

鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组 7段3亚段页岩油勘探前景探讨

李志明^{1,2,3},陶国亮^{1,2,3},黎茂稳^{1,2,3},钱门辉^{1,2,3},谢小敏^{1,2,3},蒋启贵^{1,2,3},刘鹏^{1,2,3},鲍云杰^{1,2,3},夏东领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. 中国石化油气成藏重点实验室,江苏 无锡 214126; 4. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:为探讨鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组7段3亚段(简称长7³亚段)页岩油勘探前景,在对B-1井取心段岩心系统观察描述基础上,结合白光和荧光岩心图像扫描等资料,依据典型样品的热解、多温阶热释(解)和有机岩石学分析结果,系统评价了长7³亚段典型岩性的含油性及其赋存形式。研究结果表明:长7³亚段取心段主体是一套优质烃源层系,处于主生油窗早期阶段,黑色纹层状页岩、层状泥岩含油性好但以束缚油为主,油饱和指数 OSI 平均为 45 mg/g($n=116$),含油级别主要属中含油,不具页岩油潜力;灰褐色纹层状、薄层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层含油性好,并以游离油为主,有运移油贡献,主要赋存于微裂缝与碎屑矿物的粒间孔和粒缘缝中,油饱和指数 OSI 平均为 200 mg/g($n=28$),具有页岩油潜力。彬长区块伊陕斜坡范围区长7³亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层是页岩勘探的有利层段,具有一定页岩油勘探前景。

关键词:含油性;延长组;页岩油;彬长区块;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3rd sub-member of the Triassic Chang 7 member in Binchang block, southwestern Ordos Basin

Li Zhiming^{1,2,3}, Tao Guoliang^{1,2,3}, Li Maowen^{1,2,3}, Qian Menhui^{1,2,3}, Xie Xiaomin^{1,2,3}, Jiang Qigui^{1,2,3},
Liu Peng^{1,2,3}, Bao Yunjie^{1,2,3}, Xia Dongling⁴

(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. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: To discuss the prospecting potential of shale oil in the 3rd sub-member of the Triassic Chang 7 member (Chang 7³) in Binchang block, southwestern Ordos Basin, the oil content and oil occurrence of typical rock types in Well B-1 were systematically observed and evaluated based on systematic observation and description of cores and using the results of Rock-Eval pyrolysis, thermovaporization in different temperature ranges and organic petrological analysis in combination with scanned images of cores with white light and fluorescence. The results show that the cored interval in Chang 7³ from Well B-1 is quality source rock at early stage of major oil window. The black laminated shale and layered mudstone are characterized by high oil content but dominance of immobile oil, and the average OSI is 45 mg/g ($n=116$), indicating no prospecting potential for shale oil. Whereas, the gray-brown laminated, thin-bedded and massive tuff and the interbedded tuffaceous (argillaceous) siltstone are characterized by high oil content, predominance of free oil and contributions from migrated oil. The oil mainly occurs in microfractures, intergranular pores and grain boundary fractures of detrital minerals, and its average OSI is 200 mg/g ($n=28$), indicating good prospecting potential for shale oil. In conclusion, the gray-brown tuff and the interbedded tuffaceous (argillaceous) siltstone on the Yishan slope in Binchang block are favora-

收稿日期:2019-01-20;修订日期:2019-03-11。

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)。

ble intervals for shale oil exploration and have some shale oil prospecting potential.

Key words: oil content, Yanchang Formation, shale oil, Binchang block, Ordos Basin

世界石油工业正在从常规油气向非常规油气跨越^[1]。美国凭借非常规油气的大规模商业化开发,已成功摆脱了原油主要依赖进口的局面,向实现能源独立的目标迈进。中国鄂尔多斯盆地凭借非常规油气资源尤其致密油勘探开发的快速发展,其年产油气当量已超过松辽盆地而成为中国最大的油气生产基地。鄂尔多斯盆地的致密油资源主要分布在湖盆中部三叠系延长组7段中上部(长7¹亚段和长7²亚段)致密砂岩储层(孔隙度6%~12%,渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)^[2-3],2014年探明了中国第一个亿吨级大型致密油油田—新安边油田,近年已建设4个工业先导试验区^[2,4-5],已形成姬塬、华庆、安塞和镇原—合水4个探明地质储量 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 级整装含油富集区^[2]。同时,已有多口钻井在长7段烃源岩层(长7³亚段)中获工业油流,预示着长7段也有较大的页岩油勘探前景^[6]。长7段致密油主力产区分布于盆地中南部,范围北起陕西定边县、南抵甘肃正宁县、西至甘肃环县、东至陕西延安,面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[5]。区内获工业页岩油油流的井则主要分布于长7³亚段底界埋深超过2100 m、有机质热成熟度 R_o 大于0.85%的区域,与致密油主要发育的核心区一致。经典的页岩油定义是指赋存于富有机质页岩(泥岩)或与之密切共生的贫有机质岩相如碳酸盐岩、粉砂岩或砂岩等薄层内,通过非常规技术可采出的石油资源^[7]。就鄂尔多斯盆地而言,可以将页岩油定义为长7段湖相页岩层内的油气聚集,储集层以黑色富有机质页岩为主,同时包括不能单独作为油藏单元开发的单个或多个薄砂岩夹层,属典型的源内油藏^[8]。因此,鄂尔多斯盆地页岩油勘探的重点目标层系为长7³亚段烃源层系。

中国石化在鄂尔多斯盆地南部拥有镇泾、彬长、旬宜和富县4个勘探区块,总面积约 $1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。据全国第三次资源评价成果,探区内石油资源量为 $10.71 \times 10^8 \text{ t}$,探明率仅2.36%,已发现的油层主要分布在延长组的长2段、长4+5段、长6段、长8段和长9段,原油主要源自长7³亚段油页岩^[9-11],同时长7段中上部本身也已成为鄂尔多斯盆地南部致密油勘探的重点突破层^[12],但对于鄂尔多斯盆地西南部长7³亚段烃源层系是否具有页岩油勘探潜力尚无系统评价。为此,本文以位于正宁县西南12 km处(中国石化彬长区块东北部)的B-1井长7³亚段取心段为例,在系统剖析取心段含油性及其赋存形式特征基础上,结合前人研究成果,探讨评价鄂尔多斯盆地西南部彬长区块长7³亚段页岩油勘探

前景,旨在为鄂尔多斯盆地西南部页岩油勘探决策提供依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通盆地的西南部,是在华北地台基础上发展演化形成的,在古老的变质岩基底上大范围接受沉积的时间长达400~500 Ma。期间经历加里东构造运动晚期、印支构造运动晚期和燕山构造运动晚期等多次大的抬升作用,造成了多个区域沉积间断,构成了不同时代盆地的叠加、复合,为多重叠合型盆地^[2]。其中,晚三叠世时期,华北陆块与扬子陆块碰撞拼接,受秦岭造山活动的影响,在华北陆块西南部的鄂尔多斯地区形成了大型陆相湖盆^[13]。区域探井揭示上三叠统为鄂尔多斯盆地主要的含油层,根据沉积特征自下而上可进一步分为长10段—长1段,其中长10段—长7段沉积期,为湖盆形成到发展的湖进期,至长7段沉积期湖盆演化达到全盛^[8]。扬子与华北陆块碰撞、秦岭造山的区域构造活动的活跃是引起长7段最大湖泛的主要动力因素,为优质烃源岩发育提供了基本的地质条件,同期频繁的火山喷发活动与湖底热液活动等共同促进了优质烃源岩的大规模发育^[14]。长7段自下而上可分为3个小层,即长7³亚段主要为黑色油页岩,长7²亚段以暗色泥岩为主,夹薄层粉—细砂岩,长7¹亚段发育暗色泥岩和中—薄层细砂岩^[15],其中长7³亚段既是鄂尔多斯盆地主力优质烃源层,同时也是凝灰岩最发育的层段^[16-17],此外盆地南部发育浊积岩、震积岩及同沉积构造变形^[18]。鄂尔多斯盆地现今构造形态总体显示为东翼宽缓、西翼狭窄的不对称盆地。盆地边缘断裂褶皱较为发育,而盆地内部构造为一个平缓西倾的单斜,地层倾角一般不足1°,局部发育低幅鼻隆构造^[19]。

研究区彬长区块位于鄂尔多斯盆地西南部,南北横跨鄂尔多斯盆地渭北隆起与伊陕斜坡两个构造单元,主体属于伊陕斜坡区,剖析井B-1井位于彬长区块的东北部,属伊陕斜坡区(图1)。研究表明,早白垩世末之前渭北隆起应为大型鄂尔多斯盆地的一部分,整体以沉降沉积为主,晚白垩世渭北地区整体抬升主要受控于秦岭造山带中晚燕山期的抬升过程;始新世—渐新世以来的断块翘倾作用阶段,与秦岭造山带始新世以来的快速隆升以及渭河盆地新生代的快速断

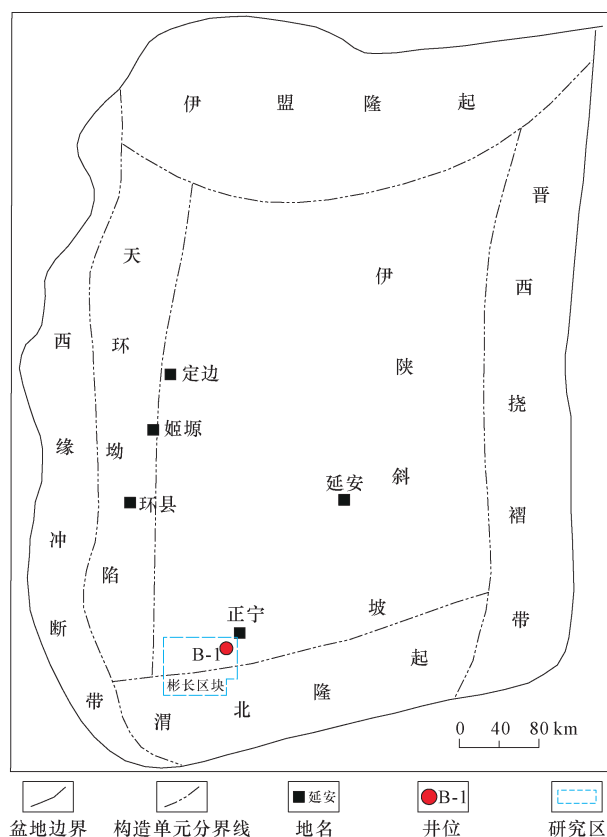


图1 鄂尔多斯盆地构造单元及研究区位置

Fig. 1 The locations of structural units in Ordos Basin and the study area

陷作用有关^[20];彬长地区长7段中上部(长7¹⁻²亚段)有效烃源岩单井平均厚度达到10.7 m,优质烃源岩单井平均厚度达3.5 m,长7底部(长7³亚段)有效烃源岩单井平均厚度达14.6 m,优质烃源岩单井平均厚度达12.6 m^[20],现今长7段底界埋深900~1 550 m^[21],成熟度 R_o (镜质体反射率)值主要介于0.50%~0.75%,普遍小于0.70%^[22-23],处于主生油阶段的早期。

2 B-1井长7段取心段含油性与赋存形式特征

2.1 层位归属、样品采集与分析测试方法

B-1井是中国石化华北油气分公司在鄂南地区针对古生界油气评价部署的一口探井,为兼顾探索评价彬长地区延长组张家滩页岩(长7³亚段)的页岩油勘探潜力,B-1井专门在延长组取了2筒岩心,取心段深度1 433.67~1 451.58 m,取心长度17.91 m。取心段岩心低温剖切、洗磨处理以及白光和荧光岩心图像扫描、伽马能谱分析在中国石化胜利油田分公司岩心库完成。已有的研究资料^[6,12,24]表明相对长7²亚段

和长8段而言,长7³亚段具有高自然伽马(且变化剧烈)、高声波时差、高感应电阻率和低密度的特征。因此,本文依据B-1井取心段测井资料、伽马能谱测定结果,结合白光和荧光岩心图像扫描和岩心观察结果,对取心段岩心层位归属进行了厘定,将1 433.67~1 447.72 m取心段归属于长7³亚段,岩性以黑色纹层状页岩、层状泥岩夹灰褐色纹层状、薄层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩为主,其中长7³亚段中上部(1 433.56~1 444.11 m)以黑色纹层状页岩、层状泥岩夹灰褐色纹层状、薄层状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩为主,而长7³亚段下部(1 444.11~1 447.72 m)则以黑色纹层状页岩、层状泥岩与灰褐色薄层状、块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩互层为特征。根据岩心精细观察统计结果,黑色纹层状页岩、层状泥岩累计厚度14.30 m,灰褐色薄层状、块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩累计厚度3.61 m。将1 447.72~1 451.58 m取心段归属于长8段,岩性以浅灰、浅灰白色层状泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和块状粉砂岩为特征(图2)。

为系统评价B-1井长7段取心段的含油性及其赋存形式特征,在对取心段岩心系统观察描述基础上,结合白光和荧光岩心图像扫描等资料,采集典型样品151件,对采集样品全部开展了热解与多温阶热释(解)分析,对部分典型样品开展了有机岩石学等分析,分析测试均在中国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。

2.2 有机地球化学基础参数特征

B-1井长7³亚段取心段和长8段取心段典型样品的热解分析结果(表1;图3)显示,长8段取心段整体为非烃源层,而长7³亚段取心段主体是一套优质烃源层系,尤其是长7³段中上部层段,有机质类型属II₁。

受黑色纹层状页岩、层状泥岩与灰褐色纹层、层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩频繁互层产出的影响,其 TOC 、 S_1 、 S_2 、 HI (氢指数= $S_2 \times 100/TOC$)、 PI (产率指数= $S_1/(S_1 + S_2)$)、 OSI (油饱和指数= $S_1 \times 100/TOC$)以及 T_{max} 等有机地球化学基础参数呈现显著的非均质性特征(图3)。其中长7³亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩的 TOC 含量介于0.06%~39.89%,平均为17.41%($n=116$); S_1 介于0~15.33 mg/g,平均为7.45 mg/g($n=116$); S_2 介于0.05~198.58 mg/g,平均为87.85 mg/g($n=116$); HI 介于13~609 mg/g,平均为475 mg/g($n=116$); PI 介于0~0.25,平均为0.09($n=116$); OSI 介于0~94 mg/g,平均为45 mg/g

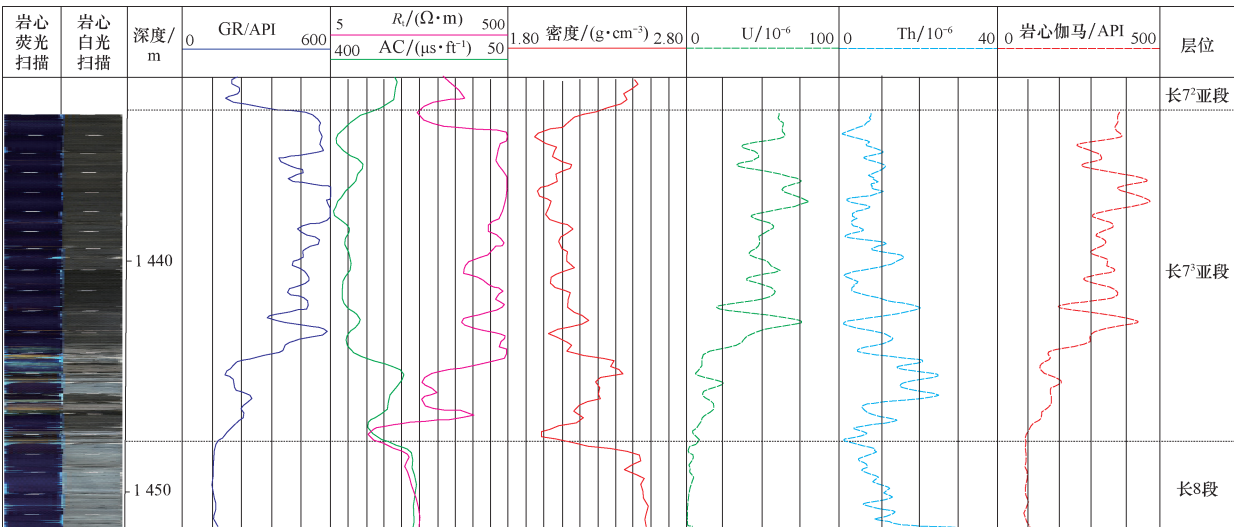


图 2 鄂尔多斯盆地西南部 B-1 井延长组取心段测井曲线与伽马能谱分析结果

Fig. 2 The well logs and gamma spectrometry analysis of the cored interval of Yanchang Formation in Well B-1 ,southwestern Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地西南部 B-1 井延长组取心段有机地球化学基础参数统计结果

Table 1 The statistical list of basic organic geochemical parameters of the cored interval of Yanchang Formation in Well B-1 ,southwestern Ordos Basin

参数	层段/岩性		
	长 7 ³ 亚段/纹层状页岩与层状泥岩	长 7 ³ 亚段/凝灰岩、凝灰质粉砂岩夹层	长 8 段/泥质粉砂岩、粉砂质泥岩
TOC/%	范围	0.06 ~ 39.89	0.96 ~ 7.48
	平均	17.41	4.76
S ₁ /(mg · g ⁻¹)	范围	0 ~ 15.33	1.62 ~ 19.29
	平均	7.45	8.80
S ₂ /(mg · g ⁻¹)	范围	0.05 ~ 198.58	3.75 ~ 40.93
	平均	87.85	24.09
HI/(mg · g ⁻¹)	范围	13 ~ 609	266 ~ 625
	平均	475	486
T _{max} /℃	范围	425 ~ 448	410 ~ 443
	平均	442	435
PI	范围	0 ~ 0.25	0.16 ~ 0.44
	平均	0.09	0.29
OSI/(mg · g ⁻¹)	范围	0 ~ 94	96 ~ 380
	平均	45	200
样品数/件		116	28

($n = 116$); $T_{\max}$ 介于 425 ~ 448 ℃, 平均为 442 ℃ (等效镜质体反射率 $R_{\text{oc}} = 0.72\%$) ($n = 116$), 指示成熟度处于主生油阶段的早期。而长 7³ 亚段灰褐色纹层、层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层的 TOC 含量介于 0.06% ~ 39.89%, 平均为 17.41% ($n = 28$); S_1 介于 0 ~ 15.33 mg/g, 平均为 7.45 mg/g ($n = 28$); S_2 介于 0.05 ~ 198.58 mg/g, 平均为 87.85 mg/g ($n = 28$); HI 介于 13 ~ 609 mg/g, 平均为 475 mg/g ($n = 28$); PI 介于 0 ~ 0.25, 平均为 0.09 ($n = 28$); OSI 介于 0 ~ 94 mg/g, 平均为 45 mg/g ($n = 28$); $T_{\max}$ 介于 410 ~

443 ℃, 平均为 435 ℃ (等效镜质体反射率 $R_{\text{oc}} = 0.50\%$) ($n = 28$) (表 1), 呈现未熟 - 低熟的特征, 与黑色纹层状页岩、层状泥岩成熟度特征不匹配。很显然, 长 7³ 亚段层段中相对贫 TOC、低 S_2 的灰褐色纹层、层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩, 具有相对高的 S_1 , PI , OSI 和相对低的 $T_{\max}$ 值。研究表明运移烃的存在会导致样品的热解 $T_{\max}$ 值抑制^[25-27], B-1 井长 7³ 亚段层段灰褐色纹层、层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩热解 $T_{\max}$ 值相对较低应与运移烃的浸染有关, 并导致 S_1 , PI 和 OSI 值相对高(表 1; 图 3, 图 4)。

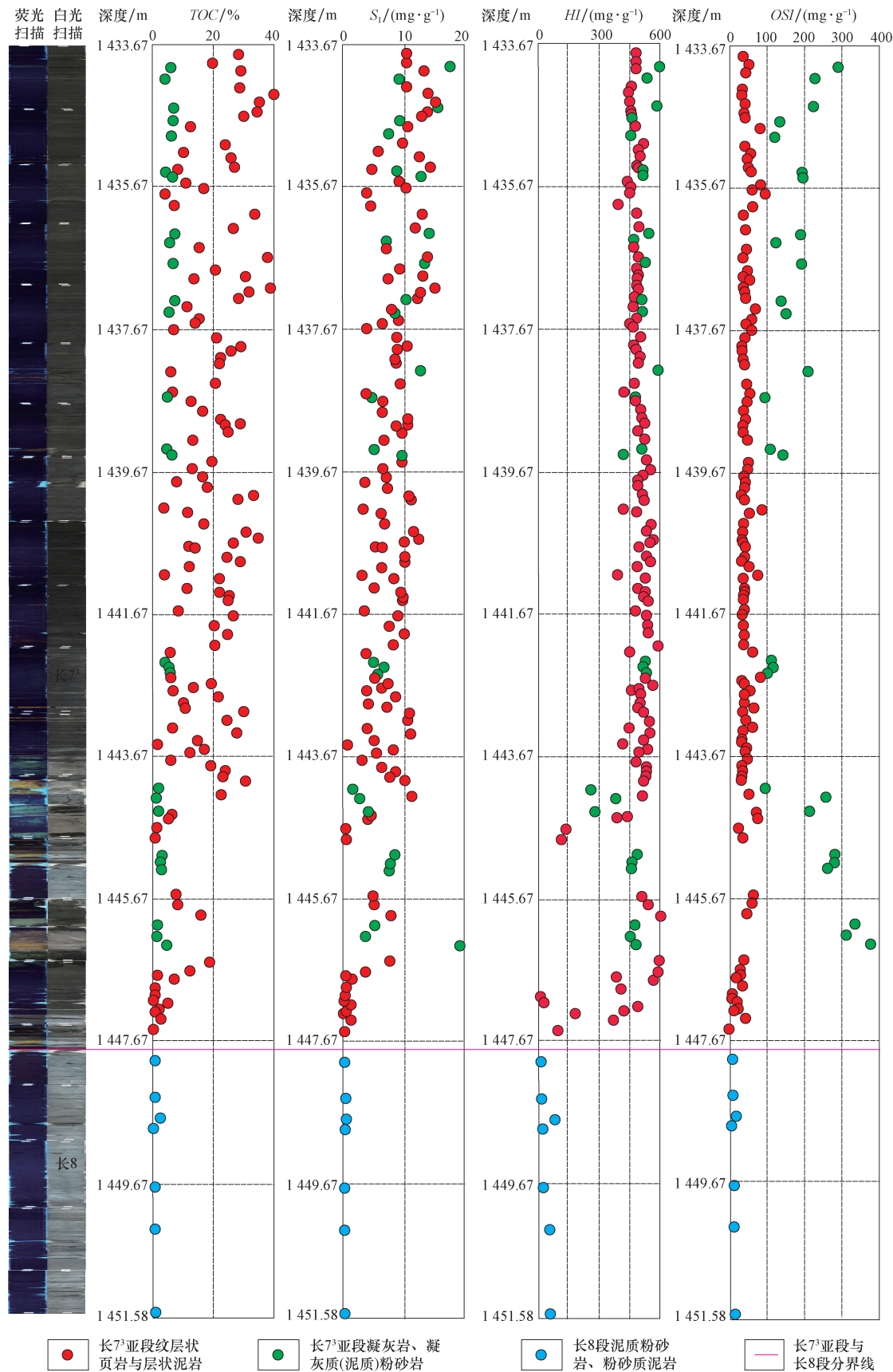


图3 鄂尔多斯盆地西南部B-1井延长组取心段综合地球化学柱状图

Fig. 3 The composite geochemistry column of the cored interval of Yanchang Formation in Well B-1, southwestern Ordos Basin

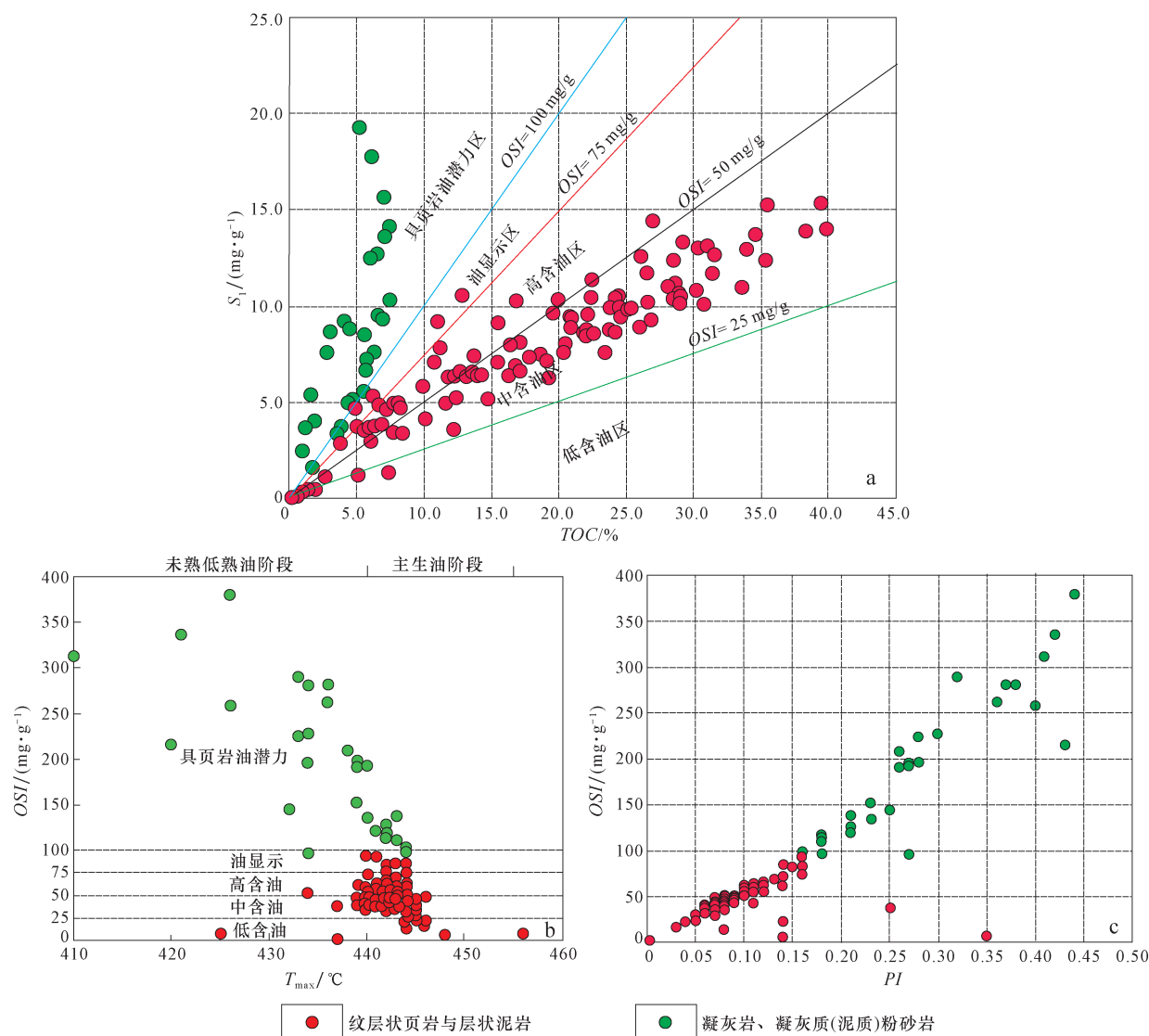


图4 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段取心段TOC-S₁(a), T_{max} -OSI(b)和PI-OSI(c)图解

Fig. 4 The diagrams showing TOC vs. S_1 (a), T_{max} vs. OSI (b), PI vs. OSI (c) for the cored interval of

Chang 7³ in Well B-1, southwestern Ordos Basin

2.3 含油性与赋存形式表征方法

富有机质层系的含油性及其赋存状态特征是制约页岩层系是否具有页岩油勘探前景的关键因素^[28-32]。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^[29],故有机地球化学分析是富有机质层系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)^[27-41] 和多温阶热释(解)法(厘定游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 、束缚油 S_{2-1})(mg/g)^[28-29,40-41] 来实现定量表征,其中多温阶热释(解)法厘定的 S_{1-1} 、 S_{1-2} 和 S_{2-1} 之和与沥青“A”基本相当^[40],与溶剂抽提法相

比具有快速、经济与环保的优势^[29],并且实现了对研究样品中不同赋存形式油与滞留油总量的快速定量表征,为泥页岩层系页岩油有利勘探层段判识提供了依据^[40]。多温阶热释(解)法的理论基础与分析流程、原理详见^[40]。研究认为常规热解 S_1 需要进行轻烃、重烃补偿校正^[36-41],多温阶热释(解)法已经通过提高热释温度来获得游离油 S_{1-2} 、束缚油 S_{2-1} 实现了重烃的补偿;同时,鄂尔多斯盆地长7³亚段典型页岩全组分定量生烃模拟结果揭示在成熟度 R_o 小于0.80%之前,其生成的轻烃量与重烃量比值为0.15左右,轻烃量与总油量(轻烃量+重烃量)比值为0.13^[42],并且Jarvie 2012年研究发现富有机质页岩因致密和基质渗透率极低及有机质的高吸附效应,

其轻烃部分在样品保存与前处理过程中损失很小,而夹层由于具有相对高的基质渗透率,其在样品保存与前处理过程中轻烃容易损失,仅能保留少量的轻质组分^[43]。考虑到不同岩性在样品保存与前处理过程中轻烃损失的复杂性以及研究样品热演化程度较低,故本文在含油性评价中暂且忽略轻烃损失的补偿。

2.4 含油性与赋存形式特征

2.4.1 含油级别

北美页岩油勘探开发实践表明,泥页岩层系的含油饱和指数(*OSI*)大于100 mg/g 层段才具有页岩油勘探潜力^[7],即相对每克有机碳而言,泥页岩中的油满足有机质吸附和互溶后,在孔缝系统中赋存的游离油量大于100 mg^[43]。依据 Jarvie 2012 年提出的油饱和指数 *OSI* 评价泥页岩的含油级别划分方案^[43-44],B-1 井长7³ 亚段取心段含油级别特征如图4a,b 所示。可见,B-1 井长7³ 亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品的含油级别主要属中含油,次为高含油,少量属油显示和低含油,而灰褐色纹层、层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩的典型样品,其含油级别均显示为具页岩油潜力。

2.4.2 含油量与赋存形式

本文重点依据 B-1 井长7³ 亚段取心段典型样品的多温阶热释法分析结果、结合有机岩石学、白光和荧光岩心图像扫描等资料,来分析评价长7³ 亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩与褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层的含油性与不同赋存状态油的含量与相对百分比率(表2,表3)。

长7³ 亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品的多温阶热释法分析结果统计显示,其总油含量介于0.09~67.10 mg/g,平均为31.11 mg/g(*n* = 116)。其中游离油 *S*₁₋₁ 含量介于0~4.61 mg/g,平均为2.33 mg/g(*n* = 116),游离油 *S*₁₋₁ 占总油百分率变化范围介于0~12.29%,均值7.04%(*n* = 116);游离油 *S*₁₋₂ 含量介于0.04~15.30 mg/g,平均为7.02 mg/g(*n* = 116),游离油 *S*₁₋₂ 占总油百分率变化范围介于16.36%~55.56%,均值25.82%(*n* = 116);束缚油 *S*₂₋₁ 含量介于0.03~49.03 mg/g,平均为21.75 mg/g(*n* = 116),束缚油 *S*₂₋₁ 占总油百分率变化范围介于33.33%~81.49%,均值67.14%(*n* = 116)。很显然,长7³ 亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品含油性好,但以束缚油 *S*₂₋₁ 为主。研究表明^[29,40],游离油

表2 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段取心段不同赋存形式油定量结果

Table 2 Quantification of different oil occurrences for the cored interval of Chang 7³ in Well B-1, southwestern Ordos Basin

含油性参数	黑色纹层状页岩、层状泥页岩			褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩		
	变化范围/ (mg·g ⁻¹)	均值/ (mg·g ⁻¹)	统计数	变化范围/ (mg·g ⁻¹)	均值/ (mg·g ⁻¹)	统计数
总油	0.09~67.10	31.11	116	2.84~40.01	19.64	28
游离油 <i>S</i> ₁₋₁	0~4.61	2.33	116	0.06~1.78	0.90	28
游离油 <i>S</i> ₁₋₂	0.04~15.30	7.02	116	1.49~22.44	10.11	28
总游离油	0.04~19.28	9.36	116	1.55~23.76	11.01	28
束缚油 <i>S</i> ₂₋₁	0.03~49.03	21.75	116	1.29~16.32	8.63	28

注:表中 *S*₁₋₁ 是指 200 ℃ 时热释放的成分(主要为轻质油组分),其以游离态赋存;*S*₁₋₂ 是指 200~350 ℃ 热释放出成分(主要为轻-中质油组分),其以游离态赋存;*S*₁₋₁ 和 *S*₁₋₂ 之和为总游离油;*S*₂₋₁ 是指 350~450 ℃ 热释放出的成分(主要重烃、胶质沥青组分,另含少量轻质组分),其与有机质吸附、互溶态和矿物吸附态赋存,即束缚态赋存;总油 = *S*₁₋₁ + *S*₁₋₂ + *S*₂₋₁。定量表征技术与原理等具体见文献[40]。

表3 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段取心段不同赋存形式油占总油百分率

Table 3 Proportions of oil in different occurrences to total oil for the cored interval of Chang 7³ in Well B-1, southwestern Ordos Basin

不同赋存状态油 与总油比率	黑色纹层状页岩、层状泥页岩			褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩		
	变化范围/%	均值/%	统计数	变化范围/%	均值/%	统计数
游离油 <i>S</i> ₁₋₁ /总油	0~12.29	7.04	116	2.11~9.89	4.69	28
游离油 <i>S</i> ₁₋₂ /总油	16.36~55.56	25.82	116	40.28~62.13	51.38	28
总游离油/总油	18.51~66.67	32.86	116	44.29~67.25	56.07	28
束缚油 <i>S</i> ₂₋₁ /总油	33.33~81.49	67.14	116	32.75~55.71	43.93	28

(S_{1-1} 和 S_{1-2})主要赋存于无机矿物基质孔隙和裂缝体系内,一般与 TOC 不具相关性;而束缚油 S_{2-1} 主要赋存于干酪根内及其表面,与 TOC 具有显著正相关性。长 7^3 亚段黑色纹层状页岩、层状泥岩的总油、游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 以及束缚油 S_{2-1} 含量在整个取心段还是米级范围内变化很大,其含量与 TOC 含量相关性分析结果(图5a—d)显示,均与 TOC 含量呈现显著正相关性,表明 TOC 含量直接控制着黑色纹层状页岩、层状泥岩的总油、游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 以及束缚油 S_{2-1} 含量,同时暗示干酪根/生油母质生成的油满足自吸附-互溶后排至无机矿物基质孔隙和裂缝体系内的游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 没有真正“远离”生油母质,就近以游离态赋存了。有机岩石学分析结果显示,黑色纹层状页岩和层状泥岩中生烃母质层状藻类体与赋存于微裂隙中富氢次生组分(油)紧邻出现(图6),这与游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 与 TOC 呈现显著正相关相吻合。

长 7^3 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品的多温阶热释法分析结果统计显示,其总油含量介于 $2.84 \sim 40.01$ mg/g,平均为 19.64 mg/g($n=28$)。其中游离油 S_{1-1} 含量介于 $0.06 \sim 1.78$ mg/g,平均为 0.90 mg/g($n=28$),游离油 S_{1-1} 占总油百分率变化范围介于 $2.11\% \sim 9.89\%$,均值 4.69% ($n=28$);游离油 S_{1-2} 含量介于 $1.49 \sim 22.44$ mg/g,平均为 10.11 mg/g($n=28$),游离油 S_{1-2} 占总油百分率变化范围介于 $40.28\% \sim 62.13\%$,均值 51.38% ($n=28$);束缚油 S_{2-1} 含量介于 $1.29 \sim 16.32$ mg/g,平均为 8.63 mg/g($n=28$),束缚油 S_{2-1} 占总油百分率变化范围介于 $32.75\% \sim 55.71\%$,均值 43.93% ($n=28$)。可见,长 7^3 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品含油性也高,并以游离油为主,其中游离油 S_{1-2} 含量明显大于黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品的游离油 S_{1-2} 含量,但游离油 S_{1-1} 含量和束缚油 S_{2-1} 含量则低于黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品的游离油 S_{1-1} 含量和束缚油 S_{2-1} 的含量。长 7^3 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品的总油、游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 以及束缚油 S_{2-1} 含量同样变化范围大,其含量与 TOC 含量相关性分析结果(图5e—h)显示,束缚油 S_{2-1} 含量与 TOC 含量呈现明显正相关性,而游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 含量与 TOC 含量间均呈弱正相关性。长 7^3 亚段取心段典型样品的游离油 S_{1-1} 、游离油 S_{1-2} 和束缚油 S_{2-1} 含量与 TOC 含量相关性分析结果显示,游离油 S_{1-1} 和束缚油 S_{2-1} 含量与 TOC 含量间仍旧呈现显著正相关性,而游离油 S_{1-2} 含量与 TOC 含量间图解显示复杂的关系,

一部分样品呈现正常的显著正相关,而在 TOC 含量低于 8.00% 时,部分样品出现异常高的游离油 S_{1-2} 含量而偏离正常的游离油 $S_{1-2} - TOC$ 线性回归趋势线,而前面对长 7^3 段取心段有机地球化学基础参数分析表明其有机质类型均属 II_1 ,并且成熟度一致,生烃能力也应基本一致。因此,结合图4、图5以及表2可见,高异常样品均为褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品,这应与褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层较黑色纹层状页岩和层状泥岩具有相对好的孔、渗条件导致有运移油的浸染作用有关。但游离油 S_{1-1} 因以轻质油组分为主,在样品保存与前处理过程中因轻烃的损失,导致运移油贡献的作用体现微弱(图5)。岩心观察、白光和荧光岩心图像扫描以及典型样品的有机岩石学显微分析结果显示,长 7^3 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层的游离油主要赋存于微裂缝系统以及碎屑矿物粒间孔隙与粒缘缝内(图6,图7),岩心前处理现场工作中发现岩心剖切3天后还可见油沿微裂缝和微孔隙系统呈气泡状缓慢渗出,反映轻质油组分仍在挥发损失。因此,对于长 7^3 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品的含油量尤其游离油 S_{1-1} 分析结果应是相对最低值,在地下原地轻质组分的含量应比实测值更高。同时,对比图5d和图5h可见,在相同有机碳含量情况下,黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品的束缚油 S_{2-1} 的含量较褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品束缚油 S_{2-1} 的含量明显低。 II 型干酪根不同演化阶段留烃能力模拟结果表明,随着热演化程度的增高,其留烃能力逐渐降低,当 R_o 为 0.72% 左右时,其留烃量在 120 mg/g^[45],与黑色纹层状页岩、层状泥岩典型样品束缚油 S_{2-1} 含量 125 mg/g相吻合,进一步印证了热释 S_{2-1} 归属于束缚油的合理性;而褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层典型样品的束缚油 S_{2-1} 含量则达 181 mg/g,这可能因运移油中的重烃、沥青质等组分加入所致。

3 彬长区块页岩油勘探前景探讨

彬长区块内构造不发育,三叠系总体构造面貌表现为东南高西北低,地层倾角仅 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的单斜。本区南部处于渭北隆起,中侏罗世末期早燕山运动使该区域下白垩统甚至侏罗系遭受不同程度剥蚀,延长组埋深变浅,局部地区只残留长7段—长9段,南部地区断裂和微裂缝发育,导致油气容易散失,保存条件不利,并且长 7^3 亚段富有机质页岩、泥岩的成熟度 R_o 小于 0.70% 。彬长区块东北部B-1井长 7^3 亚段取心含油

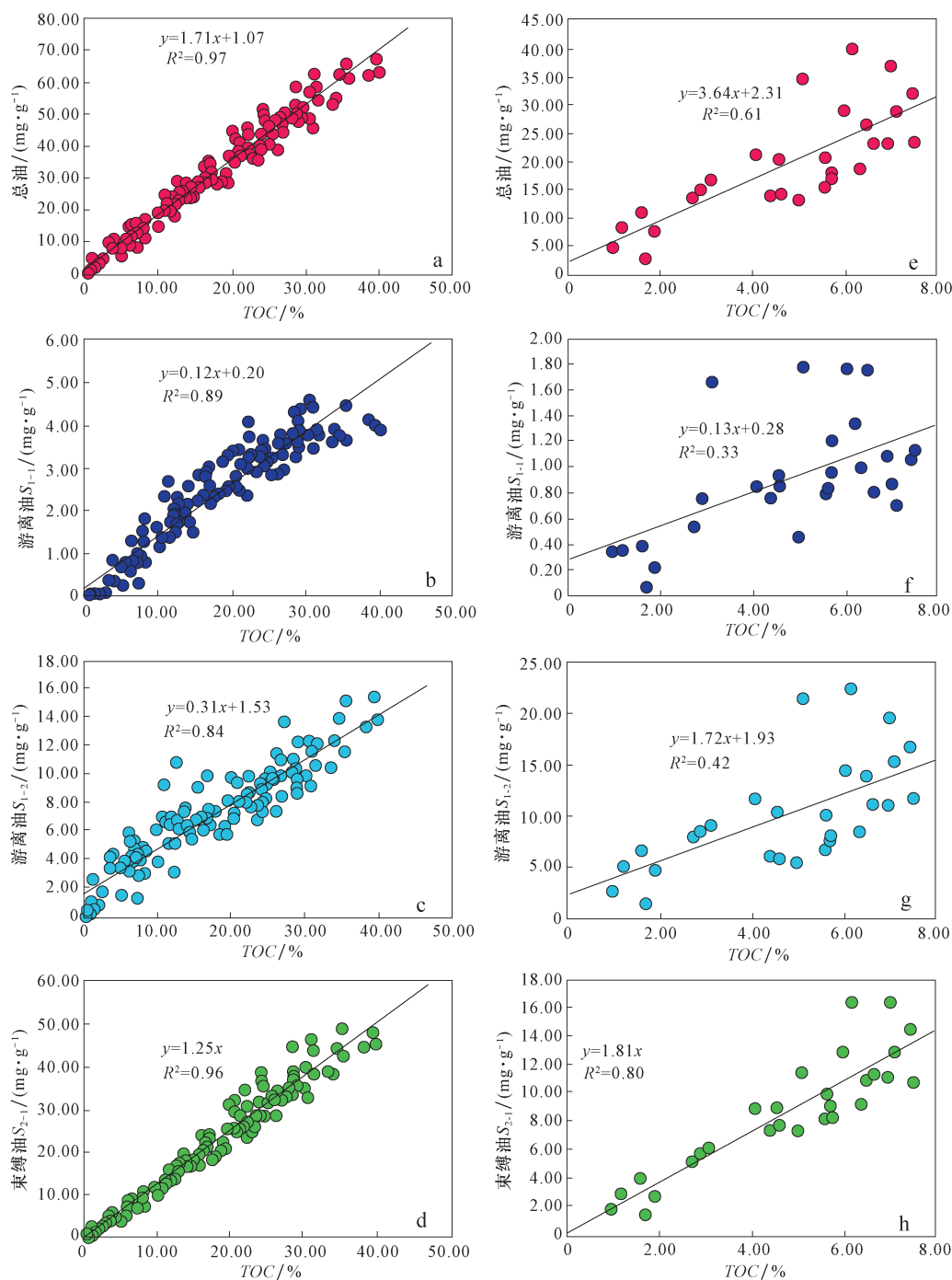


图5 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段取心段典型岩石类型总油与不同赋存形式油含量和有机碳含量关系

Fig. 5 Total oil contents vs. oil in different occurrences and TOC of typical lithologic types for the cored interval of Chang 7³ in Well B-1, southwestern Ordos Basin

a. 黑色纹层状页岩、层状泥岩总油 - TOC 图解; b. 黑色纹层状页岩、层状泥岩游离油 S_{1-1} - TOC 图解; c. 黑色纹层状页岩、层状泥岩游离油 S_{1-2} - TOC 图解; d. 黑色纹层状页岩、层状泥岩束缚油 S_{2-1} - TOC 图解; e. 褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩总油 - TOC 图解; f. 褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩游离油 S_{1-1} - TOC 图解; g. 褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩游离油 S_{1-2} - TOC 图解; h. 褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩束缚油 S_{2-1} - TOC 图解

性与赋存形式等剖析结果表明,富有机质黑色纹层状页岩、层状泥岩滞留油含量高,但受热演化程度较低(处于主生油窗早期阶段)的影响,其滞留油以束缚态(与干酪根互溶-吸附为主)形式赋存为主。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

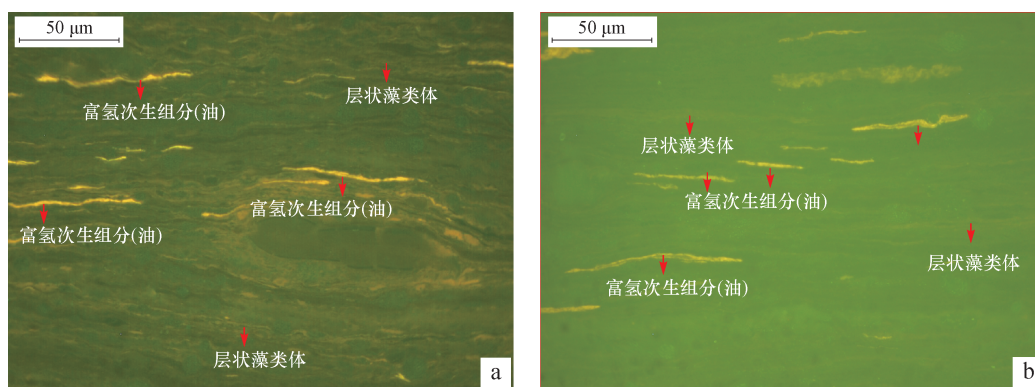


图6 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段取心段黑色纹层状页岩和层状泥岩有机岩石分析显微照片
Fig.6 Photomicrographs showing the organic petrological analysis of black laminated shale and layered mudstone for

the cored interval of Chang 7³ in Well B-1, southwestern Ordos Basin

a. 埋深1 433.8 m 黑色纹层状页岩中富氢次生组分(油)与层状藻类体分布特征;

b. 埋深1 436.66 m 黑色层状泥岩中富氢次生组分(油)与层状藻类体分布特征

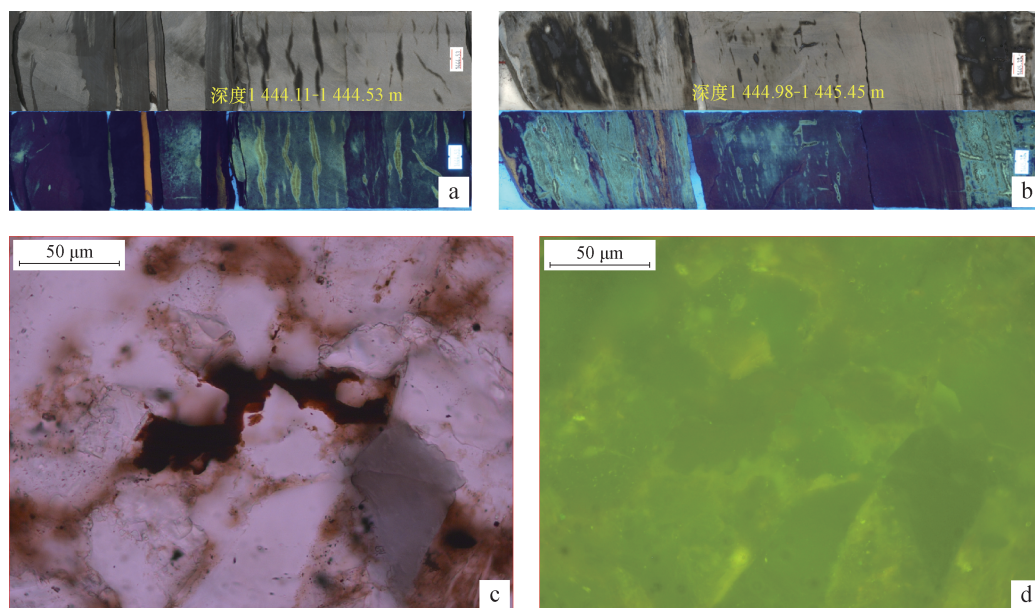


图7 鄂尔多斯盆地西南部B-1井长7³亚段埋深1 444.11~1 444.53 m和埋深1 444.98~1 444.45 m取心段白光
(a和b上部)和荧光扫描图像(a和b下部)以及埋深1 446.75 m油斑粉砂岩单偏光(c)和荧光(d)显微照片

Fig.7 Scanning images of white light(the upper part of a and b) and fluorescence(the lower part of a and b) for the cored interval of Chang 7³ at a depth ranging from 1 444.11 to 1 444.53 m and from 1 444.98 to 1 445.45 m, as well as photomicrographs of plain light(c) and fluorescence(d) for oil-stained siltstone at a depth of 1 446.75 m from Well B-1, southwestern Ordos Basin

力影响很小^①。同时,富有机质黑色纹层状页岩、层状泥岩油饱和指数 OSI 低,平均仅为 45 mg/g ($n=116$),预示不具备页岩油潜力。但褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层,受运移油贡献的影响其不仅油饱和指数 OSI 高,平均为 200 mg/g ($n=28$),具有页岩油潜力,并且滞留油以游离态赋存的油为主,主要赋存于微裂缝系统以及碎屑矿物粒间孔隙与粒缘缝内。常规热

解游离油 S_1 平均高达 8.80 mg/g ($n=28$),远高于取得商业开发的北美 Williston 盆地 Bakken 组中段典型样品常规热解游离油 S_1 平均 2.00 mg/g ^[7,43-44,46];多温阶热释游离油 S_{1-1} 含量平均为 0.90 mg/g ($n=28$)(未考虑轻烃恢复)、游离油 S_{1-2} 含量平均为 10.11 mg/g ($n=28$)、总游离油含量平均为 11.01 mg/g ($n=28$),

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.

也高于获工业页岩油产量的济阳坳陷沾化凹陷 XY59 井沙河街组三段下亚段取心段典型样品的相应平均值^[29,41]。尽管 B-1 井揭示长 7³ 亚段灰褐色薄层状、块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩累计厚度为 3.61 m (厚度大于 1.0 cm 的夹层的统计结果),但区块北部泾河油田长 7³ 亚段底部凝灰岩层自西南向东北逐渐增厚,最厚可达 8.00 m 以上,一般在 2.00 ~ 6.00 m,并在多口井具有好的油气显示、FMI 显示裂缝发育^①。因此,据 B-1 井长 7³ 亚段的含油性与赋存形式剖析结果以及彬长区块长 7³ 亚段的成熟度特征等综合分析,彬长区块伊陕斜坡范围区长 7³ 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层是页岩勘探的有利层段,具有一定页岩油勘探前景,可以在勘探开发长 8 段等致密油的同时,兼顾长 7³ 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层页岩油的勘探开发。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地西南部 B-1 井长 7³ 亚段取心段主体是一套优质烃源层系,处于主生油窗早期阶段,其中黑色纹层状页岩、层状泥岩含油性好,但以束缚油为主,油饱和指数 OSI 平均为 45 mg/g($n=116$),含油级别主要属中含油,不具页岩油潜力;灰褐色纹层状、薄层状及块状凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层含油性好,并以游离油为主,有运移油的贡献,主要赋存于微裂缝与碎屑矿物的粒间孔和粒缘缝中,油饱和指数 OSI 平均为 200 mg/g($n=28$),具有页岩油潜力。

2) 彬长区块伊陕斜坡范围区长 7³ 亚段褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层是页岩油勘探的有利层段,具有一定页岩油勘探前景,可以在勘探开发长 8 段等致密油的同时,兼顾长 7³ 亚段相对贫有机质的褐灰色凝灰岩、凝灰质(泥质)粉砂岩夹层页岩油的勘探开发。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):14-26.
- [2] 杨智,付金华,郭秋麟,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. 中国石油勘探,2017,22(6):9-15.
Yang Zhi, Fu Jinhua, Guo Qiulin, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9-15.
- [3] 杨华,李士祥,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报,2013,34(1):1-11.
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):1-11.
- [4] 付金华,喻建,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J]. 中国石油勘探,2015,20(5):9-19.
Fu Jinhua, Yu Jian, Xu Liming, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos basin and main controlling factors of large-scale enrichment and exploitable capacity [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 9-19.
- [5] 张忠义,陈世加,杨华,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段致密油成藏机理[J]. 石油勘探与开发,2016,43(4):590-599.
Zhang Zhongyi, Chen Shijia, Yang Hua, et al. Tight oil accumulation mechanisms of Triassic Yanchang Formation Chang 7 member, Ordos basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(4):590-599.
- [6] 杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油勘探潜力石油勘探与开发,2016,43(4):511-520.
Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(4):511-520.
- [7] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—Shale-oil resource systems [C] // Breyer J. Shale reservoirs: Giant resources for 21st century. AAPG Memoir, 2012:89-119.
- [8] 张文正,杨华,彭平安,等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响[J]. 地球化学, 2009, 38(6): 573-582.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Pingan, et al. The influence of Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [9] 张海林,邓南涛,张枝焕,等. 鄂尔多斯盆地南部中生界原油地球化学特征及油源分析[J]. 高校地质学报,2014,20(2):309-316.
Zhang Hailin, Deng Nantao, Zhang Zhihuan, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of the Mesozoic crude oils in the Southern Ordos Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2014,20(2):309-316.
- [10] 邓南涛,张枝焕,鲍志东,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组有效烃源岩地球化学特征及其识别标志[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(2):135-144.
Deng Nantao, Zhang Zhihuan, Bao Zhidong, et al. Geochemical features and identification markers for efficient source rocks of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013,37(2):135-144.
- [11] 邓南涛,张枝焕,王付斌,等. 鄂尔多斯盆地南部镇泾地区中生界原油地球化学特征及油源分析[J]. 天然气地球科学,2013,

① 刘传喜. 中西部盆地页岩油勘探开发目标评价[R]. 中国石化石油勘探开发研究院,2018.

- 24(3):604-611.
- Deng Nantao, Zhang Zhihuan, Wang Fubin, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of crude oils in the Zhenjing area, southern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3):604-611.
- [12] 万旻璐, 过敏, 李仲东, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘彬长地区延长组长7致密油成藏条件及控制因素[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(1):14-22.
- Wan Yanlu, Guo Min, Li Zhongdong, et al. Accumulation conditions and controlling factors of Chang 7 tight oil in Yanchang Formation, Binchang region, southwest of Ordos basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2017, 32(1):14-22.
- [13] 林森虎, 袁选俊, 杨智. 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3):517-523.
- Lin Senhu, Yuan Xuanjun, Yang Zhi. Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7th member of Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3):517-523.
- [14] 刘福田, 李荣西, 左智峰, 等. 鄂尔多斯盆地南部地区上三叠统延长组6段地层水成因及其油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6):1179-1189.
- Liu Futian, Li Rongxi, Zuo Zhifeng, et al. Genesis of formation water in the 6th member of the Upper Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin and its petroleum significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6):1179-1189.
- [15] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 湖相泥岩、页岩的沉积环境和特征对比——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3):531-540.
- Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. Depositional environment and characteristics comparison between lacustrine mudstone and shale: A case study from the Chang 7 Member of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3):531-540.
- [16] 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 等. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(6):1138-1146.
- Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Li Yuanhao, et al. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6):1138-1146.
- [17] 王建强, 刘池洋, 李行, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长7段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(4):691-704.
- Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Li Hang, et al. Geochronology, potential source and regional implication of tuff intervals in Chang-7 Member of Yanchang Formation, South of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4):691-704.
- [18] 邱欣卫, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世深湖区同沉积变形构造特征及成因[J]. 地质科学, 2013, 48(1):204-216.
- Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Triggers and characteristics of late Triassic deep-lacustrine synsedimentary deformation structures in Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(1):204-216.
- [19] 葛云锦, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地富县—甘泉地区三叠系延长组7油层组致密油富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6):1190-1200.
- Ge Yunjin, Ren Laiyi, He Yonghong, et al. Main factors controlling the tight oil enrichment in the 7th oil layer group of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian-Ganquan area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6):1190-1200.
- [20] 肖晖, 李建新, 韩伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中生代构造抬升及演化[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5):576-582.
- Xiao Hui, Li Jianxin, Han Wei, et al. The tectonic uplift time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south edge of Ordos Basin [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2013, 33(5):576-582.
- [21] 邓南涛, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组有效烃源岩分布规律研究[J]. 非常规油气, 2015, 2(1):28-34.
- Deng Nantao, Ren Laiyi, He Yonghong, et al. Distribution regulation of effective source rock of Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(1):28-34.
- [22] 白玉彬, 赵靖舟, 方朝强, 等. 优质烃源岩对鄂尔多斯盆地延长组石油聚集的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 27(2):1-5.
- Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, et al. Control effect of high-quality source rocks on petroleum accumulation in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2012, 27(2):1-5.
- [23] 黄振凯, 刘全有, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1):513-521, 600.
- Huang Zhenkai, Liu Quanyou, Li Maowen, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1):513-521, 600.
- [24] 马瑜, 周世新, 陶辉飞, 等. 鄂尔多斯盆地南部长7页岩沉积特征和有机质富集因素研究[J]. 地质科学, 2017, 52(1):106-122.
- Ma Yu, Zhou Shixin, Tao Huifei, et al. Sedimentary characteristic and organic matter enrichment factors of the Chang-7 section shale of Yanchang formation in the south of Ordos basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2017, 52(1):106-122.
- [25] Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis [J]. *AAPG. Bulletin*, 1986, 70(3):318-329.
- [26] Snowdon L R. Rock-Eval Tmax suppression: documentation and amelioration [J]. *AAPG. Bulletin*, 1995, 79(9):1337-1348.
- [27] Li Maowen, Chen Zhouheng, Cao Tingting, et al. Expelled oils and their impacts on Rock-Eval data interpretation, Eocene Qianjiang Formation in Jiangnan Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 191:37-48.
- [28] 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(3):448-457.
- 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(3):448-457.

- [29] 李志明,刘鹏,钱门辉,等.湖相泥页岩不同赋存状态油定量对比—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.
- [30] Zink K G, Scheeder G, Stueck H L, et al. Total shale oil inventory from an extended Rock-Eval approach on non-extracted and extracted source rocks from Germany [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 163: 186–194.
- [31] Abrams M A, Gong G, Garnier C, et al. A new thermal extraction protocol to evaluate liquid rich unconventional oil in place and in-situ fluid chemistry[J]. Marine Petroleum Geology, 2017, 88: 659–675.
- [32] Li Maowen, Chen Zhuoheng, Ma Xiaoxiao, et al. A numerical method for calculating total oil yield using a single routine Rock-Eval program: A case study of the Eocene Shahejie Formation in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 191: 49–65.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 朱日房,张林峰,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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 李志明,陶国亮,黎茂稳,等.渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷L69井取心段页岩油勘探有利层段探讨[J].石油与天然气地质,2019,40(2):236–247.
Li Zhiming, Tao Guoliang, Li Maowen, et al. Favorable interval for shale oil prospecting in coring Well L69 in Zhonghua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 236–247.
- [42] 王强,彭平安,张文正,等.鄂尔多斯盆地延长组7段页岩全组分定量生烃模拟及原油可动性评价[J].石油学报,2018,39(5):541–553.
Wang Qiang, Peng Pingan, Zhang Wenzheng, et al. Quantitative full-component hydrocarbon generating simulation and crude oil mobility evaluation of shale in 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 541–553.
- [43] 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. Wuxi: Sinopec Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, 2012, 8–9.
- [44] 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.
- [45] 颜永何,邹艳荣,屈振亚,等.东营凹陷沙四段烃源岩留—排烃量的实验研究[J].地球化学,2015,44(1):79–86.
Yan Yonghe, Zou Yanrong, Qu Zhenya, et al. Experimental Study on Hydrocarbon Retention-Expulsion of Es4 Formation Source Rock in the Dongying Depression[J]. Geochimica, 2015, 44(1): 79–86.
- [46] Jarvie D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems [J]. Geologica Acta, 2014, 12(4): 307–325.