

引用本文: 李志明, 金芸芸, 李楚雄, 等. 南襄盆地泌阳凹陷渐新统核桃园组三Ⅲ亚段页岩油富集模式——以中部深凹带 YYY1 井取心段为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 952–962. DOI: 10.11781/sydz202305952.
LI Zhiming, JIN Yunyun, LI Chuxiong, et al. Discussion on shale oil enrichment pattern in the Ⅲ interval of the third member of Oligocene Hetaoyuan Formation, Biyang Sag, Nanxiang Basin: a case study of cored interval of well YYY1 in the central deep sag zone[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 952–962. DOI: 10.11781/sydz202305952.

南襄盆地泌阳凹陷渐新统 核桃园组三Ⅲ亚段页岩油富集模式

——以中部深凹带 YYY1 井取心段为例

李志明^{1,2,3}, 金芸芸⁴, 李楚雄^{1,2,3}, 黄帅博⁴, 周圆圆^{1,2,3}, 贾梦瑶^{1,2,3},
冷筠滢^{1,2,3}, 余梦丽⁴, 徐二社^{1,2,3}, 刘雅慧^{1,2,3}, 刘鹏^{1,2,3}, 何晋译^{1,2,3}

1. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;
2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 江苏 无锡 214126;
3. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;
4. 中国石化 河南油田分公司 石油勘探开发研究院, 河南 南阳 473043

摘要: 南襄盆地泌阳凹陷渐新统核桃园组核三段是我国陆相页岩油率先取得勘探突破的层系, 但因多种因素影响始终未能实现规模开发。为揭示泌阳凹陷中部深凹带核三段页岩油勘探开发目标层段, 以页岩油风险探井 YYY1 井核三Ⅲ亚段系统取心段为研究对象, 充分利用系统取心段现场分析结果, 结合前人研究成果, 在剖析系统取心段岩相、页岩油富集层段特征基础上, 明确了页岩油富集模式与首选勘探开发目标层。结果揭示: YYY1 井核三Ⅲ中一下段主要发育含有机质纹层状混合质页岩、富有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状长英质页岩、富有机质纹层状长英质页岩、含有机质层状长英质页岩、含有机质块状泥质粉砂岩/粉砂岩、含有机质块状细砂岩 7 种岩相; 依据游离烃 S_1 和油饱和度 OSI 两个表征页岩油富集关键参数, 结合核磁测井总孔隙度, 共识别出 8 个页岩油富集层, 单个页岩油富集层厚度介于 5~20 m, 累计厚度 81 m。核三Ⅲ中段发育的富集层段均受原位滞留烃和高 TOC 邻层运移烃贡献共同控制, 具源储一体和源储共存双重富集模式; 核三Ⅲ下段发育的富集层段均受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式。核三Ⅲ中段第二个页岩油富集层是泌阳凹陷中部深凹带核三Ⅲ亚段页岩油勘探开发的首选目标层段, 这一认识为泌阳凹陷页岩油勘探开发部署提供了重要依据。

关键词: 页岩油; 富集模式; 核桃园组三段; 渐新统; 泌阳凹陷; 南襄盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sydz202305952

Discussion on shale oil enrichment pattern in the Ⅲ submember of the third member of Oligocene Hetaoyuan Formation, Biyang Sag, Nanxiang Basin:

a case study of cored interval of well YYY1 in the central deep sag zone

LI Zhiming^{1,2,3}, JIN Yunyun⁴, LI Chuxiong^{1,2,3}, HUANG Shuaibo⁴, ZHOU Yuanyuan^{1,2,3}, JIA Mengyao^{1,2,3},

LENG Junying^{1,2,3}, YU Mengli⁴, XU Ershe^{1,2,3}, LIU Yahui^{1,2,3}, LIU Peng^{1,2,3}, HE Jinyi^{1,2,3}

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
3. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
4. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473043, China

Abstract: The third member of Oligocene Hetaoyuan Formation (Eh_3) in Biyang Sag of Nanxiang Basin is the first strata in which a breakthrough for continental shale oil exploration is made, but scale development has not been realized due to a variety of factors. In order to reveal the target zone of shale oil exploration and development

收稿日期 (Received): 2023-06-05; 修订日期 (Revised): 2023-08-18; 出版日期 (Published): 2023-09-28.

作者简介: 李志明 (1968—), 男, 博士, 研究员, 本刊编委, 从事油气地球化学、页岩油气地质研究。E-mail: lizm.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42090022) 资助。

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

of the third member of Hetaoyuan Formation in the central deep sag zone of Biyang Sag, a case study on the cored interval of the Ⅲ submember of the third member of Hetaoyuan Formation (Eh_3^3) from shale oil risk exploration well YYY1 is carried out. Systematic studies on the lithofacies types and the characteristics of shale oil enrichment intervals of the cored interval of Eh_3^3 are carried out and the shale oil enrichment pattern and preferred target layers of shale oil exploration and development are defined by taking full advantage of the results of field analysis and combining with previous research results. The findings have shown that seven lithofacies types, i.e. organic laminar mixed shale, organic-rich laminar mixed shale, organic laminar felsic shale, organic-rich laminar felsic shale, organic layered felsic shale and organic massive argillaceous siltstone/siltstone, organic massive fine sandstone, are developed in the middle-lower interval of Eh_3^3 of well YYY1. Eight shale oil enrichment intervals are identified according to two key parameters of free hydrocarbon (S_1) and oil saturation index (OSI) and combining with the total porosity of nuclear magnetic logging. The thickness of a single shale oil enrichment interval is 5–20 m and the total thickness is 81 m. The shale oil enrichment intervals developed in the middle interval of Eh_3^3 are all controlled by both in-situ retention hydrocarbon and migration hydrocarbon from the adjacent high TOC layer, with two enrichment patterns: source-reservoir integration and source-reservoir coexistence. The shale oil enrichment intervals developed in the lower interval of Eh_3^3 are all controlled by in-situ retention hydrocarbon, with source-reservoir integration enrichment pattern. The shale oil enrichment interval in the middle interval is defined the preferred target interval for shale oil exploration and development in Eh_3^3 in the central deep sag zone of Biyang Sag. This provides an important basis for shale oil exploration and development in Biyang Sag.

Key words: shale oil; enrichment pattern; the Ⅲ submember of the third member of Hetaoyuan Formation; Biyang Sag; Nanxiang Basin

2010—2012年期间,中国石化启动了我国第一轮陆相页岩油勘探开发探索与实践^[1],河南油田分公司在南襄盆地泌阳凹陷中部深凹带,针对核桃园组核三Ⅲ亚段主力烃源岩层系,先后部署并实施了AS1、BYHF1和BYHF2井3口页岩油探井,开展了陆相页岩油的勘探开发实践。3口探井分别试获最高日产4.68 m³^[2]、23.6 m³和28.10 m³的工业油流,率先取得了我国陆相页岩油的勘探开发突破^[3-7];但页岩油高产、稳产周期短,产量递减快,累计产量低,即使水平压裂改造井BYHF1和BYHF2井累计产油量也仅为1 460 t和2 240.6 t,未能实现规模突破与效益开发。实际上,在第一轮陆相页岩油勘探开发探索与实践阶段,不仅仅泌阳凹陷,其他盆地如济阳拗陷第一轮陆相页岩油勘探开发实践也未能实现规模突破与效益开发。究其原因,除与当时针对国外海相高一过成熟页岩油气的有效开发技术难以适应我国中—低成熟度陆相页岩油的工程工艺条件外,还有一个重要原因是由于当时我国陆相页岩油的勘探开发尚处于探索的初期,基础研究还相当薄弱,陆相页岩油的富集机理与富集模式尚不清晰,评价关键参数与界限尚未落实,导致目标区或目标层段的优选不正确^[8-9]。有学者对泌阳凹陷AS1、BYHF1井试油层段进行剖析后认为,核三Ⅲ亚段主力烃源岩层系在埋深处

于2 400~2 500 m时还没有达到页岩油富集、可动的最佳深度段,故不利于页岩油的开采^[5-6]。近年,尤其2019年以来,我国陆相页岩油勘探开发已在诸多盆地/凹陷取得了革命性突破^[10-12],并建成了新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳等页岩油国家级示范区^[13],这为河南油田分公司针对泌阳凹陷核三Ⅲ亚段重启页岩油勘探开发工作带来了信心与希望。2022年河南油田分公司在泌阳凹陷中部深凹带的安棚地区,部署实施了一口页岩油风险探井——YYY1井(图1a),该井重点针对核三Ⅲ中和核三Ⅲ下段开展了系统取心,同时对核三Ⅳ、核三Ⅴ、核三Ⅶ亚段进行了选择性取心,取心总长度达333 m。系统取心段为剖析泌阳凹陷深凹带核三Ⅲ亚段页岩油富集特征与富集模式奠定了前提条件。本研究旨在以YYY1井核三Ⅲ中—下段系统取心段为研究对象,结合前人研究成果,通过系统取心段页岩油富集特征的剖析,探讨并构建泌阳凹陷核三Ⅲ亚段页岩油富集模式,以期为泌阳凹陷中部深凹带核三Ⅲ中—下段页岩油勘探开发部署决策提供科学依据。

1 地质背景

泌阳凹陷是南襄盆地的一个次级凹陷,是我国中生代典型“小而肥”的富油凹陷之一,为一南

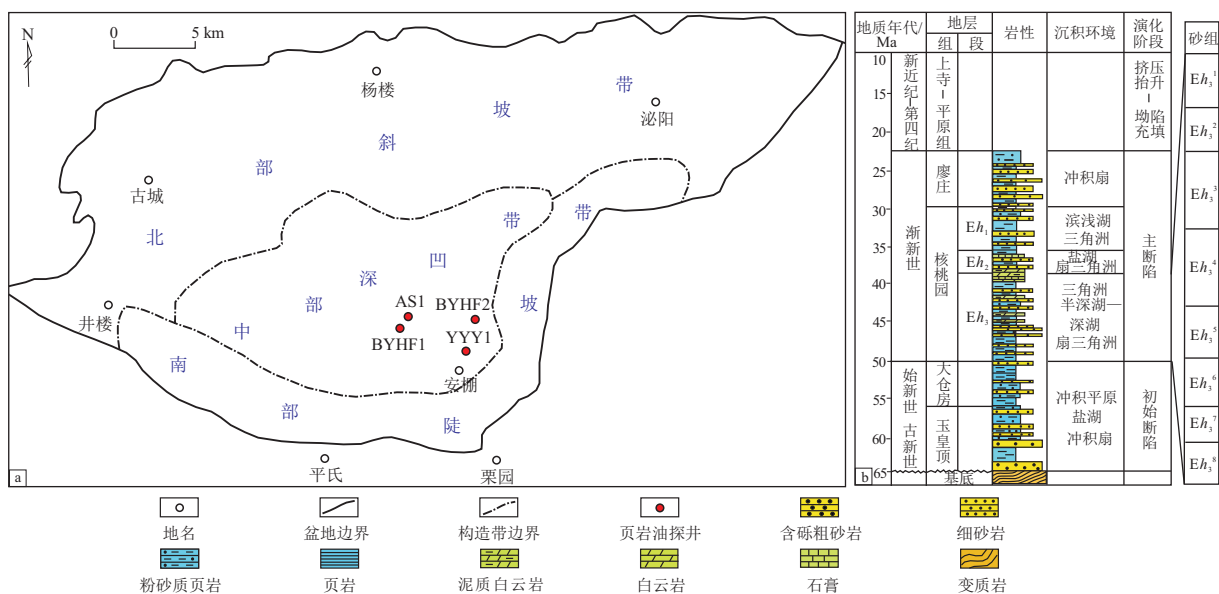


图 1 南襄盆地泌阳凹陷构造单元划分、采样井位置(a)及地层柱状图(b)

Fig.1 Structural units and sampling wells (a) and stratigraphic column (b) of Biyang Sag, Nanxiang Basin

断北超的箕状凹陷,面积约为 1 000 km²。其构造演化大致经历了初始断陷、主断陷、坳陷和挤压抬升 4 个阶段^[14-15];沉积地层自下而上依次为玉皇顶组、大仓房组、核桃园组、廖庄组、上寺组和平原组。根据沉积地层发育特征,泌阳凹陷由北至南可依次划分为北部斜坡带、中部深凹带和南部陡坡带 3 个次级构造单元(图 1a)。凹陷内大量钻井取心、测井和地震资料揭示,中部深凹带既是凹陷的沉积中心,又是凹陷沉降中心;湖盆水体总体相对较深,尤其是核桃园组核三段—核二段沉积时期,发育有大套半深湖—深湖相暗色泥页岩,是凹陷内主要富有机质泥页岩层系。该套地层沉积时期湖盆经历了频繁的水体盐度变化,总体由下而上水体呈微咸水—咸水—超咸水环境演化趋势,在核三段上部、核二段下部发育天然碱矿,水体盐度相对较大^[16]。目前,根据核桃园组三段岩性组合特征与油气勘探实践,河南油田分公司将核桃园组三段细分为 8 个亚段,即核三 I (Eh₃¹)、核三 II (Eh₃²)、核三 III (Eh₃³)、核三 IV (Eh₃⁴)、核三 V (Eh₃⁵)、核三 VI (Eh₃⁶)、核三 VII (Eh₃⁷) 和核三 VIII (Eh₃⁸),总厚度达 1 100~1 700 m,岩性主要为灰色泥岩、白云质泥岩、泥质白云岩、页岩以及粉砂岩(图 1b)^[17]。其中核三 II (Eh₃²)、核三 III (Eh₃³) 岩性以泥页岩为主,夹少量泥质白云岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩。泥页岩层段赋存的生物化石种类多、数量丰富,总有机碳含量较高(一般介于 1.0%~5.0%),有机质类型复杂多样, I 型、II₁型、II₂型和 III 均有分布,并以 II₁型、II₂型为主。其中,核三 III (Eh₃³) 亚段成

熟度主要处于主生油窗内^[18-19],其不仅是泌阳凹陷常规油气的主力烃源岩,也是页岩油赋存的有利层段^[5-7,20],是当前泌阳凹陷中部深凹带页岩油勘探开发的主要层系。

2 取心段岩性、岩相特征

根据 YYY1 井核三 III 中一下段系统取心段(2 740~3 010 m)岩心系统观察与描述结果,结合典型样品薄片鉴定、全岩矿物 XRD 分析以及 TOC 含量分析结果,编制了 YYY1 井核三 III 中一下段岩性、岩相综合柱状图(图 2)。可见,泌阳凹陷中部深凹带核三 III 中段和下段岩性相对简单,主要由灰黑色页岩、灰色泥岩、灰色粉砂质泥岩、灰色/灰白色粉砂岩、细砂岩以及少量泥质云岩组成。但岩相类型相对复杂,根据三端元矿物组成(长石+石英、碳酸盐矿物、黏土矿物)、沉积构造(纹层状、层状和块状)和总有机碳含量[为降低岩相分类的复杂程度,以 $\omega(\text{TOC})=2.0\%$ 为界限, $\omega(\text{TOC})\geq 2.0\%$ 定为富有机质, $\omega(\text{TOC})<2.0\%$ 定为含有机质],在核三 III 中一下段划分出富有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状长英质页岩、富有机质纹层状长英质页岩、含有机质层状长英质页岩、含有机质层状混合质页岩、富有机质层状混合质页岩、富有机质纹层状云灰质页岩、富有机质层状云灰质页岩以及含有机质块状长英质页岩、含有机质块状泥质粉砂岩/粉砂岩和含有机质块状细砂岩等共 12 种岩相类型,但以含有机质纹层状混合质页岩、富有机质纹层状混合质页岩

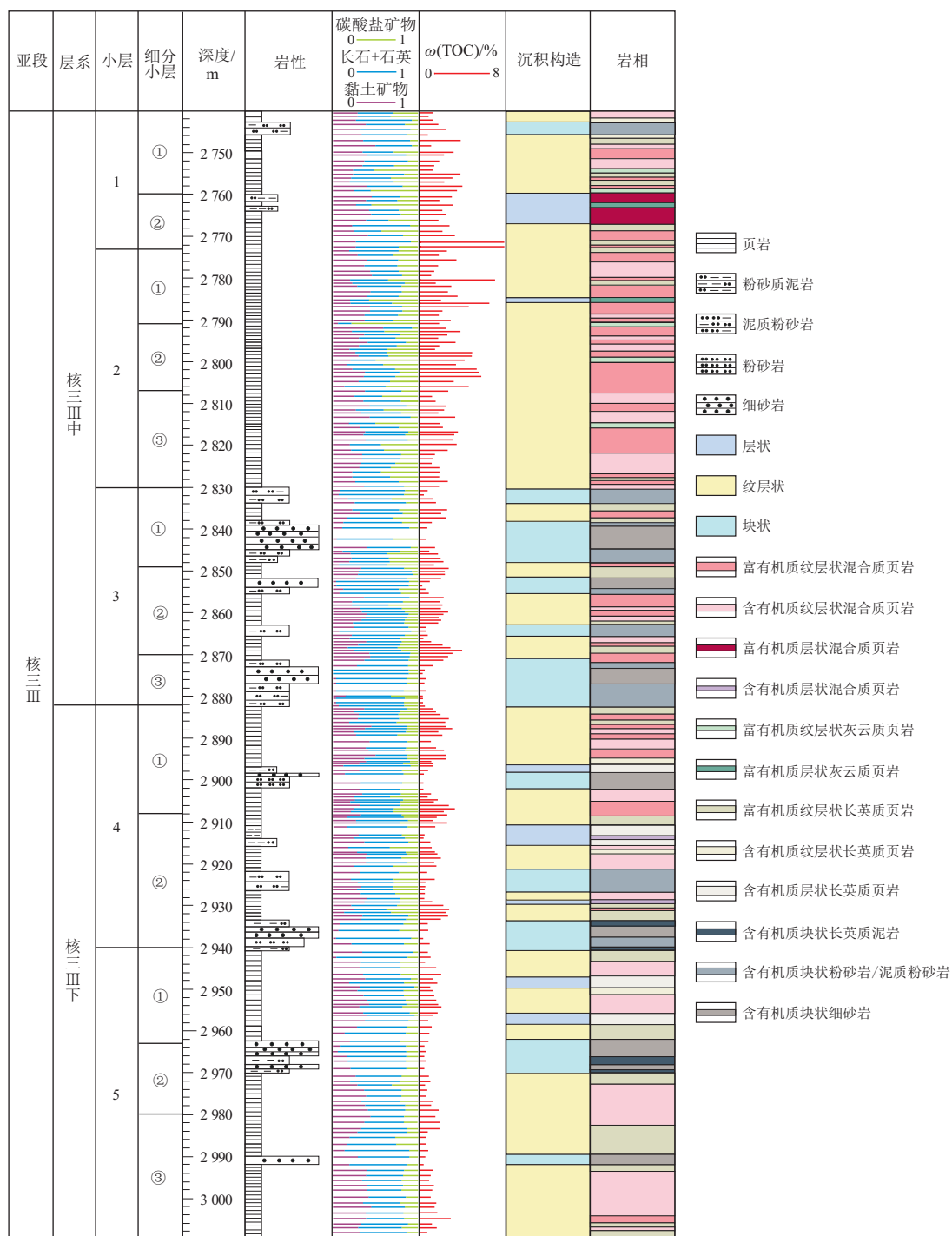


图 2 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核三 III 亚段岩性和岩相综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of lithologies and lithofacies of Eh_3 of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

岩、含有机质块状细砂岩、含有机质块状泥质粉砂岩/粉砂岩、含有机质纹层状长英质页岩、富有机质纹层状长英质页岩、含有机质层状长英质页岩等 7 种岩相为主(图 2)。

同时,纵向上核三 III 中一下段各小层之间以及小层内各亚小层之间,其岩相尚具有一定的差异性。其中 1 小层以发育富/含有机质纹层状混合质页岩、长英质页岩为主,同时发育富/含有机质层状

混合质页岩和富/含有机质纹层状云灰质页岩; 2 小层以发育富/含有机质纹层状混合质页岩为主,另发育少量富/含有机质纹层状云灰质页岩和富/含有机质纹层状长英质页岩; 3 小层以发育含有机质块状泥质粉砂岩/粉砂岩、含有机质块状细砂岩、富/含有机质纹层状混合质页岩、富有机质纹层状长英质页岩为主; 4 小层以发育富/含有机质纹层状混合质页岩、含有机质块状泥质粉砂岩/粉

砂岩、含有机质块状细砂岩、含有机质层状长英质页岩为主,另含少量含有机质层状混合质页岩和含有机质块状长英质泥岩;5 小层则以发育含有机质纹层状混合质页岩、含有机质块状细砂岩、含有机质层状长英质页岩、含有机质块状长英质泥岩为主,另含少量富有机质纹层状混合质页岩。

3 取心段页岩油富集层段特征

陆相页岩油形成条件与富集制约因素诸多,但至少需要具备以下 4 个方面基本条件^[21-22]:(1) 规模分布的优质烃源岩和适中的热成熟度;(2) 有利的岩性岩相组合,特别是纹层状页岩是最有利岩相;(3) 较好的储集条件和发育相对集中的天然微裂缝或层理缝;(4) 具有较好的顶底板保存条件。目前,表征泥页岩层系是否富集页岩油的 2 个关键参数为游离烃 S_1 和油饱和度 OSI ,页岩油富集的最低门限为 $S_1 > 2 \text{ mg/g}$ 且 $OSI > 100 \text{ mg/g}$ ^[23]。根据 YYY1 井核三 III 中一下段系统取心段典型样品的冷冻密闭碎样热解分析结果,综合系统的核磁测井总孔隙度结果,对泌阳凹陷深凹带核三 III 中一下段页岩油富集层段特征进行了剖析,结果如表 1 和图 3 所示,可见核三 III 中一下段页岩油富集层段与核磁测井总孔隙度相对高值段具有较好的对应性。通过系统剖析认为,YYY1 井核三 III 中一下段共发育 8 个页岩油富集层段,但单个页岩油富集层厚度总体较薄,介于 5~20 m,累计厚度 81 m。8 个页岩油富集层段具体特征如下:(1) 第一个富集层位于核三 III 中段 1 小层的②小层上部,深度介于

2 760~2 768 m,厚度为 8 m,主要岩相类型为富有机质层状混合质页岩,TOC 含量介于 1.9%~3.1%,平均为 2.5%($n=7$); S_1 为 2.0~7.1 mg/g,平均为 3.8 mg/g($n=7$); OSI 为 102~259 mg/g,平均为 151 mg/g($n=7$);核磁测井总孔隙度主要介于 4.8%~9.8%,平均 7.8%。(2) 第二个富集层位于核三 III 中段 2 小层的③小层,深度介于 2 810~2 830 m,厚度为 20 m,为 8 个页岩油富集层中厚度最大的富集层,主要为富/含有机质纹层状混合质页岩,TOC 含量介于 1.2%~3.6%,平均为 2.3%($n=20$); S_1 为 2.1~7.4 mg/g,平均为 3.8 mg/g($n=20$); OSI 为 100~311 mg/g,平均为 175 mg/g($n=7$);核磁测井总孔隙度主要介于 4.5%~10.0%,平均 8.3%。(3) 第三个富集层位于核三 III 中段 3 小层的①小层下部,深度介于 2 838~2 848 m,厚度为 10 m,主要为含有机质块状细砂岩、含有机质块状泥质粉砂岩,呈现典型夹层型储层特点,富集层 TOC 含量为 0.6%~2.0%,平均为 1.3%($n=8$); S_1 为 2.0~5.0 mg/g,平均为 3.3 mg/g($n=8$); OSI 为 164~455 mg/g,平均为 275 mg/g($n=8$);核磁测井总孔隙度主要介于 2.5%~8.4%,平均 6.5%。(4) 第四个富集层位于核三 III 中段 3 小层的②小层中部,深度介于 2 855~2 863 m,厚度为 8 m,主要为富有机质纹层状混合质页岩和含有机质纹层状混合质页岩,富集层 TOC 含量介于 0.9%~2.7%,平均为 2.0%($n=10$); S_1 为 2.1~5.9 mg/g,平均为 4.1 mg/g($n=10$); OSI 为 100~466 mg/g,平均为 221 mg/g($n=10$);核磁测井总孔隙度主要介于 4.0%~9.5%,平均 7.6%。

表 1 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核三 III 亚段页岩油富集层段基本特征

Table 1 Basic characteristics of shale oil enrichment intervals in Eh_3 of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

序号	富集层段编号	深度/m	厚度/m	主要岩相	$\omega(\text{TOC})/\%$		游离烃 $S_1/(\text{mg/g})$		油饱和度 $OSI/(\text{mg/g})$		核磁测井总孔隙度/%	
					范围	均值	范围	均值	范围	均值	主要范围	均值
1	第一	2 760~2 768	8	富有机质层状混合质页岩	1.9~3.1	2.5	2.0~7.1	3.8	102~259	151	4.8~9.8	7.8
2	第二	2 810~2 830	20	富/含有机质纹层状混合质页岩	1.2~3.6	2.3	2.1~7.4	3.8	100~311	175	4.5~10.0	8.3
3	第三	2 838~2 848	10	含有机质块状细砂岩、 含有机质块状泥质粉砂岩	0.6~2.0	1.3	2.0~5.0	3.3	164~455	275	2.5~8.4	6.5
4	第四	2 855~2 863	8	富/含有机质纹层状混合质页岩	0.9~2.7	2.0	2.1~5.9	4.1	100~466	221	4.0~9.5	7.6
5	第五	2 892~2 897	5	富有机质纹层状混合质页岩 和含有机质纹层状长英质页岩	1.1~2.5	1.8	2.6~6.2	4.1	145~372	241	4.3~9.5	7.1
6	第六	2 915~2 921	6	含有机质纹层状混合质页岩 夹含有机质纹层状长英质页岩	1.0~2.0	1.4	2.0~5.3	4.0	191~466	283	4.0~9.8	7.5
7	第七	2 944~2 957	13	含有机质纹层状混合质页岩、 含有机质纹层状 和层状长英质页岩	1.0~2.0	1.5	2.1~4.7	3.2	150~279	213	5.8~9.7	8.1
8	第八	2 996~3 007	11	含有机质纹层状混合质页岩 夹富有机质纹层状混合质页岩、 含有机质纹层状长英质页岩	1.1~2.9	1.6	2.0~4.6	3.1	160~249	204	4.5~9.6	7.8

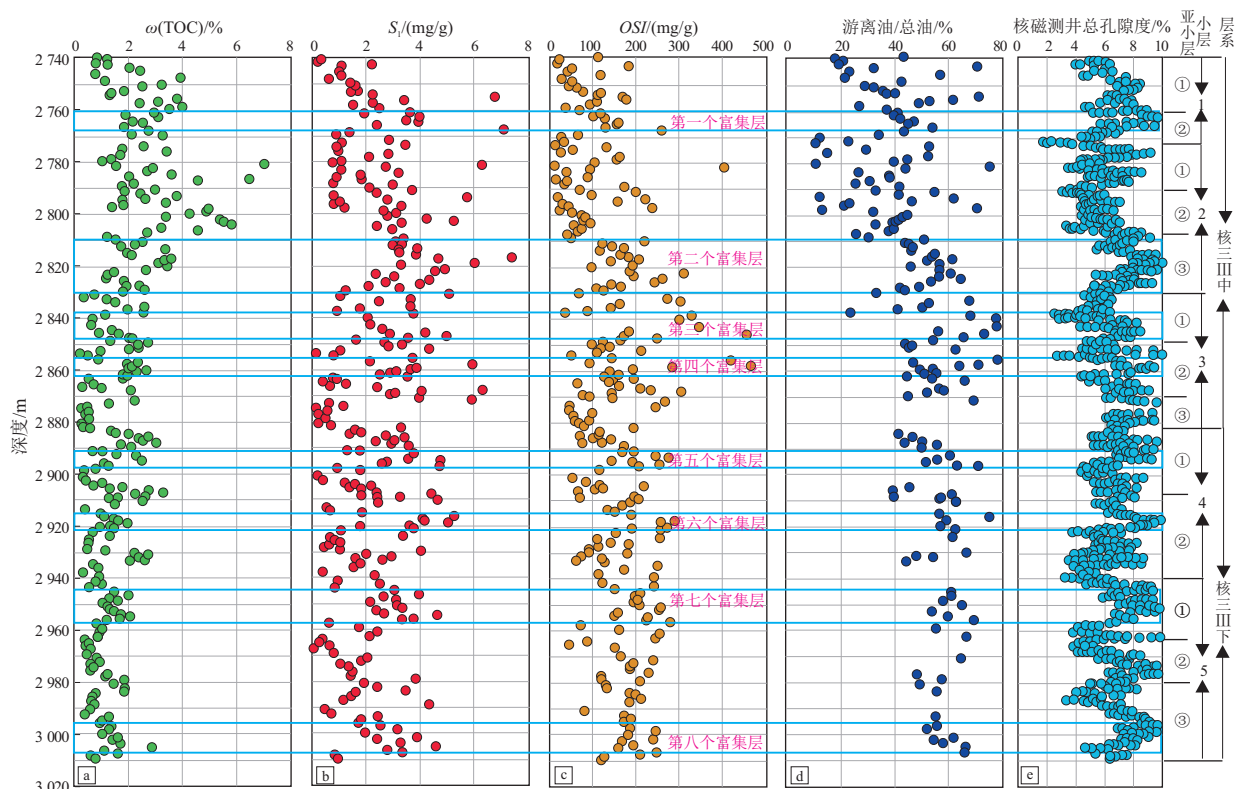


图 3 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核三 III 亚段页岩油富集层段评价

Fig.3 Evaluation of shale oil enrichment intervals in Eh_3 of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

(5) 第五个富集层位于核三 III 下段 4 小层的①小层中部, 深度介于 2 892~2 897 m, 厚度仅为 5 m, 主要为富有机质纹层状混合质页岩和含有有机质纹层状长英质页岩, TOC 含量为 1.1%~2.5%, 平均为 1.8% ($n=7$); S_1 为 2.6~6.2 mg/g, 平均为 4.1 mg/g ($n=7$); OSI 为 145~372 mg/g, 平均为 241 mg/g ($n=7$); 核磁测井总孔隙度主要介于 4.3%~9.5%, 平均 7.1%。(6) 第六个富集层位于核三 III 下段 4 小层的②小层中上部, 深度介于 2 915~2 921 m, 厚度为 6 m, 主要为含有有机质纹层状混合质页岩夹含有有机质纹层状长英质页岩, TOC 含量介于 1.0%~2.0%, 平均为 1.4% ($n=7$); S_1 为 2.0~5.3 mg/g, 平均为 4.0 mg/g ($n=7$); OSI 为 191~466 mg/g, 平均为 283 mg/g ($n=7$); 核磁测井总孔隙度主要介于 4.0%~9.8%, 平均 7.5%。(7) 第七个富集层位于核三 III 下段 5 小层的①小层中部, 深度介于 2 944~2 957 m, 厚度为 13 m, 主要为含有有机质纹层状混合质页岩、含有有机质纹层状和层状长英质页岩, TOC 含量介于 1.0%~2.0%, 平均为 1.5% ($n=12$); S_1 为 2.1~4.7 mg/g, 平均为 3.2 mg/g ($n=12$); OSI 为 150~279 mg/g, 平均为 213 mg/g ($n=12$); 核磁测井总孔隙度主要介于 5.8%~9.7%, 平均 8.1%。(8) 第八个富集层位于核三 III 下段 5 小层的③小

层下部, 深度介于 2 996~3 007 m, 厚度为 11 m, 主要为含有有机质纹层状混合质页岩夹富有机质纹层状混合质页岩、含有有机质纹层状长英质页岩, TOC 含量介于 1.0%~2.9%, 平均为 1.6% ($n=9$); S_1 介于 2.0~4.6 mg/g, 平均为 3.1 mg/g ($n=9$); OSI 为 160~249 mg/g, 平均为 204 mg/g ($n=9$); 核磁测井总孔隙度主要介于 4.5%~9.6%, 平均 7.8%。

另外, 由图 3 可见, 尽管核三 III 中段 2 小层的②小层其 S_1 主要介于 2.0~4.0 mg/g, 但由于②小层 TOC 含量最高, 导致大多数样品的 OSI 小于 75 mg/g, 未能达到页岩油富集层的门限标准, 预示页岩油可动性差, 页岩油商业开发潜力有限。同时, 核磁测井总孔隙度主要介于 4.0%~7.0%, 平均为 5.3%, 较上述确定的 8 个页岩油富集层段具有明显偏低的总孔隙度。但在泌阳凹陷第一轮页岩油勘探开发过程中, 由于沿用了页岩气的勘探思路, AS1、BYHF1 和 BYHF2 井均选取了最高 TOC 层段即核三 III 中段 2 小层的②小层实施直井或水平井改造, 虽取得了页岩油的勘探突破, 但产量递减快、累计产量均较低, 这应是泌阳凹陷第一轮页岩油勘探开发未能实现规模突破的重要因素。

4 取心段页岩油富集模式探讨

陆相页岩油属源内聚集的石油资源,根据地质条件与沉积特征可将页岩油储集层划分为夹层型、混积型和页岩型 3 类,其中夹层型储集层源储共存,混积型储集层源储共存或源储一体,页岩型储集层则源储一体^[12,24]。同时,研究表明,陆相中一高成熟度页岩层系内部发生了显著的排烃作用,其中有机质类型以 I 型和 II₁型为主的富有机质纹层状页岩是发生排烃作用的主体,而与之相邻的有机质类型相对变差,且相对贫有机质的泥页岩、粉砂岩、混积岩则是接受富有机质页岩排出烃的主体^[25-26],这是制约陆相中一高成熟度页岩层系页岩油差异富集主要因素。这意味着有机质类型以 I 型和 II₁型为主的富有机质纹层状页岩由于具有相对高的排烃效率,导致生成的油因有效排出并运移到临近的相对贫有机质的泥页岩、粉砂岩/细砂岩、混积岩层段赋存聚集而降低,造成富有机质纹层状页岩的 S₁并不随有机质丰度的增大而增大,反而呈减少特征,表现为“高 TOC 段生烃、低 TOC 段滞烃、粉砂岩/细砂岩段容烃、源内多路径运移的差异富集模式”^[26]。因此与高 TOC 相邻的相对贫 TOC 的泥页岩层段是更有利的页岩油富集层段^[27]。LI 等^[28]依据干酪根生烃理论,利用理论模型通过定量计算泥页岩原始生烃量再减去现今残存量,获得游离烃差值(ΔS₁)来评价泥页岩层系的含油性以及是否有外来烃的贡献。ΔS₁越大,说明研究层段烃类排出越多,可动油越少,含油性越差。如 ΔS₁出现负值,说明研究层段有运移烃贡献,负值越大,运移烃贡献越大,但需要接受外来烃的邻层具有相对高的储集性和相对大的孔径,这样驱使烃类由孔径小的生烃层段向孔径大的层段微运移^[29]。相反,烃类又难以从孔径大的层段向孔径小的层段排出而滞留(毛细管阻力作用),使得外来烃得以保存^[30]。

由图 2 和图 3 可见,泌阳凹陷中部深凹带核三 III 中一下段泥页岩层系尽管具有强非均质性,但是其泥页岩层段总体由 1 小层和 2 小层至 3 小层、4 小层至 5 小层,TOC 含量呈减少趋势。同时有机质类型则呈现由 I、II₁型为主变成 II₂型为主(图 4),显示 TOC 含量越高,其有机质类型越好,说明泌阳凹陷中部深凹带核三 III 中段 1 小层和 2 小层应是主力生烃层,在其未进行排烃的情况下,其 S₁应随 TOC 含量的增大而增大。然而由图 3 和图 5a-b、图 5f 可见,核三 III 中段 1 小层和 2 小

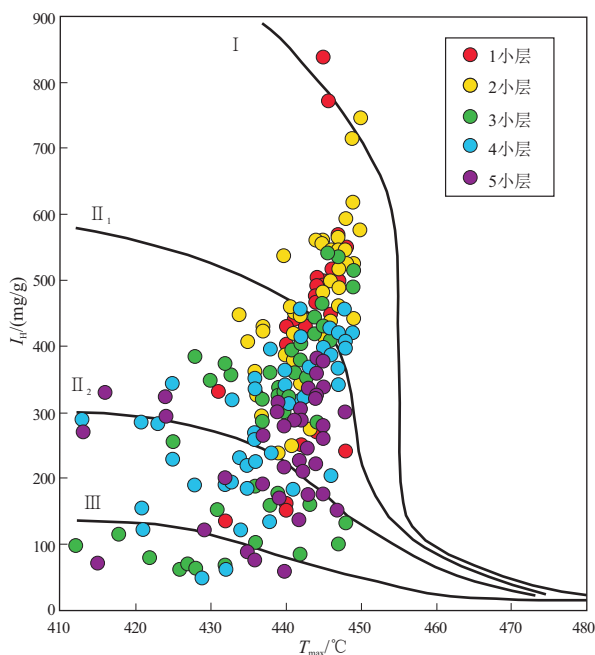


图 4 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核三 III 各小层 T_{max} 与 I_H 关系

Fig.4 T_{max} vs. I_H of small layers in Eh₃ of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

层的高 TOC 含量对应的 S₁ 反而较低,相对贫有机质的 2 760~2 768 m 层段和 2 810~2 830 m 层段,却比高 TOC 层段更加富集游离烃 S₁,并且 OSI 大于 100 mg/g 以及具有相对更高的核磁测井总孔隙度,从而分别形成了泌阳凹陷核三 III 中段的第一个、第二个页岩油富集层段。依据 LI 等^[28]和李水福等^[29]针对泌阳凹陷核三 III 亚段页岩层系给出的 ΔS₁ 定量计算方法,第一、第二个页岩油富集层段的 ΔS₁ 均值分别为 -1.1 mg/g 和 -0.9 mg/g,反映 2 个富集层段均有邻层相对更高 TOC 层排出烃的贡献。受相对高 TOC 层段排出烃贡献影响,导致两富集层段 S₁ 和总有机碳含量不具有显著正相关性,同时游离油量/总油量的占比较临近高 TOC 层段的游离油量/总油量的占比明显增大(图 3),T_{max} 值较临近高 TOC 层段显著降低。因此,泌阳凹陷核三 III 中段 1 小层内的第一个页岩油富集层和 2 小层内的第二个页岩油富集层的页岩油富集,既与原位滞留即源储一体富集模式有关,又受高 TOC 邻层运移油贡献即源储共存富集模式制约(图 6a)。

核三 III 中段 3 小层内的第三个页岩油富集层(2 838~2 848 m)主要由含有机质块状细砂岩和含有机质块状泥质粉砂岩组成,为典型的夹层型页岩油储层,TOC 含量明显较低(图 2、图 3),但较其上、下邻层即富/含有机质纹层状长英质页岩和混

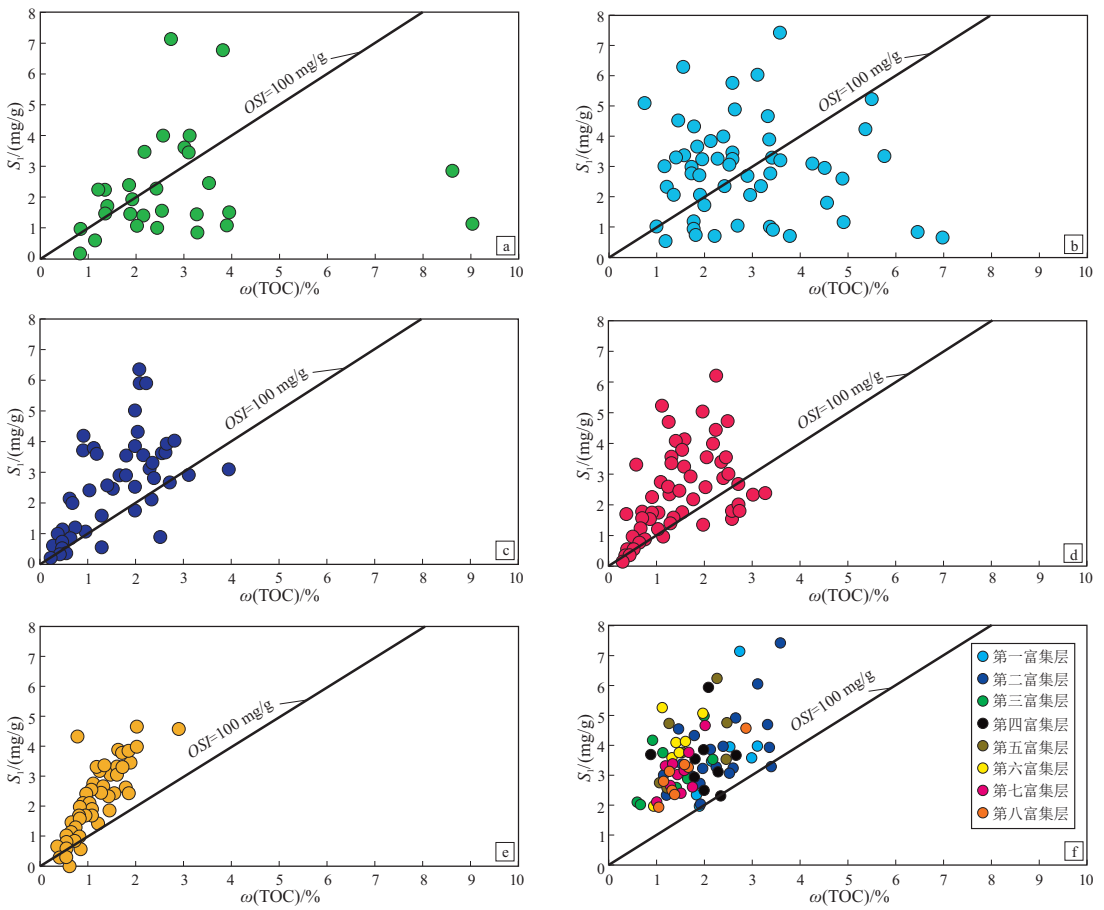


图 5 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核 III 亚段各小层 TOC 含量与 S_1 关系

a. 核 III 中段 1 小层; b. 核 III 中段 2 小层; c. 核 III 中段 3 小层; d. 核 III 下段 4 小层; e. 核 III 下段 5 小层

Fig.5 TOC vs. S_1 of small layers in Eh_3^3 of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

合质页岩而言,其 S_1 、OSI、核磁测井总孔隙度以及游离油量/总油量的占比均相对明显偏高(图 3), T_{max} 值则相对偏低,并且 S_1 与 TOC 含量不具有明显的相关性(图 5f),富集层段的 ΔS_1 均值为 -1.8 mg/g , 这些特征指示第三个页岩油富集层的页岩油富集,除受自身有机质生烃原位滞留烃具一定贡献外,主

要源自上、下邻层相对高 TOC 的纹层状长英质页岩和混合质页岩的运移烃贡献(图 6)。核 III 中段 3 小层内的第四个页岩油富集层(2 855 ~ 2 863 m)主要由富有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状长英质页岩构成,其 TOC 含量和核磁测井总孔隙度较其上、

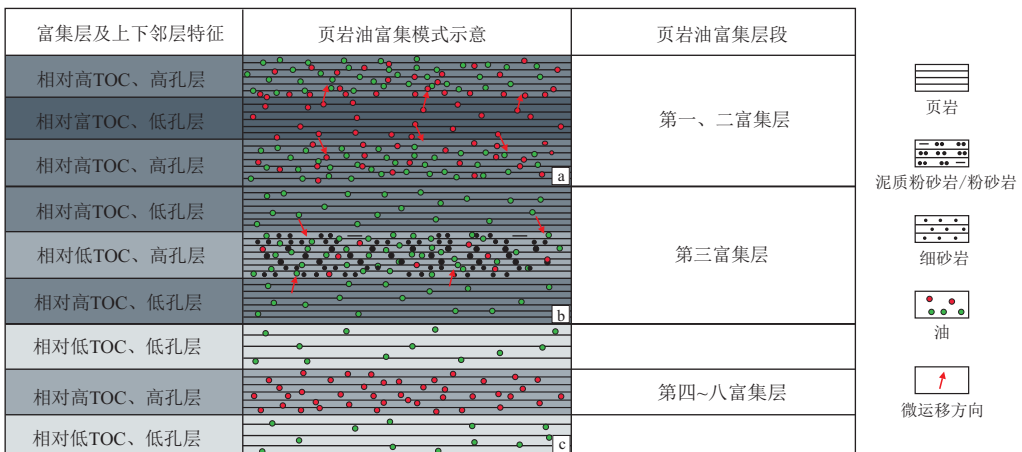


图 6 南襄盆地泌阳凹陷 YYY1 井核 III 中—下段页岩油富集模式示意

Fig.6 Shale oil enrichment patterns for middle-lower interval of Eh_3^3 of well YYY1 in Biyang Sag, Nanxiang Basin

下含有机质块状泥质粉砂岩/细砂岩和含有机质块状泥质粉砂岩的 TOC 含量 (TOC 含量均小于 1.0%, 平均 0.6%) 和核磁测井总孔隙度明显要高 (图 2, 图 3), 同时其上、下含有机质块状泥质粉砂岩/细砂岩和含有机质块状泥质粉砂岩的 S_1 较低, 均小于 0.9 mg/g, 且与 TOC 含量具正相关 (图 3, 图 5c), 富集层段的 ΔS_1 均值为 0.07 mg/g, 这表明该富集层内的富有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状混合质页岩等没有向明显贫有机质的块状泥质粉砂岩/细砂岩供烃, 但富集层段内富有机质纹层状混合质页岩较含有机质纹层状混合质页岩、长英质页岩, 具有相对低的 S_1 、OSI (图 3), S_1 与 TOC 呈现负相关性 (图 5f), 这表明核三 III 中段 3 小层内的第四个页岩油富集层属宏观上源储一体的富集模式, 而微观上则具有源储共存富集模式特征 (图 6b)。

核三 III 下段 4 小层内的第五个页岩油富集层 (2 892~2 897 m) 为一套富有机质纹层状混合质页岩和含有机质纹层状长英质页岩, 其 S_1 总体随 TOC 含量的增大呈增高趋势 (图 3, 图 5f), ΔS_1 均值为 0.03 mg/g; 而其上部的含有机质纹层状混合质页岩和下部的含有机质层状长英质页岩 S_1 均小于 1.8 mg/g, 且与 TOC 含量正相关 (图 3, 图 5d), 反映核三 III 下段 4 小层内的第五个页岩油富集层页岩油富集主要受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式 (图 6c)。核三 III 下段 4 小层内的第六个页岩油富集层 (2 915~2 921 m) 为一套含有机质纹层状混合质页岩夹含有机质纹层状长英质页岩, ΔS_1 均值为 -0.01 mg/g; S_1 也总体随 TOC 含量的增大呈增高趋势 (图 3, 图 5f)。其上部的含有机质层状长英质页岩和下部的含有机质块状泥质粉砂岩 S_1 均小于 1.8 mg/g, 且与 TOC 含量具正相关性 (图 3, 图 5d), 反映核三 III 下段 4 小层内的第六个页岩油富集层页岩油富集也主要受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式 (图 6c)。

核三 III 下段 5 小层内的第七个页岩油富集层 (2 944~2 957 m) 为一套含有机质纹层状、层状混合质页岩和长英质页岩 (图 2), ΔS_1 均值为 -0.02 mg/g, S_1 总体随 TOC 含量的增大呈增大趋势 (图 3, 图 5f); 其上部的含有机质纹层状长英质页岩和下部的含有机质层状长英质页岩 S_1 含量均小于 1.7 mg/g, 且与 TOC 含量具正相关性 (图 3, 图 5e), 反映核三 III 下段 5 小层内的第七个页岩油富集层页岩油富集受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式 (图 6c)。核三 III 下段 5 小层内的第八

个页岩油富集层 (2 996~3 007 m) 为一套含有机质纹层状混合质页岩、富有机质纹层状混合质页岩和含有机质纹层状长英质页岩, ΔS_1 均值为 0.03 mg/g, S_1 与 TOC 含量呈显著正相关 (图 3, 图 5f); 其上部的含有机质纹层状混合质页岩和下部的含有机质纹层状长英质页岩 S_1 含量均小于 1.8 mg/g, 与 TOC 含量同样具显著正相关性 (图 3, 图 5e), 反映核三 III 下段 5 小层内的第八个页岩油富集层页岩油富集受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式 (图 6c)。

综合分析可见, 泌阳凹陷中部深凹带核三 III 中段的第一个页岩油富集层 (2 760~2 768 m)、第二个页岩油富集层 (2 810~2 830 m) 和第三个页岩油富集层 (2 823~2 848 m), 其页岩油富集均受原位滞留烃和高 TOC 邻层运移烃贡献共同控制, 具源储一体和源储共存双重富集模式; 核三 III 中段的第四个页岩油富集层 (2 855~2 863 m), 其页岩油富集具宏观上受原位滞留烃控制, 微观上又受高 TOC 层运移烃影响, 具宏观源储一体的富集、微观则具有源储共存富集模式特征; 核三 III 下段的第五个页岩油富集层 (2 892~2 897 m)、第六个页岩油富集层 (2 996~3 007 m)、第七个页岩油富集层 (2 944~2 957 m) 和第八个页岩油富集层 (2 996~3 007 m), 其页岩油富集均受原位滞留富集控制, 属源储一体的富集模式。以核三 III 中段 2 小层 ③小层内的第二个页岩油富集层 (2 810~2 830 m) 发育厚度最大, 是泌阳凹陷中部深凹带核三 III 亚段页岩油勘探开发的首选目标层段。

5 结论与认识

(1) 泌阳凹陷中部深凹带 YYY1 井核三 III 中一下段主要发育含有机质纹层状混合质页岩、富有机质纹层状混合质页岩、含有机质纹层状长英质页岩、富有机质纹层状长英质页岩、含有机质层状长英质页岩、含有机质块状泥质粉砂岩/粉砂岩和含有机质块状细砂岩 7 种岩相。

(2) 依据游离烃 S_1 和油饱和指数 OSI 两个表征页岩油富集关键参数, 结合核磁测井总孔隙度, 在 YYY1 井核三 III 中一下段共识别出 8 个页岩油富集层, 单个页岩油富集层厚度总体较薄, 介于 5~20 m, 页岩油富集层累计厚度 81 m。

(3) 第一、第二、第三个页岩油富集层的页岩油富集均受原位滞留烃和高 TOC 邻层运移烃贡献共同控制, 具源储一体和源储共存双重富集模式; 第四个页岩油富集层的页岩油富集具宏观上受原

位滞留烃控制,微观上又受高 TOC 层运移烃影响,具宏观源储一体的富集、微观则具有源储共存富集模式特征;第五、第六、第七和第八个页岩油富集层的页岩油富集均受原位滞留富集控制,属源储一体的富集模式。第二个页岩油富集层(2 810 ~ 2 830 m)是泌阳凹陷中部深凹带核三Ⅲ亚段页岩油勘探开发首选目标层段。

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

李志明和金芸芸负责论文撰写和修改;李楚雄、黄帅博、周圆圆、冷筠滢、余梦丽、刘雅慧、刘鹏参与数据的整理和分析,黄帅博、贾梦瑶、余梦丽、徐二社、刘雅慧参与图件的绘制;贾梦瑶、何晋译参与论文部分内容的写作;所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

LI Zhiming and JIN Yunyun drafted and revised the manuscript. LI Chuxiong, HUANG Shuaibo, ZHOU Yuanyuan, LENG Yuning, YU Mengli, LIU Yahui and LIU Peng participated in data collation and analysis. HUANG Shuaibo, JIA Mengyao, YU Mengli, XU Ershe and LIU Yahui drew the diagrams. JIA Mengyao and HE Jinyi participated in drafting the manuscript. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 李志明,刘鹏,钱门辉,等.湖相泥页岩不同赋存状态油量对比:以渤海湾盆地东营凹陷页岩油探井取心段为例[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1252-1263.

LI Zhiming, LIU Peng, QIAN Menhui, et al. Quantitative comparison of different occurrence oil for lacustrine shale: a case from cored interval of shale oil special drilling wells in Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1252-1263.

- [2] 陈祥,王敏,严永新,等.泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J].石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.

CHEN Xiang, WANG Min, YAN Yongxin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 568-576.

- [3] 章新文,余志远,黄庆,等.泌阳凹陷陆相页岩油富集主控因素分析[J].石油地质与工程,2013,27(3):5-7.

ZHANG Xinwen, YU Zhiyuan, HUANG Qing, et al. Discussion on main controlling factors of continental shale oil enrichment in Biyang Depression [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(3): 5-7.

- [4] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J].中国工程科学,2012,14(6):22-29.

MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in SINOPEC [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 22-29.

- [5] 李吉君,史颖琳,章新文,等.页岩油富集可采主控因素分析:以泌阳凹陷为例[J].地球科学(中国地质大学学报),2014,39(7):848-857.

LI Jijun, SHI Yinglin, ZHANG Xinwen, et al. Control factors of enrichment and producibility of shale oil: a case study of Biyang Depression [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(7): 848-857.

- [6] 冯国奇,李吉君,刘洁文,等.泌阳凹陷页岩油富集及可动性探讨[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1236-1246.

FENG Guoqi, LI Jijun, LIU Jiewen, et al. Discussion on the enrichment and mobility of continental shale oil in Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1236-1246.

- [7] 何涛华,李文浩,谭昭昭,等.南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油富集机制[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1259-1269.

HE Taohua, LI Wenhao, TAN Zhaozhao, et al. Mechanism of shale oil accumulation in the Hetaoyuan Formation from the Biyang Depression, Nanxiang Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1259-1269.

- [8] 金之钧,白振瑞,高波,等.中国迎来页岩油气革命了吗? [J].石油与天然气地质,2019,43(3):451-458.

JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.

- [9] 李志明,孙中良,黎茂稳,等.济阳坳陷第一轮页岩油探井“失利”原因剖析[J].地球科学,2023,48(1):143-157.

LI Zhiming, SUN Zhongliang, LI Maowen, et al. Cause analyses of “failure” for first round shale oil exploration wells in Jiyang Depression [J]. Earth Science, 2023, 48(1): 143-157.

- [10] 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.

- [11] 朱国文,王小军,张金友,等.松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J].石油学报,2023,44(1):110-124.

ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 110-124.

- [12] 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.

- [13] 蔚远江,王红岩,刘德勋,等.中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系[J].地球科学,2023,48(1):191-205.

YU Yuanjiang, WANG Hongyan, LIU Dexun, et al. Development status and feasibility evaluation index system of continental shale oil demonstration area in China [J]. Earth Science, 2023, 48(1): 191-205.

- [14] 尚飞,解习农,李水福,等.基于地球物理和地球化学数据的页岩油甜点区综合预测:以泌阳凹陷核三段 5 号页岩层为例[J].地球科学,2018,43(10):3640-3651.
SHANG Fei,XIE Xinong,LI Shuifu,et al.Comprehensive prediction of shale oil sweet spots based on geophysical and geochemical data: a case study of the Paleogene Hetaoyuan Formation,Biyang Depression,China[J].Earth Science,2018,43(10):3640-3651.
- [15] 张永华,陈祥,张悦,等.泌阳凹陷地层压力成因机制与预测方法[J].特种油气藏,2020,27(1):25-29.
ZHANG Yonghua,CHEN Xiang,ZHANG Yue,et al.Formation pressure genesis mechanism and prediction in Biyang Depression[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2020,27(1):25-29.
- [16] 谭昭昭,王伟明,李文浩,等.泌阳凹陷核桃园组三段富有机质泥页岩形成环境及发育模式[J].沉积学报,2018,36(6):1256-1266.
TAN Zhaozhao,WANG Weiming,LI Wenhao,et al.The sedimentary environment and deposition mode of organic-rich mudstone from the third member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression [J].Acta Sedimentologica Sinica,2018,36(6):1256-1266.
- [17] 易承龙.河南省泌阳凹陷安棚地区古近系核桃园组含碱地层层序特征及其意义[J].古地学报,2016,18(1):93-100.
YI Chenglong.Sequence stratigraphy characteristics and its significance of alkaliferous strata of the Paleogene Hetaoyuan Formation in Anpeng area,Biyang Sag in Henan province [J].Journal of Palaeogeography,2016,18(1):93-100.
- [18] 董田,何生,林社卿.泌阳凹陷核桃园组烃源岩有机地化特征及热演化成熟史[J].石油实验地质,2013,35(2):187-194.
DONG Tian,HE Sheng,LIN Sheqing.Organic geochemical characteristics and thermal evolution maturity history modeling of source rocks in Eocene Hetaoyuan Formation of Biyang Sag,Nanxiang Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(2):187-194.
- [19] 李志明,张隽,余晓露,等.南襄盆地泌阳凹陷烃源岩成熟度厘定及其意义[J].石油实验地质,2013,35(1):76-80.
LI Zhiming,ZHANG Jun,YU Xiaolu,et al.Determination of maturity for source rocks in Biyang Sag of Nanxiang Basin and its significance [J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(1):76-80.
- [20] 王敏,陈祥,严永新,等.南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩油地质特征与评价[J].古地学报,2013,15(5):663-671.
WANG Min,CHEN Xiang,YAN Yongxin,et al.Geological characteristics and evaluation of continental shale oil in Biyang Sag of Nanxiang Basin [J].Journal of Palaeogeography,2013,15(5):663-671.
- [21] 黎茂稳,金之钧,董明哲,等.陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J].石油实验地质,2020,42(4):489-505.
LI Maowen,JIN Zhijun,DONG Mingzhe,et al.Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J].Petroleum Geology & Experiment,2020,42(4):489-505.
- [22] 朱如凯,张婧雅,李梦莹,等.陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J/OL].地质学报,2023;1-23.[2023-08-15].
http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html.
- ZHU Rukai,ZHANG Jingya,LI Mengying,et al.Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J/OL].Acta Geologica Sinica,2023;1-23.[2023-08-15].
http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html.
- [23] 赵文智,朱如凯,刘伟,等.我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J].地学前沿,2023,30(1):116-127.
ZHAO Wenzhi,ZHU Rukai,LIU Wei,et al.Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China:enrichment conditions and occurrence features [J].Earth Science Frontiers,2023,30(1):116-127.
- [24] 黎茂稳,马晓潇,金之钧,等.中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2022,43(1):1-25.
LI Maowen,MA Xiaoxiao,JIN Zhijun,et al.Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J].Oil & Gas Geology,2022,43(1):1-25.
- [25] 胡素云,白斌,陶士振,等.中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J].石油勘探与开发,2022,49(2):224-237.
HU Suyun,BAI Bin,TAO Shizhen,et al.Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China [J].Petroleum Exploration and Development,2022,49(2):224-237.
- [26] 潘松圻,郭秋雷,邹才能,等.页岩型与粉砂岩型“页岩油系统”甜点段判识:以鄂尔多斯盆地长 7 段为例[J].中国科学(地球科学),2023,53(7):1663-1678.
PAN Songqi,GUO Qiulei,ZOU Caineng,et al.Identification of sweet spots in shale-type and siltstone-type “shale oil system”: a case study of the Chang 7 member in Ordos Basin [J].Science China(Earth Sciences),2023,66(7):1647-1663.
- [27] 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.
- [28] LI Shuifu,HU Shouzhi,XIE Xinong,et al.Assessment of shale oil potential using a new free hydrocarbon index [J].International Journal of Coal Geology,2016,156:74-85.
- [29] 李水福,胡守志,张冬梅,等.自由烃差值法评价页岩含油性的思想、方法及应用[J].地球科学,2019,44(3):929-938.
LI Shuifu,HU Shouzhi,ZHANG Dongmei,et al.Idea,method and application of evaluating shale oil potential by free hydrocarbon difference [J].Earth Science,2019,44(3):929-938.
- [30] 李传亮,张景廉,杜志敏.油气初次运移理论新探[J].地学前沿,2007,14(4):132-142.
LI Chuanliang,ZHANG Jinglian,DU Zhimin.New viewpoints of the primary migration of oil and gas [J].Earth Science Frontiers,2007,14(4):132-142.