

渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷 L69 井古近系沙三下亚段取心段页岩油勘探有利层段

李志明^{1,2,3},陶国亮^{1,2,3},黎茂稳^{1,2,3},蒋启贵^{1,2,3},曹婷婷^{1,2,3},刘鹏^{1,2,3},钱门辉^{1,2,3},谢小敏^{1,2,3},李政⁴

(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有效开发

国家重点实验室,江苏 无锡 214126; 3. 国家能源页岩油研发中心,江苏 无锡 214126; 4. 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:为探讨渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷 L69 井沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)取心段页岩油勘探有利层段,对 L69 井沙三下亚段取心段典型岩相样品和获工业页岩油产量的 XYS9 井沙三下亚段取心段典型岩相样品,开展了常规热解和多温阶热释法分析,对比研究其含油性、不同赋存形式油含量特征,结合其他影响页岩油产量的因素综合评价页岩油勘探有利层段。结果表明:L69 井埋深 3 040.35~3 072.10 m 富有机质纹层状泥质灰岩段,其游离油总量尤其是轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量显著低于获工业页岩油产量的 XYS9 井沙三下亚段的含量,并且油饱和指数(OSI)均值仅为 67 mg/g,不具有页岩油勘探潜力;埋深 3 116.90~3 126.70 m 含有机质纹层状泥质灰岩段,虽其油饱和指数(OSI)均在 100 mg/g 以上,平均达 204 mg/g(样品数 $n=8$),但游离油总量和轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量显著低于获工业页岩油产量的 XYS9 井沙三下亚段的含量,页岩油勘探潜力较低;埋深 2 994.10~3 010.90 m 富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段,其游离油总量尤其是轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量和油饱和指数(OSI),与获工业页岩油产量的 XYS9 井沙三下亚段的含量基本相近或相等,并且该层段微裂缝发育、具异常压力、脆性矿物含量高和存在成熟运移油的贡献,为页岩油勘探的有利层段。

关键词:含油性;赋存形式;页岩油;沙河街组;沾化凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Favorable interval for shale oil prospecting in coring Well L69 in the Paleogene Es^{3L} in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

Li Zhiming^{1,2,3}, Tao Guoliang^{1,2,3}, Li Maowen^{1,2,3}, Jiang Qigui^{1,2,3}, Cao Tingting^{1,2,3}, Liu Peng^{1,2,3},
Qian Menhui^{1,2,3}, Xie Xiaomin^{1,2,3}, Li Zheng⁴

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126,

China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Research Institute of Exploration and Development of Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: This paper aims to identify the favorable interval for shale oil prospecting in the cored interval of the lower section of the third member of the Shahejie Formation (Es^{3L}) from Well L69 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. To study their oil content and occurrence, typical lithofacies samples from the cored intervals of Es^{3L} in wells with commercial shale oil production, Well L69 and Well XYS9, were comparatively analyzed with routine Rock-Eval pyrolysis method and thermal desorption method, and the favorable interval for shale oil prospecting and factors affecting shale oil production were assessed. Results show that the total content of free oil, especially the content of free oil S_{1-1} after light hydrocarbon correction, for the organic-rich lamellar argillaceous limestones at a depth of 3 040.35 m to 3 072.10 m in Well L69, is obviously lower than that of cored interval with commercial shale oil production in Well XYS9, and the average Oil Saturation Index(OSI) is only 67 mg/g, both of which indicate no exploration potential for shale oil. The total

收稿日期:2018-03-10;修订日期:2018-12-02。

第一作者简介:李志明(1968—),男,研究员,油气地球化学、页岩油气地质。E-mail: lizm.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05049-001)。

content of free oil, especially the content of free oil S_{1-1} after light hydrocarbon correction, for organic-rich lamellar argillaceous limestones at a depth of 3 116. 90m to 3 126. 70m in Well L69, is obviously lower than that of cored interval of the $Es^{(L)}$ with commercial shale oil production from Well XYS9, though the OSI s are usually larger than 100mg/g with an average of 204mg/g, suggesting a lower shale oil exploration potential. The total content of free oil, especially the content of free oil S_{1-1} after light hydrocarbon correction, and the OSI of organic-rich laminar argillaceous limestones and calcareous mudstones at a depth of 2 994. 10m to 3 010. 90m in Well XYS9, are similar or almost equal to those of the cored interval of the $Es^{(L)}$ with commercial shale oil production from Well XYS9; characterized by developed micro-fractures, abnormal pressure, high contents of brittle minerals and contribution of mature oil migration, the cored interval at the depth of 2 994. 10m to 3 010. 90m should be a favorable interval for shale oil exploration.

Key words: oil content, occurrence, shale oil, Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

沾化凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷主要富油气凹陷之一,其沉积地层以古近系-新近系为主,生储盖条件优越,烃源岩层主要发育在古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)、沙三下亚段以及沙一段^[1]。在常规油气勘探过程中,多口井已在烃源岩层钻遇泥页岩油藏并获工业油流^[2-3],其中 XYS9 井在沙三下亚段埋深 3 355. 11 ~ 3 435. 29 m 层段试油(未压裂改造情况下)获日产油 38. 5 t、天然气 867 m³^[2,4],投产后累积产油 11 346 t,产能较高^[4],展示了沾化凹陷具有页岩油勘探前景。2010 年,为加快推进该凹陷页岩油的勘探开发进程,中国石化胜利油田分公司针对沙三下亚段部署了系统取心井——L69 井,该井取心深度段介于 2 911. 00 ~ 3 140. 75 m(层位主要属沙三下亚段),取心进尺 229. 75 m,心长 221. 36 m,为沾化凹陷开展页岩油勘探开发基础研究提供了良好的资料基础。2011 年 8 月,胜利油田分公司依据测井、录井以及取心段有机碳含量等基础有机地球化学参数,优选了 3 040. 00 ~ 3 051. 00 m 和 3 056. 00 ~ 3 066. 00 m 井段进行射孔联作、完井测试,获日产油仅 0. 85 t,累产油也只有 2. 90 t。截止目前,前人已对 L69 井取心段沙三下亚段泥页岩沉积相与岩石学特征^[5]、储集空间与物性特征^[6-8]、微观孔隙结构^[9]、有机地球化学基本特征^[3,6,10]以及泥页岩非均质性特征及演化模式^[10]等方面开展了比较系统地分析与评价,而 L69 沙三下亚段取心段是否存在页岩油勘探有利层段尚无定论。鉴于国内外页岩油的勘探实践表明:赋存于富有机质泥页岩层系内的滞留油能否有效开发,与富有机质泥页岩层系的含油性及其赋存形式、成熟度、微裂缝发育程度、地层压力以及可压裂改造性等诸多因素有关,但含油性及其赋存形式是其中的关键因素^[11]。为此,本研究旨在重点通过对 L69 井取心段典型岩相段与 XYS9 井沙三下亚段出油层段含油性与赋存形式的对比剖析,结合成熟度、微裂缝发育程度、地层压力及可

压裂改造性等,来综合评价 L69 井试油层段页岩油产量不佳的原因,探讨取心段页岩油勘探有利层段,为沾化凹陷以及我国其他地区陆相页岩油勘探纵向选层评价提供参考与借鉴。

1 研究区地质背景

沾化凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东北部,其西以义东断裂与车镇凹陷相接,南部与陈家庄凸起相接,东南以垦东凸起为界^[12],构成一个 NE 向敞开的典型“北断南超”的山间箕状盆地^[3]。沾化凹陷的一个显著特点是断裂非常发育,不同方向不同期次的断裂,将凹陷分割成多个洼陷、凸起等次级构造单元(图 1)。

印支期—燕山期,沾化凹陷受 NE-SW 方向挤压应力及燕山期 NE-SW 方向拉张应力的影响,沾化凹陷自西向东依次发育了罗西断层、孤西断层和五号桩长堤断裂,控制了早期盆地的发育^[13]。后期受喜马拉雅期区域右旋应力场及郯庐断裂活动的影响,发育了一系列的 NE 向、EW 向构造,该断裂体系基本控制了新生代断陷湖盆的形成与演化^[14]。沾化凹陷具有典型的下断上坳双层结构,从孔店期开始裂陷以来至东营期,凹陷连续沉降沉积,其中沙三下亚段沉积时期属于沾化凹陷的深断陷期,盆地进入非补偿阶段,气候潮湿,沉积了一套深湖-半深湖相泥质灰岩和灰质泥岩,厚度一般 100 ~ 500 m 不等,为沾化凹陷的主力烃源层,现今主要处于成熟-中低成熟阶段,以生油为主,因而是目前页岩油勘探的重点层系。在古近纪末期,喜马拉雅运动东营幕造成本区强烈的构造隆升,大规模断裂活动,并伴随着地层 200 ~ 400 m 抬升剥蚀,形成区域性不整合。新近系沉积以来,凹陷进入整体拗陷阶段,凸起带和洼陷带同时接受沉降沉积,形成覆盖全区、近水平产状的新近系馆陶组和明化镇组^[15]。

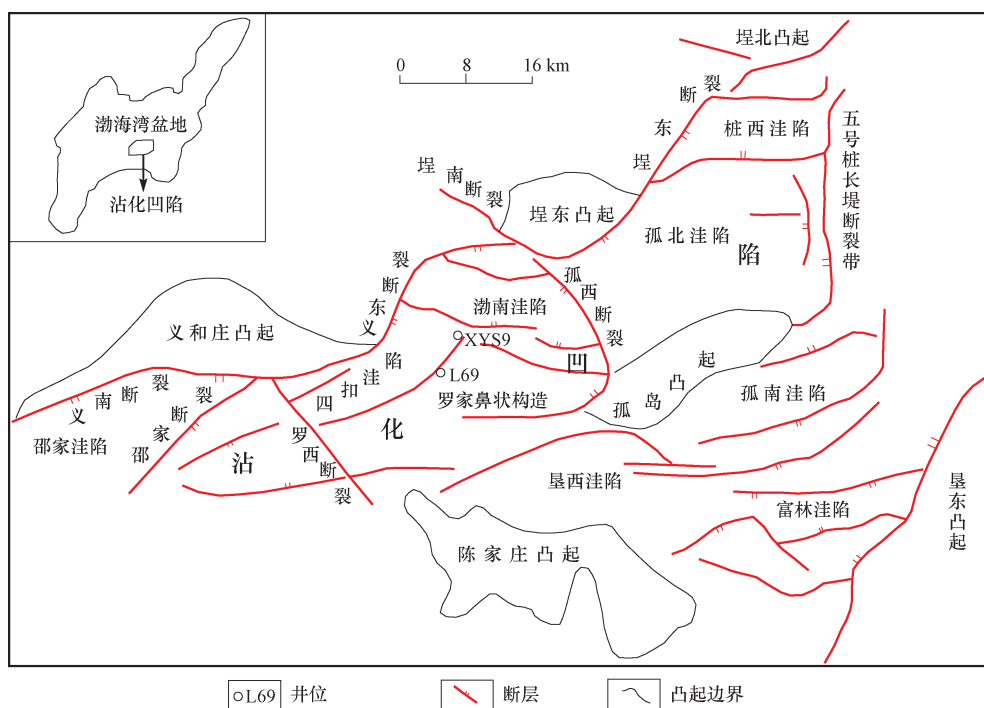


图1 沾化凹陷构造位置及研究井分布

Fig. 1 Structural location of Zhanhua Sag, Jiayang Depression, Bohai Bay Basin, and distribution of test wells

研究井 L69 井和对比井 XYS9 井分别位于沾化凹陷渤南洼陷南部的罗家鼻状构造区和四扣洼陷(图1), L69 井揭示沙三下亚段属一套深灰色-灰褐色深湖-半深湖相不等厚互层产出的富(含)有机质纹层状、层状和块状灰质泥岩、泥质灰岩, 累计厚度约 188.81 m(图2)。在埋深 3 040 ~ 3 066 m 试油层段, 实测压力为 54.45 MPa, 压力系数高达 1.82。目前, 沾化凹陷沙三下亚段页岩油勘探区域主要位于罗西断层和孤西断层之间, 勘探面积约为 910 km^{2[3]}。

2 样品采集与分析

为选取典型研究样品, 在对 L69 井取心段岩心进行精细观察描述基础上, 结合从胜利油田收集到的热解分析结果, 编制了 L69 井取心段综合柱状图(图2), 综合岩性与岩相、有机碳含量(TOC)、游离烃含量(S_1)以及油饱和指数(OSI)等信息, 选择 L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m(为相对高 TOC, S_1 和 OSI 的富有机质层状泥质灰岩和灰质泥岩)、3 040.35 ~ 3 072.10 m(为相对高 TOC、低 S_1 和 OSI 的富有机质纹层状泥质灰岩)以及 3 116.90 ~ 3 130.80 m(为相对低 TOC, S_1 和高 OSI 的含有机质纹层状泥质灰岩)3 个深度段开展了样品采集, 采样间距一般为 1.0 ~ 2.5 m, 共采集样品 54 件。除深度 3 130.80 m 的样品层位归属于沙四上亚段外, 其他样品均属于沙三下亚段。对比井 XYS9 井

在沙三下亚段的 3 375.00 ~ 3 383.39 m 和 3 410.00 ~ 3 417.42 m 两个取心井段分别采集富含有机质层状(或纹层状)泥质灰岩各 5 件和 6 件, 采集间距分别为 2.0 m 和 1.0 m。

对采集样品系统开展了常规热解与多温阶热释(解)分析, 分析在中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验地质研究中心完成。

3 含油性与赋存形式评价

3.1 含油性与赋存形式表征方法

泥页岩含油性表征可以通过有机地球化学分析与岩心物理方法来实现, 但有机地球化学方法相对既快速又经济, 并且不易遗漏岩石中不连通的封闭孔隙中的烃类^[16], 故有机地球化学分析是泥页岩含油性表征的最实用方法, 主要是通过测定泥页岩中氯仿沥青“A”含量或热解 S_1 (mg/g) 来实现^[11, 16-23], 但氯仿沥青“A”含量需要进行轻烃补偿校正, 热解 S_1 需要进行轻烃、重烃补偿校正^[11, 19-23]。Jarvie(2012)则直接利用油饱和指数($OSI = 100S_1/TOC$) - 最高热解峰温图解来评价泥页岩的含油级别^[24], 不过轻烃校正后的结果更符合勘探实际^[11], 故本文采用轻烃校正后的热解分析结果获得油饱和指数, 来评价 L69 井和 XYS9 井沙三下亚段不同深度段泥质灰岩或灰质泥

(样品数 $n = 20$), 油饱和指数总体随最高热解峰温 ($T_{\max}$) 和样品深度的增大呈降低趋势, 含油级别均属于具页岩油潜力; 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段除 3 040.35 m 和 3 068.10 m 的 2 个样品油饱和指数之外 (分别为 167 mg/g 和 245 mg/g), 其他富有机质纹层状泥质灰岩油饱和指数均在 100 mg/g 以下, 介于 31 ~ 93 mg/g, 平均为 67 mg/g ($n = 25$), 油饱和指数同样总体随最高热解峰温和样品深度的增大呈降低趋势, 含油级别仅属中含油至油显示; 3 116.90 ~ 3 126.70 m 井段沙三下亚段含有机质纹层状泥质灰岩的油饱和指数均在 100 mg/g 以上, 介于 118 ~ 247 mg/g, 平均为 204 mg/g ($n = 8$), 油饱和指数也总体随最高热解峰温和样品深度的增大呈降低趋势, 含油级别也属具

页岩油潜力。XYS9 井沙三下亚段取心段层状 (或纹层状) 泥质灰岩油饱和指数, 显著高于 L69 井沙三下亚段取心段油饱和指数, 介于 228 ~ 455 mg/g, 平均为 309 mg/g ($n = 11$), 含油级别均属具页岩油潜力。其中 3 375.00 ~ 3 383.39 m 深度段层状 (或纹层状) 泥质灰岩的油饱和指数介于 228 ~ 297 mg/g, 平均为 265 mg/g ($n = 5$); 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段层状 (或纹层状) 泥质灰岩的油饱和指数介于 261 ~ 455 mg/g, 平均为 345 mg/g ($n = 6$)。

3.3 含油性与不同赋存形式油定量对比

依据 L69 井和 XYS9 井沙三下亚段不同深度段灰质泥岩和泥质灰岩的 Rock-Eval6 热解 S_1 和多温阶热

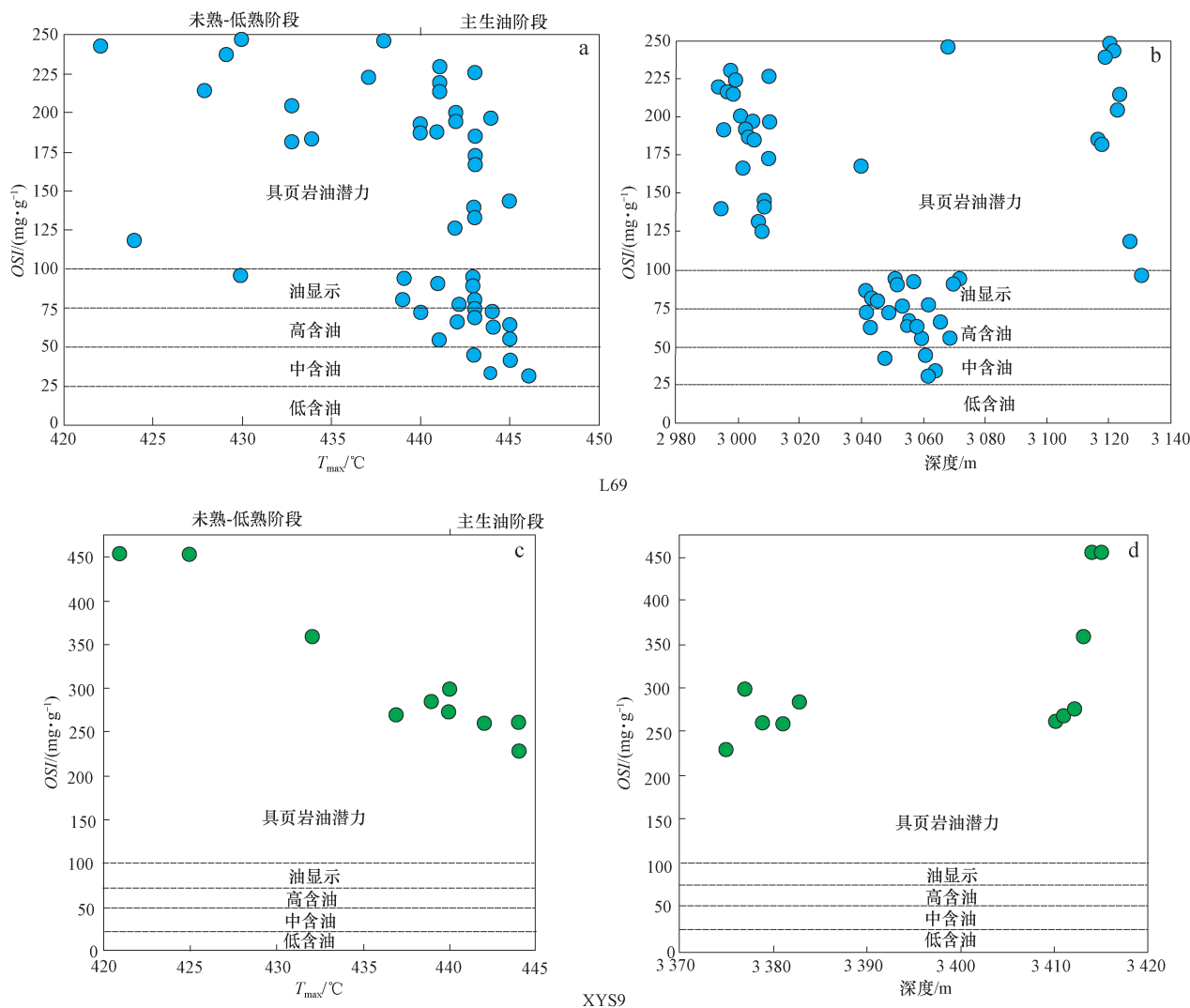


图3 沾化凹陷 L69 井和 XYS9 井沙三下亚段取心段轻烃校正后油饱和指数 (OSI) 与最高热解峰温 ($T_{\max}$) 和样品深度关系 (底图据文献[24]修改)

Fig. 3 Diagram showing the correlation between $OSI - T_{\max}$ after light hydrocarbon correction and depth for the cored intervals of the E_s^{3L} from Wells L69 and XYS9 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin (base map was modified from reference[24])

a. L69 井 $OSI - T_{\max}$ 图解; b. L69 井 OSI - 深度图解; c. XYS9 井 $OSI - T_{\max}$ 图解; d. XYS9 井 OSI - 深度图解

释烃 S_{1-1} , S_{1-2} 和 S_{2-1} 结果, 获得了 2 口沙三下亚段不同深度段的总含油量与不同赋存形式油定量评价结果 (图 4), 不同赋存形式油占总含油量的百分率如图 5 所示。

L69 井沙三下亚段灰质泥岩和泥质灰岩的含油性较好, 总含油量介于 4.03 ~ 23.43 mg/g, 平均为 11.62 mg/g ($n=53$)。同时由图 4 可见, 在取心段的三个样品采集段, 由浅至深, 总含油量总体呈现降低趋势, 其中 2 994.10 ~ 3 010.90 m 深度段, 其总含油 L69 井沙三下亚段不同赋存状态油的含量随深度变化特征与总含油量变化特征基本一致, 由浅至深总

体呈现降低趋势。轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 0.53 ~ 3.70 mg/g, 平均为 1.71 mg/g ($n=53$), 轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 6.83% ~ 20.37%, 平均为 14.45% ($n=53$); 其中 2 994.10 ~ 3 010.90 m 深度段, 其轻烃校正后游离油量介于 7.83 ~ 23.43 mg/g, 平均为 15.68 mg/g ($n=20$); 3 040.35 ~ 3 072.10 m 深度段, 其总含油量介于 4.86 ~ 16.51 mg/g, 平均为 10.16 mg/g ($n=25$); 3 116.90 ~ 3 126.70 m 深度段, 其总含油量介于 4.03 ~ 9.41 mg/g, 平均为 6.01 mg/g ($n=8$)。

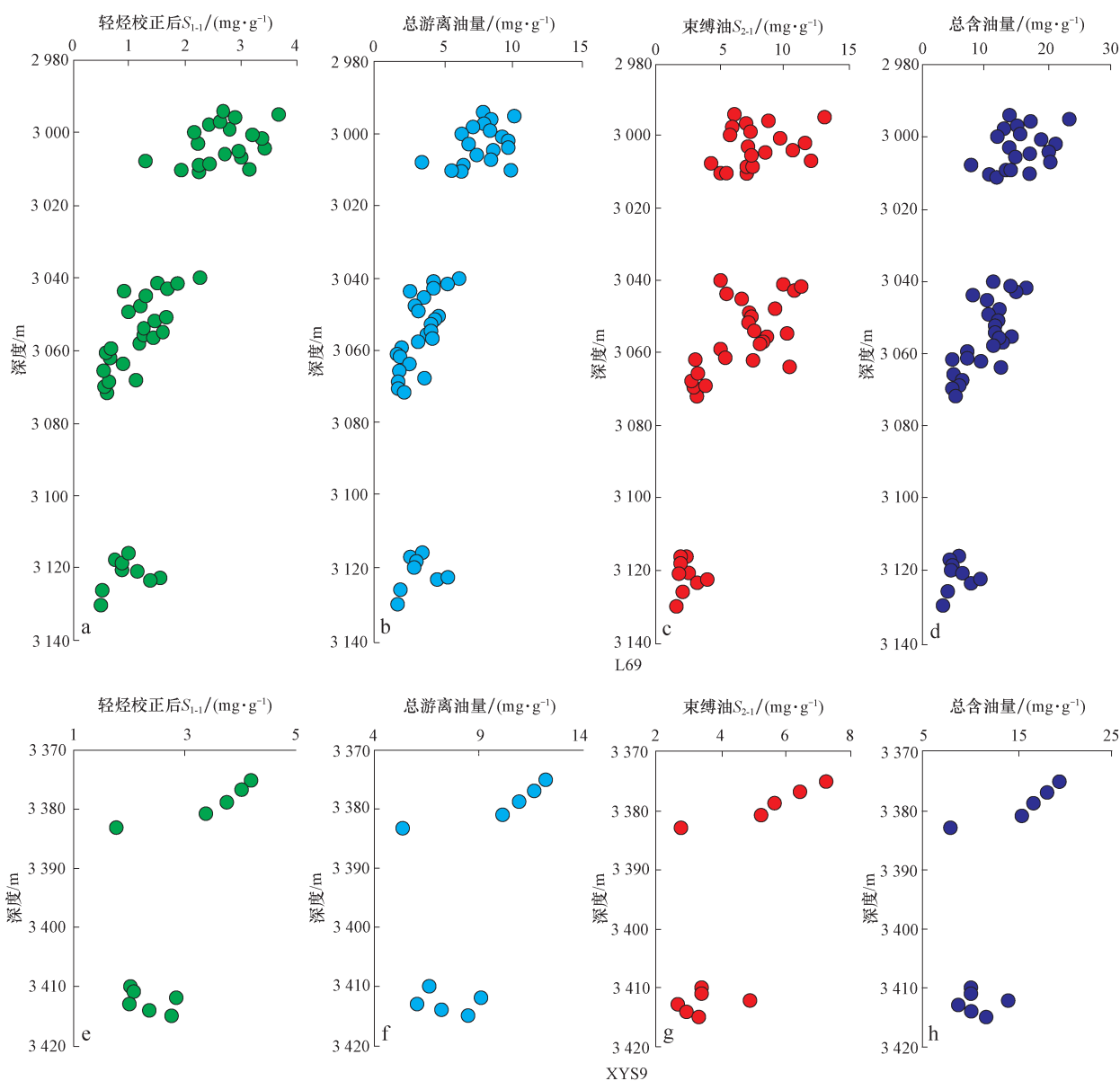


图 4 沾化凹陷 L69 井和 XYS9 井沙三下亚段取心段含油性不同赋存形式油定量评价结果

Fig. 4 Quantitative evaluation of oil content and different modes of occurrence for the cored intervals of the Es^{3L} from Wells L69 and XYS9 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. L69 井轻烃校正后 S_{1-1} - 深度图解; b. L69 井总游离油量 - 深度图解; c. L69 井束缚油 S_{2-1} - 深度图解; d. L69 井总含油量 - 深度图解;
e. XYS9 井轻烃校正后 S_{1-1} - 深度图解; f. XYS9 井总游离油量 - 深度图解; g. XYS9 井束缚油 S_{2-1} - 深度图解; h. XYS9 井总含油量 - 深度图解

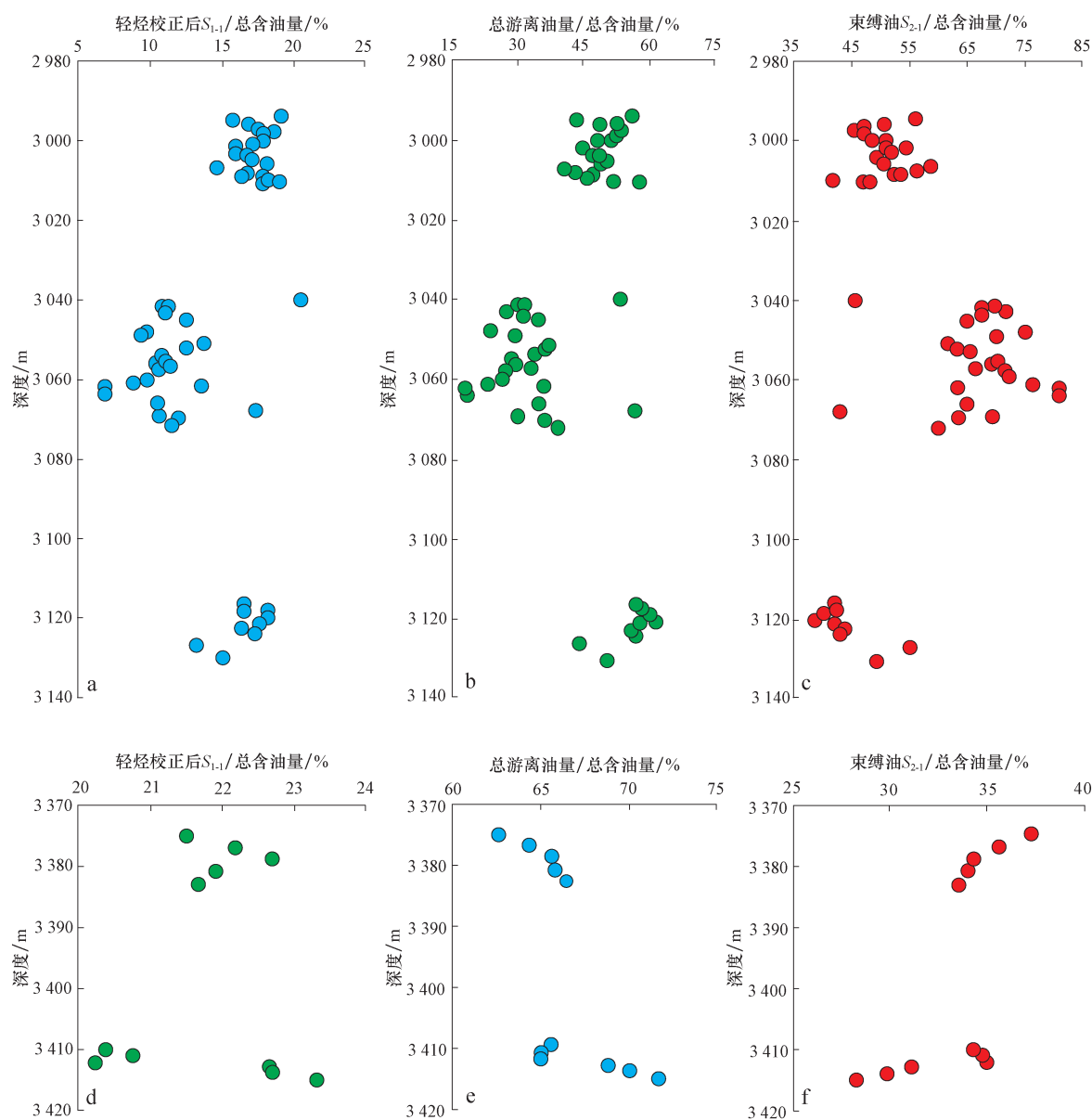


图5 沾化凹陷 L69 井和 XY9 井沙三下亚段取心段不同赋存形式油占总油百分率

Fig. 5 Diagram showing the proportion of different occurrence oil in total oil content for the cored intervals of the E_s^{3L} from Wells L69 and XY9 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. L69 井轻烃校正后 S_{1-1} /总含油量-深度图解; b. L69 井总游离油量/总含油量-深度图解; c. L69 井束缚油 S_{2-1} /总含油量-深度图解;

d. XY9 井轻烃校正后 S_{1-1} /总含油量-深度图解; e. XY9 井总游离油量/总含油量-深度图解; f. XY9 井束缚油 S_{2-1} /总含油量-深度图解

S_{1-1} 含量介于 1.31 ~ 3.70 mg/g, 平均为 2.69 mg/g ($n = 20$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 14.67% ~ 19.16%, 平均为 17.30% ($n = 20$); 3 040.35 ~ 3 072.10 m 深度段, 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 0.54 ~ 2.29 mg/g, 平均为 1.15 mg/g ($n = 25$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 6.83% ~ 20.37%, 平均为 11.42% ($n = 25$); 3 116.90 ~ 3 126.70 m 深度段, 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 0.53 ~ 1.55 mg/g, 平均为 1.01 mg/g ($n = 8$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分

率介于 13.15% ~ 18.34%, 平均为 16.78% ($n = 8$)。总游离油量介于 1.71 ~ 10.22 mg/g, 平均为 4.97 mg/g ($n = 53$), 总游离油含量占总含油量的百分率介于 18.79% ~ 61.41%, 平均为 42.78% ($n = 53$); 其中 2 994.10 ~ 3 010.90 m 深度段, 其总游离油量介于 3.44 ~ 10.22 mg/g, 平均为 7.73 mg/g ($n = 20$), 其总游离油含量占总含油量的百分率介于 41.21% ~ 57.97%, 平均为 49.65% ($n = 20$); 3 040.35 ~ 3 072.10 m 深度段, 其总游离油量介于 1.71 ~ 6.13 mg/g, 平均为 3.27 mg/g ($n = 25$), 其总游离油含量占总含油量的百分

率介于 18.79% ~ 57.10%, 平均为 32.85% ($n=25$); 3 116.90 ~ 3 126.70 m 深度段, 其总游离油量介于 1.80 ~ 5.32 mg/g, 平均为 3.42 mg/g ($n=8$), 其总游离油含量占总含油量的百分率介于 44.67% ~ 61.41%, 平均为 56.63% ($n=8$)。束缚油 S_{2-1} 含量介于 1.81 ~ 13.21 mg/g, 平均为 6.64 mg/g ($n=53$), 束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 38.59% ~ 81.21%, 平均为 57.22% ($n=53$)。其中 2 994.10 ~ 3 010.90 m 深度段, 其束缚油 S_{2-1} 含量介于 5.18 ~ 13.21 mg/g, 平均为 7.95 mg/g ($n=20$), 其束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 42.03% ~ 58.79%, 平均为 50.35% ($n=20$); 3 040.35 ~ 3 072.10 m 深度段, 其束缚油 S_{2-1} 含量介于 2.78 ~ 11.19 mg/g, 平均为 6.90 mg/g ($n=25$), 其束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 42.90% ~ 81.21%, 平均为 67.15% ($n=25$); 3 116.90 ~ 3 126.70 m 深度段, 其束缚油 S_{2-1} 含量介于 1.64 ~ 4.09 mg/g, 平均为 2.48 mg/g ($n=8$), 束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 38.59% ~ 55.33%, 平均为 43.37% ($n=8$)。

XY9 井沙三下亚段取心段层状(或纹层状)泥质灰岩总含油量介于 8.21 ~ 19.51 mg/g, 平均为 13.01 mg/g ($n=11$)。其中 3 375.00 ~ 3 383.39 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩的介于 8.21 ~ 19.51 mg/g, 平均为 15.57 mg/g ($n=5$); 3 410.00 ~ 3 417.42 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩的介于 8.86 ~ 11.82 mg/g, 平均为 10.88 mg/g ($n=6$)。XY9 井沙三下亚段取心段层状(或纹层状)泥质灰岩不同赋存状态油的含量随深度变化特征与总含油量变化特征基本一致, 由浅至深总体呈现降低趋势。轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 1.78 ~ 4.20 mg/g, 平均为 2.84 mg/g ($n=11$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 20.26% ~ 23.35%, 平均为 21.84% ($n=11$)。其中 3 375.00 ~ 3 383.39 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 1.78 ~ 4.20 mg/g, 平均为 3.43 mg/g ($n=5$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 21.53% ~ 22.71%, 平均为 22.01% ($n=5$); 3 410.00 ~ 3 417.42 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量介于 2.01 ~ 2.85 mg/g, 平均为 2.35 mg/g ($n=6$), 其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量占总含油量的百分率介于 20.26% ~ 23.35%, 平均为 21.69% ($n=6$)。总游离油量介于 5.45 ~ 12.24 mg/g, 平均为 8.60 mg/g ($n=11$), 总游离油含量占总含油量的百分率介于 62.74% ~ 71.66%, 平均

为 66.49% ($n=11$)。其中 3 375.00 ~ 3 383.39 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩总游离油量介于 5.45 ~ 12.24 mg/g, 平均为 10.08 mg/g ($n=5$), 其总游离油量占总含油量的百分率介于 62.74% ~ 66.38%, 平均为 65.02% ($n=5$); 3 410.00 ~ 3 417.42 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩总游离油量介于 6.10 ~ 9.14 mg/g, 平均为 7.39 mg/g ($n=6$), 其总游离油量占总含油量的百分率介于 64.96% ~ 71.66%, 平均为 67.72% ($n=6$)。束缚油 S_{2-1} 含量介于 2.76 ~ 7.27 mg/g, 平均为 4.41 mg/g ($n=11$), 束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 28.34% ~ 37.26%, 平均为 33.51% ($n=11$)。其中 3 375.00 ~ 3 383.39 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩束缚油 S_{2-1} 含量介于 2.76 ~ 7.27 mg/g, 平均为 5.49 mg/g ($n=5$), 其束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 33.62% ~ 37.26%, 平均为 34.98% ($n=5$); 3 410.00 ~ 3 417.42 m 深度段层状(或纹层状)泥质灰岩束缚油 S_{2-1} 含量介于 2.76 ~ 4.93 mg/g, 平均为 3.52 mg/g ($n=6$), 其束缚油 S_{2-1} 含量占总含油量的百分率介于 28.34% ~ 35.04%, 平均为 32.28% ($n=6$)。

图 6 为 L69 井沙三下亚段 3 个采样分析段和 XY9 井沙三下亚段 2 个采样分析段总含油量均值与不同赋存形式油含量均值对比结果。显然, L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m 井段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段与 XY9 井 3 375.00 ~ 3 383.39 m 井段深度段层状(或纹层状)泥质灰岩的总含油量均值近于相等, 分别为 15.68 mg/g 和 15.57 mg/g; L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段富有机质纹层状泥质灰岩与 XY9 井 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段层状(或纹层状)泥质灰岩的总含油量均值基本相当, 分别为 10.16 mg/g 和 10.88 mg/g; L69 井 3 116.90 ~ 3 130.8 m 井段含有机质纹层状泥质灰岩的总含油量均值相对最低, 为 5.70 mg/g。L69 井 2 994.10 ~ 3 010.9 m 井段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段总游离油含量均值与 XY9 井 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段层状(或纹层状)泥质灰岩的总游离油含量均值基本相当, 分别为 7.73 mg/g 和 7.39 mg/g, 但明显低于 XY9 井 3 375.00 ~ 3 383.39 m 层状(或纹层状)泥质灰岩的总游离油含量均值 10.08 mg/g; L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 富有机质纹层状泥质灰岩和 3 116.90 ~ 3 130.8 m 含有机质纹层状泥质灰岩的总游离油含量均值近于相等并且相对较低, 分别为 3.27 mg/g 和 3.42 mg/g。L69 井 2 994.10 ~ 3 010.9 m 富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含

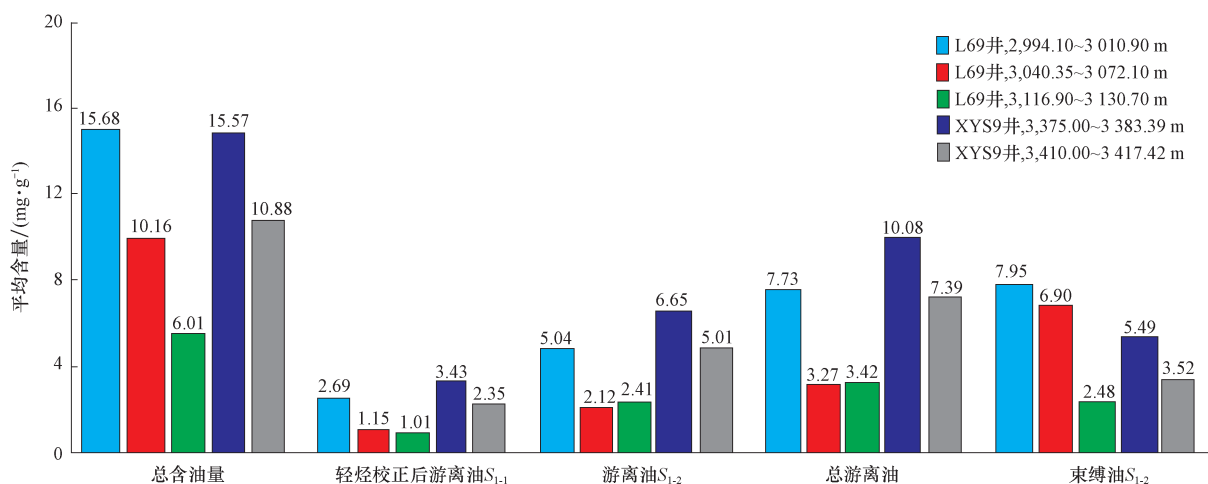


图6 沾化凹陷 L69 井和 XYS9 井沙三下亚段取心段总含油量均值与不同赋存形式油含量均值对比

Fig. 6 The comparative diagram showing the average total oil content and the average oil content for different modes of occurrence for the cored intervals of the Es^{3L} from Wells L69 and XYS9 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

量均值与 XYS9 井 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段层状(或纹层状)泥质灰岩的轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量均值基本相当,分别为 2.69 mg/g 和 2.35 mg/g,但明显低于 XYS9 井 3 375.00 ~ 3 383.39 m 井段层状(或纹层状)泥质灰岩的轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量均值 3.43 mg/g; L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段富有机质纹层状泥质灰岩和 3 116.90 ~ 3 130.8 m 井段含有机质纹层状泥质灰岩的轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量均值相近并且相对较低,分别为 1.15 mg/g 和 1.01 mg/g。同样, L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m 井段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段游离油 S_{1-2} 含量均值与 XYS9 井 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段层状(或纹层状)泥质灰岩的游离油 S_{1-2} 含量均值近于相等,分别为 5.04 mg/g 和 5.01 mg/g,但明显低于 XYS9 井 3 375.00 ~ 3 383.39 m 井段深度段层状(或纹层状)泥质灰岩的游离油 S_{1-2} 含量均值 6.65 mg/g; L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段富有机质纹层状泥质灰岩和 3 116.90 ~ 3 130.80 m 井段含有机质纹层状泥质灰岩的游离油 S_{1-2} 含量均值近于相等并且相对较低,分别为 2.12 mg/g 和 2.41 mg/g。束缚油 S_{2-1} 含量均值则以 L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m 井段深度段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段最高,为 7.95 mg/g; L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段深度段富有机质纹层状泥质灰岩段束缚油 S_{2-1} 含量均值次之,为 6.90 mg/g; XYS9 井 3 375.00 ~ 3 383.39 m 井段深度段层状(或纹层状)泥质灰岩束缚油 S_{2-1} 含量均值居第三,为 5.49 mg/g; XYS9 井 3 410.00 ~ 3 417.42 m 井段深度段层状(或纹层状)泥质灰岩和 L69 井 3 116.90 ~

3 130.8 m 井段深度段含有机质纹层状泥质灰岩的束缚油 S_{2-1} 含量均值均相对较低,分别 3.52 mg/g 和 2.48 mg/g。

4 L69 井取心段页岩油勘探有利层段探讨

泥页岩层系滞留油含量是决定页岩层系是否具备页岩油勘探潜力的物质基础,但 Steve Larter 等研究指出,烃源岩中赋存于干酪根中的滞留油其运移方式主要靠扩散作用而不是经典的达西渗流作用。因此,不考虑能量补充和化学改质的人工水力压裂作用对烃源岩中赋存于干酪根内的滞留油的生产能力影响很小^①。沾化凹陷 L69 井沙三下亚段取心段典型层段样品的束缚油 S_{2-1} 含量与 TOC 含量之间呈现显著正相关关系,并且当 TOC 含量为零时,束缚油 S_{2-1} 含量仅为 0.18 mg/g (图 7)。这说明无机矿物对油的吸附能力很低,束缚油 S_{2-1} 主要以吸附-互溶态赋存于干酪根中,与张林晔等^[27]的实验研究结果相吻合。这意味着滞留于泥页岩层系内的束缚油 S_{2-1} 仅通过压裂改造也是难以有效动用的。因此,评价泥页岩层系是否具有页岩油勘探潜力,其游离油尤其是轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量是关键因素。实际上,目前国外取得商业开发的页岩油均为油质很轻的轻质油甚至凝析油,即使在 Williston 盆地 Bakken 组混合型页岩油系统中,真正可动用的油(可有效采出的油)主要为碳数低于 15 的轻烃部分^[28],除非泥页岩层系裂缝系统异常发育。同时,具

① Larter S, Huang H, Bennett B. What don't we know about self sourced oil reservoirs: challenges and potential solution[R]. Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2012.

页岩油勘探潜力层段其油饱和指数 ($OSI = S_1 \times 100 / TOC$) 均大于 100^[24]。

微裂缝不仅是页岩层系内游离油的主要赋存空间,同时也利于页岩油的可流动性与有效开发。L69 井 3 个研究层段和 XYS9 井 2 个研究层段微裂缝均发育,尤其 XYS9 井可识别出构造裂缝 15 条,线密度约为 1.4 条/m^[29-30],这是 XYS9 井沙三下亚段在未压裂改造情况下也能获高产页岩油流的重要因素。同时,异常高压有利于提高页岩油的驱动力,L69 井 3 个研究层段和 XYS9 井 2 个研究层段处于异常压力发育深度段^[31-32],其中 L69 井在埋深 3 040 ~ 3 066 m 试油段实测压力为 54.45 MPa,压力系数为 1.82。新义深 9 井在埋深 3 355 ~ 3 430 m 试油段实测压力为 60.02 MPa,压力系数为 1.79^[3]。此外,脆性矿物(硅质矿物和碳酸盐岩矿物)含量高容易产生天然裂缝和诱导裂缝,有利于页岩油开采,优质页岩储层的脆性矿物含量要大于 50%,而粘土矿物含量则低于 40%^[33]。L69 井和 XYS9 井沙三下亚段研究层段脆性矿物含量均值均在 70%以上,而粘土矿物含量均值则低于 25%^[10],显然,沙三下亚段泥页岩层系具有良好的可压裂改造性。因此,从微裂缝发育程度、地层压力及可压裂改造性角度而言,L69 井沙三下亚段 3 个剖析层段均属页岩油勘探的有利层段。但是,从前面的分析可见,相对 XYS9 井获得页岩油产量的沙三下亚段而言,L69 井 2 994.10 ~ 3 010.9 m 深度段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段,其游离油总量尤其是轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量较之基本相近或相等,并且油饱和指数 (OSI) 均在 100 mg/g 以上,平均达 184 mg/g ($n=20$),具备页岩油高产的良好物质基础。同时,尽管该层段的埋藏深度相对最浅,热成熟度相对最低 ($R_o = 0.78\%$),但抽提物生物标志物成熟度参数相对更深层段样品的结果存在倒转现象,显示高成熟特征,表明该层段存在运移油的贡献^[34]①,与该层段总游离油/总含油量的占比百分率反而比下部层段更高相吻合(图 5),更有利于页岩油的开发。而 L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段富有机质纹层状泥质灰岩段,其游离油总量和轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量较之低 2.0 至 3.0 倍左右,并且油饱和指数 (OSI) 普遍小于 75 mg/g,平均仅为 67 mg/g ($n=25$),不具有页岩油勘探开发的潜力,这应是在该层段内试油未能获得工业页岩油油流的根本原因。L69 井 3 116.90 ~ 3 126.70 m 井段含有机质纹层状泥质灰岩段,虽其油饱和指数均在 100 mg/g 以上,平均达 204 mg/g ($n=8$),但游离油总量和轻烃校正后游离

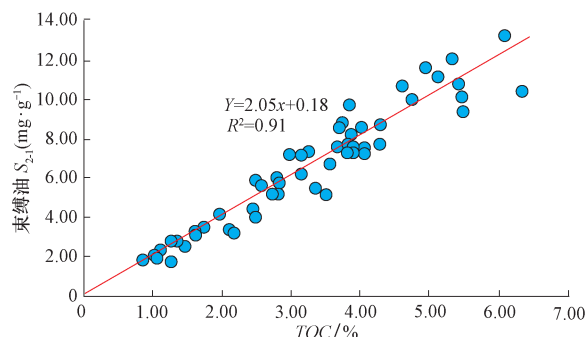


图7 沾化凹陷 L69 井沙三下亚段取心段
束缚油 S_{2-1} 与 TOC 关系图解

Fig. 7 Diagram showing the relationship of irreducible oil S_{2-1} and TOC for the cored interval of the Es^{3L} from Well L69 in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

油 S_{1-1} 含量较之低 2.3 至 3.6 倍左右。因此,该层段页岩油勘探开发潜力会显著降低。综上分析,L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m 井段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段应为页岩油勘探有利层段。

5 结论

1) L69 井 3 040.35 ~ 3 072.10 m 井段富有机质纹层状泥质灰岩段,其游离油总量和轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量较获高产页岩油油流的 XYS9 井沙三下亚段低 2.0 ~ 3.0 倍左右,并且轻烃校正后的油饱和指数 (OSI) 普遍小于 75 mg/g,平均仅为 67 mg/g ($n=25$),不具有页岩油勘探开发的潜力。游离油总量尤其轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量不足应是在该层段内试油未能获得工业页岩油油流的根本原因。

2) L69 井 2 994.10 ~ 3 010.90 m 井段富有机质层状泥质灰岩、灰质泥岩段,其游离油总量尤其是轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量较获高产页岩油油流的 XYS9 井沙三下亚段基本相近或相等,并且油饱和指数均在 100 mg/g 以上,平均达 184 mg/g ($n=20$),具备页岩油高产的良好物质基础。同时,微裂缝发育、具异常高压、脆性矿物含量高,并且存在运移油的贡献,更有利于页岩油的开发。3 116.90 ~ 3 126.70 m 井段含有机质纹层状泥质灰岩段,虽其油饱和指数均在 100 mg/g 以上,平均达 204 mg/g ($n=8$),但游离油总量和轻烃校正后游离油 S_{1-1} 含量较低,页岩油勘探开发潜力有限。因此,L69 井埋深 2 994.10 ~ 3 010.90 m 层段应为页岩油勘探的有利层段。

① 黎茂稳,李志明,蒋启贵,等. 东部断陷盆地烃源层可动油定量评价方法[R]. 北京:中国石化石油勘探开发研究院,2014,1-93.

参 考 文 献

- [1] 刘培,蒋有录,刘华,等.渤海湾盆地沾化凹陷断层活动与新近系油气成藏关系[J].天然气地球科学,2013,24(3):541-547.
Liu Pei, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. The relationship between fault-activity and hydrocarbon accumulation of Neogene in Zhanhua depression, Bohai Bay basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3):541-547.
- [2] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳坳陷页岩油气评价方法-以沾化凹陷罗家地区为例[J].石油学报,2013,34(1):83-91.
Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: A case study on Luoia area in Zhanhua sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1):83-91.
- [3] 王鸿升,胡天跃.渤海湾盆地沾化凹陷页岩油形成影响因素分析[J].天然气地球科学,2014,25(增刊1):141-149.
Wang Hongsheng, Hu Tianyue. Analysis of influence factors of shale oil formation in Zhanhua depression of Bohai Bay basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(S1):141-149.
- [4] 王永诗,巩建强,房建军,等.渤南洼陷页岩油气富集高产条件及勘探方向[J].油气地质与采收率,2012,19(6):6-10.
Wang Yongshi, Gong Jianqiang, Fang Jiangjun, et al. Enrichment condition analysis and exploration direction of shale oil-gas in Bonan subsag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6):6-10.
- [5] 刘惠民,张守鹏,王朴,等.沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J].油气地质与采收率,2012,19(6):11-15.
Liu Huimin, Zhang Shoupeng, Wang Pu, et al. Lithologic characteristics of lower Es3 shale in Luoia area, Zhanhua sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6):11-15.
- [6] 邓美寅,梁超.渤南洼陷沙三段下亚段页岩储集空间研究:以罗69井为例[J].地学前缘,2012,19(1):173-181.
Deng Meiyin, Liang Chao. Studies on reservoir space of mudstone and shale of the lower section of Es3 in Bonan subsag: An example from well Luo69 [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1):173-181.
- [7] 王永诗,王伟庆,郝运轻.济阳坳陷沾化凹陷罗家地区古近系沙河街组页岩储集特征分析[J].古地理学报,2013,15(5):657-662.
Wang Yongshi, Wang Weiqing, Hao Yunqing. Shale reservoir characteristics analysis of the Paleogene Shahejie Formation in Luoia area of Zhanhua sag, Jiyang depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5):657-662.
- [8] 李超,朱筱敏,朱世发,等.沾化凹陷罗家地区沙三段泥页岩储层特征[J].沉积学报,2015,33(4):795-808.
Li Chao, Zhu Xiaomin, Zhu Shifa, et al. Shale reservoir characteristics of the Lower 3th member of Shahejie Formation, Luoia area, Zhanhua Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4):795-808.
- [9] 张磊磊,陆正元,王军,等.渤海湾盆地沾化凹陷沙三段下亚段页岩油层段微观孔隙结构[J].石油与天然气地质,2016,37(1):80-86.
Zhang Leilei, Lu Zhengyuan, Wang Jun, et al. Microscopic pore structure of shale oil reservoirs in the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1):80-86.
- [10] 彭丽,陆永潮,彭鹏,等.渤海湾盆地渤南洼陷沙三段下亚段泥页岩非均质性特征及演化模式-以罗69井为例[J].石油与天然气地质,2017,38(2):219-229.
Peng Li, Lu Yongchao, Peng Peng, et al. Heterogeneity and evolution model of the Lower Shahejie Member 3 mud-shale in the Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin: An example from Well Luo 69 [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2):219-229.
- [11] 李志明,钱门辉,黎茂稳,等.中-低成熟湖相富有机质泥页岩含油性及其赋存形式-以渤海湾盆地渤南洼陷罗63井和义21井沙河街组一段为例[J].石油与天然气地质,2017,38(1):448-456.
Li Zhiming, Qian Menhui, Li Maowen, et al. Oil content and occurrence in low-medium mature organic-rich lacustrine shales: A case from the 1st member of the Eocene-Oligocene Shahejie Formation in Well Luo-63 and Yi-21, Bonan subsag, Bohai Bay basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1):448-456.
- [12] 吴智平,李伟,郑德顺,等.沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析[J].高校地质学报,2004,10(1):405-417.
Wu Zhiping, Li Wei, Zheng Deshun, et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua sag [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1):405-417.
- [13] 杨超,陈清华.济阳坳陷构造演化及其构造层的划分[J].油气地质与采收率,2005,12(2):9-12,22.
Yang Chao, Chen Qinghua. Tectonic evolution and tectono-stratigraphic classification of Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2):9-12,22.
- [14] 彭存仓.沾化凹陷断层活动性及其叠合特征[J].油气地质与采收率,2009,16(5):37-39,43.
Peng Cuncang. Analysis of fault activity and structural type in Zhanhua depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5):37-39,43.
- [15] 罗胜元,何生,金秋月,等.渤南洼陷超压系统划分及结构特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(1):37-51.
Luo Shengyuan, He Sheng, Jin Qiuyue, et al. Overpressure system classification and structure characteristics in Bonan sag [J]. Journal of Jinlin University: Earth Science Edition, 2015, 45(1):37-51.
- [16] 郭小波,黄志龙,陈旋,等.马郎凹陷芦草沟组页岩储层含油性特征与评价[J].沉积学报,2014,32(1):166-173.
Guo Xiaobo, Huang Zhilong, Chen Xuan, et al. The oil-bearing property characteristics and evaluation of Lucaogou formation shale reservoirs in Malang sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1):166-173.
- [17] 柳波,郭小波,黄志龙,等.页岩油资源潜力预测方法探讨:以三塘湖盆地马郎凹陷芦草沟组页岩油为例[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(4):1472-1478.
Liu Bo, Guo Xiaobo, Huang Zhilong, et al. Discussion on prediction method for hydrocarbon resource potential of shale oil: Taking Lucaogou Formation shale oil of Malang sag as case [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4):1472-

- 1478.
- [18] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等. 烃源岩滞留油气作用及其对泥页岩含油气率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6):2439-2448.
- Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. Residual oil and gas in source rocks and its influence on oil and gas rate in shale[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(6):2439-2448.
- [19] 薛海涛,田善思,王伟明,等. 页岩油资源评价关键参数-含油率的校正[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1):15-22.
- Xue Haitao, Tian Shansi, Wang Weiming, et al. Correction of oil content-one key parameter in shale oil resource assessment[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1):15-22.
- [20] 薛海涛,田善思,卢双舫,等. 页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正-以松辽盆地北部青山口组为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1):70-78.
- Xue Haitao, Tian Shansi, Lu Shuangfang, et al. Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil: a case study at the Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1):70-78.
- [21] 朱日房,张林晔,李钜源,等. 页岩滞留液态烃的定量评价[J]. 石油学报, 2015, 36(1):13-18.
- Zhu Rifang, Zhang Linye, Li Juyuan, et al. Quantitative evaluation of residual liquid hydrocarbons in shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1):13-18.
- [22] 柳波,何佳,吕延防,等. 页岩油资源评价指标与方法-以松辽盆地北部青山口组页岩油为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11):3847-3852.
- Liu Bo, He Jia, Lv Yanfang, et al. Parameters and method for shale oil assessment: Taking Qingshankou Formation shale oil of Northern Songliao Basin[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(11):3847-3852.
- [23] 蒋启贵,黎茂稳,钱门辉,等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6):842-849.
- Jiang Qigui, Li Maowen, Qian Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6):842-849.
- [24] Jarvie D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource system[C]// Li M W. Abstract of international symposium on shale oil technologies. Sinopec Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi:2012, 8-9.
- [25] 张林晔. 陆相盆地页岩油勘探开发关键地质问题研究-以东营凹陷为例[C]// Li M W. 页岩油资源与勘探开发技术国际研讨会摘要. 中国石化油气成藏重点实验室, 无锡:2012, 14-15.
- Zhang Linye. The study of the key geologic factors in shale oil exploration and development in continental basin-take Dongying depression as an example[C]// Li M W. Abstract of International symposium on shale oil technologies. Sinopec Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi:2012, 14-15.
- [26] 宋国奇,张林晔,卢双舫,等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4):221-228.
- Song Guoqi, Zhang Linye, Lu Shuangfang, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application[J]. Earth Science Front, 2013, 20(4):221-228.
- [27] 张林晔,包友书,李钜源,等. 湖相页岩中矿物和干酪根留油能力实验研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(6):776-780.
- Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Hydrocarbon and crude oil adsorption abilities of minerals and kerogens in lacustrine shales[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6):776-780.
- [28] 李志明,芮晓庆,黎茂稳,等. 北美典型混合页岩油系统特征及其启示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4):1060-1072.
- Li Zhiming, Rui Xiaoqing, Li Maowen, et al. Characteristics of typical hybrid shale oil system in north America and its implications[J]. Journal of Jinlin University(Earth Science Edition), 2015, 45(4):1060-1072.
- [29] 刘魁元,孙喜新,李琦,等. 沾化凹陷泥质岩储层中裂缝类型及其成因研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(4):12-15.
- Liu Kuiyuan, Sun Xixin, Li Qi, et al. Fracture pattern and genesis of mudstone reservoir in Zhanhua depression[J]. Journal of China University Petroleum, 2004, 28(4):12-15.
- [30] 宋梅远,张善文,王永诗,等. 沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6):18-22.
- Song Meiyuan, Zhang Shanwen, Wang Yongshi, et al. Lithology classification and prediction of favorable area of Sha III mudstone-fractured reservoir in Zhanhua depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6):18-22.
- [31] 刘华,蒋有录,谷国翠,等. 沾化凹陷渤南洼陷古近系压力特征及成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(4):46-51.
- Liu Hua, Jiang Youlu, Gu Guocui, et al. Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan sag, Zhanhua depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(4):46-51.
- [32] 崔健健. 沾化凹陷古近系温压场与油气分布关系研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2011, 1-60.
- Cui Jianjian. Investigation on the relationship between Paleogene temperature-pressure field and hydrocarbon distribution in Zhanhua[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011, 1-60.
- [33] 姜在兴,张文昭,梁超,等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1):184-196.
- Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1):184-196.
- [34] 王学军,宁方兴,郝雪峰,等. 古近系页岩油赋存特征-以济阳凹陷为例[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29):39-48.
- Wang Xuejun, Ning Fangxing, Hao Xuefeng, et al. Paleogene shale oil occurrence features: a case of Jiyang depression[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(29):39-48.