

引用格式:杨保良,于雯泉,段宏亮,等. 细粒沉积岩岩相组合特征及评价:以苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2026, 16(1): 153-161.

YANG Baoliang, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Characteristics and evaluation of lithofacies combination of fine-grained sedimentary rocks: A case study of deep second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(1): 153-161.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024386

## 细粒沉积岩岩相组合特征及评价 ——以苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层为例

杨保良<sup>1,2</sup>, 于雯泉<sup>1</sup>, 段宏亮<sup>1</sup>, 付茜<sup>1</sup>, 孙雅雄<sup>1,3</sup>, 仇永峰<sup>1</sup>, 杨艳<sup>1</sup>, 刘世丽<sup>1,3</sup>, 周进峰<sup>1</sup>, 傅强<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司, 江苏扬州 225009; 2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 陆相湖盆泥页岩具有岩相类型多样、垂向叠置复杂的特征,在岩相类型划分基础上开展岩相组合类型划分和有利组合优选,对于落实页岩油“甜点”层、“甜点”区具有重要意义。高邮凹陷阜宁组二段(以下简称阜二段)是苏北盆地页岩油勘探的重点区带和层系,其岩相类型单层厚度薄且纵向变化频繁,对于岩相组合类型划分及评价研究尚处于初步阶段。以高邮凹陷阜二段深层HY7井为研究对象,通过岩心观察、薄片鉴定、全岩X衍射分析、主微量元素分析等手段,在岩相类型识别和纵向沉积环境演化规律分析基础上,开展岩相组合类型划分与发育规律研究,并结合不同岩相组合类型的评价参数对比,优选有利组合类型。研究表明:HY7井阜二段以混积类岩相和长英质类岩相为主,以层状或纹层状长英质-灰质或白云质混积岩最为发育。阜二段沉积环境纵向上表现为气候早干晚湿、水深早浅晚深、盐度早高晚低、物源供给早高晚低、生产力早低晚高,可划分为6个演化阶段。结合各演化阶段内沉积旋回升降变化、不同岩相类型的垂向叠置关系、厚度占比等,划分出7种主要岩相组合类型。其中,层状或纹层状长英质-黏土质混积岩、长英质-灰质或白云质混积岩互层组合为最有利组合类型;层状或纹层状碳酸盐岩、长英质-灰质或白云质混积岩占主导的组合可作为较好的储集层。

**关键词:** 细粒沉积岩;岩相组合;苏北盆地;高邮凹陷;阜宁组二段

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Characteristics and evaluation of lithofacies combination of fine-grained sedimentary rocks: A case study of deep second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

YANG Baoliang<sup>1,2</sup>, YU Wenquan<sup>1</sup>, DUAN Hongliang<sup>1</sup>, FU Qian<sup>1</sup>, SUN Yaxiong<sup>1,3</sup>, QIU Yongfeng<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>,

LIU Shili<sup>1,3</sup>, ZHOU Jinfeng<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>2</sup>

(1. Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Shale in continental lacustrine basins has the characteristics of diverse lithofacies types and complex vertical superposition. On the basis of lithofacies type classification, the classification of lithofacies combination types and the selection of favorable combination are of great significance for identifying the “sweet spot” layers and areas of shale oil. The second member of the Funing Formation in Gaoyou Sag is a key area and stratigraphic unit for shale oil exploration in Subei Basin. Its lithofacies types have thin single layers and frequent vertical variations. Therefore, the research on the classification and evaluation of lithofacies combination types is still in the preliminary stage. Taking the well HY7 in the deep second member of the Funing Formation in Gaoyou Sag as the research object, methods including core observation, thin section identification, whole-rock X-ray diffraction analysis, and major and trace element analysis were employed.

收稿日期:2024-09-18。

第一作者简介:杨保良(1988—),男,博士,助理研究员,从事非常规细粒沉积与页岩油气储层评价研究。地址:江苏省扬州市文汇西路1号江苏油田分公司,邮政编码:225009。E-mail: yangbl564@163.com

通信作者简介:孙雅雄(1993—),男,博士,副研究员,从事非常规油气地质理论与评价研究。地址:江苏省扬州市文汇西路1号江苏油田分公司,邮政编码:225009。E-mail: sunyaxiong2015@163.com

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探技术”(2024ZD1400100);中国石化科技开发部项目“内陆断陷湖盆断块型页岩油勘探开发技术”(P23189);中国石化科技开发部项目“东部断陷盆地页岩储层差异演化机制及建模”(P24207);中国石化江苏油田分公司科研课题“苏北盆地阜二段细粒混合沉积岩展布特征及分布规律”(JD23002);中国石化江苏油田分公司科研课题“高邮凹陷阜二段页岩油形成条件及资源潜力”(JS24002);江苏省卓越博士后计划“湖相细粒沉积岩混合沉积特征及其对页岩油气甜点发育的影响”(2024ZB364)。

Based on lithofacies type identification and vertical sedimentary environment evolution analysis, the lithofacies combination type classification and development patterns were investigated. By comparing the evaluation parameters of different lithofacies combination types, the favorable combination types were optimized and selected. The results showed that the well HY7 in the second member of Funing Formation was mainly composed of mixed rock facies and felsic rock facies, with layered or laminated felsic-calcareous/dolomitic mixed rocks being the most developed. The sedimentary environment of the second member of the Funing Formation vertically showed early dry-late wet climate, early shallow-late deep water depth, early high-late low salinity, early high-late low provenance supply, and early low-late high productivity, which could be divided into six evolution stages. Considering sedimentary cycle changes in each evolution stage, the vertical superposition relationships of different lithofacies types, and their thickness proportions, seven main lithofacies combination types were identified. Among them, the interbedded combination of layered or laminated felsic-argillaceous mixed rocks and felsic-calcareous/dolomitic mixed rocks had the highest thickness proportion and was the most favorable combination type. The lithofacies assemblages dominated by layered/laminated carbonate rocks and felsic-calcareous/dolomitic mixed rocks could serve as good reservoir layers.

**Keywords:** fine-grained sedimentary rock; lithofacies combination; Subei Basin; Gaoyou Sag; second member of Funing Formation

湖相页岩油是保障国家石油供应安全和提升工业创新水平的战略接替资源。近年来,中国湖相页岩油气在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、四川盆地、松辽盆地、苏北盆地等取得重大突破<sup>[1-12]</sup>。苏北盆地是中国东部陆相断陷湖盆重要组成,盆地中高邮凹陷是页岩油勘探开发的重点凹陷,古近系阜宁组二段(以下简称阜二段)是苏北盆地页岩油勘探的重点层系,该层系页岩油勘探的重大突破证实了其巨大的勘探开发潜力<sup>[13-15]</sup>。前人基于矿物组分、层理构造开展了苏北盆地高邮凹陷阜二段岩相类型划分,并以岩相为研究对象开展了不同岩相的评价、优选工作,相关研究有效指导了生产实践<sup>[14]</sup>。高邮凹陷阜二段岩石类型多样,主要发育细粒混积岩,前人依据岩性组合特征,总结出混积岩、混积岩夹白云石条带、混积岩夹粉砂岩条带或纹层3种典型的岩性组合类型,然而对于岩相组合类型的总结及其演化规律研究还需进一步开展工作<sup>[13-14]</sup>。中国学者在细粒沉积岩岩相组合的划分工作研究初期,通常依据沉积组构特征进行岩石类型的组合<sup>[16-19]</sup>。由于沉积环境演化影响了岩相类型及其分布特征,因此在沉积环境约束下开展岩相组合类型划分及其组合分布规律分析是有效的研究手段<sup>[20-23]</sup>。以苏北盆地高邮凹陷阜二段深层HY7井为研究对象,通过岩心观察、薄片鉴定、全岩X射线衍射分析等手段,描述细粒沉积岩矿物组成、沉积构造等特征,划分岩相类型;结合元素地球化学分析数据,量化阜二段沉积古环境特征,明确不同沉积环境演化阶段细粒沉积岩岩相组合特征,探讨阜二段细粒沉积岩岩相组合类型纵向发育规律与沉积古环境的耦合关系;最后,通过评价参数对比,优选有利岩相组合,以期为阜二段页岩油勘探开发实践提供地质支撑。

## 1 地质概况

苏北盆地是中国东部典型的断陷湖盆,地处苏北—南黄海盆地陆上部分,其南北分别以苏南隆起和鲁苏古陆为界,西至郯庐断裂,东与南黄海盆地相接,面积为3.5×

10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。高邮凹陷位于苏北盆地东台坳陷中部,是盆地中最为重要的含油气凹陷之一(图1a)。高邮凹陷内自下而上发育有白垩系泰州组、古近系阜宁组、戴南组、三垛组、新近系盐城组和第四系的东台组地层,累计沉积厚度超过10 000 m(图1b),其中阜二段沉积时期为半深湖—深湖沉积,分布广泛且有稳定的泥页岩层系<sup>[25]</sup>。综合岩心观察、测井响应和岩性变化规律等,可将阜二段自上而下分为5个亚段<sup>[14]</sup>。高邮凹陷阜二段泥页岩厚度大、生烃指标好、脆性矿物含量高、油气显示丰富,具备形成赋存页岩油气的基础地质条件<sup>[14, 24]</sup>。

在对高邮凹陷阜二段深层系统取心井HY7井岩心观察和描述基础上,采集了泥页岩样品707块,开展了薄片鉴定、全岩X衍射分析、主微量元素分析、核磁有效孔隙度测定、TOC(总有机碳含量)测定、岩石热解分析、力学脆性指数测定等实验分析。2023年,中国石化江苏油田分公司在高邮凹陷花庄地区阜二段页岩油“平面分区、纵向分层、储层分类”研究基础上,向深层中高成熟度页岩油(成熟度大于0.9%,压力系数大于1.5)开展探索,部署实施了预探井HY7井,该井针对阜二段开展系统取心,取心总长度近300 m。系统取心为阜二段沉积环境特征和页岩岩相组合划分研究提供了条件。

## 2 页岩四性特征分析

依据全岩X衍射分析测试数据,高邮凹陷HY7井阜二段泥页岩主要矿物组分包括长英质矿物、碳酸盐岩矿物、黏土矿物等。其中,以长英质矿物为主,质量分数主要介于38.9%~51.7%,平均值为45.3%;碳酸盐岩矿物质量分数主要介于17.1%~37%,平均值为28.94%;方解石与白云石质量分数相当,平均值分别为14.26%和14.68%;黏土矿物质量分数主要介于15.5%~28.2%,平均值为21.75%(图2a)。

有机质类型以I型和II<sub>1</sub>型为主,纵向上自下向上由腐殖型向腐泥型逐渐转变<sup>[13]</sup>。有机显微组分主要以藻类

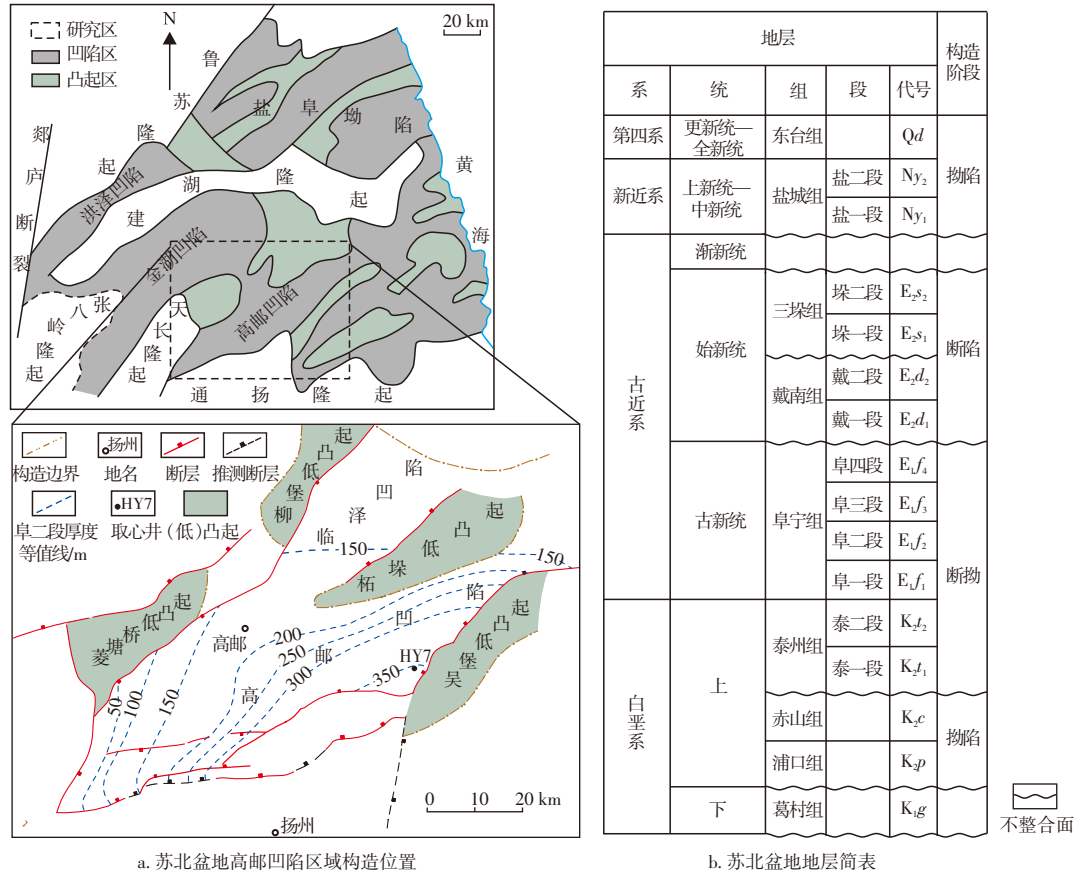


图1 苏北盆地高邮凹陷区域构造位置和地层简表(据参考文献[14,26]修改)

Fig. 1 Regional tectonic location and stratigraphic characteristics of Gaoyou Sag, Subei Basin (modified from references [14,26])

体为主,其质量分数介于35%~95%,平均值为69.56%,以分散或群体聚集形式分布在页岩中<sup>[27]</sup>。高邮凹陷阜宁组二段HY7井(25%~75%的样品)的 $\omega(\text{TOC})$ 介于0.51%~1.17%,平均值为0.87%,属于中低TOC范畴(图2b);游离烃( $S_1$ )质量比主要分布在0.62~1.21 mg/g,平均值为0.99 mg/g;生烃潜量( $S_1+S_2$ ,其中 $S_2$ 为热解生烃量)质量比集中在

1.75~3.95 mg/g,平均值为2.96 mg/g(图2c、图2d);孔隙度介于2.41%~3.77%,平均值为3.12%(图2e)。储集空间类型主要为无机孔和裂缝为主,孔-缝系统发育。其中,无机孔包括长英质矿物粒间孔和溶蚀孔、碳酸盐岩矿物晶间孔和溶蚀孔;层理缝和裂缝是页岩油流动的主要通道,能够有效沟通基质孔隙<sup>[13-14]</sup>。

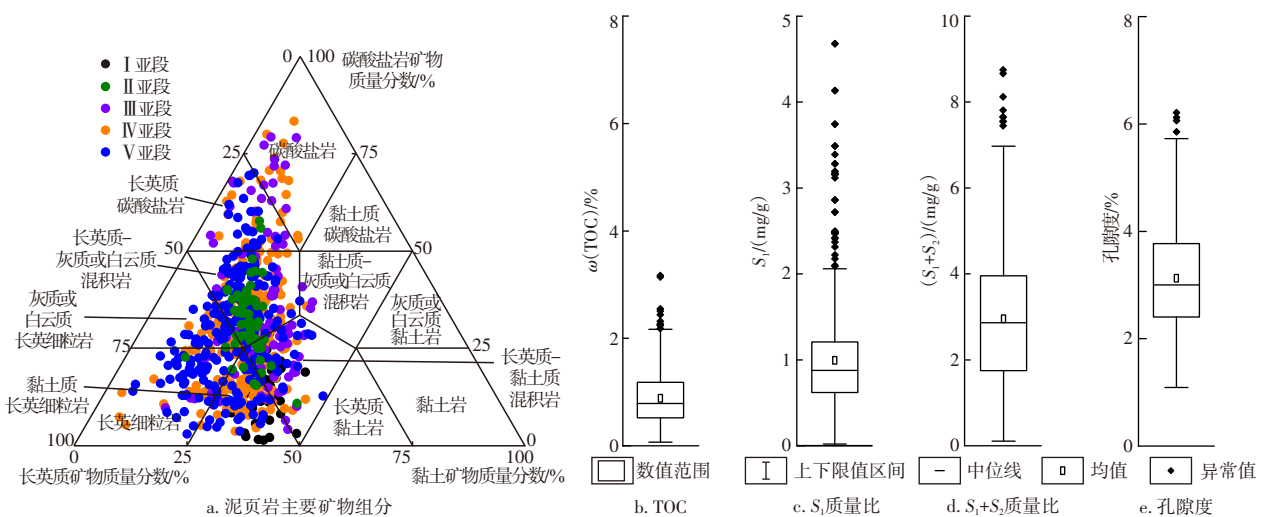


图2 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段HY7井泥页岩主要矿物组分与TOC、 $S_1$ 、 $S_1+S_2$ 、孔隙度参数特征

Fig. 2 Major mineral components, and TOC,  $S_1$ ,  $S_1+S_2$  and He porosity parameters of shale from well HY7 in second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

### 3 岩相组合特征

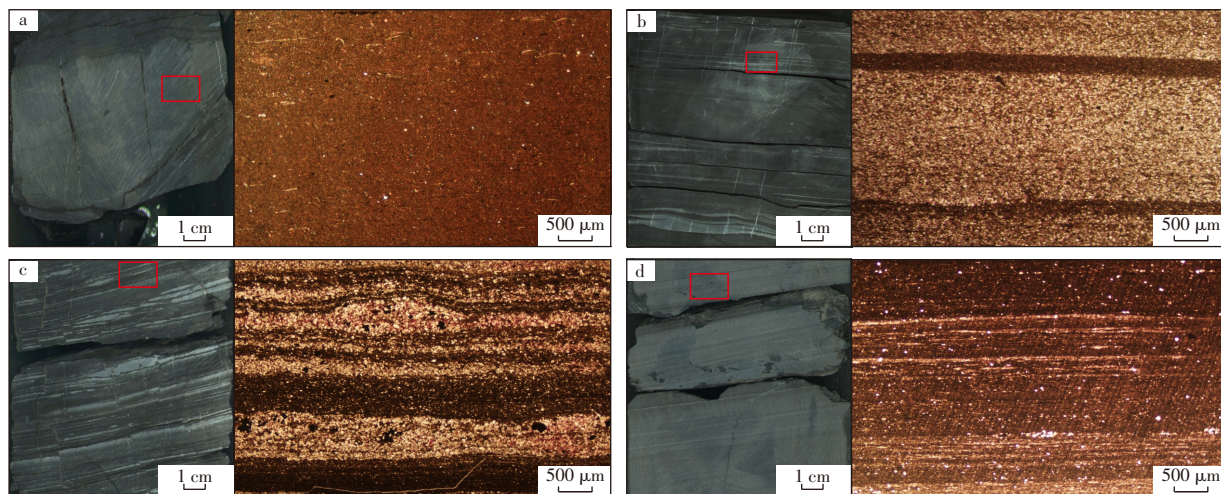
#### 3.1 岩相类型

目前,国内学者普遍考虑矿物组分、沉积构造、有机质丰度等因素来划分陆相细粒沉积岩岩相类型<sup>[22, 28]</sup>。高邮凹陷阜二段HY7井TOC值普遍较低,因此未将有机质丰度纳入岩相类型划分中。

针对细粒沉积岩的岩石类型划分,采用“三端元”岩相学分类方法划分岩石类型,以黏土矿物、碳酸盐矿物和长英质矿物作为三端元。遵循三级命名法原则,即以矿物含量50%为岩石主名边界确定一级分区,再以25%为界进行次一级分区,将细粒沉积岩中三端元矿物相对含量均小于50%界定为混积岩。HY7井阜二段岩石类型

以混积岩最为发育,随后依次为黏土质长英细粒岩、长英质-黏土质混积岩、长英细粒岩,以及少量的灰质或白云质长英细粒岩和长英质碳酸盐岩,极少量碳酸盐岩和黏土质-灰质或白云质混积岩(图2a)。基于HY7井岩心观察,可识别出块状(纹层厚度大于5 cm)、层状(纹层厚度介于1~5 cm)、纹层状(纹层厚度小于1 cm)3种主要层理构造类型(图3)。

基于“矿物组分+沉积构造”划分,高邮凹陷阜二段泥页岩岩相类型划分为3大类、7个亚类<sup>[14]</sup>;HY7井阜二段以混积岩类和长英质类岩相为主,以层状或纹层状、长英质-灰质或白云质混积岩最为发育。其中,混积岩类主要包括块状或纹层状或层状长英质-灰质或白云质混积岩、层状或块状长英质-黏土质混积岩;长英质类包括层状长英细粒岩、层状或块状黏土质长英细粒岩。



注:a为块状构造,正交光薄片照片(右)呈现为均质泥晶碳酸盐岩组分,深度4 019.33 m;b为层状构造,单偏光薄片照片(右)呈现为泥质纹层(暗色)、长英质纹层(亮色)组合,深度4 247.2 m;c为纹层状构造,单偏光薄片照片(右)呈现为泥质纹层(暗色)、长英质纹层(亮色)组合,深度4 134.35 m;d为纹层状构造,正交光薄片照片(右)呈现为碳酸盐岩纹层(亮色)和富黏土质纹层(暗色)组合,深度4 103.13 m。左侧岩心中红框对应右侧薄片位置。

图3 苏北盆地高邮凹陷阜二段HY7井典型层理构造岩心(左)、薄片(右)照片

Fig. 3 Core (left) and thin section (right) photos of typical bedding structures of well HY7 in second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

#### 3.2 沉积环境特征

沉积岩中常微量元素可以指示水介质特征和沉积古环境变化,其中 $V/(V+Ni)$ 指示氧化还原条件, $Sr/Ba$ 比值指示沉积水体古盐度, $Mg/Ca$ 比值指示古气候, $100MgO/Al_2O_3$ 指示古水深, $Al_2O_3$ 含量指示物源供给强度, $Ba/Al$ 比值指示古生产力<sup>[29-32]</sup>。伽马测井曲线可以保存气候的相关信息,广泛用于湖相细粒沉积旋回的分析,一定程度上可以反映湖平面的升降变化<sup>[21, 33-36]</sup>。基于主微量元素、全岩X衍射分析等实验分析,开展阜二段古水深、古气候、古盐度、古生产力等特征恢复;并结合伽马测井曲线

变化趋势,纵向上将阜二段沉积环境分为6个演化阶段(图4)。

对比不同阶段环境参数,可知高邮凹陷阜二段各阶段样品的 $V/(V+Ni)$ 值集中分布在0.60~0.84,平均值为0.72,指示了阜二段深凹带整体处于贫氧环境<sup>[21]</sup>(图5a)。阶段2和阶段4的 $Sr/Ba$ 比值大于1,且阶段2平均值最高为1.91,指示了咸水环境;阶段1、阶段3和阶段5的 $Sr/Ba$ 比值分布介于0.8~2.0,指示了半咸—咸水环境;阶段6的 $Sr/Ba$ 比值主要介于0.5~1.0,指示了半咸水—淡水环境<sup>[21]</sup>(图5b)。从阶段1到阶段6的 $Sr/Ba$ 与 $100MgO/Al_2O_3$ 比值中位数的变化趋势大体上具有一致性,指示了盐度

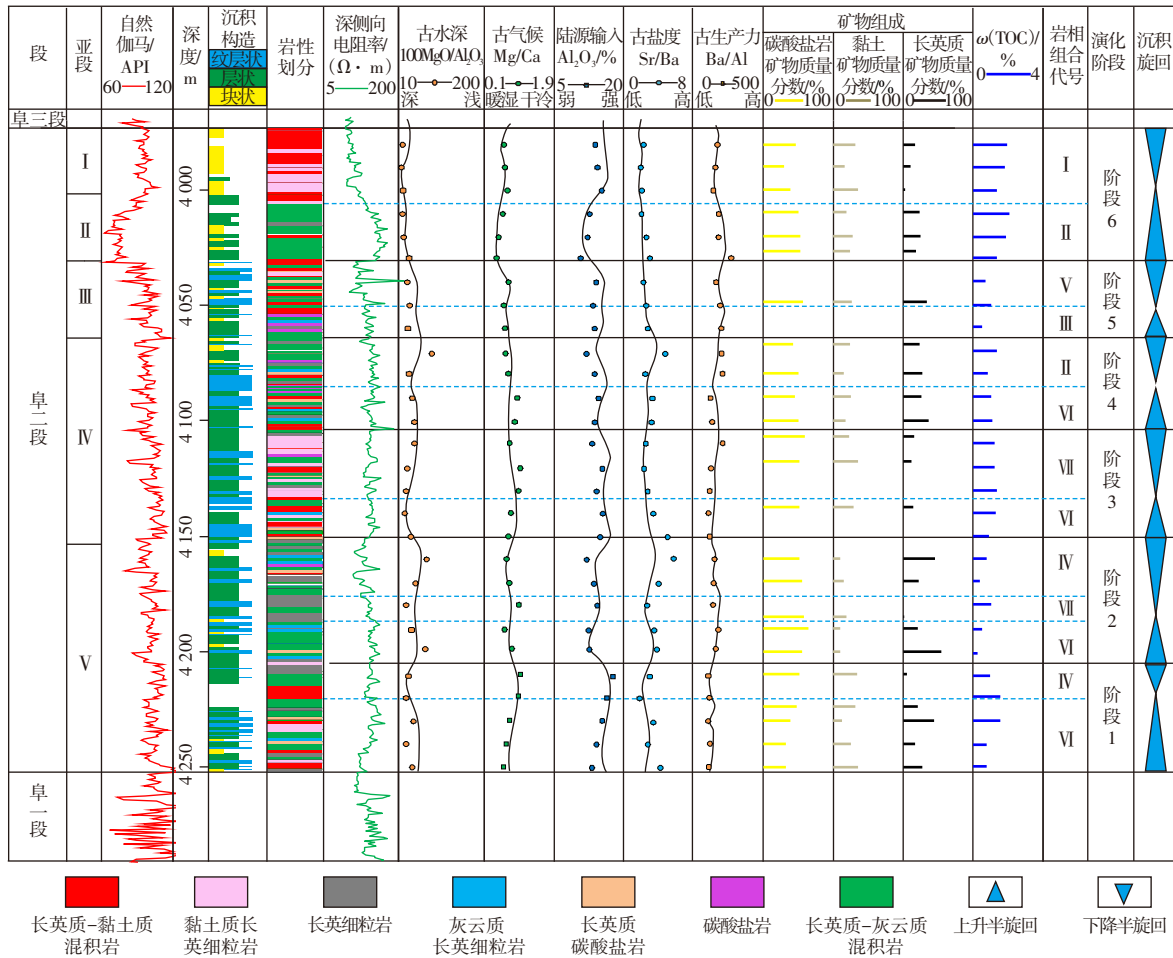


图4 苏北盆地高邮凹陷阜二段HY7井沉积环境特征和岩相组合类型划分

Fig. 4 Sedimentary environment characteristics and classification of lithofacies combination types of well HY7 in second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

升高—下降—小幅度升高—缓慢下降,水深变浅—变深—变浅—逐渐变深的沉积环境变化(图5b、图5c)。利用100MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值和伽马测井曲线反映湖平面升降变化,划分上升半旋回和下降半旋回,可知阶段1、6主要发育上升半旋回,表明这2个阶段湖平面整体上升为主;阶段2、3、5下降半旋回沉积厚度大,表明这3个阶段湖平面整体下降为主(图4)。Mg/Ca比值与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>值中位数变化趋势具有一致性,指示了随着气候变暖湿,半深湖—深湖环境陆源供给减弱,气候变干旱陆源供给增强<sup>[29,37]</sup>。从阶段1到阶段6气候先由干热变半干热,再变干热,然后逐渐向暖湿转变;物源供给由强变较强,再变强,然后逐渐变弱(图5d、图5e)。Ba/Al比值主要分布在30.25×10<sup>-4</sup>~178.1×10<sup>-4</sup>,平均值为110.56×10<sup>-4</sup>,从阶段1到阶段6古生产力逐渐增强,与TOC值整体变化趋势一致(图4、图5f)。

### 3.3 岩相组合类型

在对阜二段HY7井纵向沉积环境演化阶段划分基础上,结合各演化阶段内沉积旋回升降变化,依据不同岩相类型的垂向叠置关系、厚度占比等,划分出7种主要岩

相组合类型(图4、表1)。从纵向发育位置和厚度占比来看,岩相组合I、II、III主要在阜二段晚期(4~6阶段)发育。其中岩相组合I出现在最大湖泛面附近,岩相组合II出现在上升半旋回底部或下降半旋回顶部,岩相组合III发育厚度小,最低为4.9%(表1)。岩相组合IV出现在阜二段早期(1~2阶段),发育在下降半旋回顶部;岩相组合VI出现阜二段1~4亚段,发育在上升半旋回,发育厚度占比最大,为30.22%;岩相组合V在阜二段中期末(5阶段)发育,出现在下降半旋回;岩相组合VII出现在阶段2的湖泛面附近,阶段3下降半旋回,发育厚度较大为14.77%(图4、表1)。

### 3.4 岩相组合发育规律

在岩相组合类型划分基础上,结合沉积古环境纵向演化,建立了沉积古环境影响下阜二段细粒沉积岩岩相组合发育规律(图6)。阜二段整体发育湖侵体系域,湖泊面积持续增大<sup>[38]</sup>。沉积晚期对应环境演化阶段6,该时期气候湿润、盐度低、水深较大,古生产力较高对应高TOC值(图4、图5b—图5f),该时期主要发育上升半旋

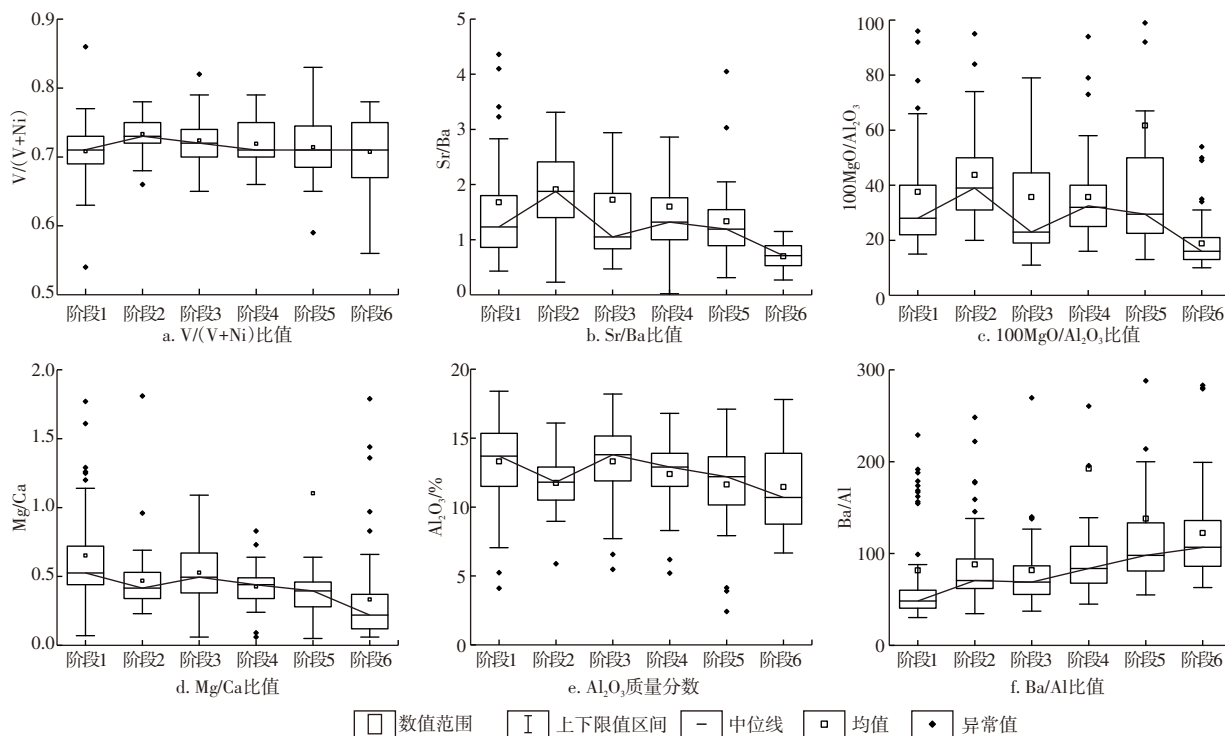


图5 苏北盆地高邮凹陷阜二段不同环境演化阶段各地化参数箱型图

Fig. 5 Box plots of geochemical parameters at different environmental evolution stages of second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

表1 苏北盆地高邮凹陷阜二段岩相组合类型评价参数对比

Table 1 Comparison of evaluation parameters of lithofacies combination types of second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

岩相组合代号	岩相类型	发育层段	厚度比/%	$\omega(\text{TOC})/\%$	$S_1/\text{(mg/g)}$	$S_1+S_2/\text{(mg/g)}$	含油饱和指数/ $\text{(mg/g)}$	孔隙度/%	力学脆性指数
I	块状黏土质长英细粒岩、长英质-黏土质混积岩	I亚段	11.66	1.58	0.85	4.59	54.59	3.71	30.75
II	块状或层状长英质-灰质或白云质混积岩夹薄层长英质-黏土质混积岩	II、IV亚段	16.84	1.14	0.99	3.71	111.13	2.88	55.56
III	层状碳酸盐岩、长英质-灰质或白云质混积岩互层	III亚段	4.90	0.69	1.07	2.88	150.43	3.32	60.84
IV	层状或纹层状的黏土质长英细粒岩或长英细砂岩、长英质-黏土质混积岩、长英质-灰质或白云质的混积岩,灰质或白云质长英细粒岩互层	V亚段	14.70	0.51	0.66	1.46	121.86	2.57	45.45
V	层状或纹层状长英质-黏土质混积岩、长英质-灰质或白云质混积岩互层	IV亚段	6.92	1.19	1.01	4.31	101.54	4.00	52.60
VI	层状或纹层状长英质-灰质或白云质混积岩、灰质或白云质长英细粒岩夹薄层长英细粒岩、长英质-黏土质混积岩	IV、V亚段	30.22	0.70	1.12	2.35	140.19	3.01	54.67
VII	层状或纹层状的黏土质长英细粒岩或长英细粒岩夹薄层长英质-灰质或白云质混积岩、长英质-黏土质混积岩	V亚段	14.77	0.85	1.09	3.02	136.36	3.07	47.82

注:含油饱和指数为 $S_1/Q_{\text{TOC}} \times 100$ 。

回,旋回底部岩相组合 II 对应弱陆源供给,发育块状或层状长英质-灰质或白云质混积岩,顶部岩相组合 I 对应陆源供给增强,发育块状黏土质长英细粒岩和块状长英质-黏土质混积岩组合。阜二段沉积早期对应环境演化 1~2 阶段,该时期气候干热、水体蒸发强、水深较浅、盐度高,低古生产力对应低 TOC 值(图 4、图 5b—图 5f)。从阶段 1 到阶段 2,水深变浅、盐度增加、物源供给减弱。阶段 2 碳酸盐岩矿物质量分数高于阶段 1,平均值分别为 31.07% 和 23.57%。阶段 1 以上升半旋回为主,阶段

2 以下降半旋回为主,上升半旋回时期发育岩相组合 VI,以层状或纹层状长英质-灰质或白云质混积岩岩相夹薄层长英细粒岩、黏土质长英细粒岩为主,下降半旋回发育岩相组合 IV,下降半旋回晚期以层状或纹层状长英细粒岩与长英质-灰质或白云质混积岩互层为主,阶段 2 晚期较阶段 1 晚期物源供给增强,岩相组合 IV 中层状或纹层状长英细粒岩厚度更大。沉积中期对应环境演化 3~5 阶段,该时期气候由早期干旱向半湿润转变,水体为半咸水—咸水,古生产力呈升高趋势,TOC 值

高于沉积早期1~2阶段(图4、图5b—图5f)。该时期湖平面先降低再升高、盐度先升高后减小、物源供给持续减弱,该时期主要发育下降半旋回,由组合VII层状或纹层

状黏土质长英细粒岩,向组合II块状或层状长英质-灰质或白云质混积岩,再向组合V纹层状长英质-灰质或白云质混积岩、长英质-黏土质混积岩互层转换。

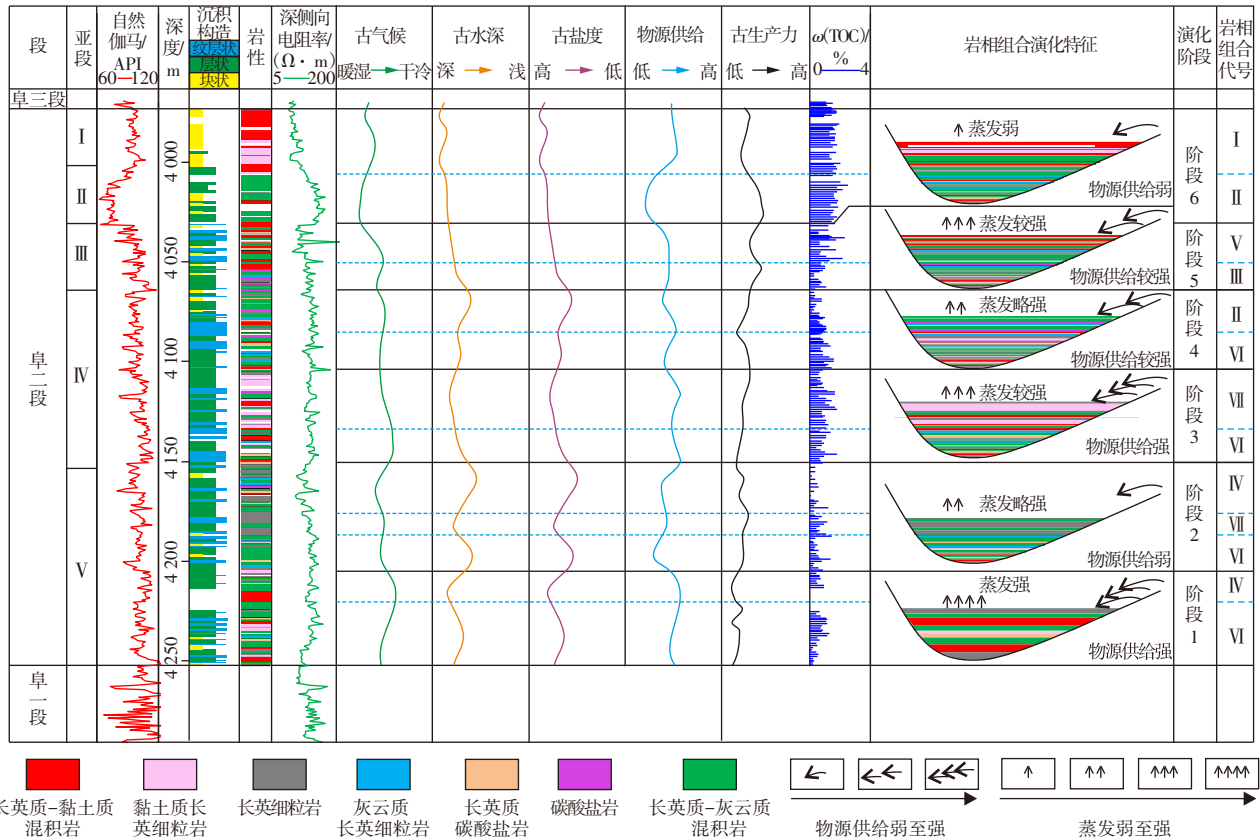


图6 苏北盆地高邮凹陷HY7井阜二段沉积环境纵向演化及其岩相组合类型模式

Fig. 6 Vertical evolution models of sedimentary environment and lithofacies combination types of well HY7 in second member of Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin

#### 4 有利岩相组合类型

从地质-工程角度入手,对比不同岩相组合类型的TOC、 $S_1$ 、 $S_1+S_2$ 、含油饱和度、孔隙度和力学脆性指数等参数特征(表1),可知岩相组合V源储配置条件最为有利, $\omega(\text{TOC})$ (平均值为1.19%)、 $S_1$ (平均值为1.01 mg/g)、 $S_1+S_2$ (平均值为4.31 mg/g)、含油饱和度(平均值为101.54 mg/g)、孔隙度(平均值为4.00%)、力学脆性指数(平均值为52.6)均相对较高,表明岩相组合V的生油性、含油性、储集性、可动性和力学脆性特征均相对较好。岩相组合III和VI的 $S_1$ (平均值为1.07 mg/g和1.12 mg/g)、 $S_1+S_2$ (平均值为2.88 mg/g和2.35 mg/g)、含油饱和度(平均值为150.43 mg/g和140.19 mg/g)、孔隙度(平均值为3.32%和3.01%)、力学脆性指数(平均值为60.84%和54.67%)均相对较高, $\omega(\text{TOC})$ (平均值为0.69%和0.7%)相对较低,表明岩相组合III和VI具有较好的含油性、储集性、可动性、脆性特征,可作为较好的储集层。

岩相组合VII的 $\omega(\text{TOC})$ (平均值为0.85%)、 $S_1+S_2$ (平均值为3.02 mg/g)相对中等, $S_1$ (平均值为1.09 mg/g)、含油饱和度(平均值为136.36 mg/g)、孔隙度(平均值为3.07%)、力学脆性指数(平均值为47.82)略低于50,表明岩相组合VII生油性中等,含油性、储集性、可动性均相对较好,脆性特征较差。岩相组合II的 $\omega(\text{TOC})$ (平均值为1.14%)、 $S_1+S_2$ (平均值为3.71 mg/g)、含油饱和度(平均值为111.13 mg/g)、力学脆性指数(平均值为55.56)均相对较高, $S_1$ (平均值为0.99 mg/g)、孔隙度(平均值为2.88%)相对中等,表明岩相组合II生油性、可压性较好,储集性和含油性中等。

岩相组合I的 $\omega(\text{TOC})$ (平均值为1.58%)、 $S_1+S_2$ (平均值为4.59 mg/g)均相对较高,但是 $S_1$ (平均值为0.85 mg/g)、含油饱和度(平均值为54.59 mg/g)、孔隙度(平均值为3.71%)、力学脆性指数(平均值为30.75)均相对较低,表明岩相组合I具有良好的生油潜力,但是可动性、脆性特征均较差。岩相组合IV的 $\omega(\text{TOC})$ (平均值小于1%)、 $S_1$ (平均值小于1 mg/g)、 $S_1+S_2$ (平均值为1.46 mg/g、2.35 mg/g)、

孔隙度(平均值为2.57%、3.01%)均相对较低,表明岩相组合IV生烃条件较差,同时岩相组合IV力学脆性指数(平均值为45.45)低于50,指示脆性特征较差。

## 5 结论

1) 阜二段TOC含量普遍较低,基于“矿物组分+沉积构造”划分岩相类型, HY7井阜二段以混积岩类和长英质类岩相为主,其中,层状或纹层状长英质-黏土质混积岩、长英质-灰质或白云质混积岩互层组合为最有利组合类型。

2) 依据主微量元素、全岩X衍射分析数据结合伽马测井曲线变化趋势, HY7井阜二段纵向上沉积环境分为6个演化阶段。结合各演化阶段内沉积旋回升降变化,依据不同岩相类型的垂向叠置关系、厚度占比等,划分出7种主要岩相组合类型。沉积环境演化控制了岩相组合类型及其纵向演化。

3) 对比不同岩相组合类型的TOC、 $S_1$ 、 $S_1+S_2$ 、含油饱和指数、孔隙度和力学脆性指数等特征,岩相组合V最为有利,岩相组合III和VI可作为较好的储集层。

### 参考文献

- 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J].地质学报,2022,96(1):155-171.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- 何希鹏,王凯,何贵松,等.复杂构造带常压页岩气开发刻度区建立及其意义[J].天然气工业,2025,45(3):16-35.  
HE Xipeng, WANG Kai, HE Guisong, et al. Establishment of calibrated area of normal pressure shale gas development in complex structure belts and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 16-35.
- 张海杰,牟泳澄,韩贵生,等.四川盆地大足地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气储层特征与分布规律[J].天然气勘探与开发,2024,47(4):28-37.  
ZHANG Haijie, MU Yongcheng, HAN Guisheng, et al. Shale gas reservoirs of the Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation, Dazu area, Sichuan Basin: Characteristics and distribution[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(4): 28-37.
- 白桦,洪海涛,邱玉超,等.基于地震相分析的四川盆地侏罗系凉山组湖盆演化及页岩发育区预测[J].天然气勘探与开发,2024,47(6):8-17.  
BAI Hua, HONG Haitao, QIU Yuchao, et al. Seismic facies to analyze lacustrine-basin evolution and predict shale blocks extended into the Jurassic Liangaoshan Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(6): 8-17.
- 孙平涛,赵建忠,刘强.吉林油田页岩油水平井二开钻井关键技术及应用[J].天然气勘探与开发,2024,47(3):111-117.  
SUN Pingtao, ZHAO Jianzhong, LIU Qiang. Key second-spud horizontal-well technologies for shale oil in Jilin Oilfield and their application[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(3): 111-117.
- 任静思,孔德蔚然,刘军,等.川南页岩气地质工程协同研究平台建设初探[J].天然气勘探与开发,2024,47(3):94-104.  
REN Jingsi, KONG Deweiran, LIU Jun, et al. The geology-engineering collaborative platform established for shale gas, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(3): 94-104.
- 沈童,卢文涛,郑爱维,等.四川盆地复兴地区侏罗系陆相页岩油可采储量评价方法[J].天然气勘探与开发,2024,47(5):39-47.  
SHEN Tong, LU Wentao, ZHENG Aiwei, et al. An integrated method for estimating recoverable reserves of Jurassic continental shale oil in Fuxing area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(5): 39-47.
- 王翔,冯永超.鄂尔多斯盆地缘华北探区页岩油储层岩石力学特性实验研究[J].非常规油气,2024,11(1):110-118.  
WANG Xiang, FENG Yongchao. Experimental study on rock mechanical properties of shale oil reservoir in North China exploration, southern Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(1): 110-118.
- 张伟强.渤海凹陷沙河街组页岩油藏水力裂缝穿层扩展规律研究[J].非常规油气,2024,11(2):140-146.  
ZHANG Weiqiang. Layer-crossing propagation law of hydraulic fracture in Shahejie Formation shale reservoir in Bonan Depression [J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(2): 140-146.
- 聂舟,陈瑞华,姜振学,等.长宁地区低阻页岩孔隙结构精细表征及分形研究[J].非常规油气,2024,11(1):45-55.  
NIE Zhou, CHEN Ruihua, JIANG Zhenxue, et al. Pore structure characterization and fractal study of low-resistivity shales in Changning area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(1): 45-55.
- 高攀明.鄂尔多斯盆地吴起地区长7页岩油烃源岩特征及生排烃潜力[J].非常规油气,2024,11(3):10-18.  
GAO Panming. Characteristics and hydrocarbon generation and expulsion potential of Chang7 shale oil source rocks in Wuqi Area, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(3): 10-18.
- 刘文慧,马啸,户瑞宁,等.海陆相页岩孔隙结构对比研究:以龙马溪组和芦苇沟组为例[J].非常规油气,2024,11(3):35-48.  
LIU Wenhui, MA Xiao, HU Ruining, et al. Comparative study on pore structure of marine and terrestrial shales: A case study of Longmaxi Formation and Lucaogou Formation[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(3): 35-48.
- 段宏亮,孙雅雄,杨保良.苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集主控因素[J].石油实验地质,2024,46(3):441-450.  
DUAN Hongliang, SUN Yaxiong, YANG Baoliang. Main controlling factors of shale oil enrichment in second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 441-450.
- 朱相羽,段宏亮,孙雅雄.苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(8):1206-1221.  
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221.
- 张琬璐,荆晓明.海安凹陷曲塘次凹阜二段页岩油形成条件研究[J].非常规油气,2024,11(6):34-43.  
ZHANG Wanlu, JING Xiaoming. A study on formation conditions of shale oil in second member of Funing Formation in Qutang Sub-sag, Haian Sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(6): 34-43.
- 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.
- 焦方正,邹才能,杨智.陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1067-1078.  
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.
- 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等.陆相页岩油富集机理探讨[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1333-1349.

- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [19] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盐湖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.
- [20] 林中凯, 张少龙, 李传华, 等. 湖相页岩油地层岩相组合类型划分及其油气勘探意义: 以博兴洼陷沙河街组为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 39-51.
- LIN Zhongkai, ZHANG Shaolong, LI Chuanhua, et al. Types of shale lithofacies assemblage and its significance for shale oil exploration: A case study of Shahejie Formation in Boxing Sag[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(1): 39-51.
- [21] 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 等. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J]. *古地理学报*, 2023, 25(5): 1156-1175.
- PANG Xiaojiao, WANG Guiwen, KUANG Lichun, et al. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: A case study of the Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(5): 1156-1175.
- [22] 刘惠民, 王勇, 李军亮, 等. 济阳坳陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 752-767.
- LIU Huimin, WANG Yong, LI Junliang, et al. Main controlling factors and distribution characteristics of shale lithofacies in the Eocene of Jiyang Depression[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(4): 752-767.
- [23] 刘惠民, 张顺, 王学军, 等. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 30-48.
- LIU Huimin, ZHANG Shun, WANG Xuejun, et al. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: A case study from upper sub-member of Es<sub>4</sub> in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 30-48.
- [24] 方志雄, 肖秋生, 张殿伟, 等. 苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1468-1478.
- FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1468-1478.
- [25] 严泽宇, 梁兵, 孙雅雄, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层页岩储层地应力方向及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(6): 1187-1197.
- YAN Zeyu, LIANG Bing, SUN Yaxiong, et al. In-situ stress orientation and main controlling factors of deep shale reservoirs in the second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(6): 1187-1197.
- [26] 李维, 朱筱敏, 段宏亮, 等. 苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组细粒沉积岩纹层特征与成因[J]. *古地理学报*, 2020, 22(3): 469-482.
- LI Wei, ZHU Xiaomin, DUAN Hongliang, et al. Characteristics and forming mechanism of laminae fine-grained sedimentary rock of the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu sags, Subei Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(3): 469-482.
- [27] 荆晓明. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜二段页岩油甜点评价[J]. *非常规油气*, 2023, 10(3): 31-38.
- JING Xiaoming. Evaluation of shale oil sweet spots in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(3): 31-38.
- [28] 彭军, 曾焱, 杨一茗, 等. 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 106-115.
- PENG Jun, ZENG Yao, YANG Yiming, et al. Discussion on classification and naming scheme of fine-grained sedimentary rocks [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 106-115.
- [29] FAN X J, LU Y B, LIU Z H, et al. Lacustrine shale lithofacies and depositional environment in the Paleocene second member of the Funing Formation, Subei Basin, China: Insights into shale oil development prospects[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 164: 106849.
- [30] 逢淑伊, 操应长, 梁超. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段岩相特征及沉积环境: 以樊页1井为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 799-809.
- PANG Shuyi, CAO Yingchang, LIANG Chao. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Es<sub>4</sub><sup>U</sup> and Es<sub>3</sub><sup>L</sup>: A case study of well FY1 in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 799-809.
- [31] 许中杰, 程日辉, 张莉, 等. 华南陆缘晚三叠—早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录[J]. *地球科学*, 2012, 37(1): 113-124.
- XU Zhongjie, CHENG Rihui, ZHANG Li, et al. The geochemistry records of sea-level relative movement and paleoclimatic evolution of the South China continental margin in Late Triassic-Early-Middle Jurassic[J]. *Earth Science*, 2012, 37(1): 113-124.
- [32] 杨万芹, 王学军, 蒋有录, 等. 湖泊古气候的量化恢复及其对细粒沉积的影响: 以东营凹陷沙四段上亚段—沙三段下亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(2): 29-36.
- YANG Wanqin, WANG Xuejun, JIANG Youlu, et al. Quantitative reconstruction of paleoclimate and its effects on fine-grained lacustrine sediments: A case study of the upper Es<sub>4</sub> and lower Es<sub>3</sub> in Dongying Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(2): 29-36.
- [33] WEI X S, DENG Y, YAN D T, et al. Organic matter enrichment in Asia's Palaeolake controlled by the early and middle Eocene global warming and astronomically driven precessional climate[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 154: 106342.
- [34] HUANG H, GAO Y, JONES M M, et al. Astronomical forcing of Middle Permian terrestrial climate recorded in a large paleolake in northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 550: 109735.
- [35] 胡涛, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨: 以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 140-152.
- HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Factors controlling differential enrichment of organic matter in saline lacustrine rift basin: A case study of third member Shahejie Fm in Dongpu Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 140-152.
- [36] 金芸芸, 李艳然, 李圻, 等. 陆相断陷咸化湖盆细粒沉积岩特征及沉积环境: 以泌阳凹陷核桃园组H3 III亚段为例[J]. *断块油气田*, 2024, 31(2): 289-298.
- JIN Yunyun, LI Yanran, LI Yi, et al. Characteristics and sedimentary environment of fine-grained sedimentary rocks in continental rift-subsidence saline lacustrine basin: A case study of H3 III Submember of Hetaoyuan Formation in Biyang Sag[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(2): 289-298.
- [37] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405-414.
- XIONG Xiaohui, XIAO Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405-414.
- [38] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- QIU Xuming, LIU Yurui, FU Qiang. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous-Tertiary in Subei Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.