] 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一亚段为例[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 breakthrough 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.
- [11] 赵贤正,周立宏,赵敏,王文革,官全胜. 陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):589-600.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Zhao Min, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: A case study on Kong-2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 589-600.
- [12] 柳广弟,王德强. 黄骅坳陷歧口凹陷深层异常压力特征[J]. 石油勘探与开发,2001(3):22-24.
Liu Guangdi, Wang Deqiang. The characteristics of abnormal pressure in deep formations in Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001(3): 22-24.
- [13] 吴永平,付立新,杨池银,等. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响[J]. 石油学报,2002(2):16-21.
Wu Yongping, Fu Lixin, Yang Chiyin, et al. Effect of Mesozoic tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in buried hills in Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002(2): 16-21.
- [14] 刘世瑞,王有功,刘海涛,等. 歧口凹陷断裂密集带形成演化特征及油气富集差异研究[J]. 特种油气藏,2019,27(5):88-93.
Liu Shirui, Wang Yougong, Liu Haitao, et al. Study on the formation and evolution characteristics and hydrocarbon enrichment difference of fault concentrated zones in Qikou Sag[J]. Special oil & Gas Reservoirs, 2019, 27(5): 88-93.
- [15] 周立宏,韩国猛,马建英,等. 歧口凹陷西南缘沙河街组一段下亚段古环境特征与沉积模式. 石油学报,2020,41(8):903-917.
Zhou Lihong, Han Guomeng, Ma Jianying, et al. Palaeoenvironment characteristics and sedimentary model of the lower submember of member 1 of Shahejie formation in the Southwestern margin of Qikou sag. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 903-917.
- [16] 周立宏,陈长伟,韩国猛,等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙一下亚段地质特征与页岩油勘探潜力[J]. 地球科学,2019,44(8):2736-2750.
Zhou Lihong, Chen Changwei, Han Guomen, et al. Geological characteristics and shale oil exploration potential of lower first member of Shahejie Formation in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2736-2750.
- [17] 李三忠,索艳慧,郭玲莉,等. 渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(4):98-

109.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Guo Lingli, et al. Transfer zones and differences in inter-plate deformation in great Qikou sag of the Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 98–109.
- [18] 韩国猛, 司维柳, 石倩茹, 等. 歧北斜坡岩性油气藏成藏条件与有利区带优选[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 594–600.
Han Guomeng, Si Weiliu, Shi Qianru, et al. Conditions of Lithologic Reservoir formation and favorable selection of exploration area in North Slope of Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 594–600.
- [19] 周立宏, 韩国猛, 牟智全, 等. 箕状断陷缓坡带油气成藏模式——以歧北斜坡为例[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(1): 27–31 + 138.
Zhou Lihong, Han Guomen, Mou Zhiquan, et al. Research on hydrocarbon accumulation models of gentle slope belt of half graben—A case study of Qibei slope belt[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(1): 27–31.
- [20] 韩国猛, 李淑恩, 池永红, 等. 大港歧北斜坡沙二段和沙三段模型指导下薄互层储层预测及效果[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(6): 779–787.
Han Guomeng, Li Shuen, Chi Yonghong, et al. Effect and prediction of thin interbedded reservoir under the guidance of the Es_2 and Es_3 Mode in the North Slope of Qikou fo Dagang[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(6): 779–787.
- [21] 赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 等. 断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现——以歧口凹陷歧北缓坡带为例[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 729–739.
Zhao Xianzheng, Piu Xiugang, Wang Jiahao, et al. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin; a case study of Qibei slope in Qikou sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 38(7): 729–739.
- [22] 赵贤正, 蒲秀刚, 韩文中, 等. 细粒沉积岩性识别新方法 with 储集层甜点分析——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 492–502.
Zhao Xianzheng, Piu Xiugang, Han Wenzhong, et al. A new method for lithology identification of fine grained deposits and reservoir sweet spot analysis; A case study of Kong 2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 492–502.
- [23] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3625–3639.
Zhou Lihong, Piu Xiugang, Chen Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin; A case from the Second Member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3625–3639.
- [24] 周立宏, 肖敦清, 蒲秀刚, 等. 陆相断陷湖盆复式叠合油气成藏与优势相富集新模式——以渤海湾盆地歧口凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 7–11.
Zhou Lihong, Xiao Dunqing, Piu Xiugang, et al. New pattern of composite superimposed reservoirs and advantageous phase accumulation in continental rifted lake basin; A case study from Qikou Sag of Bohai Bay Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(1): 7–11.
- [25] 王书香, 于学敏, 何咏梅, 等. 歧口凹陷滨海地区沙河街组深层碎屑岩储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 566–571.
Wang Shuxiang, Yu Xuemin, He Yongmei, et al. Characteristics and formation deep clastic reservoir in Binhai area of Qikou Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 566–571.
- [26] 肖敦清, 姜文亚, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷中深层天然气成藏条件与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1409–1421.
Xiao Dunqing, Jiang Wenya, Piu Xiugang, et al. Natural gas formation conditions and resource potential in mid-deep strata of the Qikou sag, Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1409–1421.
- [27] 毛凯楠, 解习农, 肖敦清, 等. 歧口凹陷歧深地区古近系多层超压体系特征[J]. 特种油气藏, 2010, 17(6): 38–41.
Mao Kainan, Xie Xinong, Xiao Dunqing, et al. Characteristics of the Paleogene multi layer overpressure system in the Qishen area, Qikou depression [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010, 17(6): 38–41.
- [28] 胡明, 房金伟, 赵佳丽, 等. 歧口凹陷马东地区深层油气藏特征及成藏主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 32–39.
Hu Ming, Fang Jinwei, Zhao Jiali, et al. Characteristics and main accumulation controlling factors for deep hydrocarbon reservoirs in Ma-dong area of Qikou Sag [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 32–39.
- [29] 周立宏, 蒲秀刚, 周建生, 等. 黄骅断陷歧口凹陷古近系坡折体系聚砂控藏机制分析[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 371–377.
Zhou Lihong, Piu Xiugang, Zhou Jiansheng, et al. Sand gathering and reservoir-controlling mechanisms of Paleogene slope-break system in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 371–377.
- [30] 周立宏, 韩国猛, 董越崎, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断鼻—砂组合模式与油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 869–882.
Zhou Lihong, Han Guomen, Dong Yueqi, et al. Fault-sand combination modes and hydrocarbon accumulation in Binhai fault nose of Qikou Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 869–882.
- [31] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356–363.
Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356–363.
- [32] 周立宏, 于超, 滑双君, 等. 沧东凹陷孔店二段页岩油资源评价方法与应用[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 1–6.
Zhou Lihong, Yu Chao, Hua Shuangqing, et al. Shale oil resource estimation and application in Kong 2 Member of Cangdong Sag [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 1–6.