

引用本文:高玉巧,蔡潇,夏威,等.苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油储集空间特征及甜点段评价——以溱潼凹陷 QY1 井为例[J].石油实验地质,2024,46(5):916-926.DOI:10.11781/sysydz202405916.

GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin; a case study of well QY1 in Qintong Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 916-926. DOI: 10.11781/sysydz202405916.

苏北盆地古近系阜宁组二段 页岩油储集空间特征及甜点段评价

——以溱潼凹陷 QY1 井为例

高玉巧^{1,2}, 蔡潇^{1,2}, 夏威^{1,2}, 吴艳艳^{1,2}, 陈云燕^{1,2}

1. 中国石化 华东油气分公司 勘探开发研究院, 南京 210000;

2. 中国石化 深层煤层气勘探开发重点实验室, 南京 210000

摘要:苏北盆地古近系阜宁组二段是常规油重点产层,同时也是中国东部陆相页岩油勘探开发的优选层位。对溱潼凹陷 QY1 井岩心样品进行分析测试表明,该套页岩具有低有机质丰度、较低镜质体反射率(R_o)、矿物组分均衡及孔隙网络复杂的特点;运用岩石学及地球化学方法等对该页岩油储层的岩相特征、储集空间特征、含油性、脆性指数与可压性特征等进行研究,指明了生产甜点段。阜二段是一套混积页岩纹层型储层,矿物组成以黏土、长英质和碳酸盐矿物为主,有机碳含量平均值为1.32%, R_o 为0.9%~1.1%;平均孔隙度中下部为4%,上部为2.2%。根据“有机质丰度+构造特征+岩性”将阜二段页岩划分为6种岩相,其储集性具有明显差异,纹层发育特征的差异是导致不同岩相具有不同储集空间特征的重要原因。除低有机质纹层/层状灰质页岩外,其他岩相都具有较好的含油性;高有机质层状灰质页岩的有机碳含量最高。纹层数量与油气可动性具有较好的对应性,从中有机质层状含灰云页岩到高有机质块状泥岩,平均含油饱和度指数从202.62 mg/g降至77.83 mg/g。高有机质块状泥岩由于存在大量塑性矿物,造缝效果是6种岩相中最差的。中有机质层状含灰云页岩是最优岩相,中有机质层状含灰云页岩和中有机质层状含灰云页岩略差,但也可以作为优势岩相成为勘探开发的重点。根据优势岩相在纵向上的分布,优选阜二段 I 亚段③—⑤小层和 II 亚段②—④小层为该区地质甜点段。

关键词:储集空间;甜点段评价;页岩油;阜宁组;古近系;溱潼凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE122.23

文献标识码:A

DOI:10.11781/sysydz202405916

Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin:

a case study of well QY1 in Qintong Sag

GAO Yuqiao^{1,2}, CAI Xiao^{1,2}, XIA Wei^{1,2}, WU Yanyan^{1,2}, CHEN Yunyan^{1,2}

1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Deep Coalbed Methane Exploration and Development, Nanjing, Jiangsu 210000, China

Abstract: The second member of the Paleogene Funing Formation in the Subei Basin is a key production layer for conventional oil and an optimal target for the exploration and development of continental shale oil in East China. The analysis and testing of core samples from well QY1 in the Qintong Sag indicate that the shale features low total organic carbon (TOC) content, relatively low vitrinite reflectance (R_o), balanced mineral composition, and a complex pore network. Using petrological and geochemical methods, the lithofacies characteristics, reservoir space characteristics, oil-bearing and mobility characteristics, brittleness index, and compressibility characteristics of this shale oil reservoir were studied to identify production sweet spots. The second member of the Funing

收稿日期 (Received): 2023-11-16; 修订日期 (Revised): 2024-08-01; 出版日期 (Published): 2024-09-28.

作者简介:高玉巧(1978—),女,博士,研究员,从事非常规油气勘探开发方面的管理与研究。E-mail: gaoyq.hdsj@sinopec.com.

通信作者:蔡潇(1988—),男,硕士,高级工程师,从事非常规油气储层特征研究。E-mail: caix.hdsj@sinopec.com.

基金项目:中国石化科技部项目(P21112, P23190)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Formation is a mixed shale layered reservoir, with mineral composition mainly consisting of clay minerals, felsic minerals, and carbonate minerals. The average TOC value is 1.32%, and R_o ranges from 0.9% to 1.1%. The average porosity is 4% in the middle and lower parts and 2.2% in the upper part. Based on the abundance of organic matter, structural characteristics, and lithology, the shale of the second member of the Funing Formation can be divided into six lithofacies, with significant differences in reservoir properties. The development characteristics of the laminae are an important reason for the different reservoir space characteristics among different lithofacies. Except for low organic matter laminated/layered shale with poor calcite and dolomite, other lithofacies have good oil content. The high organic matter layered shale with rich calcite demonstrates the highest TOC content. The number of layers correlates well with oil and gas mobility, with the average OSI value decreasing from 202.62 mg/g in medium organic matter laminae shale with poor calcite and dolomite to 77.83 mg/g in high organic matter massive mudstone. High organic matter massive mudstone, due to the presence of a large amount of plastic minerals, has the worst fracturing effect among the six types of lithofacies. Medium organic matter laminae shale with poor calcite and dolomite is the optimal lithofacies, while medium organic matter layered shale with poor calcite and dolomite and medium organic matter layered shale with rich calcite and dolomite are slightly less favorable but can still be key targets for exploration and development. Based on the vertical distribution of the dominant lithofacies, sublayers ③ to ⑤ of submember I and sublayers ② to ④ of submember II of the second member of the Funing Formation are selected as geological sweet spots in this area.

Key words: reservoir space; sweet spot evaluation; shale oil; Funing Formation; Paleogene; Qingtong Sag; Subei Basin

页岩油作为非常规油气资源的重要组成部分,勘探开发潜力巨大,已经成为全球油气增长的重要领域^[1-3]。北美地区海相页岩油的规模开发,极大地推动了石油工业跨越式发展。2022年美国成为全球原油产量增长最多的资源国,其中以页岩油为主的致密油贡献最大,同比增加了 $27\ 507.86 \times 10^4\ \text{t}$ ^[4]。目前,美国页岩油高产井主要分布于威利斯顿、二叠和海湾等海相盆地,主要的页岩油层系为 Eagle Ford 组,岩性以钙质页岩、泥灰岩和灰岩为主,整体是一套高有机碳(TOC)含量、较高成熟度(R_o)、较好脆性的混积岩页岩油储层。与美国不同,中国页岩油勘探主要面向陆相盆地,资源量为 $397.46 \times 10^8\ \text{t}$,可采资源量约为 $145 \times 10^8\ \text{t}$,是中国未来原油增储上产的主体^[5-12]。

近年来,通过持续开展“甜点评价、水平井与体积压裂”为核心的技术攻关,中国陆相页岩油相继在准噶尔、鄂尔多斯、渤海湾、松辽、四川和苏北等多个盆地获得工业突破^[13-17]。中国陆相页岩油储层主要有3种组合类型,分别是基质型、互层/夹层型和混积页岩纹层型^[6]。松辽盆地白垩系青山口组一段是典型的基质型页岩油储层,其特点是源储一体,石油原地滞留形成“甜点”,多分布于半咸化湖盆。鄂尔多斯盆地三叠系延长组七段是互层/夹层型页岩油储层的代表,其特点是源储共存,薄层砂岩或灰岩夹层近源捕获石油形成“甜点”,多

分布于淡水湖盆中。而混积页岩纹层型储层特点是宏观上表现为自生自储,微观上不同纹层类型内油气分布亦有不同,富有机质泥质纹层是生油层,富碳酸盐或长英质纹层是储层,二者结合形成微观源储组合,多分布于咸化湖盆。其中,以富碳酸盐纹层为储层的典型代表为渤海湾盆地古近系沙河街组四段—三段;而以长英质纹层为储层的典型代表则为苏北盆地古近系阜宁组二段(以下简称为阜二段)。

不同于中国其他盆地的页岩油储层,苏北盆地阜二段页岩具有低 TOC 含量和较低 R_o 的地化特征,其各矿物组分占比也与其他页岩油储层有明显差异,长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物含量占比为 4 : 3 : 3,具有典型的混积岩特征。阜二段中下部见大量长英质纹层,水平方向的层理缝极发育,局部受构造作用改造强烈,可见大量高角度裂缝,两者构成了复杂的孔隙网络。鉴于苏北盆地独特的页岩油储层特征,亟需针对该区开展系统的储层精细研究,尤其在储集空间特征、成岩成储成因及油气富集规律等方面的研究工作还相对滞后,给该区储层评价及甜点段优选带来了较大困难,极大地制约了勘探开发进程。为此,本文对苏北盆地阜二段页岩进行了系统剖析,基于有机质丰度、构造特征及岩性划分了 6 种岩相类型,针对各岩相开展了储集性、含油性、可动性及可压性研究,分析了各

岩相储层特征的差异,并在此基础上确定了优势岩相及其分布特征,最终优选了地质“甜点段”,以期为该区域页岩油有效勘探开发提供指导。

1 地质背景

苏北盆地是在扬子地台古生界褶皱基底上发育起来的中、新生代盆地,面积 $3.28 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有“一隆两坳”的构造特征,即建湖隆起、盐阜坳陷和东台坳陷(图 1)。新生界厚度达 6 000 m,自下而上发育泰州组二段、阜宁组二段和阜宁组四段 3 套烃源岩层系。其中阜二段为主力烃源岩,其既是常规油藏形成的主要来源,也是页岩油发育的重点层段^[18]。阜二段沉积时期为湖相,自西向东水体逐渐变深,由浅湖亚相过渡为半深湖—深湖亚相,泥页岩厚度 250~450 m,是一套混积纹层型页岩油储层,其中富有机质泥质纹层是生油层,长英质纹层是储层^[19]。近年来,中国石化华东油气分公司加大页岩油勘探开发力度,2020 年在苏北盆地溱潼凹陷深凹带部署实施了 SD1 井,试获最高日产油 50.9 t,实现了苏北盆地陆相页岩油勘探重大战略突破;随后针对不同构造部位、不同埋深、不同甜点层段开展滚动评价,相继实施了 QY1 井和 QY2 井,分别试获最高日产油 66.2 t 和 113.1 t,累积原油产量 $2.41 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $2.17 \times 10^4 \text{ t}$,进一步展现了溱潼凹陷阜二段页岩油规模勘探的良好前景。

根据沉积旋回、岩性组合和电性特征,阜二段可划分为 5 个亚段,整体气测显示良好,尤其以 I、II 亚段最高,平均气测全烃可达 17.1%。本文样品取自溱潼凹陷 QY1 井阜二段岩心,岩性自下而上由纹层状灰质页岩变为块状泥岩,矿物组成以黏土矿物(30%~50%)、长英质矿物(40%)和碳酸盐矿物(22%)为主,TOC 含量为 0.5%~2%,平均值为 1.32%, R_o 为 0.9%~1.1%。中下部纹层及裂缝发育,孔隙度平均值为 4%;上部块状泥岩层理及裂缝不发育,孔隙度平均值为 2.2%(图 2)。

2 沉积岩相特征

2.1 沉积特征

阜二段沉积时期苏北盆地为广阔的陆相湖盆,沉积了一套厚度 150~450 m 的暗色泥页岩,溱潼凹陷是盆地的沉积和沉降中心,水体较深,沉积环境为半深湖—深湖。沉积演化史分析表明,阜二段沉积期的沉积环境发生变化,受气候、降水及湖平面升降的影响,早中期 I、II 亚段沉积时期为干旱炎热、咸化的半深湖—深湖沉积, Sr/Ba 比值为 0.60~0.87,发育一套灰黑色、深灰色灰质/白云质页岩,纹层及页理发育;中晚期 III—V 亚段沉积时期降水增多、气候温暖潮湿,湖水盐度降低, Sr/Ba 比值为 0.10~0.16,沉积环境逐渐转为淡水,沉积速率增高,主要发育一套块状灰质泥页岩和泥岩^[16](图 2)。

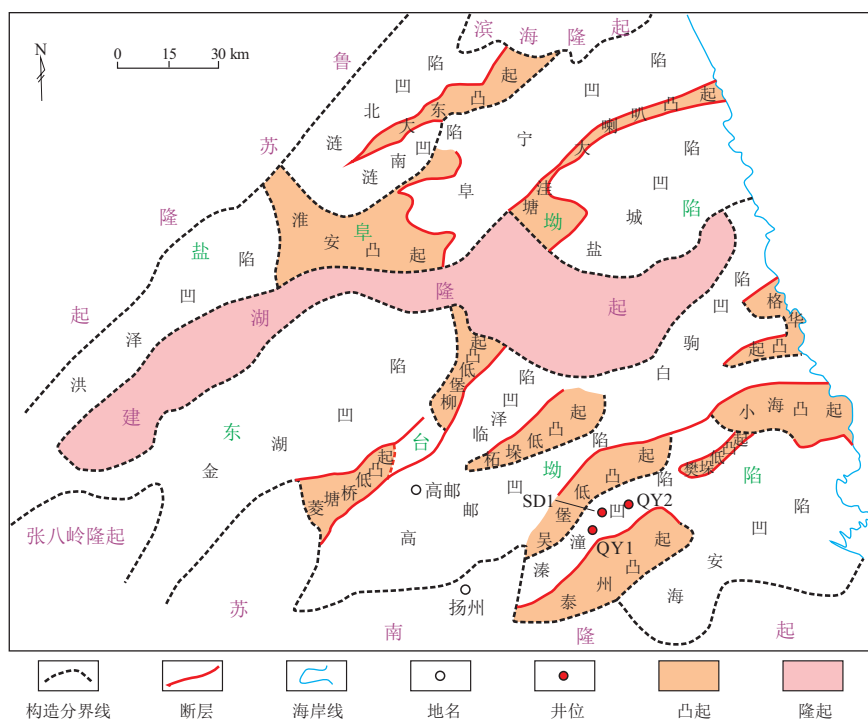


图 1 苏北盆地构造单元分布及采样井位置

Fig.1 Tectonic units of Subei Basin and location of sampling wells

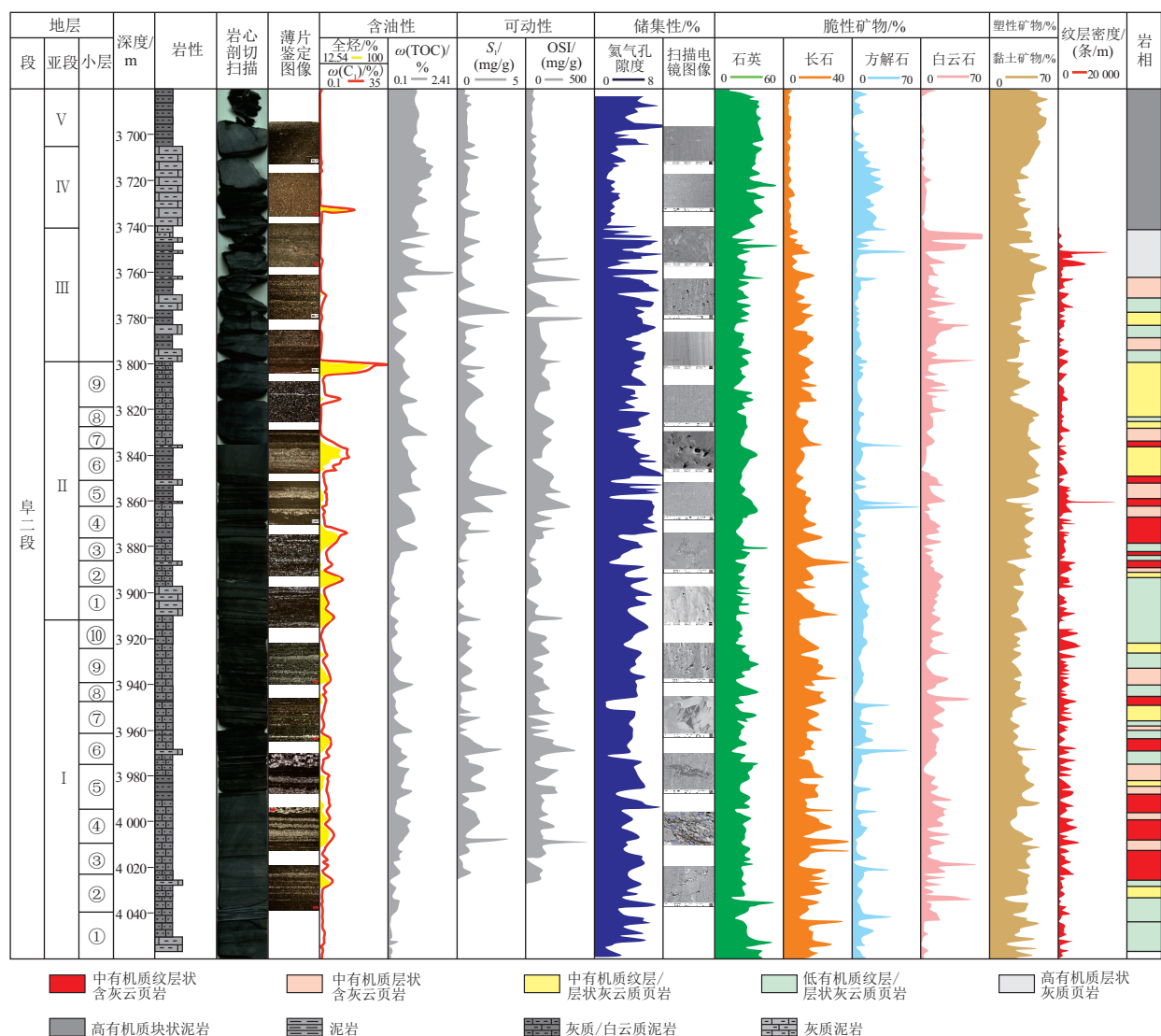


图 2 苏北盆地溱潼凹陷 QY1 井阜宁组二段岩相综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of lithofacies of second member of Funing Formation, well QY1, Qintong Sag, Subei Basin

2.2 岩相特征

随着阜宁组各亚段沉积环境的变化,各亚段内岩相变化明显且复杂。基于泥页岩岩石学特征(有机质、矿物组成、结构构造等)对页岩油形成、富集及可流动性的影响,综合考虑将“有机质丰度+构造特征+岩性”等作为岩相划分的主要依据。有机质丰度分为高有机质(TOC 含量 > 2%)、中有机质(1% ≤ TOC 含量 ≤ 2%) 和低有机质(TOC 含量 < 1%); 构造特征分为纹层状、层状和块状; 岩性重点关注碳酸盐矿物含量, 分为含灰云(10% < 方解石 + 白云石 ≤ 25%)、灰云质(方解石 + 白云石 > 25%) 等。依据上述标准, 将 QY1 井阜宁二段划分为 6 种岩相, 即①中有机质纹层状含灰云页岩、②中有机质层状含灰云页岩、③中有机质纹层/层状灰云质页岩、④低有机质纹层/层状灰云质页岩、⑤高有机质层状灰质页岩和⑥高有机质块状泥岩

(表 1)。

从有机质丰度看, 岩相①—③的平均 TOC 含量为 1.20% ~ 1.30%, 岩相④平均 TOC 含量仅为 0.52%, 岩相⑤—⑥平均 TOC 含量为 2.04% ~ 2.40%。从岩性看, 6 种岩相在矿物组合类型上基本相当, 主要的矿物组分为黏土矿物、石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿, 局部层位可见方沸石, 但各矿物组分的含量变化较大。岩相①—④各矿物组分含量变化相对较少, 主要在碳酸盐矿物含量上略有差异; 岩相⑤的方解石含量明显高于其他岩相, 白云石较少; 岩相⑥的黏土矿物含量明显高于其他岩相, 碳酸盐矿物含量低。从结构构造看, 岩相①纹层极发育, 岩相②长英质层厚度相对更大, 岩相③—④中纹层和层状均发育, 岩相⑤主要为层状, 岩相⑥纹层不发育, 主要为块状(表 1)。纵向上, 岩相①—④主要位于阜二段的 I—III 亚段, 岩

表 1 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段岩相基本特征

Table 1 Characteristics of lithofacies of second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

岩相类型	岩心照片	薄片照片	矿物组分图	三元图	$\omega(\text{TOC})/\%$																
①中有机质纹层状含灰云质页岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>31.2</td></tr> <tr><td>石英</td><td>22.5</td></tr> <tr><td>长石</td><td>16.9</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>11.0</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>14.3</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>3.8</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>0.0</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	31.2	石英	22.5	长石	16.9	方解石	11.0	白云石	14.3	黄铁矿	3.8	方沸石	0.0	<p>黏土矿物 碳酸盐矿物 长英质</p>	0.59~3.27 1.32(78)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	31.2																				
石英	22.5																				
长石	16.9																				
方解石	11.0																				
白云石	14.3																				
黄铁矿	3.8																				
方沸石	0.0																				
②中有机质层状含灰云质页岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>33.3</td></tr> <tr><td>石英</td><td>24.3</td></tr> <tr><td>长石</td><td>15.9</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>7.8</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>10.2</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>3.2</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>5.5</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	33.3	石英	24.3	长石	15.9	方解石	7.8	白云石	10.2	黄铁矿	3.2	方沸石	5.5		0.32~2.69 1.35(59)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	33.3																				
石英	24.3																				
长石	15.9																				
方解石	7.8																				
白云石	10.2																				
黄铁矿	3.2																				
方沸石	5.5																				
③中有机质纹层/层状灰云质页岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>32.3</td></tr> <tr><td>石英</td><td>21.9</td></tr> <tr><td>长石</td><td>11.3</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>9.3</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>13.8</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>9.2</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	32.3	石英	21.9	长石	11.3	方解石	9.3	白云石	13.8	黄铁矿	3.0	方沸石	9.2		0.36~4.92 1.20(88)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	32.3																				
石英	21.9																				
长石	11.3																				
方解石	9.3																				
白云石	13.8																				
黄铁矿	3.0																				
方沸石	9.2																				
④低有机质纹层/层状灰云质页岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>35.6</td></tr> <tr><td>石英</td><td>35.0</td></tr> <tr><td>长石</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>18.8</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>3.3</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>0.0</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	35.6	石英	35.0	长石	5.5	方解石	18.8	白云石	3.3	黄铁矿	1.9	方沸石	0.0		0.12~1.66 0.52(99)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	35.6																				
石英	35.0																				
长石	5.5																				
方解石	18.8																				
白云石	3.3																				
黄铁矿	1.9																				
方沸石	0.0																				
⑤高有机质层状灰质页岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>49.6</td></tr> <tr><td>石英</td><td>35.4</td></tr> <tr><td>长石</td><td>4.8</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>5.3</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>4.3</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>0.0</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	49.6	石英	35.4	长石	4.8	方解石	5.3	白云石	4.3	黄铁矿	0.8	方沸石	0.0		1.60~3.49 2.42(32)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	49.6																				
石英	35.4																				
长石	4.8																				
方解石	5.3																				
白云石	4.3																				
黄铁矿	0.8																				
方沸石	0.0																				
⑥高有机质块状泥岩			<table border="1"> <tr><th>矿物</th><th>含量/%</th></tr> <tr><td>黏土矿物</td><td>30.7</td></tr> <tr><td>石英</td><td>26.4</td></tr> <tr><td>长石</td><td>14.6</td></tr> <tr><td>方解石</td><td>9.3</td></tr> <tr><td>白云石</td><td>11.3</td></tr> <tr><td>黄铁矿</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>方沸石</td><td>5.7</td></tr> </table>	矿物	含量/%	黏土矿物	30.7	石英	26.4	长石	14.6	方解石	9.3	白云石	11.3	黄铁矿	2.3	方沸石	5.7		1.64~2.27 2.04(20)
矿物	含量/%																				
黏土矿物	30.7																				
石英	26.4																				
长石	14.6																				
方解石	9.3																				
白云石	11.3																				
黄铁矿	2.3																				
方沸石	5.7																				

注： $\omega(\text{TOC})$ 数据意义为 $\frac{\text{最小值-最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

相⑤位于IV亚段,岩相⑥位于V亚段(图2)。

3 储层特征

3.1 储集空间特征

基于岩相划分的结果,对6种岩相开展了扫描电镜、液氮吸附和孔隙度测试等定性定量分析,各岩相表现出不同的储集空间特征(表2)。岩相划分的主要依据是有机质丰度、构造特征和岩性,这3个因素对各岩相储集空间特征有着重要影响。整体来看,构造特征中纹层是否发育是造成各岩相储集空间差异的主要原因,纹层类型主要包括黏土质纹层、长英质(长石+石英)纹层、碳酸盐纹层和有机质纹层,不同纹层的组合类型导致了矿物组分的不同和储集空间的差异。对于某一种纹层来讲,

纹层越厚,该类纹层所对应的矿物组分含量越高,与之相关的孔隙类型越发育。如黏土质纹层主要以黏土矿物为主,局部可见黄铁矿,孔隙则以黏土矿物晶间孔为主,少量黄铁矿晶间孔;长英质纹层主要以石英、长石为主,少量黏土矿物,颗粒间填充有方解石或白云石,孔隙则以粒间孔为主,少量长石或碳酸盐矿物表面可见溶蚀孔;碳酸盐纹层主要以方解石为主,局部可达到亮晶级别,孔隙以晶间孔、溶蚀孔为主;有机质纹层中富集大量有机质,孔隙以有机质生烃形成的孔隙为主。不同纹层之间是岩石的薄弱面,岩心取至地表、压力释放后,大量水平方向的层理缝出现在纹层之间,因此纹层数量能够间接反映层理缝的发育情况,对储集空间也有重要的影响。另外,阜二段下部I—III亚段还可见

表2 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段各岩相储集空间特征

Table 2 Reservoir space characteristics of various lithofacies in second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

岩相类型	扫描电镜图像	孔隙形态	孔径分布	孔隙度/%
①中有机质纹层状含灰云页岩				0.65~7.18 4.14(86)
②中有机质层状含灰云页岩				0.17~8.49 4.33(63)
③中有机质纹层/层状灰云质页岩				0.24~9.05 4.09(98)
④低有机质纹层/层状灰云质页岩				0.27~7.13 4.49(111)
⑤高有机质层状灰质页岩				1.43~9.01 2.50(35)
⑥高有机质块状泥岩				2.48~7.86 5.03(20)

注:孔隙度数据意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

构造作用形成的构造缝、局部生烃作用形成异常高压导致的生烃缝等。

综上所述,由纹层发育特征的差异导致了物质组成(矿物和有机质)的不同,间接导致了不同岩相具有不同的储集空间特征。扫描电镜结果表明,岩相①—②主要为长英质纹层和黏土质纹层的互层,孔隙主要以长英质颗粒间的粒间孔和黏土矿物晶间孔为主,因纹层较发育可见大量层理缝,局部构造作用强烈,构造缝发育;岩相②由于纹层厚度相对较厚,纹层数量少于岩相①,继而层理缝也少于岩相①;岩相③不同于上述2种岩相,其碳酸盐矿物含量更高,多以胶结物的形式填充于长英质纹层的矿物颗粒间,因此粒间孔更少,溶蚀孔更多;岩相④在岩性上与岩相③基本相当,最大不同是有机

质含量较低,不同于岩相①—③有机质表面普遍发育孔隙,岩相④有机孔极少,长英质纹层内几乎不含有有机质,因此粒间孔相对更多,孔径更大;岩相⑤是方解石含量最高的岩相,大量的粒间孔和黏土矿物晶间孔都被方解石填充,实测小柱塞样品的孔隙度最低,平均仅为2.50%,孔隙仍以粒间孔和黏土矿物晶间孔为主;岩相⑥是黏土矿物含量最高的岩相,且纹层不发育,岩性以块状泥岩为主,孔隙主要为黏土矿物晶间孔(表2)。整体上,从岩相①至岩相⑥,其组构最大的差异体现在长英质纹层数量逐渐减少,由此也导致了各岩相孔隙形态及孔径分布上的差异。从液氮吸附实验结果来看,从岩相①至岩相⑥,其吸附—脱附环逐渐增大,说明随着长英质纹层数量减少,各岩相孔隙形态逐渐由楔状、平

板式的开放孔向纺锤体、墨水瓶型的孔隙类型转变。同时,岩相①宏孔(>50 nm)占比为 35.58%,明显高于其他岩相;与之对应的微孔(<2 nm)和介孔(2~50 nm)占比之和逐渐从岩相①的 64.42%增加至岩相⑥的 91.73%(表 2)。

3.2 含油性与可动性特征

各岩相岩性和储集空间的差异会进一步影响油气的运移和富集。从实测 TOC 含量看,平均 TOC 含量最高的岩相为⑤高有机质层状灰质页岩,实际上岩相①—③有相当多的层段有机质较富集,TOC 含量最高可达 4.92%(图 3a),说明岩相①—③也具有较好的含油气性。在页岩油地质评价中,常用 S_1 来评价游离烃含量,用 S_1 与 TOC 之间的比值来评价页岩油的可动性,将该比值称为含油饱和度指数(OSI)。由于岩心样品取至地表后游离烃会快速逸散,常使用液氮将样品冷冻后保存,以减少游离烃的散失,再开展冷冻热解实验获取更准确的 S_1 。冷冻热解的结果表明(图 3b),岩相① S_1 最高,平均 S_1 为 3.14 mg/g,岩相④ S_1 最低,仅为 0.78 mg/g;整体上,岩相①—④的数据离散性更

大,说明油气在局部有富集;岩相⑤平均 S_1 较高,达到 2.01 mg/g,但由于孔隙度较低,孔径小且孔隙结构较差,可动性相对较差。从 OSI 统计结果来看(图 3c),纹层数量与油气的可动性有较好的对应性,岩相①到岩相⑥,平均 OSI 值从 202.62 mg/g 降至 77.83 mg/g,岩相①—③平均 TOC 含量低于岩相⑤,但可动油(S_1)和可动性(OSI)都明显好于岩相⑤。可动性与原油组分也有较大的关系,族组分结果表明(图 3d),岩相①—②中流动性更好的饱和烃含量最多,达到 77% 以上;岩相③—④略低,饱和烃含量在 65% 左右;岩相⑤—⑥饱和烃含量则仅有 55% 左右。整体上,岩相①—⑥的芳烃含量比较接近,含量在 10%~15% 之间。差异较大的是非烃类化合物,岩相①—②含量极低,而岩相⑤—⑥含量则多超过 20%,这些流动性差的非烃类化合物也是导致各岩相流动性差异的重要原因。

3.3 脆性指数与可压性特征

岩石的脆性程度受多因素影响,包括矿物组成、岩石物性、流体压力以及后期的成岩作用^[20-21],其中矿物组成是影响岩石脆性最直接的

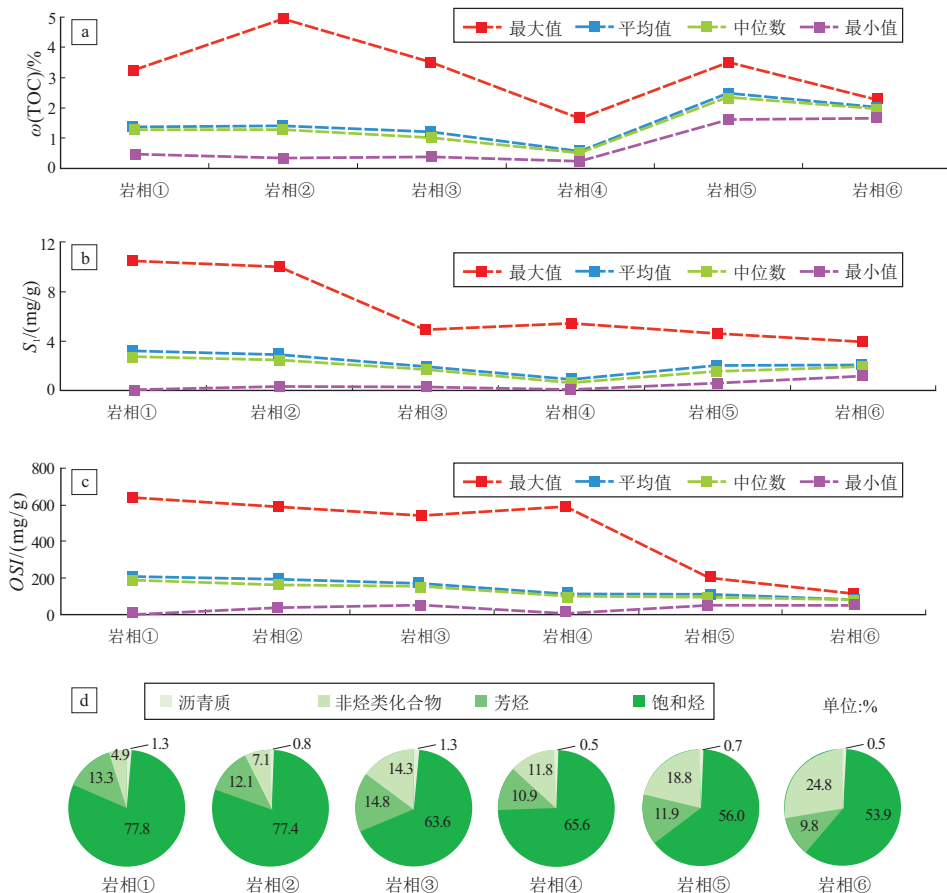


图 3 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段各岩相有机地球化学特征
Fig.3 Organic geochemical characteristics of various lithofacies in second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

内在因素。前人研究表明,页岩中石英脆性最强,其次是方解石等碳酸盐矿物,黏土矿物脆性最差^[22-23]。X射线衍射全岩分析的结果表明,苏北盆地阜宁组二段脆性矿物含量(石英、长石、方解石、白云石之和)较高,岩相①—⑤的脆性矿物含量均超过60%,仅有岩相⑥的脆性矿物含量较低,仅为49.8%(表3)。唐颖等^[24]认为,影响页岩储层可压性的主要因素包括页岩本身的属性和页岩所处的地质属性,除了脆性矿物含量之外,黏土矿物含量及其赋存状态也控制了页岩储层的可压性、压裂造缝复杂程度、压后裂缝闭合速度与程度等。三轴力学实验结果(表3)表明,岩相①—④压后能够形成纵向贯穿整个岩心柱的长裂缝;岩相⑤压后形成“之”字形裂缝,裂缝未贯穿岩心柱;岩相⑥压后岩心柱沿水平方向从中间断开,未形成纵向裂缝。结合脆性、塑性矿物含量来看,岩相①—④脆性矿物和塑性矿物含量基本相当;岩相⑤则塑性矿物含量略高于上述4种岩相,其最终的造缝长度和破裂效果都略差于前4种岩相;而岩相⑥含有大量塑性矿物,含量达到45.6%,是导致造缝效果较差的主要原因。

4 甜点段评价

随着非常规油气勘探开发实践与理论研究的

不断发展,“甜点”概念得到了广泛应用,“甜点段”的评价和预测成为了非常规油气勘探开发的重点和难点。不同学者围绕“甜点”概念提出了甜点段、甜点区、地质甜点、工程甜点、经济甜点等概念,但尚未形成完全统一的定义。孙龙德等^[25]在系统梳理国内外学者及油气田企业对“甜点”概念的认识后,提出非常规储层油气的“甜点”即为非常规地层中储层品质较好、易压裂改造、经济效益好的区域。围绕页岩油“甜点段”评价,前人选用的评价参数多达数十个,针对不同地区或不同层位,不同学者选取的评价参数差异较大,其中TOC含量、岩石矿物组成、脆性指数、热演化程度、泥页岩厚度、孔隙度及裂缝等提及频率较高。针对混积型页岩油“甜点段”评价,孙龙德等^[25]认为将含油性、储集性、可动性、可压性和可采性作为页岩层系评价的核心要素,并给出了各参数的取值范围(表4),但强调参数选取和取值不作强制规定,可根据具体情况围绕上述5个核心要素,选取相关评价参数进行分类分析。

鉴于溱潼凹陷位于苏北盆地的沉降中心,其阜二段大部分埋深均小于4 500 m,因此在“甜点段”评价中不考虑可采性方面的参数,重点对含油性、储集性、可动性及可压性开展评价。含油性方面,TOC含量是页岩油储层的物质基础,也是影响生烃

表3 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段各岩相可压性特征
Table 3 Compressibility characteristics of each lithofacies in second member of Funing Formation, well QY1, Qintong Sag, Subei Basin

项目	①中有机质纹层状含灰云页岩	②中有机质层状含灰云页岩	③中有机质纹层/层状灰云质页岩	④低有机质纹层/层状灰云质页岩	⑤高有机质层状灰质页岩	⑥高有机质块状泥岩
三轴力学压前照片						
三轴力学压后照片						
薄片照片						
脆性塑性矿物占比	脆性矿物 31.2%, 塑性矿物 64.8%	脆性矿物 33.3%, 塑性矿物 60.1%	脆性矿物 32.3%, 塑性矿物 61.3%	脆性矿物 30.7%, 塑性矿物 61.6%	脆性矿物 35.6%, 塑性矿物 62.6%	脆性矿物 45.6%, 塑性矿物 49.8%

表 4 页岩层系富集层评价标准^[25]

Table 4 Evaluation criteria for “sweet spot” of shale strata

核心要素	评价参数	
	北美	中国
含油性	TOC 含量大于 2%, 氢指数大于 400 mg/g, $R_o > 1.0\%$	TOC 含量大于 1%, $S_1 > 2 \text{ mg/g}$, $R_o > 1.0\%$
储集性	厚度大于 25~30 m (理想值大于 50 m), 平均孔隙度大于 6%~12%, 发育天然裂缝	厚度大于 10 m, 孔隙度大于 3%, 裂缝发育
可动性	页岩段具气测显示和测试产量, 地层超压等	地层压力系数大于 1.0, 地层超压
可压性	硅/钙质等脆性矿物含量大于 45%, 蒙脱石等黏土矿物含量低	脆性指数大于 30%, 黏土矿物含量小于 35%
可采性	埋深小于 4 100 m	埋深小于 4 500 m

潜力最重要的指标,尤其在苏北盆地 TOC 含量整体偏低的条件下,TOC 含量对含油性评价显得至关重要。储集性方面,岩石的矿物组成对基质孔隙类型有较大影响,石英、长石等碎屑颗粒间多发育有粒间孔,两者含量的增加预示着粒间孔的增加,对孔隙度有积极的影响;而方解石多以胶结物的形式填充于粒间孔和黏土矿物晶间孔内,占据了相当大的储集空间,对孔隙度是负面的影响。岩石的结构特征则对裂缝有重要影响,从岩心剖切照片、薄片照片及扫描电镜图片中可见大量的层理缝,层理缝多见于不同类型的纹层间;纹层数量与层理缝的发育程度具有明显的相关性,纹层数量对于页岩油储层的物性具有至关重要的影响。可动性方面,多采用 OSI 来评价,以 100 mg/g 作为判定可动性优劣的重要指标。不同于页岩气,页岩油储层孔径的可动流体下限要高得多。通过二维核磁实验结果计算,苏北盆地阜二段页岩油储层孔径的可动油下限为 27 nm,大孔(大于 50 nm 的孔隙)的比例和整

体孔隙度的大小显得尤其重要,是制约可动性好坏的重要参数。在可压性方面,脆性矿物和塑性矿物含量都对压裂效果有较大影响。从阜二段页岩矿物组分来看,脆性和塑性矿物之和可达 95% 以上,在储集性方面已经考虑了长英质含量的前提下,应重点关注塑性矿物(黏土矿物)对可压性的负面影响。综上所述,最终选取 TOC 含量对含油性进行评价,选取长英质、方解石含量和纹层数量对储集性进行评价,选取 OSI、大孔比例和孔隙度对可动性进行评价,选取黏土矿物对可压性进行评价。

采用雷达图图示法对各岩相的储层特征进行综合评价,8 个关键参数占据的面积越大,表明其含油气性越好。在 8 个参数中,长英质含量、纹层数量、大孔比例、孔隙度、OSI 和 TOC 含量对于储层均是有利的,值越大,占据的面积越大;而方解石和黏土矿物对储层是负面影响,值越小,占据的面积越大。从 6 种岩相的雷达图(图 4)来看,岩相①具有明显的优势,除 TOC 含量略低外,其他参数均处于

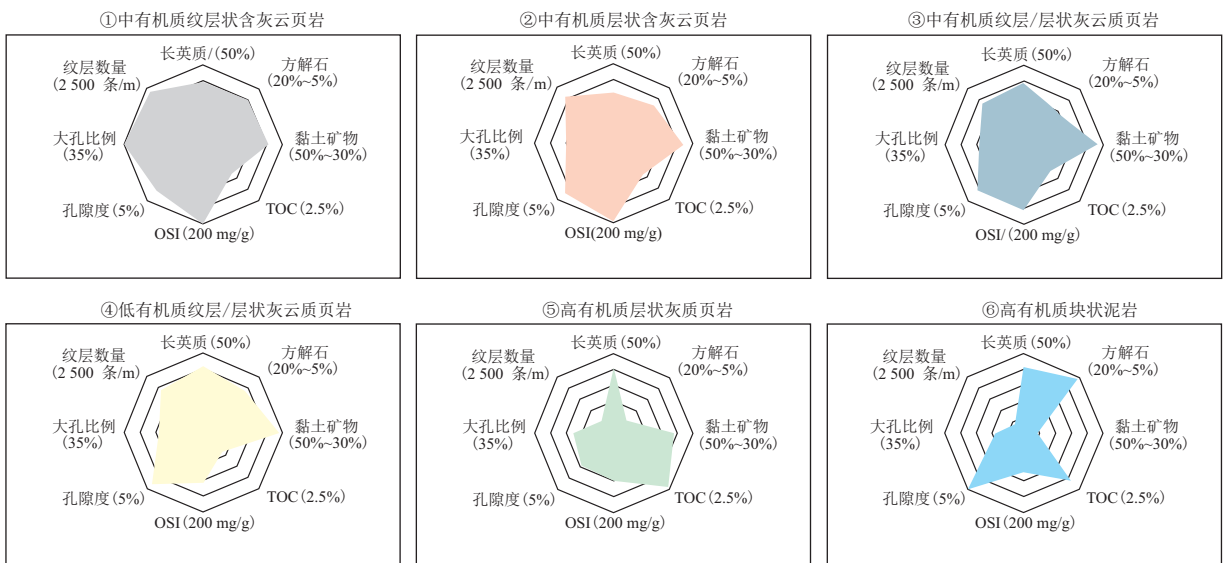


图 4 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段各岩相综合评价雷达图

Fig.4 Radar chart for comprehensive evaluation of various lithofacies in second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

极大值;其次为岩相②和岩相③,岩相②长英质含量略低于岩相①,粒间孔比例低,导致大孔比例偏低;岩相③方解石含量高,粒间孔内的填充物更多,同样导致大孔比例偏低,但在雷达图中的面积较大,也应作为较为优势的岩相类型;岩相④则 TOC 含量明显低于其他岩相,在储集性和可压性上有较好的表现,但含油性和可动性都相对较差;岩相⑤和岩相⑥都具有明显的短板,相对于上述 4 种岩相,整体评价较差,不应成为勘探开发的重点。综上所述,苏北盆地阜二段页岩油储层的优势岩相应为岩相①—③,地质“甜点段”的优选应围绕优势岩相展开,将上述 3 种岩相作为勘探开发的重点。对 QY1 井各岩相在纵向上的分布规律进行系统整理,统计了优势岩相在各亚段小层中的占比,其中阜二段 I 亚段③—⑤小层岩性①—②的平均占比超过了 90%,II 亚段②—④小层岩性①—②的平均占比超过 85%,这两段应为该井页岩油的地质“甜点段”(图 2)。

5 结论

(1) 苏北盆地阜二段页岩是一套混积页岩纹层型储层,主要由黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物组成;TOC 含量平均值为 1.32%, R_o 为 0.9%~1.1%。中下部纹层和裂缝发育程度较高,孔隙度平均为 4%;上部块状泥岩层理和裂缝发育程度较低,孔隙度平均为 2.2%。

(2) 根据“有机质丰度+构造特征+岩性”,将阜二段页岩划分为 6 种岩相类型。各岩相储集性具有明显差异,其储集性与纹层类型和数量相关。长英质纹层具有更多的粒间孔和层理缝;黏土质纹层具有更多的黏土矿物晶间孔;方解石含量多的岩相实测孔隙度最低,大量孔隙被填充。

(3) 除了岩相④外,其他岩相都具备较好的含油性。油气的可动性与纹层数量和饱和烃含量呈正相关关系,其中岩相①—②的可动性最优,岩相③—⑥次之。

(4) 压裂效果受脆性矿物和塑性矿物含量的影响。力学实验结果表明,岩相①—④压后能够形成贯穿整个岩心柱轴向的长裂缝,岩相⑤压后能形成“之”字形裂缝;而岩相⑥这类高塑性泥岩,压后造缝效果最差。

(5) 优选长英质、方解石、黏土矿物含量、有机碳含量、含油饱和度指数、大孔比例、孔隙度及纹层数量等 8 个参数,采用雷达图示法对各岩相进行综合评价。评价结果表明,岩相①为最优势岩相,岩相②—③次之。根据优势岩相在纵向上的分布情况,确定阜二段 I 亚段③—⑤小层和 II 亚段②—④小层为该地质甜点段。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

高玉巧负责论文的选题、构思及统稿;蔡潇负责实验设计;高玉巧、蔡潇、夏威参与论文写作及修改;吴艳艳、陈云燕完成实验操作。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

GAO Yuqiao selected the topic, provided the conception and organized the paper. CAI Xiao was responsible for the experimental design. GAO Yuqiao, CAI Xiao and XIA Wei participated in the writing and revision of the paper. WU Yanyan and CHEN Yunyan completed the experimental operation. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 郭旭升,蔡勋育,刘金连,等.中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J].天然气工业,2021,41(8):12-22.
GUO Xusheng, CAI Xunyu, LIU Jinlian, et al. Natural gas exploration progress of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 12-22.
- [2] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等.中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J].石油与天然气地质,2020,41(4):655-672.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.
- [4] 王作乾,范磊,陈希,等.2022 年度全球油气开发现状、形势及启示[J].石油勘探与开发,2023,50(5):1016-1031.
WANG Zuoqian, FAN Zhe, CHEN Xi, et al. Global oil and gas development in 2022: situation, trend and enlightenment[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1016-1031.
- [5] 郭旭升,魏志红,魏祥峰,等.四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J].石油学报,2023,44(1):14-27.
GUO Xusheng, WEI Zhihong, WEI Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 14-27.
- [6] 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.
- [7] 何发岐,徐兵威,邵隆坎.再论油气勘探开发哲学和创新性思维:纪念“中国陆上第一口油井”延 1 井[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):265-273.
HE Faqi, XU Bingwei, SHAO Longkan. On philosophy and innovative thinking of oil & gas exploration and development: com-

- memoration of the first oil well on land in China, well-Yan1 [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 265-273.
- [8] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources; discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [9] 杨智, 邹才能, 付金华, 等. 大面积连续分布是页岩层系油气的标志特征: 以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(4): 459-474.
YANG Zhi, ZOU Caineng, FU Jinhua, et al. Characteristics and "sweet area (section)" evaluation of continuous tight & shale oil and gas in Ordos Basin, north-central China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(4): 459-474.
- [10] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [11] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景 [J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [12] 郭秋麟, 米石云, 张倩, 等. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 402-412.
GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(3): 402-412.
- [13] 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 62-72.
WU Songtao, ZHU Rukai, LUO Zhong, et al. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 62-72.
- [14] 王然, 何文军, 赵辛楣, 等. 准噶尔盆地吉 174 井芦草沟组页岩油地质剖面分析 [J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 192-203.
WANG Ran, HE Wenjun, ZHAO Xinmei, et al. Geological section analysis of shale oil in Lucaogou Formation of well-Ji-174, Junggar Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 192-203.
- [15] YU Shaoyong, 刘玉慧. 页岩及致密地层油气井的生产特征及可采储量计算方法 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 146-153.
YU Shaoyong, LIU Yuhui. Production performance and EUR forecast of wells producing from tight/shale reservoirs [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 146-153.
- [16] 李志明, 孙中良, 鲍云杰, 等. 冀北坳陷中元古界洪水庄组页岩油勘探前景探讨 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 29-40.
LI Zhiming, SUN Zhongliang, BAO Yunjie, et al. Discussion on prospecting shale oil potential of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in the Jibei Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 29-40.
- [17] 冯动军. 四川盆地侏罗系大安寨段陆相页岩油气地质特征及勘探方向 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 219-230.
FENG Dongjun. Geological characteristics and exploration direction of continental shale gas in Jurassic Daanzhai Member, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(2): 219-230.
- [18] 云露, 何希鹏, 花彩霞, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力 [J]. 石油学报, 2023, 44(1): 176-187.
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong Sag of Subei Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 176-187.
- [19] 咎灵, 白鸾羲, 印燕铃, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油基本特征及成因分析 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 356-365.
ZAN Ling, BAI Luanxi, YIN Yanling, et al. Basic characteristics and genesis analysis of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 356-365.
- [20] 侯连华, 吴松涛, 姜晓华, 等. 页岩油地质评价实验方法现状、挑战与发展方向 [J]. 石油学报, 2023, 44(1): 72-90.
HOU Lianhua, WU Songtao, JIANG Xiaohua, et al. Situation, challenge and future direction of experimental methods for geological evaluation of shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 72-90.
- [21] 赵兰. 致密砂岩储层微裂缝发育特征及对物性的影响: 以杭锦旗地区十里加汗区带为例 [J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 285-291.
ZHAO Lan. Development characteristics of microfractures in tight sandstone reservoir and its influence on physical properties: a case study of Shiligiahan zone in Hangjinqi [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 285-291.
- [22] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气储层可压性评价新方法 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1165-1172.
ZHAO Jinzhou, XU Wenjun, LI Yongming, et al. A new method for fracability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1165-1172.
- [23] 李宁, 冯周, 武宏亮, 等. 中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展 [J]. 石油学报, 2023, 44(1): 28-44.
LI Ning, FENG Zhou, WU Hongliang, et al. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 28-44.
- [24] 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.
- [25] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论 [J]. 石油学报, 2023, 44(1): 1-13.
SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of "sweet spot" in shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 1-13.