

渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征

刘惠民¹, 李政², 包友书², 张守春², 王伟庆², 吴连波², 王勇², 朱日房², 方正伟², 张顺²,
刘鹏², 王敏²

(1. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257015; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015)

摘要: 济阳坳陷高产页岩油井BYP5古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)页岩为高成熟、富碳酸盐页岩典型代表, 研究其地质特征对相似页岩勘探具有借鉴意义。从矿物组成、薄层结构、生烃条件、烃类流体性质、储集空间特征等方面剖析了该页岩基本特点。基于地化参数异常分析了页岩油微运移调整、富集机制, 确定了页岩油可动的油饱和度指数(*OSI*)、总有机碳含量(*TOC*)及孔隙度下限。研究了有利于页岩油高产的地质条件。研究表明: BYP5井沙三下亚段页岩以碳酸盐质页岩为主, 具有明显的薄层结构特征, 薄层类型主要包括泥质薄层和泥晶方解石薄层。*TOC*为0.58%~7.98%, 平均4.52%, 以I型有机质为主, 处于生轻质油-凝析气阶段。孔隙度为2.2%~6.9%, 平均3.22%, 储集空间包括基质孔、层间缝以及穿层缝, 其中基质孔是主要储集空间类型。可动页岩油的*OSI*下限值低于50 mg/g, *TOC*下限值为1%, 孔隙度下限为2.2%。利于高产的地质条件是: ①较高的有机质丰度和生烃潜力, 为石油富集及流动奠定坚实物质基础; ②油气具有较好的流动性, 可大大降低有效储集物性下限; ③异常高压为石油产出提供了充足的天然能量; ④页岩的纹层状/层状结构特征决定了其具有较高的生-储-渗效率; ⑤层间缝和穿层缝等多种裂缝发育, 可有效沟通裂缝两侧的基质孔隙, 有利于基质孔中石油产出。

关键词: 富碳酸盐页岩; 微运移调整; 纹层状/层状结构; 油饱和度指数; 页岩油; 济阳坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

LIU Huimin¹, LI Zheng², BAO Youshu², ZHANG Shouchun², WANG Weiqing², WU Lianbo², WANG Yong²,
ZHU Rifang², FANG Zhengwei², ZHANG Shun², LIU Peng², WANG Min²

(1. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Shales in the lower sub-member of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation (*Es*^{3l} section) in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression are of typical carbonate-rich type with high maturity. Research on their geological characteristics is of analogy and reference significance for the exploration of similar shales. We delve into the basic characteristics of these shales in terms of mineral composition, thin layer structure, hydrocarbon-generating condition, hydrocarbon fluid property, and reservoir space type. Based on the anomalies of geochemical parameters, we discuss the micro-migration adjustment and accumulation mechanism of shale oil, determine the lower limit of the oil saturation index (*OSI*), total organic carbon (*TOC*) content, and porosity for shale oil mobility. Therefore, the geological conditions favorable for high shale oil production are concluded. As revealed by this study, shales in the *Es*^{3l} section in well BYP5 is predominantly of carbonate-rich type, characterized by thin layer structure dominated by argillaceous and micritic calcite thin layers. With *TOC* content ranging from 0.58% to 7.98% (average: 4.52%) and Type I organic matter predominating, the shales in the study area are at the stage of light oil and condensate gas generation. With porosity between 2.2% and 6.9% (average: 3.22%), the dominant storage spaces are matrix pores, followed by inter-layer and cross-cutting fractures. The lower limit of the shales' *OSI* for oil production

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-10-07。

第一作者简介: 刘惠民(1969—), 男, 教授级高级工程师, 油气勘探管理。E-mail: hmlu@vip.163.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目(P23084, P22083); 中国石化胜利油田分公司前瞻性基础性研究项目(YJQ2201)。

is less than 50 mg/g, while that of their *TOC* content and porosity for oil production is 1 % and 2.2 %, respectively. The geological conditions favorable for high shale oil production are as follows: (1) High organic matter abundance and high hydrocarbon-generating potential as a result serve to lay a solid material foundation for oil enrichment and flow; (2) High hydrocarbon mobility significantly reduces the lower limit of effective reservoir properties for hydrocarbon storage; (3) Abnormally high pressures provide sufficient natural energy for oil production; (4) The lamellar/layered structures of shales determine the high efficiency of hydrocarbon generation, storage, and permeability of the reservoir; (5) Multiple types of fractures like inter-layer and cross-cutting fractures can effectively connect matrix pores on both sides of the fractures, facilitating the oil recovery from the matrix pores.

Key words: carbonate-rich shale, micro-migration adjustment, lamellar/layered structure, oil saturation index (*OSI*), shale oil, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:刘惠民,李政,包友书,等.渤海湾盆地济阳拗陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1405–1417. DOI: 10.11743/ogg20230606.

LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1405–1417. DOI: 10.11743/ogg20230606.

页岩油气是一种重要的非常规油气资源,北美海相页岩油气的成功勘探开发推进了全球页岩油气的勘探及研究步伐。中国陆相页岩层系分布面积广、厚度大,油气资源评估的技术可采资源量已达 $200\times 10^8\text{ t}^{[1]}$ 。中国陆相泥页岩层系具有沉积相变快、沉积厚度大、成熟度较低、黏土矿物含量高的特点,且与海相地层相比,具有沉积构造背景较不稳定,沉积年代较新、非均质性更强,地层能量和地温梯度较低,以及烃类黏度和密度较大等不利因素^[2–5]。然而,就其自身特点而言,中国陆相页岩也在含油性、储集性、可动性和可压性等方面的优势。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组^[6]、渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段^[1, 7–8]、松辽盆地青山口组^[9–11]、济阳拗陷沙河街组四段和沙河街组三段^[12–14]、鄂尔多斯盆地延长组7段^[17]、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组^[6, 18]等多类型盆地的多层系获得页岩油产能突破,也说明中国陆相页岩油具有其独特的勘探开发有利地质条件,但各个地区页岩油地质特征也表现出明显的差异性,宏观上包括页岩的岩相、有机质特征、有机质成熟度及油气性质等。

济阳拗陷为中国东部陆相断陷盆地富油拗陷的典型代表,在古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)、沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)发育典型的富碳酸盐页岩。经过十几年技术攻关,胜利油田在富碳酸盐页岩的岩相类型、含油性、储集性、可动性及可压性等方面取得了一系列的理论及勘探成果^[12–16, 19–23],有效指导了济阳拗陷页岩油勘探,在镜质体反射率(R_0)为0.6 % ~ 1.1 %的页岩中,取得了页岩油勘探的重大突破。其中,获得高产并持续稳产的BYP5井页岩为济阳拗陷诸多突破中的一种典型类型,其页岩具有高碳

酸盐含量、纹层状/层状结构发育、页岩孔隙度较低、有机质成熟度较高的特点。本文详细分析其页岩油发育的地质特征及其高产的地质条件,以期为该类型的页岩油勘探开发及评价提供参考。

1 BYP5井基本情况

BYP5井位于渤海湾盆地济阳拗陷沾化凹陷渤南洼陷(图1)。渤南洼陷是济阳拗陷的一个三级负向构造单元,属于北东走向的断陷湖盆,具有“北断南超、

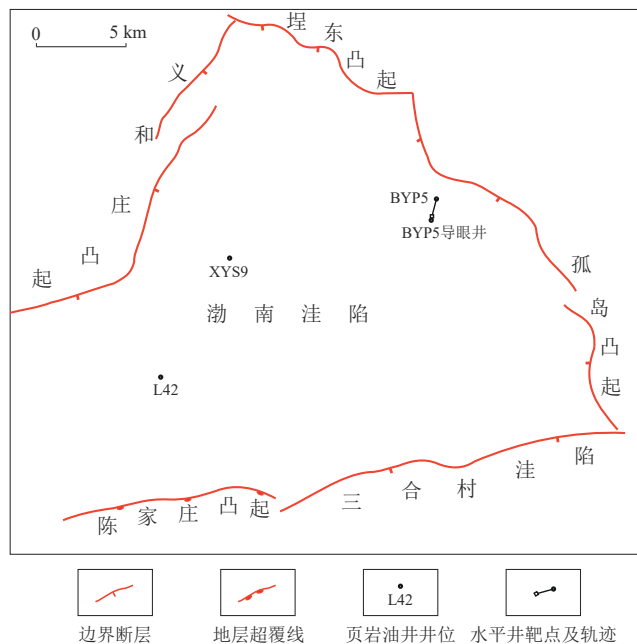


图1 济阳拗陷渤南洼陷BYP5井位置

Fig. 1 Map showing the location of well BYP5 in the Bonan Sag, Jiyang Depression

东西双断”的特点。渤南洼陷地层自下而上分别为古生界,中生界,古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。其中沙河街组自下而上可分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。渤南洼陷主要发育沙四上亚段、沙三下亚段、沙三中亚段以及沙一段烃源岩,其中沙三下亚段沉积于深断陷期,为半干旱-潮湿气候的咸水-半咸水沉积环境,发育深灰色深湖-半深湖相富碳酸盐页岩,厚度一般为100~300 m。

在常规油气勘探过程中,多口井钻经渤南洼陷沙三下亚段页岩段时见油气显示,对部分井试油见工业油流,如XYS9井试油获得日产油量38.5 t,投产后累积产油量11 346 t, L42井试油获得日产油量79.9 t,投产后累积产油量13 605 t,显示出其页岩油气勘探潜力良好。

BYP5井主要用于探索渤南洼陷沙三下亚段较高演化程度区页岩含油气情况。为准确控制水平井穿行的甜点段,先期在附近钻探了BYP5导眼井。BYP5导眼井综合柱状图如图2所示。BYP5导眼井的主要勘探层段为沙三下亚段的13上层组1-3小层,其中深度4 267.0~4 338.1 m层段的测试数据为岩心数据,4 267.0 m以上为岩屑测试数据。BYP5井水平段长度为1 059 m,在深度4 250.0~5 248.0 m(垂深4 047.1~4 279.5 m)的页岩段进行压裂施工,入靶点相当于BYP5导眼井4 219 m深度,靶盒相当于BYP5导眼井4 218~4 220 m深度,实际井轨迹穿行了1小层和2小层。

该井峰值日产油85.67 t,日产气 $7.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。截至2023年6月29日,已生产735 d,日产油量仍达15.70 t,日产气量达 $1.66 \times 10^4 \text{ m}^3$,累产油 $1.69 \times 10^4 \text{ t}$,累产气 $1.886.62 \times 10^4 \text{ m}^3$,累积油气当量 $3.58 \times 10^4 \text{ t}$ 。生产初期,BYP5井分离罐的原油密度为 $0.839 5 \text{ g/cm}^3$,后期密度有所下降,约8个月后,分离罐原油密度为 $0.827 6 \text{ g/cm}^3$ 。BYP5井生产井段平均地层温度为 175.0°C ,原始地层压力约为77.6 MPa,压力系数约为1.8,具有明显的高温、高压特征。

2 页岩矿物组成及薄层结构特征

2.1 矿物组成

BYP5导眼井沙三下亚段13上层组岩性以泥质灰岩和灰质泥岩为主,该层组1-3小层发育一定量的含泥灰岩(图2)。页岩岩心样品的矿物组成以碳酸盐、

陆源碎屑(石英和长石)和黏土矿物为主,含有少量的黄铁矿及石膏等其他矿物。整体上其碳酸盐含量最高,占16.0%~81.0%,平均55.1%,以方解石为主,白云石含量相对较低;陆源碎屑含量次之,占13.0%~48.0%,平均24.5%,以石英为主;黏土矿物含量占4.0%~45.0%,平均17.8%(表1)。

以三大类矿物(碳酸盐矿物、陆源碎屑矿物和黏土矿物)组成判断页岩类型,BYP5井沙三下亚段页岩类型包括碳酸盐质页岩和混合质页岩,但以碳酸盐质页岩为主(图3)。总体上,BYP5井沙三下亚段页岩具有明显的富碳酸盐页岩的特征。

2.2 薄层结构特征

BYP5导眼井沙三下亚段13上层组岩屑和岩心样品分析显示,该区页岩主要为纹层状、层状页岩以及少量块状泥岩,具有明显的薄层结构特征,薄层类型主要为泥质薄层、碳酸盐薄层以及极少量的陆源碎屑薄层。

BYP5导眼井沙三下亚段的岩心样品主要矿物之间的相关关系如图4所示:黏土矿物含量、陆源碎屑矿物含量均与碳酸盐矿物含量呈负相关,而陆源碎屑矿物含量则与黏土矿物含量呈正相关。通常陆源碎屑矿物与黏土矿物为同源共沉积关系,镜下也可以观测到陆源碎屑矿物大多赋存于黏土矿物层中,形成黏土矿物与陆源碎屑混合的泥质层(图5a,d,e)。

碳酸盐薄层以泥晶方解石为主(图5a—d),含有少量的粉晶方解石层(图5b,c,e)和极少量的纤维状方解石脉。通常,泥晶方解石颗粒细小,为原生方解石结构;粉晶方解石薄层为方解石重结晶产物,具有明显的晶粒结构。纤维状方解石脉一般具有垂直层面的纤维状晶体结构,为酸性流体溶解、迁移碳酸盐矿物在开启的层间缝中重结晶的产物。

大部分陆源碎屑矿物分散于泥质层中,也发育极少量的陆源碎屑薄层(图5e),薄层的成分主要为石英、长石和极少量岩屑,颗粒间主要充填物为泥质和方解石。

3 有机质丰度、类型及成熟度

3.1 有机质丰度

BYP5导眼井中页岩的岩屑和岩心样品总体具有较高的有机质丰度(图6)。其TOC为0.58%~7.98%,平均值为4.52%;热解 S_1 (岩石中的热解游离

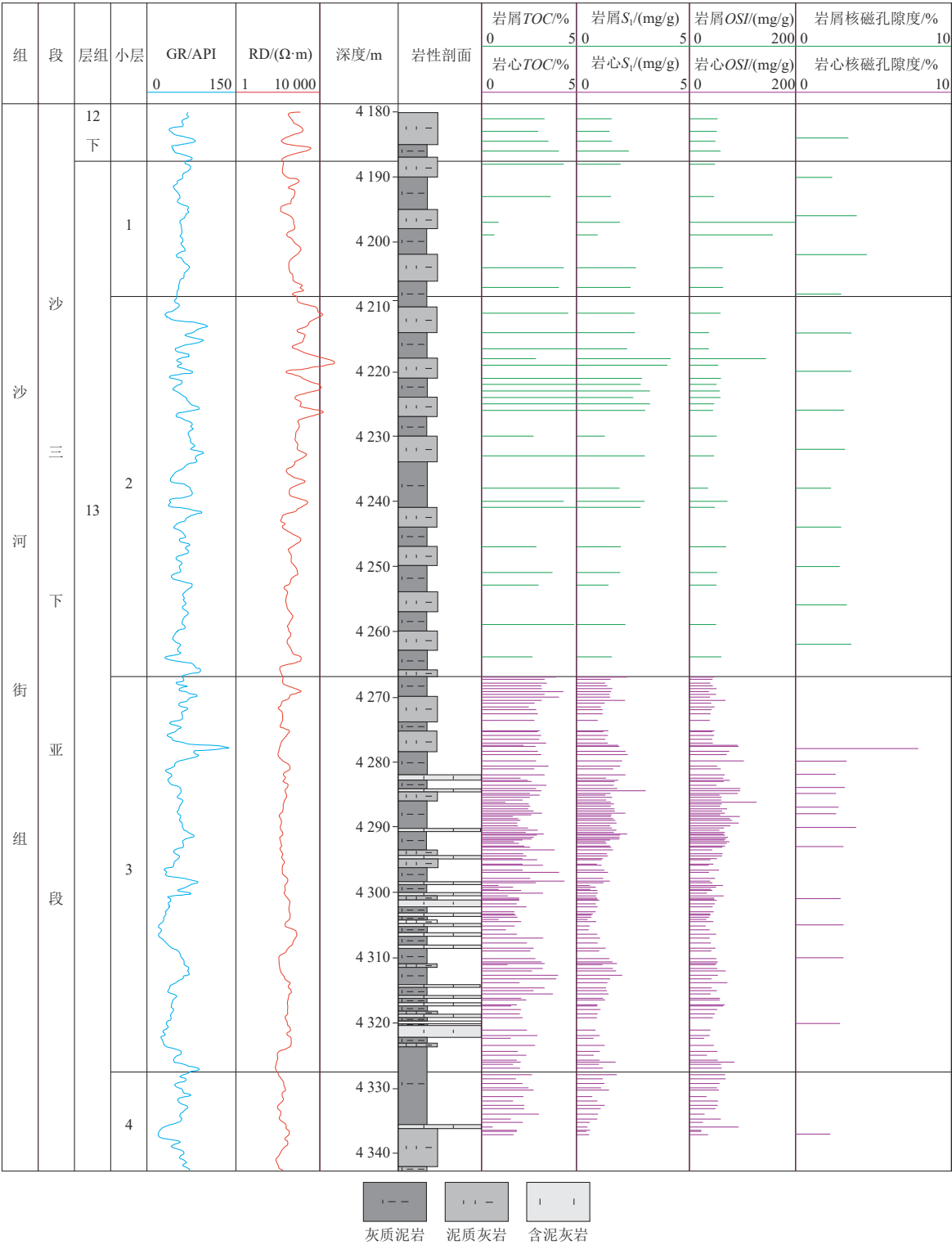


图2 济阳坳陷渤南洼陷BYP5导眼井地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the pilot hole of well BYP5 in the Bonan sub-sag, Jiyang Depression

烃含量)为0.91~4.09 mg/g,平均值为2.32 mg/g;热解S₂(岩石中的热解烃含量)为0.14~23.47 mg/g,平均值为9.12 mg/g,生烃潜量(S₁+S₂)为1.05~27.48 mg/g,平均值为11.44 mg/g。若以热解参数S₁近似表征已经生成并滞留的游离烃量,以S₂近似表征剩余生烃潜量,

则BYP5井生产井段不但具有较高的游离烃量,也仍然具有较高的生烃潜力。

3.2 有机质类型

根据BYP5导眼井页岩岩屑和岩心样品热解参数

表 1 济阳凹陷BYP5井沙三下亚段页岩矿物组成

Table 1 Mineral composition of shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

参数	黏土矿物含量	陆源碎屑矿物含量				碳酸盐矿物含量			黄铁矿含量	石膏含量
		石英	钾长石	斜长石	总量	方解石	白云石	总量		
变化范围/%	4~45	12~40	1~4	1~9	13~35	10~79	2~21	16~81	1~3	1~2
平均值/%	17.8	21.1	1.9	2.6	24.5	48.2	6.9	55.1	2.1	1.2
样本数量/个	35	35	21	29	35	35	35	35	34	16

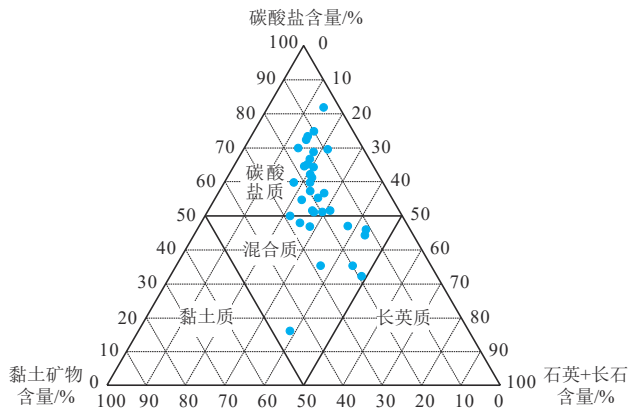


图 3 济阳凹陷BYP5井沙三下亚段页岩矿物组成及页岩类型
Fig. 3 Mineral composition and rock types of shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

的氢指数(HI , $HI=S_2/TOC \times 100$ mg/g)和最高热解峰温(T_{max})确定有机质类型,其结果如图 7 所示。其中,大

多数数据点分布在 I - II₁型区间,这些数据点的 T_{max} 相对集中,在 450 ~ 460 °C, HI 整体相对较高,一般在 100 ~ 360 mg/g。另有一部分数据点的 T_{max} 较低,且发散分布,分布区间为 404 ~ 447 °C,其 HI 较低,分布区间为 24 ~ 97 mg/g。

这些 T_{max} 及 HI 较低的样品一般为混入油的贫有机质页岩。混入原油的样品,尤其是混入原油的贫有机质页岩,热解参数会改变,整体表现为具有较高的热解 S_1 值, T_{max} 降低^[24-25]。由于原油的混入,会导致贫有机质层含有一定的 TOC 和热解 S_2 值。在 $HI-T_{max}$ 关系图上表现出低氢指数和低 T_{max} 的特点。图 7 中的数据分布表明,该页岩段中存在着原油从富有机质页岩向贫有机质页岩运移调整的现象。而去掉这些明显混有运移调整原油的样品,BYP5 井页岩样品总体有机质类型为 I - II₁型,以 I 型为主。

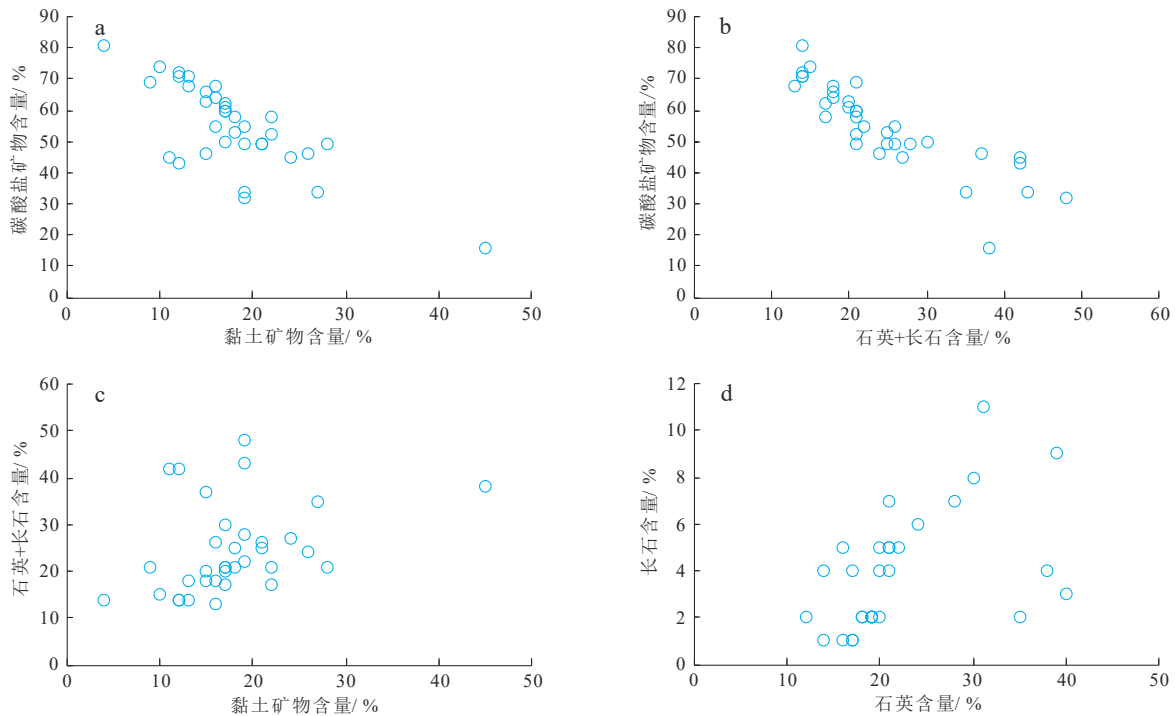


图 4 济阳凹陷BYP5井沙三下亚段页岩中主要矿物含量之间关系

Fig. 4 Relationships among the primary mineral contents in shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

a. 碳酸盐矿物含量与黏土矿物含量关系; b. 碳酸盐矿物含量与陆源碎屑含量关系; c. 陆源碎屑含量与黏土矿物含量关系; d. 长石含量与石英含量关系

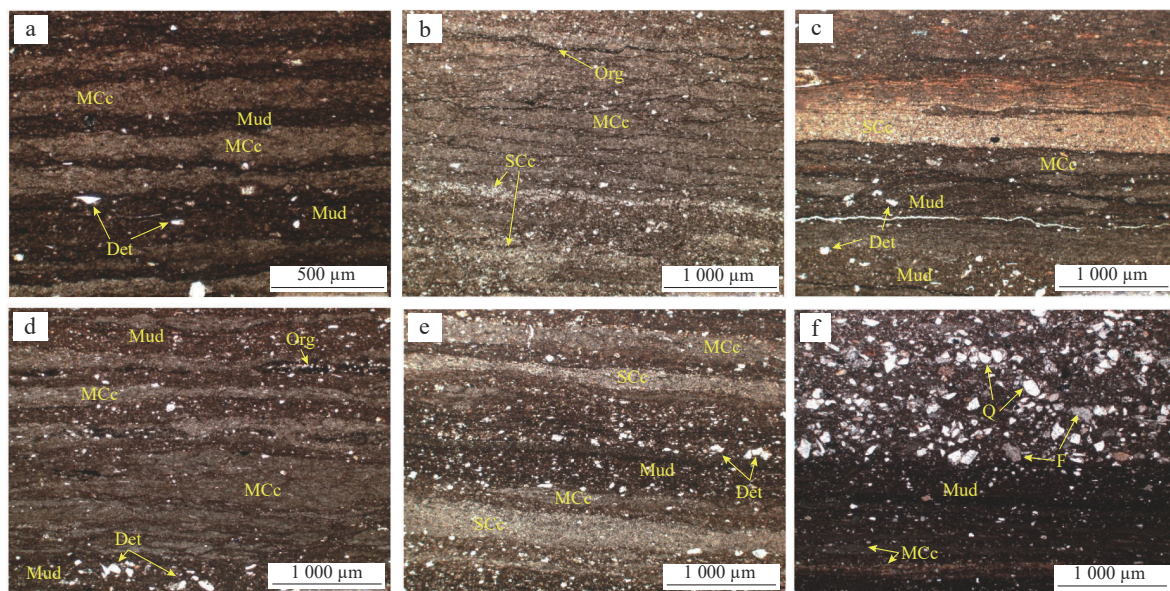


图5 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩纹层状/层状结构及矿物发育特征显微照片

Fig. 5 Microphotos showing the lamellar/layered structures and mineral occurrence of shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

a. 富泥质层页岩, 泥晶方解石层与泥质层互层, 埋深4 319.25 m, 单偏光薄片; b. 富方解石层页岩, 泥晶方解石层为主, 含部分粉晶方解石层, 埋深4 321.70 m, 单偏光薄片; c. 含粉晶方解石层页岩, 埋深4 322.70 m, 单偏光薄片; d. 富泥晶方解石层页岩, 埋深4 326.80 m, 单偏光薄片; e. 含粉晶方解石层页岩, 埋深4 328.50 m, 单偏光薄片; f. 含长英质层页岩, 埋深4 315.90 m, 单偏光薄片
Mcc. 泥晶方解石层; Mud. 泥质层; Det. 陆源碎屑; SCc. 粉晶方解石层; Org. 有机质; Q. 石英; F. 长石

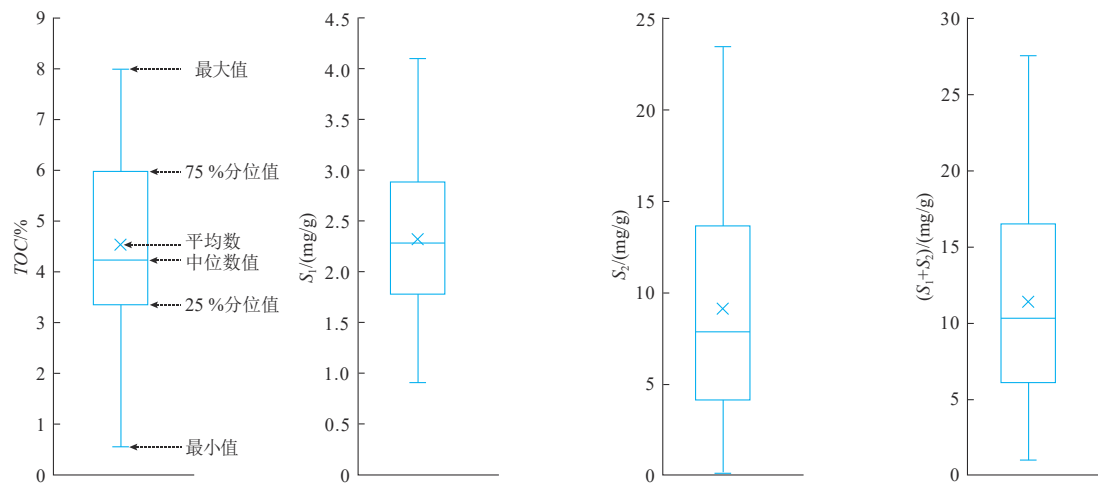


图6 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩有机质丰度评价指标

Fig. 6 Organic matter abundance of in shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

a. TOC 含量; b. 热解 S₁; c. 热解 S₂; d. 生烃潜量 (S₁ + S₂)

3.3 有机质成熟度

BYP5 导眼井沙三下亚段页岩岩心样品的实测镜质体反射率 R_o 在 1.05% ~ 1.13%, 平均值为 1.10%, 总体上与渤南洼陷沙三下亚段页岩的 R_o 与深度关系一致 (图8)。而根据 HI 与 T_{max} 关系确定页岩热演化程度, 去除明显混入原油的贫有机质页岩 (图7中的红色点), BYP5 井页岩的 R_o 集中分布在 1.0% ~ 1.3%, 平均 1.1%。结

合该区页岩生成流体特征随热演化程度的变化规律^[26], 认为该页岩已经进入生成轻质油-凝析气阶段。

4 页岩的储集性

4.1 页岩孔隙度

BYP5 井沙三下亚段页岩埋藏较深, 样品成熟度较

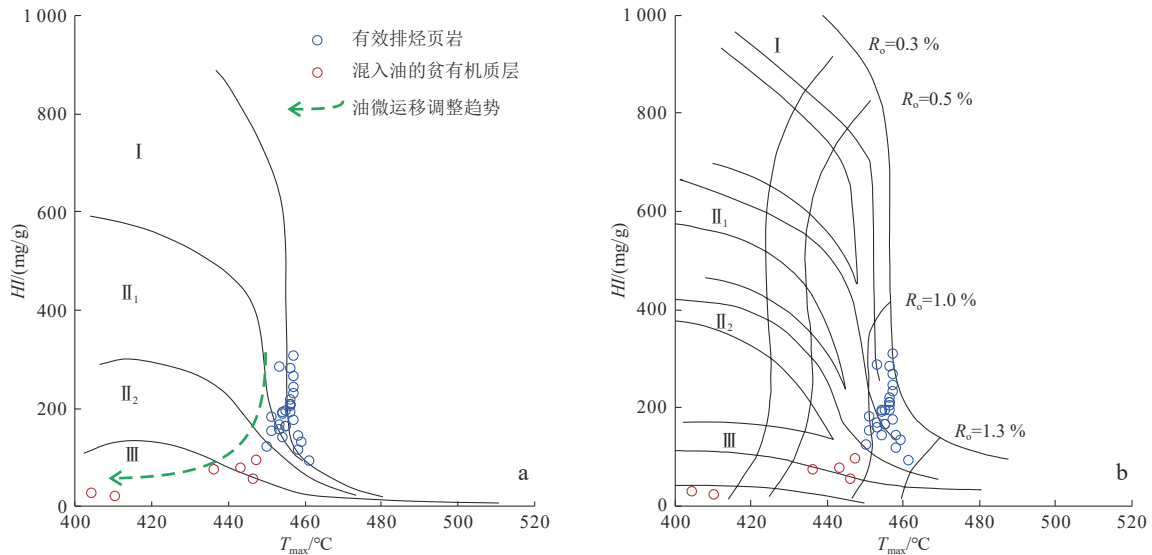


图7 根据 HI 与 T_{max} 关系确定济阳坳陷BYP5井页岩有机质类型(a)及成熟度(b)

Fig. 7 Relationships between HI and T_{max} and the obtained organic matter types (a) and maturity (b) of shales from well BYP5, Jiyang Depression

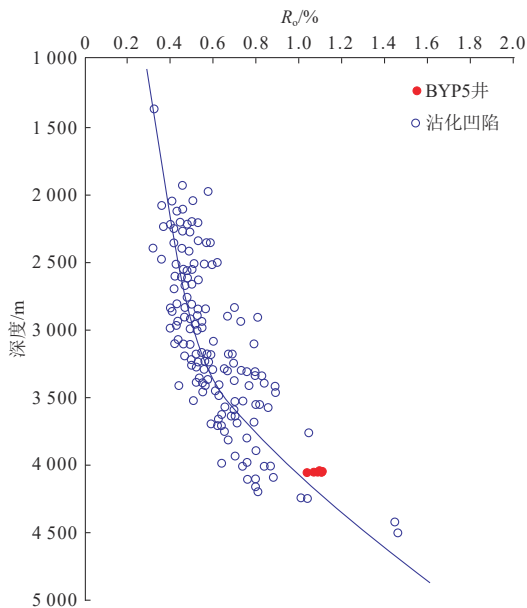


图8 济阳坳陷渤南洼陷沙三下亚段页岩 R_o 与深度关系

Fig. 8 Depth vs. R_o of shales from the Es³¹ section in the Bonan sub-sag, Jiyang Depression

高,岩石的压实及胶结作用较强。实测BYP5导眼井沙三下亚段页岩岩屑和岩心样品的孔隙度均总体较低(图2)。以核磁共振方法测定沙三下亚段13个页岩岩心样品的孔隙度:将新鲜的页岩样品去除杂质后,在20 MPa的高压条件下用盐水饱和岩心,然后测定饱和盐水后的页岩样品核磁孔隙度,以核磁标准样品进行标定。测得结果显示孔隙度分布在2.2%~6.9%,平

均值为3.2%,中位数为3.0%。

4.2 页岩储集空间类型

据镜下及手标本观测得出,BYP5井沙三下亚段页岩岩心样品的储集空间类型包括页岩基质孔、页岩层间缝及页岩穿层缝等。

4.2.1 基质孔

在页岩的薄层结构中,不同类型薄层的主要基质孔有所差异。BYP5井沙三下亚段页岩的泥质层基质孔包括黏土矿物片间孔(图9a—c)、黄铁矿晶间孔(图9c)、黏土矿物与分散颗粒间(碳酸盐颗粒和陆源碎屑颗粒等)接触边缘孔和有机质孔等。电镜下观测,泥质层基质孔以黏土矿物片间孔最为发育,不仅数量多,且孔径较大。此类片间孔多呈扁平状,其中较大的黏土矿物片间孔长轴方向可达8 μm ,短轴方向可达2 μm 。黏土矿物片间孔是泥质层中油、气或水赋存的主要空间。

方解石层中的基质孔包括粒间孔、粒内孔和晶间孔等,其中粒间孔在泥晶方解石层中普遍发育(图9d),是该层的主要孔隙类型,颗粒边缘可见明显的溶蚀现象;部分方解石颗粒内发育粒内溶蚀孔,与其周缘的粒间(或晶间)孔相比,孔径较小(图9e)。粉晶方解石薄层和白云石薄层的晶间孔较为发育(图9f)。作为BYP5导眼井沙三下亚段页岩中主要方解石薄层类型的泥晶方解石层,粒间孔是其主要的储集空间,而酸性流体的溶蚀作用大大改善了该粒间储集空间,并增加粒内孔储集空间。

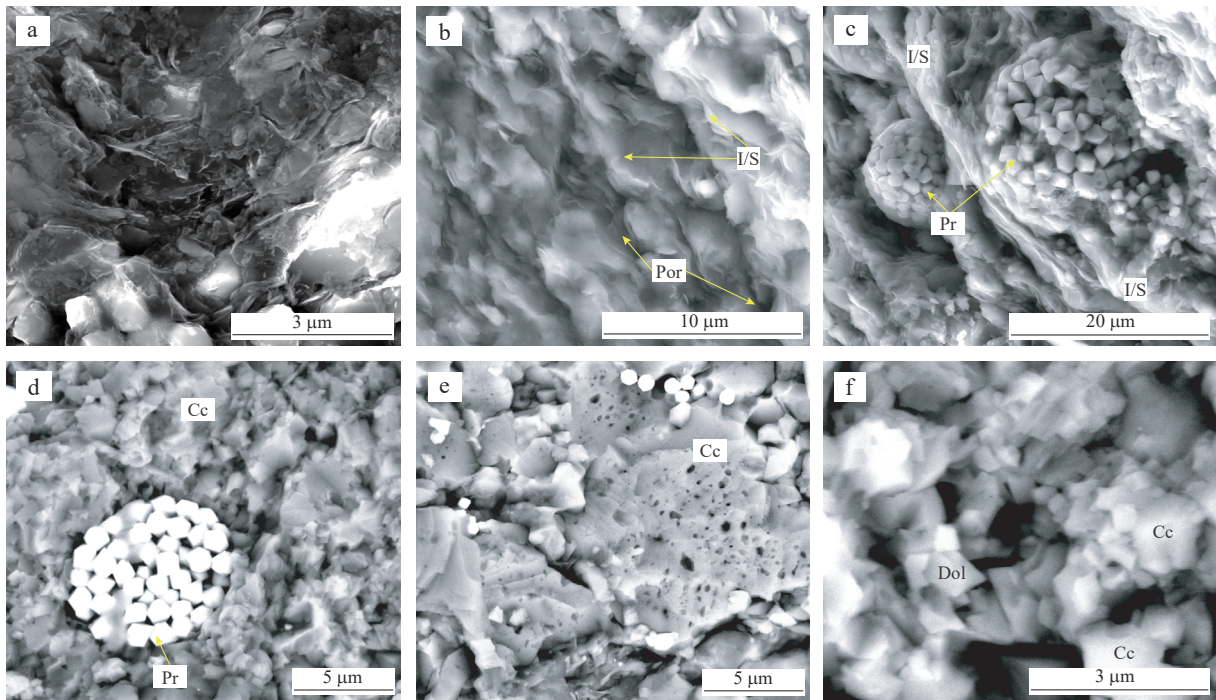


图9 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩孔隙发育特征扫描电镜照片

Fig. 9 SEM images showing the characteristics of pores developed in the shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression
a. 泥质层孔隙发育特征,黏土矿物片间孔发育,埋深4 219.0 m; b. 泥质层中黏土矿物片间孔发育特征,埋深4 322.7 m; c. 泥质层中的黄铁矿及黄铁矿晶间孔发育特征,埋深4 322.7 m; d. 泥晶方解石层中方解石粒间孔发育特征,埋深4 324.0 m; e. 方解石颗粒的粒内溶蚀孔发育特征,埋深4 326.8 m; f. 方解石层中晶间孔发育,埋深4 324.0 m
I/S. 伊/蒙混层; Por. 孔隙; Pr. 黄铁矿; Ce. 方解石; Dol. 白云石

4.2.2 微裂缝

BYP5导眼井沙三下亚段页岩的微裂缝包括层间缝和穿层缝。层间缝主要发育在不同薄层之间:泥晶方解石层与泥质层之间(图10a)、粉晶方解石层与泥质层之间、粉晶方解石层与泥晶方解石层之间以及相邻的方解石层之间(图10b)等。镜下观测发现,开启的层间缝中充填有机质或部分充填重结晶方解石矿物。

穿层缝一般切穿页岩薄层,其发育尺度及数量不一,大的裂缝在岩心上明显可见,小的只有在显微镜下才可观测到。镜下观测到的穿层缝多为高角度缝。部分高角度缝呈集群分布(图10d),部分穿层缝处于开启状态,可见其内部充填有机质和方解石(图10c);另有部分穿层缝完全被重结晶方解石所充填(图10d,e)。部分样品中,可见穿层缝沟通层间缝(图10f)。

裂缝的发育受控于页岩矿物组成、页岩结构、流体压力及地应力等条件^[27],Liu Huimin等研究认为:东营凹陷页岩的层间缝多为碳酸盐薄层与相邻层界面处的

部分碳酸盐晶间孔(缝)及溶蚀孔隙连通所形成的连续空间,其受预先存在的粒间孔隙或(矿层)溶解孔隙的控制,并由后来的超压、溶解和渗流作用力连接扩展^[28]。

BYP5井沙三下亚段页岩薄层发育、层理特征明显,并且泥质层与方解石层间力学性质差异较大,处于大量生轻质油-凝析气阶段,具有明显的超压,有利于形成层间缝。济阳坳陷深层大部分区域的水平最大主应力接近垂向应力,部分地区甚至高于垂向应力^[23]。地应力测试BYP5井沙三下亚段水平最大主应力值为96.9 MPa,水平最小主应力值为82.7 MPa,水平最大主应力与垂向应力(按23 MPa/km计算,垂向应力为96.46 MPa)相当。在高应力和高流体压力双重作用下,更容易形成包括竖直或高角度穿层缝和层间缝在内的多种裂缝^[23]。

尽管观测到的裂缝发育样品有限,但其对油气的产出有着重要的影响:一方面,裂缝可作为基质型孔隙储集空间的有效补充;另一方面,裂缝可有效沟通裂缝两侧的基质孔隙,尤其是层间缝,为页岩基质孔中油的产出提供有利的输导条件。

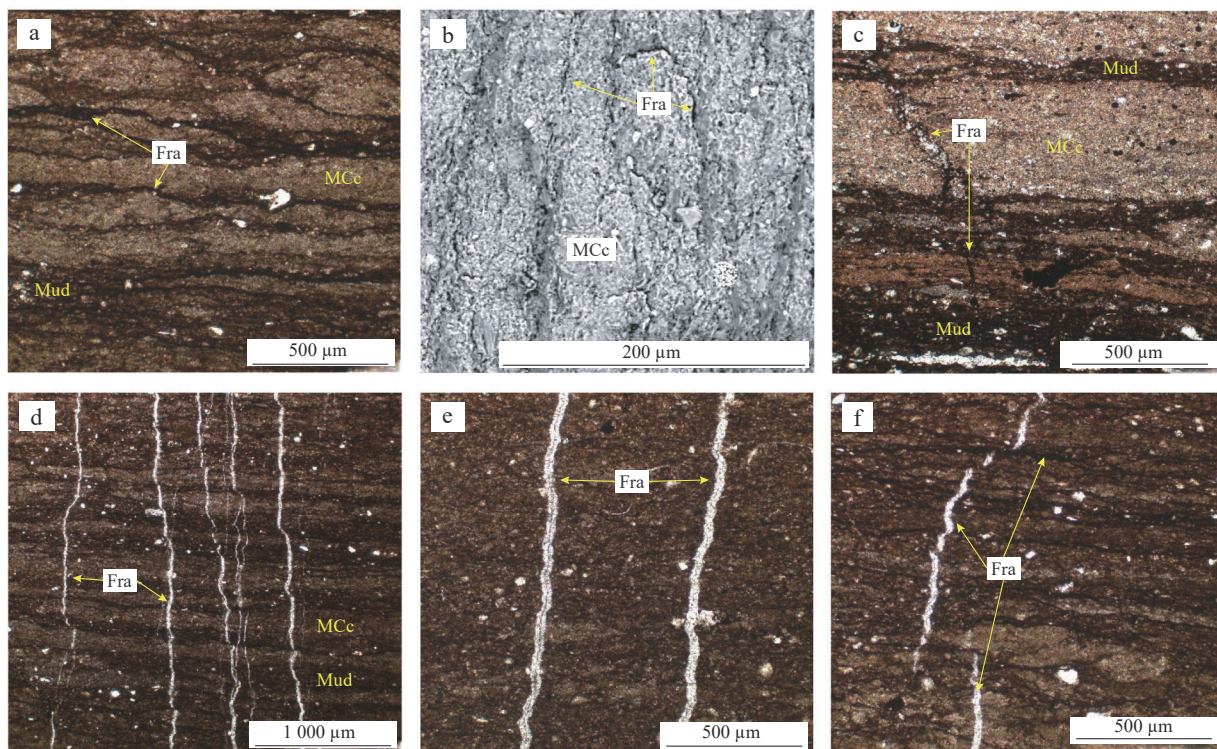


图10 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩裂缝特征显微照片

Fig. 10 Micrographs showing the fracture occurrence in shales from the Es^{3l} section in well BYP5, Jiyang Depression

a. 纹层状页岩中的层间缝,缝中充填有机质,埋深4 319.25 m,单偏光薄片;b. 泥晶方解石层之间的层间缝,埋深4 310.30 m,扫描电镜;c. 纹层状页岩的穿层缝,缝中充填有机质及重结晶方解石,埋深4 319.25 m,单偏光薄片;d. 纹层状页岩的穿层缝,裂缝密集分布,充填方解石,埋深4 320.90 m,单偏光薄片;e. 层状页岩中穿层缝,充填方解石,埋深4 314.35 m,单偏光薄片;f. 穿层缝与层间缝沟通,层间缝充填有机质,穿层缝充填方解石,埋深4 321.16 m,单偏光薄片

Mud. 泥质层;MCc. 泥晶方解石层;Fra. 裂缝

5 页岩油气微运移调整作用及可动下限条件

5.1 页岩内油气微运移调整与地化参数异常

由于页岩的强烈非均质性,在页岩的生、排烃及油气滞留富集过程中,存在着相对富有机质页岩与相对贫有机质页岩之间的油气微运移调整:富有机质页岩生烃潜力较高,生烃增压作用较强;贫有机质页岩生烃潜力较低,甚至没有。在相对富有机质页岩与相对贫有机质页岩之间存在着油气饱和度、油气分子浓度及压力的差异。在上述差异下,相对富有机质页岩中的部分油气会向相对贫有机质页岩微运移。

相对富有机质页岩中的油气向相对贫有机质页岩汇聚的作用过程,会造成相对贫有机质页岩呈现较高的 S_1 、较低的 T_{max} 和较高的 OSI ^[24-25, 29]。Li Maowen等和Chen Zhuoheng等研究认为,烃源岩样品可能被附近成熟烃源岩或同一烃源岩单元内富有机质纹层

排出的油“污染”。被油“污染”的样品,在Rock-Eval热解参数上可能产生异常高的 S_1 峰、异常高的烃产率指数 $[PI, PI=S_1/(S_1+S_2)]$ 、异常低的 T_{max} 及异常高的 OSI 等^[24-25, 29]。页岩内油气的微运移调整过程可在地化参数上有明显的体现。

根据BYP5导眼井沙三下亚段页岩岩屑和岩心样品的 OSI 、 T_{max} 及 S_1/S_2 参数,可看出富有机质页岩向贫有机质页岩中油气的微运移调整现象(图11)。TOC相对较高的页岩样品,其 T_{max} 一般较高(图11a)、热解 S_1/S_2 比值较低(图11b),且 OSI 稳定(图11c);而相对贫有机质页岩则具有明显较低的 T_{max} 、较高的 S_1/S_2 比值和较高的 OSI ,并且,TOC越低, S_1/S_2 比值越高, T_{max} 越低, OSI 越高,油气的微运移调整迹象越显著。这种微运移调整的结果是实现了富有机质页岩和贫有机质页岩含油气的“共同富裕”。

5.2 页岩油可动的 OSI 及 TOC 下限

页岩内油气的微运移调整过程导致地化参数异常,可根据对此地化参数异常的分析,确定页岩油可动

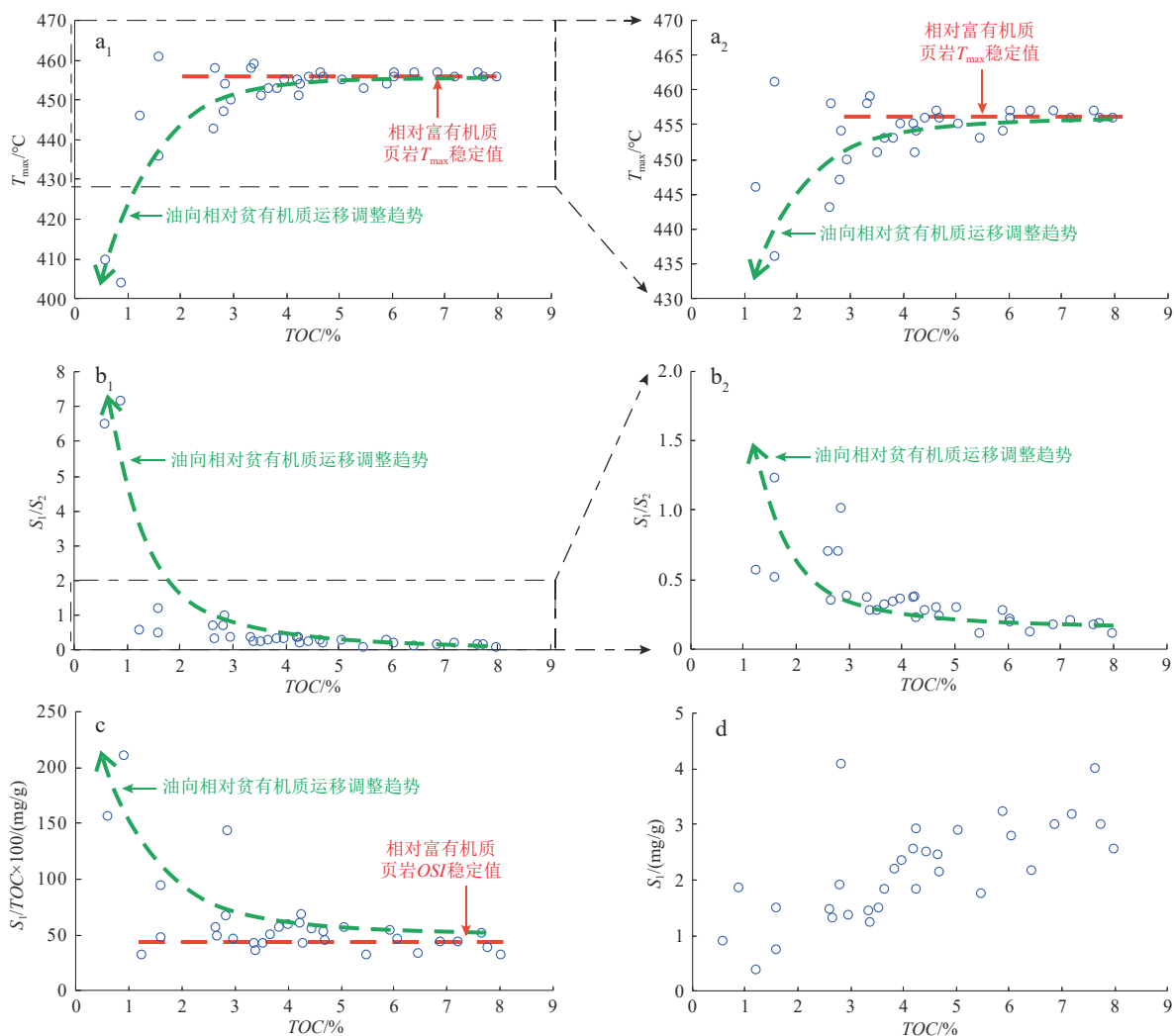


图 11 BYP5 井沙三下亚段页岩油微运移调整的地球化学参数分析

Fig. 11 Relationships of the geochemical parameters indicating oil micro-migration adjustment for shales from the Es^{3l} section in well BYP5
 a_1 . T_{max} 与 TOC 关系; a_2 . T_{max} 与 TOC 关系 (a_1 图的局部放大); b_1 . S_1/S_2 与 TOC 关系; b_2 . S_1/S_2 与 TOC 关系 (b_1 图的局部放大);
 c . OSI 与 TOC 关系; d . S_1 与 TOC 关系

的 OSI 条件^[30-31]及有机质丰度条件。

尽管 BYP5 井沙三下亚段页岩中明显存在油气从相对富有机质页岩向相对贫有机质页岩的微运移调整作用,但是仍存在 TOC 越高, S_1 越高的关系 (图 11d), 表明富有机质页岩中仍然具有更高的游离油含量, 具有更大的可动潜力, 因此, 应以相对富有机质页岩的 OSI 来评价页岩油的整体可动性。相对富有机质页岩的稳定 OSI 表明, 该区页岩油可动的 OSI 下限值应该低于 50 mg/g。而该 OSI 可作为该区该成熟度条件下富碳酸盐页岩中页岩油可动性评价的保守指标, 这一指标远低于 Jarvie 和 Andrew 等提出的页岩油具有可动潜力的 OSI 一般在 70 ~ 100 mg/g 的指标^[32-34]。BYP5 井沙三下亚段产油段 OSI 较低有两种可能的原因, 或两种原因兼而有之: ①有机质热演化程度较高, 烃类流体密

度、黏度较低, 导致页岩内有机质对原油的吸附能力较低; ②无机矿物中, 碳酸盐含量较高, 而碳酸盐矿物对原油的吸附能力较弱。因此, 在利用 OSI 作为指标评价页岩油的可动性时, 要综合考虑页岩的成熟度、油气性质和页岩的矿物组成等。而保守估计 OSI 为 50 mg/g 可作为高成熟富碳酸盐页岩的可动性评价指标。需说明的是, OSI 仅可以评价页岩油的可动性, 不能用以计算页岩中游离油或可动油量的多少, 或评价页岩油的产能情况。

BYP5 井沙三下亚段产油段样品中, OSI 为 50 mg/g 页岩的最低 TOC 大致在 1 % 左右 (图 11c), 推测该井中 TOC 为 1 % 的页岩, 也可能具有向更贫有机质页岩供烃的能力, 因此将具有可动潜力的 TOC 下限定为 1 %。 TOC 为 1 % 可作为该区该成熟度条件下, 富碳酸盐页岩

岩中页岩油具有整体可动性的有机质丰度下限指标。

5.3 页岩油可动的孔隙度下限

页岩油富集可动的孔隙度下限条件根据热解 S_1 与孔隙度关系确定^[35]。在BYP5导眼井和岩心样品的 S_1 与孔隙度关系图中,去除孔隙度离群值, S_1 与孔隙度总体上呈正相关。根据 S_1 与孔隙度的相关曲线,外推 S_1 为0时,孔隙度约为2.2%(图12)。表明对于孔隙度低于2.2%的页岩,一般不具有游离烃。2.2%的孔隙度可作为该区该成熟度下富碳酸盐页岩中油气富集可动的孔隙度下限条件。

6 高产地质条件

BYP5井沙三下亚段页岩油获得高产,分析得出其地质方面的有利因素,包括:①页岩具有较高的有机质丰度, TOC 平均值为4.52%,有机质类型较好,为I-II₁型(I型为主),具有较高的生烃潜力,为页岩油气富集提供了优厚的物质基础。②有机质热演化程度较高,处于生轻质油-凝析气阶段,油气本身具有较好的流动性;轻质油-凝析油阶段,烃类流体性质大大降低页岩的有效储集物性下限,较低孔隙度的页岩也可有效含油。③生烃增压导致异常高压发育,BYP5井压力系数为1.8,为页岩油气的产出提供了良好的天然能量。④页岩的纹层状/层状结构特征决定了其具有较高的生-储-渗效率。页岩的泥质层有机质丰度较高,且黏土矿物片间孔发育,为页岩提供了生烃和储集条件,泥晶方解石层内粒间孔等孔隙发育,提供了有效储集和渗流条件,且页岩纹层越薄,泥晶方解石层对页岩内烃类的渗流输导效果越好。⑤在高地应力和高流体压力双重作用下,形成层间缝和穿层缝等多种裂缝。

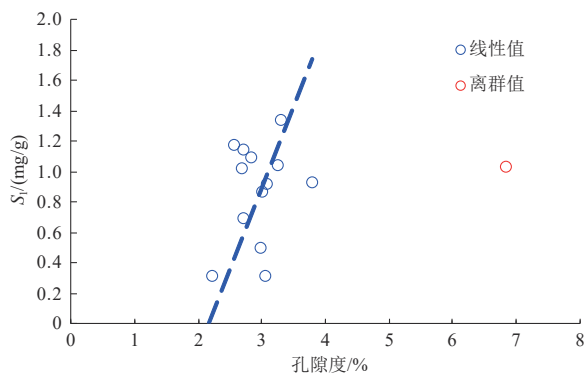


图12 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩 S_1 与孔隙度关系

Fig. 12 Relationship between S_1 and porosity for shales from the Es³¹ section in well BYP5, Jiyang Depression

增加了除基质型孔隙外的储集空间裂缝,可有效沟通两侧的基质孔隙,有利于基质孔中油气的产出。

7 结论

1) 济阳坳陷BYP5井沙三下亚段页岩具有较高的碳酸盐含量,为碳酸盐质页岩和混合质页岩,以碳酸盐质页岩为主;一般为纹层状页岩或层状页岩,具有明显的薄层结构特征,薄层类型主要包括泥质薄层、碳酸盐薄层,碳酸盐薄层以泥晶方解石层为主。陆源碎屑多分散于黏土层中,与黏土层共同形成泥质层。

2) BYP5井沙三下亚段页岩具有较高的有机质丰度和生烃潜量,有机质类型以I型为主,热演化程度(R_o)为1.1%,处于生轻质油-凝析气阶段。

3) BYP5井沙三下亚段页岩的孔隙度较低,储集空间包括基质孔、层间缝和穿层缝。泥质层中基质孔以黏土矿物片间孔为主,泥晶方解石层中基质孔以方解石粒间孔为主。基质孔是主要的储集空间,层间缝和穿层缝可为页岩油的产出提供有利的渗流输导条件。

4) 在页岩内部存在微运移调整的油气富集过程,相对富有机质页岩中的油部分向相对贫有机质页岩微运移,微运移调整的结果是实现富有机质页岩和贫有机质页岩含油的“共同富裕”。BYP5井沙三下亚段页岩样品的 OSI , T_{max} 及 S_1/S_2 参数,均显示出页岩内部的油气微运移调整现象。可根据油气的微运移调整过程导致的地化参数异常,确定页岩油可动的 OSI 及 TOC 下限条件。BYP5井沙三下亚段页岩油可动的 OSI 下限值低于50 mg/g, TOC 下限值为1%,孔隙度下限为2.2%

5) BYP5井沙三下亚段页岩油高产的有利地质条件是:①页岩具有较高的有机质丰度和生烃潜力,为油气富集及可动提供优厚的物质基础;②有机质热演化程度较高,处于生轻质油-凝析气阶段,油气具有较好的流动性,大大降低页岩的有效储集物性下限;③异常高压发育,为页岩油气的产出提供了良好的天然能量;④页岩的纹层状/层状结构特征决定了其具有较高的生-储-渗效率;⑤层间缝和穿层缝等多种裂缝发育,可作为基质型孔隙储集空间的有效补充,并可有效沟通裂缝两侧的基质孔隙,有利于基质孔中油气的产出。

6) BYP5井页岩油的成功勘探,表明中国东部陆相断陷盆地中的深层富碳酸盐且纹层/层状结构发育的富有机质页岩,发育有利的页岩油可动地质条件,具有较大的页岩油勘探潜力。建议下一步应将其作为一种典型的页岩油勘探目标,对其页岩油的富集机制、赋存特征和流动机理进行系统攻关研究。

参 考 文 献

- [1] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆地相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143-162.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162.
- [2] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [3] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [4] 沈云琦, 金之钧, 苏建政, 等. 中国陆相页岩油储层水平渗透率与垂直渗透率特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 378-389.
CHEN Yunqi, JIN Zhijun, SU Jianzheng, et al. Characteristics of horizontal and vertical permeability of continental shale oil reservoirs in China: A case from Jiyang Depression in Bohai Bay Basin and Qianjiang Sag in Jiangnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 378-389.
- [5] 陈国辉, 蒋恕, 李醇, 等. 加热过程中页岩储层改质效果研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 286-296.
CHEN Guohui, JIANG Shu, LI Chun, et al. Progress in shale reservoir upgrading through in-situ heating [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 286-296.
- [6] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系威化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 125-143.
TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 125-143.
- [7] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩型页岩油勘探开发理论技术与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 616-626.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Theories, technologies and practices of lacustrine shale oil exploration and development: A case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 616-626.
- [8] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 856-869.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Formation conditions and enrichment model of retained petroleum in lacustrine shale: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 856-869.
- [9] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 441-454.
SUN Longde, CUI Baowen, ZHU Rukai, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 441-454.
- [10] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838.
LIU Bo, SHI Jiaxin, FU Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 828-838.
- [11] 白斌, 戴朝成, 侯秀林, 等. 松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地质特征与页岩油甜点评价[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 846-856.
BAI Bin, DAI Chaoheng, HOU Xiulin, et al. Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 846-856.
- [12] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 581-594.
LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang Depression: A case study of the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 581-594.
- [13] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1717-1729.
LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1717-1729.
- [14] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳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, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [15] 王鑫, 曾澍辉, 贾昆, 等. 成岩作用控制下低渗透砂岩润湿性演化过程及机制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1308-1320.
WANG Xin, ZENG Jianhui, JIA Kunkun, et al. Evolutionary process of the wettability of low-permeability sandstone reservoirs under the control of diagenesis and its mechanism: A case study of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1308-1320.
- [16] 白龙辉, 柳波, 迟亚奥, 等. 二维核磁共振技术表征页岩所含流体特征的应用——以松辽盆地青山口组富有机质页岩为例

- [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1389-1400.
- BAI Longhui, LIU Bo, CHI Ya'ao, et al. 2D NMR studies of fluids in organic-rich shale from the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1389-1400.
- [17] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561-569.
- FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.
- [18] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.
- ZHI Dongming, TANG Yong, HE Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 38-51.
- [19] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1390-1400.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: A case study of source rocks in the upper submember of Member 4 and lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [20] 刘惠民, 于炳松, 谢忠怀, 等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油学报, 2018, 39(12): 1328-1343.
- LIU Huimin, YU Bingsong, XIE Zhonghuai, et al. Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1328-1343.
- [21] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷页岩油富集要素与富集模式研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(2): 268-276.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Enrichment controls and models of shale oil in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(2): 268-276.
- [22] ZHANG Linye, BAO Youshu, LI Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 703-711.
- [23] 包友书, 张林晔, 张金功, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 408-414.
- BAO Youshu, ZHANG Linye, ZHANG Jingong, et al. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 408-414.
- [24] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, CAO Tingting, et al. Expelled oils and their impacts on Rock-Eval data interpretation, Eocene Qianjiang Formation in Jiangnan Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 191: 37-48.
- [25] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, MA Xiaoxiao, et al. A numerical method for calculating total oil yield using a single routine Rock-Eval program: A case study of the Eocene Shahejie Formation in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 191: 49-65.
- [26] 包友书, 王永诗, 李政, 等. 济阳坳陷深层沙河街组四段轻质油—凝析气成藏条件[J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1615-1624, 1639.
- BAO Youshu, WANG Yongshi, LI Zheng, et al. Accumulation conditions for deep light oil and condensate gas from Member 4 of Shahejie Formation in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(12): 1615-1624, 1639.
- [27] 包友书. 陆相泥页岩在水平地应力作用下裂缝的多样性——以济阳坳陷古近系泥页岩为例[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 777-785.
- BAO Youshu. Fracture diversity of continental shale under horizontal geostress: A case study of the Paleogene shale in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 777-785.
- [28] LIU Huimin, ZHANG Shun, SONG Guoqi, et al. A discussion on the origin of shale reservoir inter-laminar fractures in the Shahejie Formation of Paleogene, Dongying Depression [J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(6): 1064-1077.
- [29] CHEN Zhuoheng, LI Maowen, CAO Tingting, et al. Hydrocarbon generation kinetics of a heterogeneous source rock system: Example from the lacustrine Eocene-Oligocene Shahejie Formation, Bohai Bay Basin, China [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(12): 13291-13304.
- [30] 刘惠民, 林会喜, 李政, 等. 页岩油资源可动性的地球化学评价方法: CN201910247411.3 [P]. 2019-07-09.
- LIU Huimin, LIN Huixi, LI Zheng, et al. Geochemical evaluation method for resource mobility of shale oil: CN201910247411.3 [P]. 2019-07-09.
- [31] 包友书, 李政, 王学军, 等. 页岩油及连续型油藏勘探有利区的预测方法: CN201910830909.2 [P]. 2020-02-04.
- BAO Youshu, LI Zheng, WANG Xuejun, et al. Prediction method of favorable areas for Shale oil and continuous oil reservoir exploration: CN201910830909.2 [P]. 2020-02-04.
- [32] PEPPER A S, CORVI P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part III: Modelling an open system [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(4): 417-452.
- [33] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—shale-oil resource systems [M]//BREYER J A. Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 89-119.
- [34] JARVIE D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems [J]. Geologica Acta, 2014, 12(4): 307-325.
- [35] 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 and Experiment, 2018, 40(4): 479-484.