

# 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩生烃演化特征

高波<sup>1,2,3</sup>, 武晓玲<sup>3</sup>, 张英<sup>3</sup>, 陈新军<sup>3</sup>, 边瑞康<sup>1,2,3</sup>, 李倩文<sup>3</sup>

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083;

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:**鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组张家滩油页岩不仅是重要的固体矿产资源,也是该盆地三叠系油气的主力烃源岩。对张家滩油页岩典型露头剖面、钻井岩心进行有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”及族组分、含油率等相关测试分析表明,张家滩油页岩有机质丰度高,TOC介于5.11%~36.47%,平均16.15%,生烃潜量( $S_0+S_1+S_2$ )介于16.58~230.98 mg/g,平均94.20 mg/g,氯仿沥青“A”介于0.42%~2.22%之间,平均1.25%,属于生烃条件极好的优质烃源岩;含油率高,介于3.52%~14.6%之间,平均8.16%,属于中高品质的油页岩;干酪根类型以I—II<sub>1</sub>型为主, $R_o$ 介于0.43%~1.09%。综合利用野外露头剖面和钻井岩心样品,建立了盆地南部张家滩油页岩的热演化剖面,分析了氯仿抽提前、后油页岩的含油率变化及油页岩热演化过程中含油率、热解烃产物的变化特征,揭示鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩具有聚集油页岩、页岩油两类资源的潜力,提出了相应的勘探开发对策。

**关键词:**热演化;页岩油;张家滩油页岩;延长组;上三叠统;鄂尔多斯盆地南部

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

## Hydrocarbon generation and evolution characteristics of Triassic Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

GAO Bo<sup>1,2,3</sup>, WU Xiaoling<sup>3</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>, CHEN Xinjun<sup>3</sup>, BIAN Ruikang<sup>1,2,3</sup>, LI Qianwen<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China

**Abstract:** The Zhangjiatan oil shale from the Upper Triassic Yanchang Formation in the southern Ordos Basin is an important solid mineral resource, it can also be considered as the main source rock of Triassic oil and gas in the basin. Results of analytical experiments such as TOC, bitumen extraction and group composition, oil content etc. of shale samples from key typical outcrop sections and drilling cores showed that the Zhangjiatan oil shale has a high organic matter abundance. The TOC content ranges 5.11% to 36.47%, with an average value of 16.15%. The  $S_0+S_1+S_2$  value distributes between 16.58–230.98 mg/g, with an average value of 94.20 mg/g. The extracted bitumen abundance is between 0.42%–2.22%, with an average value of 1.25%. Based on these analytical results, Zhangjiatan oil shale can be assigned to be high-quality source rock with an excellent hydrocarbon generation potential. The oil content of oil shale is between 3.52% and 14.6%, with an average value of 8.16%, which belongs to medium- and high-quality oil shale. The kerogen type is mainly I–II<sub>1</sub>, and the  $R_o$  value generally ranges from 0.43% to 1.09%. Based on field outcrop and drilling core samples, a thermal evolution profile of the Zhangjiatan oil shale in the southern Ordos Basin was established. Moreover, the oil contents of oil shale before and after solvent extraction were compared, and the variations of oil content and pyrolysis hydrocarbon products during the thermal evolution of oil shale were analyzed. There are two types of resources such as oil shale and shale oil in the Zhangjiatan oil shale with a great potential in the southern Ordos Basin. Moreover, some exploration and development countermeasures of oil shale and shale oil were put forward.

**Key words:** thermal evolution; shale oil; Zhangjiatan oil shale; Yanchang Formation; Upper Triassic; southern Ordos Basin

收稿日期:2021-03-25;修订日期:2021-11-30。

作者简介:高波(1969—),男,博士,研究员,从事非常规油气地质、地球化学研究。E-mail:gaobo.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05036-004-004)和中国石化科技开发部项目(P20049-1)资助。

油页岩又称油母页岩,是一种高灰分的含可燃有机质的沉积岩,它具有有机质丰度高(TOC一般大于10%)、灰分高(超过40%)、含油率高(大于3.5%)、发热量大(一般不小于4.18 MJ/kg)的特点<sup>[1]</sup>。油页岩油是指油页岩低温干馏时有机质热分解而形成的液态烃类产物,目前普遍通过地面干馏加工处理技术获得。由于地面干馏技术存在资源利用率低、高污染、规模小、埋深受限等问题,近年来油页岩地下原位开采技术日益受到重视<sup>[1-8]</sup>。资源评价表明,全国油页岩总资源量为 $7\ 199.37 \times 10^8$  t,技术可采资源量 $2\ 432.36 \times 10^8$  t;油页岩油资源量 $476.44 \times 10^8$  t,技术可采资源量 $159.72 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。页岩油系指赋存于富有机质页岩及其碳酸盐岩和碎屑岩薄夹层中的石油,具有自生自储、非构造高点控制、自然产能低、通过大规模人工压裂才能取得经济效益的特点<sup>[9-13]</sup>。全国页岩油有利区地质资源量 $402.67 \times 10^8$  t,可采资源量为 $37.06 \times 10^8$  t<sup>[14]</sup>。

鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气盆地,也是发育坳陷湖成油页岩的典型代表区,在盆地南部上三叠统延长组发育了规模巨大的油页岩资源。据原国土资源部评价,鄂尔多斯盆地油页岩资源量 $1\ 568.32 \times 10^8$  t,油页岩油资源量 $96.2 \times 10^8$  t,占全国油页岩油资源量的20.2%<sup>[1]</sup>。其中,鄂尔多斯盆地延长组长7段张家滩油页岩分布面积广、厚度大、有机质丰度高,占该盆地油页岩资源总量的90%以上。张家滩油页岩含油率较高,热演化程度变化范围宽,从未成熟—成熟阶段均有分布,具有形成油页岩和页岩油两类资源的潜力。前人对鄂尔多斯盆地张家滩油页岩的地球化学特征及分布进行过相关研究<sup>[15-16]</sup>,但对于热演化程度对油页岩含油率的影响、油页岩与页岩油两类资源的关系研究较为薄弱。本文通过野外露头观测、岩心观察和样品分析测试,对张家滩油页岩的分布及基本特征进行了研究,建立了油页岩自然演化剖面,分析了张家滩油页岩的热演化特征及其与含油率变化关系,探讨了油页岩和页岩油两类资源的赋存关系及资源分布,提出了两类资源的开采利用建议,期为鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩中蕴藏的两类资源的综合利用提供决策依据。

## 1 油页岩的地质特征

鄂尔多斯盆地南部(下文简称鄂南)地区张家滩油页岩较为发育,矿区东南边缘出露地表,埋深为0~2 500 m,其中,彬县—长武、旬邑—宜君、富

县地区埋深小于1 500 m,镇原—泾川地区埋深介于1 200~2 300 m。通过对研究区大量测录井资料的统计分析发现,鄂南张家滩油页岩具有如下测井响应特征:自然伽马(GR)一般介于101~293.5 API,平均148 API,是泥岩的3倍以上;地层真电阻率(Rt)一般介于39~196  $\Omega \cdot m$ ,平均77  $\Omega \cdot m$ ,是泥岩的4倍以上;4m视电阻率(Rt)一般介于63~540  $\Omega \cdot m$ ,平均234  $\Omega \cdot m$ ;岩石声波时差读数( $\Delta t$ )一般介于230~362  $\mu s/m$ ,平均282  $\mu s/m$ 。张家滩油页岩多呈单层连续发育,厚度分布在5~30 m。受沉积相控制,彬县—长武(彬长)、旬邑—宜君(旬宜)北部、富县西南部油页岩相对发育,厚度大于15 m;镇原—泾川(镇泾)、富县东部地区相对较薄,厚度介于5~10 m(图1)。油页岩颜色以深灰褐色为主,粒度细,富含分散状黄铁矿,层理发育。

油页岩是富含有机质的泥质烃源岩,此次对鄂南典型露头和探井岩心共25个张家滩油页岩样品的测试分析表明,TOC含量介于5.11%~36.47%,平均16.15%;生烃潜量( $S_0+S_1+S_2$ )介于16.58~230.98 mg/g,平均94.20 mg/g;氯仿沥青“A”介于0.42%~2.22%之间,平均1.25%(表1),按照侯读杰、卢双舫优质烃源岩评价标准<sup>[17-18]</sup>,属于生烃条件极好的优质烃源岩,揭示张家滩油页岩有机质丰度高,生烃潜力大。该区油页岩氢指数( $I_H$ )介于202~1 467 mg/g之间,平均583 mg/g(表1),有机质类型以I型和II<sub>1</sub>型为主(图2),部分样品氢指数与松辽盆地青山口组和嫩江组油页岩相似,部分样品氢指数与桦甸盆地桦甸组油页岩相似<sup>[19]</sup>,揭示低等生物是油页岩中有机质的主要来源。这与油页岩干酪根H/C原子比为1.17~1.50(平均1.34)、O/C原子比为0.02~0.32(平均0.10)特征相一致<sup>[16]</sup>,属于有利于生油的干酪根类型。

鄂南张家滩25个油页岩样品 $T_{max}$ 介于425~455  $^{\circ}C$ 之间,平均437  $^{\circ}C$ (表1)。一般认为, $T_{max}$ 值435  $^{\circ}C$ 为生油门限,435~440  $^{\circ}C$ 为低成熟阶段,440~460  $^{\circ}C$ 为大量生烃阶段<sup>[20]</sup>。由表1和图2可以看出,张家滩油页岩热演化程度变化范围较宽,处于未成熟—成熟阶段,这与油页岩 $R_o$ 值介于0.43%~1.09%之间相一致。总体而言,盆地边缘 $R_o$ 低,向盆地内部 $R_o$ 增大,由未成熟向成熟阶段转变。对盆地东南部何家坊地区12个油页岩样品矿物组成的分析表明,页岩黏土矿物含量较高,介于40.0%~58.9%,平均51.6%;石英含量介于21.3%~41.6%,平均31.4%;长石含量介于2.3%~4.8%,平

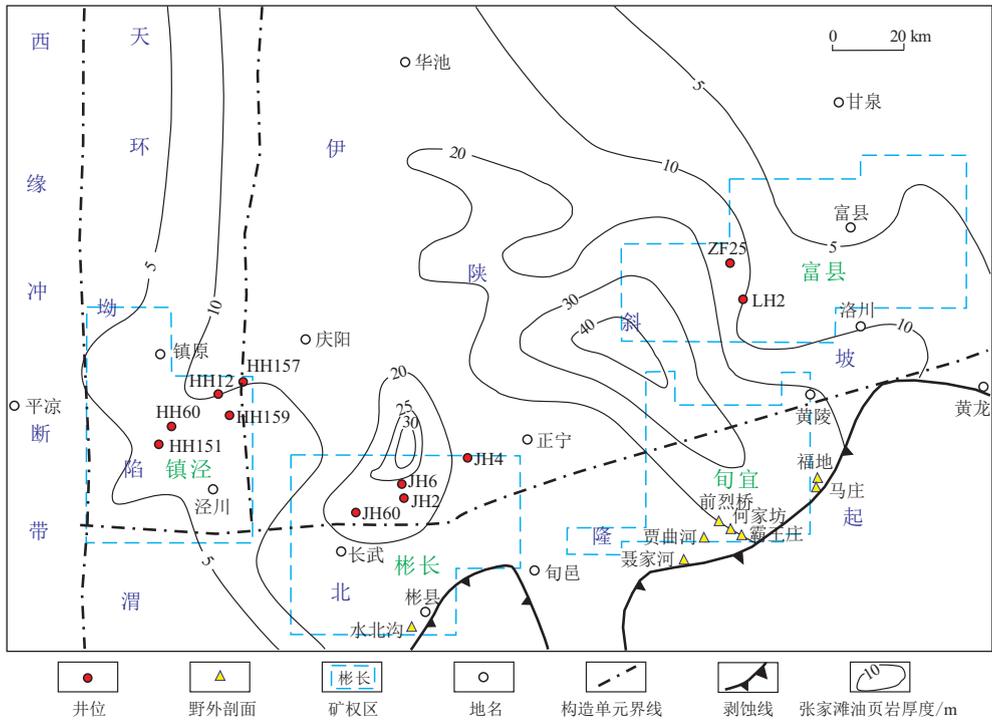


图1 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩厚度分布

据文献[15]修改。

Fig.1 Thickness of Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩地球化学特征统计

Table 1 Geochemical characteristics of Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

地区	剖面/探井	$\omega(\text{TOC})/\%$	$\omega(\text{S})/\%$	$(\text{S}_0+\text{S}_1+\text{S}_2)/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	氯仿沥青“A”/ $\%$	$I_{\text{H}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$R_o/\%$
旬宜	福地	15.74~27.74 20.37(3)	0.45~2.69 1.31(3)	78.38~105.57 90.82(3)	0.93~1.06 1.01(3)	312~576 459(3)	432~440 437(3)	0.63~0.68 0.66(3)
	霸王庄	26.72~36.47 31.60(2)	2.81~5.88 4.35(2)	167.39~230.98 199.18(2)	1.52~1.71 1.62(2)	428~815 622(2)	433~439 436(2)	0.54~0.59 0.57(2)
	何家坊	20.19	3.42	116.19	1.48	550	430	0.59
	前烈桥	27.08	0.61	122.29	0.72	436	430	0.51
	阎曲河	8.34	2.04	42.93	0.42	486	425	0.69
	贾曲河	9.35	1.19	35.42	0.51	363	428	0.43
聂家河		20.91~33.71 28.04(3)	0.82~2.57 1.53(3)	61.04~150.87 120.00(3)	0.46~1.82 1.27(3)	283~485 394(3)	426~432 430(3)	0.44~0.47 0.46(3)
	水北沟	9.60~9.95 9.78(2)	0.75~0.97 0.86(2)	67.1~159.99 113.54(2)	0.83~1.15 0.99(2)	680~1467 1074(2)	432~433 433(2)	0.42~0.43 0.43(2)
彬长	JH4井	10.00	2.93	59.38	1.63	549	433	0.74
	JH6井	17.77	2.98	104.45	1.53	555	434	0.72
	JH60井	7.40~22.81 13.13(3)	1.55~2.32 2.03(3)	57.60~206.38 113.67(3)	1.33~1.66 1.54(3)	757~871 799(3)	438~439 439(3)	0.6~0.73 0.65(3)
镇泾	HH12井	13.75	2.17	114.17	1.22	780	443	0.61
	HH151井	6.24	0.55	46.30	1.24	730	448	0.67
	HH157井	5.44	0.44	42.00	1.05	733	446	0.7
	HH159井	6.41	1.58	39.01	1.07	574	438	0.74
富县	LH2井	6.81	2.39	16.58	1.54	202	449	0.84
	ZF25井	5.11	0.49	17.42	2.22	275	455	1.09
范围及平均值		5.11~36.47 16.15(25)	0.44~5.88 1.83(25)	16.58~230.98 94.20(25)	0.42~2.22 1.25(25)	202~1467 583(25)	425~455 437(25)	0.42~1.09 0.63(25)

注：表中分式意义为  $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$ 。

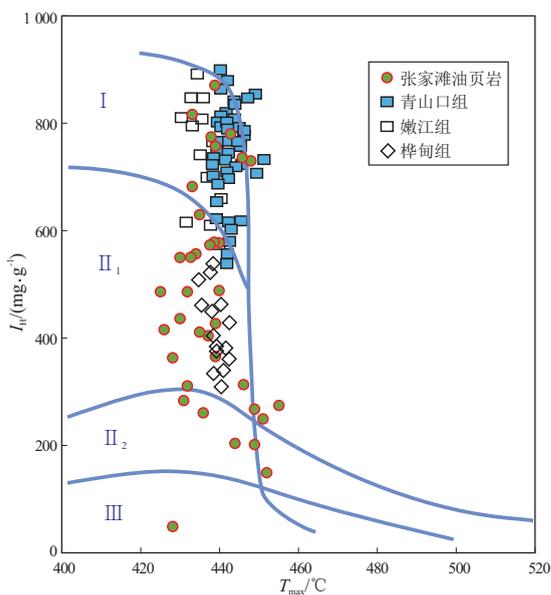


图 2 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩最高热解峰温 ( $T_{max}$ ) 与氢指数 ( $I_H$ ) 关系

青山口组、嫩江组和桦甸组油页岩数据据文献[19]。

Fig.2  $I_H$  vs.  $T_{max}$  diagram indicating kerogen types and maturity range of Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

均 3.1%; 碳酸盐矿物含量介于 1.5%~19.0%, 平均 8.6%, 黏土矿物含量较延长探区长 7 段和山 1 段页岩明显增大(图 3)。结合延长探区长 7 页岩段泊松比主要分布于 0.26~0.31, 平均 0.28, 杨氏模量 6~11.5 GPa, 平均 8.19 GPa<sup>[21-22]</sup>, 明显低于国内外海相页岩储层的杨氏模量可以看出, 鄂南张家滩组油页岩可压裂性相对较差。张家滩油页岩具页理构造, 微孔隙、裂缝发育; 油页岩段顶底板及其附近砂岩为著名的延长组“磨刀石”, 岩性致密, 物性差, 无明显水层, 稳定性好。

含油率、灰分产率、全硫含量、挥发分、水分、岩石密度是评价油页岩工业品质的重要指标。含油率系指油页岩中页岩油(焦油)所占的质量分数, 其测定方法是将油页岩样品装于铝甑中, 在隔绝空气条件下以一定的升温速度加热到 520 °C, 并保持一定时间后, 通过测量干馏后的产物组成获得。一般根据含油率可以将油页岩划分为非矿体(<3.5%)、

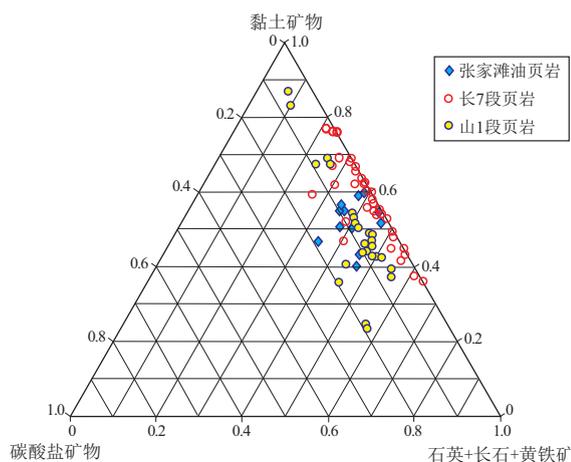
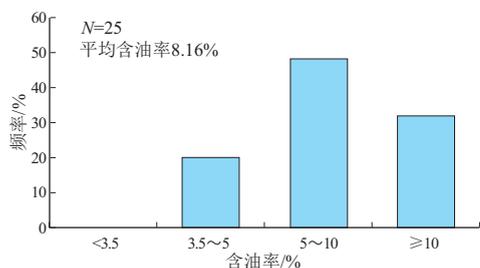


图 3 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩与陆相页岩储层矿物组分对比

图中张家滩油页岩来自何家坊地区, 长 7 段页岩和山 1 段页岩数据据文献[22]。

Fig.3 Mineral composition of Zhangjiatan oil shale and continental shale reservoir in southern Ordos Basin

低品级油页岩 (3.5%~5.0%)、中品级油页岩 (5.0%~10.0%) 和高品位油页岩 ( $\geq 10.0\%$ ) 4 个级别; 根据全硫含量, 可将油页岩划分为特低硫油页岩 ( $\leq 1.0\%$ )、低硫油页岩 (1.0%~1.5%)、中硫油页岩 (1.5%~2.5%)、富硫油页岩 (2.5%~4.0%) 和高硫油页岩 ( $>4.0\%$ ) 5 个级别; 按水分含量可分为高湿度油页岩 (20%~30%)、中湿度油页岩 (10%~20%) 和低湿度油页岩 ( $<10\%$ )<sup>[1]</sup>。此次对 25 个张家滩油页岩样品进行了含油量、含硫量、水分等相关分析, 结果表明, 油页岩含油率为 3.52%~14.60%, 平均 8.16%; 含硫量为 0.44%~5.88%, 平均 1.83%; 水分含量为 1.65%~3.41%, 平均 2.12%, 揭示张家滩油页岩工业品质较好, 整体上属于中高品位、中含硫、低湿度的油页岩(图 4, 表 1)。

前人分析油页岩含油率时, 很少考虑油页岩早期形成的滞留液态烃对含油率的影响, 造成部分较高成熟度的泥页岩因滞留液态烃含量较高表现出高含油率的特征。这与传统意义上油页岩为未熟—低成熟度烃源岩存在一定的矛盾, 不利于客观

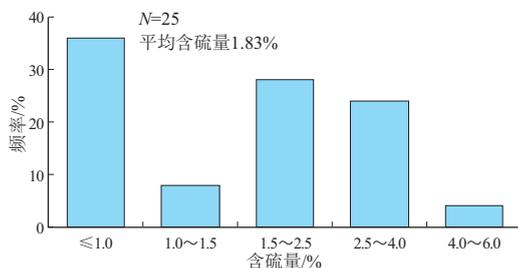


图 4 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩含油率和含硫量分布

Fig.4 Distribution of oil and sulfur contents of Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

评价油页岩通过干馏或原位改质技术进行开采时的生烃潜力。为了客观评价油页岩在热演化过程中形成的可溶有机质含量对油页岩含油率的影响,本文对选取的 25 个张家滩油页岩样品,测定了氯仿抽提前、后的含油率(图 5)。结果显示,25 个样品氯仿抽提前含油率均大于 3.5%,介于 3.52%~14.6%之间,平均 8.16%,整体属于中高品质的油页岩;抽提后的油页岩样品含油率明显减小,介于 0.89%~5.54%之间,平均 2.74%,仅有 5 个样品氯仿抽提后含油率仍大于 3.5%,且氯仿抽提前、后的样品均具有随着热演化程度的增大含油率逐渐降低的趋势。这一方面表明鄂南张家滩油页岩随着热演化程度的增大发生了明显的液态烃生成过程,油页岩中的滞留液态烃对其含油率具有较大贡献;另一方面表明,对于未成熟—低成熟的油页岩而言,其干酪根仍然具有较大的生油潜力。纵向上,高品质油页岩主要分布于张家滩油页岩段的中下部;平面上,以彬县—长武、旬邑—宜君较好,优于镇原—泾川、富县地区(图 1)。

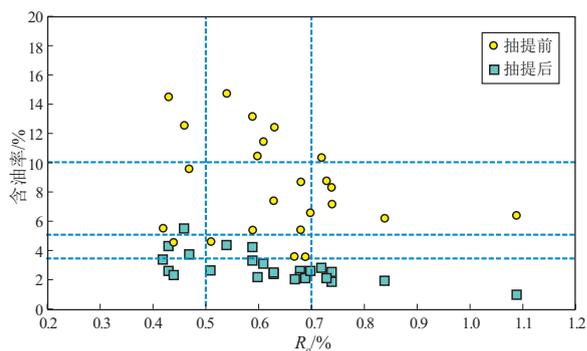


图 5 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩抽提前、后含油率随  $R_o$  变化对比

Fig.5 Comparison of oil content with  $R_o$  before and after extraction of Zhangjiantan oil shale in southern Ordos Basin

## 2 油页岩生烃演化特征

### 2.1 油页岩样品的选定

通过对鄂南聂家河(NJH)、水北沟(SBG)、霸王庄(BWZ)等露头剖面 and 红河(HH12)、泾河(JH60)等钻井岩心共 25 个样品的相关分析,结合前人的研究成果,发现张家滩油页岩演化程度变化范围较宽,盆缘露头区演化程度较低, $R_o$  在 0.43%~0.59%之间,盆内钻井岩心  $R_o$  分布在 0.61%~1.09%之间,镇泾、彬长地区演化程度低于富县地区(表 1)。为了揭示油页岩热演化过程中的成烃特征,对盆缘露头、镇泾、彬长、富县钻井岩心共 12 个样品进行了族组分等系统分析,建立起自然演化剖面(表 2), $R_o$  从 0.43%递增至 1.09%,涵盖了鄂南张家滩油页岩未熟—低熟—成熟的各演化阶段。

### 2.2 油页岩演化过程中含油率变化特征

从表 2 和图 6 可以看出,无论是氯仿抽提前还是抽提后,油页岩的含油率与 TOC、生烃潜量( $S_0+S_1+S_2$ )、游离烃( $S_0+S_1$ )、热解烃  $S_2$  均呈较好的正相关性(图 6a-d),揭示油页岩中的分散不溶有机质(干酪根)和可溶有机质(烃源岩热演化过程中形成的滞留液态烃)均对油页岩的含油率具有较大贡献。同一个油页岩样品,氯仿抽提前比抽提后的含油率明显降低,降低幅度达到 39%~86%,平均降低 63%,揭示油页岩中滞留的可溶有机质对含油率具有较大影响,且油页岩抽提前、后的含油率呈现明显的正相关性,则表明油页岩中的分散不同有机质(干酪根)对油页岩的含油率也具有重要影响(表 2,图 6e)。油页岩在氯仿抽提前、后的含油率与热演化程度  $R_o$  之间呈现明显的负相关关系(图 6f), $R_o \geq 0.6\%$  后,油页岩抽提后含油率均小于 3.5%,表明随着热演化程度的增大,油页岩发生了

表 2 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩测试分析统计

Table 2 Testing data of Zhangjiantan oil shale in southern Ordos Basin

样品来源	样号	$\omega(\text{TOC})/\%$	$S_0/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$S_1/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$S_2/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$(S_0+S_1+S_2)/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	氯仿抽青“A”/%	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%	含油率/%		$R_o/\%$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$
												抽提前	抽提后		
水北沟	SBG1	9.95	0.53	13.45	146.01	159.99	1.154	37.63	23.14	34.96	4.27	14.38	4.25	0.43	432
聂家河	NJH3	33.71	0.33	7.85	139.90	148.08	1.542	38.98	9.06	44.48	7.48	12.50	5.45	0.46	426
聂家河	NJH2	29.51	0.27	7.51	143.10	150.87	1.822	45.02	13.42	38.53	3.03	9.57	3.66	0.47	432
霸王庄	BWZ4	36.47	0.62	10.72	156.06	167.39	1.522	33.87	15.08	49.94	1.11	14.60	4.28	0.54	439
霸王庄	BWZ2	26.72	0.44	12.67	217.87	230.98	1.714	34.53	19.37	41.05	5.05	13.10	4.16	0.59	433
红河	HH12	13.75	0.45	6.51	107.22	114.17	1.222	32.96	33.79	25.43	7.82	11.35	3.05	0.61	443
泾河	JH60	22.81	0.91	6.89	198.58	206.38	1.663	33.15	20.66	38.08	8.11	12.35	2.42	0.63	439
福地	FD2	17.64	0.09	3.80	101.67	105.57	1.056	36.91	22.47	31.34	9.28	8.65	2.51	0.68	440
泾河	JH6	17.77	0.17	5.59	98.68	104.45	1.530	55.42	23.87	19.13	1.58	10.27	2.75	0.72	434
泾河	JH4	10.00	0.15	4.31	54.92	59.38	1.632	42.23	26.07	30.48	1.22	8.24	1.79	0.74	433
洛河	LH2	6.81	0.15	2.67	13.76	16.58	1.541	59.41	21.15	15.81	3.63	6.14	1.85	0.84	449
富县	ZF25	5.11	0.18	3.21	14.04	17.42	2.221	64.72	17.38	11.88	6.02	6.35	0.89	1.09	455

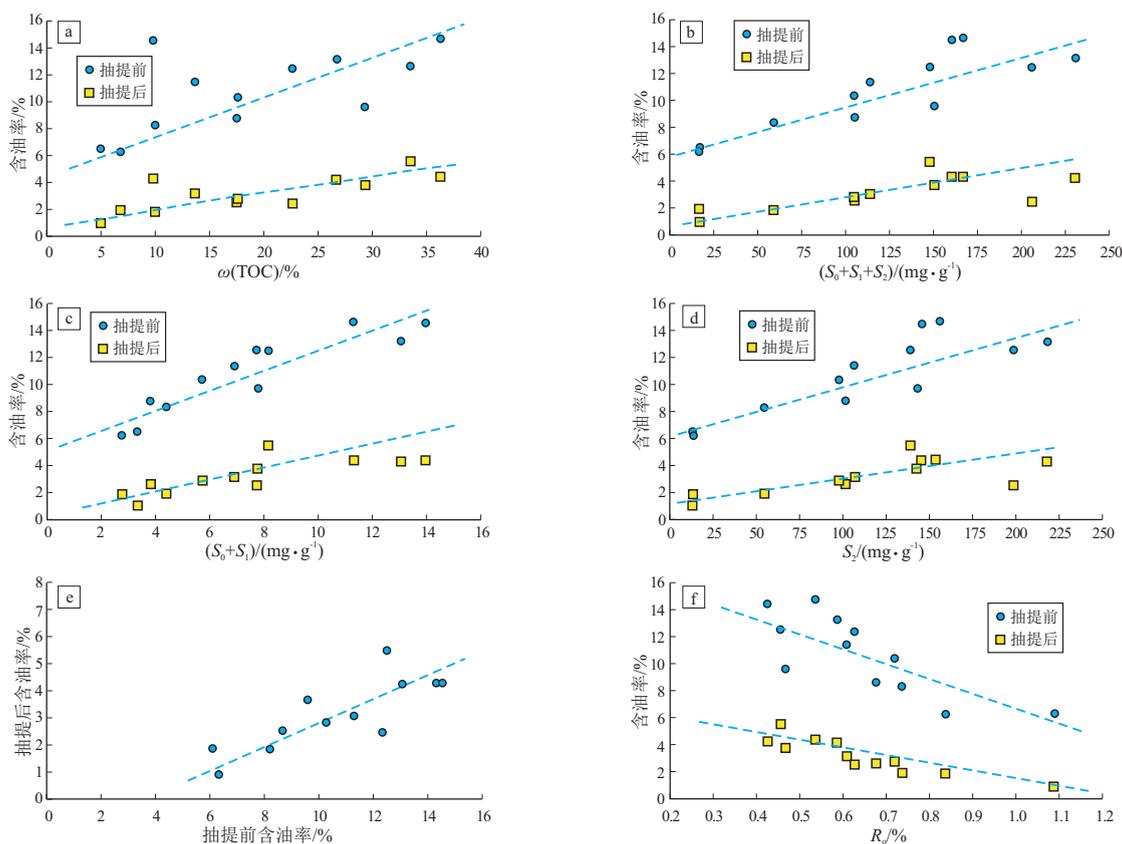


图6 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩含油率与相关参数关系

Fig.6 Relationship between oil content and related parameters of Zhangjiatan oil shale in southern Ordos Basin

大量的油气生成与运移,致使油页岩中的可溶有机质含量和有机碳含量呈现下降趋势,油页岩抽提后的含油率明显降低。

### 2.3 油页岩生烃演化特征

从图7可以看出,随着热演化程度的升高,张家滩油页岩的可溶烃( $S_0+S_1$ )、热解烃( $S_2$ )、非烃+沥青质的含量、含油率逐渐降低,而饱和烃+芳烃含量、氯仿沥青转化率(沥青“A”/TOC)、总烃转化率(总烃/TOC)具有逐渐增大的趋势,揭示了烃源岩中干酪根的热降解作用对油页岩的有机质丰度、滞留烃的含量、热解烃产率均具有较大的影响。自然剖面很好地反映了油页岩生油速率逐步增高的过程,在 $R_0 < 0.7\%$ 之前的低演化阶段,油页岩的生油速率上升非常缓慢, $R_0 > 0.7\%$ 之后,油页岩进入了大量生油的成熟阶段,生油速率明显增快,氯仿沥青“A”、总烃产率明显增大。根据马中良等<sup>[23]</sup>对茂名盆地古近系油柑窝组油页岩的热模拟实验,该油页岩 $R_0$ 在1.05%左右时达到生油高峰,后期液态烃产率逐渐降低,烃气产率逐渐增大。综合分析可见,鄂南张家滩油页岩在 $R_0$ 为0.4%~0.6%的低演化阶段已经生成了一定数量的低熟液态烃, $R_0$ 达0.7%后进入成熟阶段,生油速率加快, $R_0$ 在1.0%

左右达到生油高峰,在低成熟—生油高峰阶段张家滩油页岩发生过较大规模的生排烃事件。

### 3 油页岩与页岩油资源赋存关系

国内外一般将油页岩资源的含油率下界限定为3.5%。鄂南张家滩油页岩 $R_0$ 值介于0.43%~1.1%,揭示盆地内部油页岩已经历了热演化生烃过程,致使油页岩抽提后的含油率与 $R_0$ 呈明显的负相关关系, $R_0 \geq 0.6\%$ 后,抽提后含油率小于3.5%, $R_0 > 0.7\%$ 后,抽提后含油率小于3.0%(图5),意味着油页岩中残留的干酪根继续热解已经不能再提供具有足够开采价值的页岩油,这与绝大多数油页岩处于未成熟—低成熟度演化阶段相一致<sup>[1]</sup>。随着演化程度升高,油页岩层段内逐渐发生油页岩固体资源向页岩油液体资源转化,资源类型和性质都在发生巨大变化。

综合鄂南张家滩油页岩的热演化生烃特征、烃类赋存特征,可将张家滩油页岩层段内的资源划分为三大类(图8):第一类资源赋存于低成熟阶段( $R_0 < 0.7\%$ )的页岩中,油页岩固体资源与页岩油液体资源共存,由于此阶段液态烃生成量较少,主要以油页岩固体资源为主,可采用油页岩原位加热转

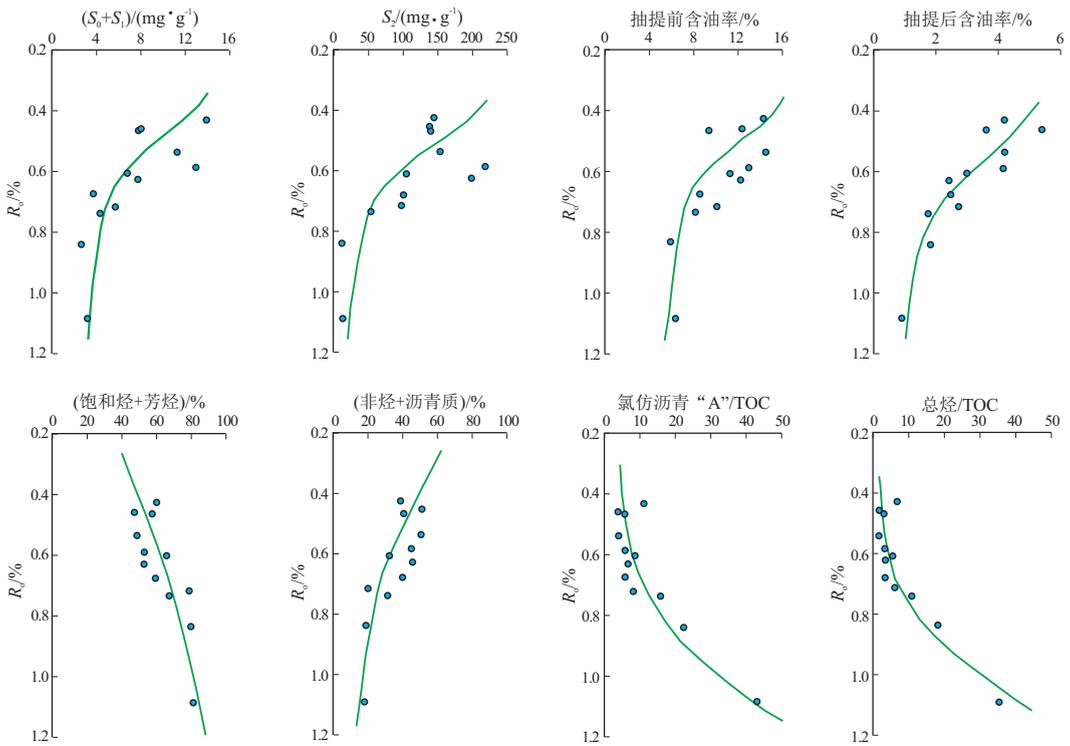


图7 鄂尔多斯盆地张家滩油页岩自然剖面的热演化特征

Fig.7 Thermal evolution characteristics of natural profile of Zhangjiatan oil shale in Ordos Basin

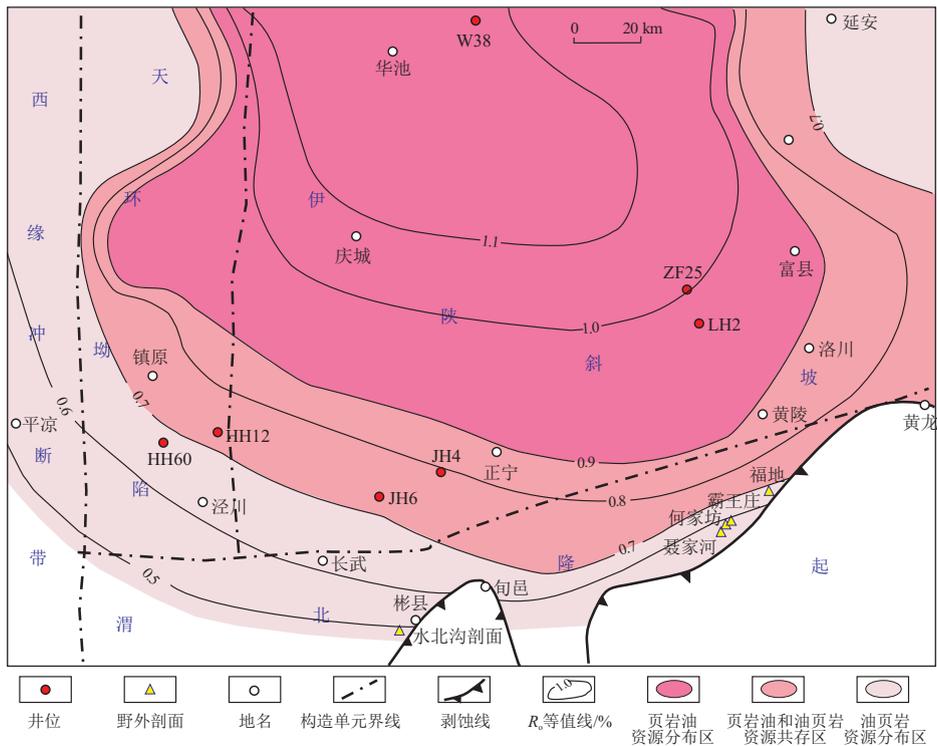


图8 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩与页岩油资源分布

Fig.8 Distribution of Zhangjiatan oil shale and shale oil resources in southern Ordos Basin

化技术或地面干馏技术(埋深小于300 m)进行开采<sup>[1-6]</sup>;第二类资源赋存于成熟阶段(0.7% ≤ R<sub>o</sub> < 0.9%)的页岩中,氯仿抽提后的含油率较低,揭示该阶段资源主要以赋存于油页岩层系中的页岩油

资源为主,油页岩也具有一定的生烃潜力,但由于热演化程度相对较低,可流动性较差,需要进一步攻关地下原位转化技术<sup>[24]</sup>,以达到页岩油和油页岩资源综合利用的目的;第三类资源赋存于高

成熟阶段( $R_o \geq 0.9\%$ )的页岩中,由于热演化程度较高,油页岩抽提后含油率很低,页岩油的密度较低,可流动性变好,是现阶段经济技术条件下可采用水平井分段压裂技术进行有效动用的现实资源。目前中国石油长庆油田公司不仅在湖盆中部庆城地区长7段发现了三级储量10亿吨级的重力流夹层型页岩油,而且十多口探井在长7<sub>3</sub>亚段半深湖—深湖区纹层页岩型页岩油获得工业油流<sup>[25]</sup>,揭示了鄂尔多斯盆地中高成熟度张家滩油页岩层系页岩油勘探开发的巨大潜力。

## 4 结论与建议

(1)鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩分布范围广,厚度介于5~30 m,有机质丰度高,TOC大于5%, $S_0+S_1+S_2$ 大于16 mg/g,氯仿沥青“A”大于0.4%,有机质类型以I—II<sub>1</sub>型为主,属于生烃条件极好的烃源岩;油页岩含油率介于3.52%~14.6%之间,平均8.16%,含硫量介于0.44~5.88%,平均1.83%,水分含量介于1.65%~3.41%,平均2.12%,整体上属于中高品位、中含硫、低湿度的油页岩。

(2)张家滩油页岩 $R_o$ 介于0.43%~1.1%,氯仿抽提后含油率明显低于抽提前含油率,随着热演化程度的升高,油页岩的氯仿沥青“A”转化率、总烃转化率、饱和烃+芳烃含量逐渐升高,可溶烃、热解烃、非烃+沥青质含量、含油率逐渐降低,揭示了干酪根的热降解作用对油页岩的有机质丰度、滞留烃的含量、烃类产率均具有较大的影响。干酪根和早期生成并滞留于油页岩中的液态烃对油页岩含油率均具有贡献。 $R_o > 0.6\%$ 以后,油页岩氯仿抽提后的含油率小于3.5%,表明在现有经济技术条件下,进入成熟阶段的油页岩仅依靠干酪根已不具备商业开发价值,需要考虑油页岩和页岩油的综合开发利用。

(3)张家滩油页岩层段内的资源划分为三大类:第一类资源赋存于 $R_o \leq 0.7\%$ 的低成熟度油页岩中,主要以油页岩固体资源为主,建议采用油页岩原位加热转化技术或地面干馏技术(埋深小于300 m)进行开采;第二类资源赋存在 $R_o$ 介于0.7%~0.9%的中等成熟度页岩中,主要以页岩油资源为主、固体油页岩资源为辅,考虑到油页岩含油率还较高,建议进一步攻关地下原位转化技术,以达到页岩油和页岩油综合利用的目的;第三类资源赋存于 $R_o > 0.9\%$ 的较高成熟度油页岩中,该类型油页岩含油率低,建议采用水平井分段压裂

技术进行有效开发,是现阶段经济技术条件下可有效动用的现实资源。

(4)中国陆相含油气盆地蕴藏着丰富的油页岩资源,普遍处于未成熟—成熟阶段,均不同程度存在油页岩与页岩油资源共存问题,建议针对不同类型的资源特点开展适应性的工程工艺技术攻关,促进油页岩层系资源的综合开发和利用。

## 参考文献:

- [1] 刘招君,杨虎林,董清水,等.中国油页岩[M].北京:石油工业出版社,2009.  
LIU Zhaojun, YANG Hulin, DONG Qingshui, et al. Oil shale in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [2] 刘德勋,王红岩,郑德温,等.世界油页岩原位开采技术进展[J].天然气工业,2009,29(5):128-132.  
LIU Dexun, WANG Hongyan, ZHENG Dewen, et al. World progress of oil shale in-situ exploitation methods[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 128-132.
- [3] FOWLER T D, VINEGAR H J. Oil shale ICP-colorado field pilots[R]. San Jose: SPE, 2009.
- [4] 刘洪林,刘德勋,方朝合,等.利用微波加热开采地下油页岩的技术[J].石油学报,2010,31(4):623-625.  
LIU Honglin, LIU Dexun, FANG Chaohe, et al. Microwave heating technology of in-situ oil shale developing[J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(4): 623-625.
- [5] 汪友平,王益维,孟祥龙,等.美国油页岩原位开采技术与启示[J].石油钻采工艺,2013,35(6):55-59.  
WANG Youping, WANG Yiwei, MENG Xianglong, et al. Enlightenment of American's oil shale in-situ retorting technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 55-59.
- [6] ALPAK F O, VINK J C, GAO Guohua, et al. Techniques for effective simulation, optimization, and uncertainty quantification of the in-situ upgrading process [C]//Proceedings of SPE Reservoir Simulation Symposium. Texas: SPE, 2013.
- [7] 柳波,刘阳,刘岩,等.低熟页岩电加热原位改质油气资源潜力数值模拟:以松辽盆地南部中央坳陷区嫩江组一、二段为例[J].石油实验地质,2020,42(4):533-544.  
LIU Bo, LIU Yang, LIU Yan, et al. Prediction of low-maturity shale oil produced by in situ conversion: a case study of the first and second members of Nenjiang Formation in the Central Depression, southern Songliao Basin, Northeast China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 533-544.
- [8] 赵康安,孙平昌,于丰宁,等.民和盆地油页岩加热过程储集物性研究[J].新疆石油地质,2020,41(2):158-163.  
ZHAO Kang'an, SUN Pingchang, YU Fengning, et al. Study on reservoir physical properties of oil shale during heating in Minhe basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(2): 158-163.
- [9] 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,2019,40(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.

- [10] 付锁堂,姚泾利,李士祥,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J].石油实验地质,2020,42(5):698-710.  
FU Suotang, YAO Jingli, LI Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 698-710.
- [11] 李士祥,牛小兵,柳广弟,等.鄂尔多斯盆地延长组长 7 段页岩油形成富集机理[J].石油与天然气地质,2020,41(4):719-729.  
LI Shixiang, NIU Xiaobing, LIU Guangdi, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 719-729.
- [12] 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.
- [13] 林会喜,王圣柱,杨艳艳,等.博格达地区中二叠统芦草沟组页岩油储集特征[J].断块油气田,2020,27(4):418-423.  
LIN Huixi, WANG Shengzhu, YANG Yanyan, et al. Shale oil reservoir characteristics of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area [J]. Fault - Block Oil and Gas Field, 2020, 27(4): 418-423.
- [14] 国土资源部油气资源战略研究中心.全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选[M].北京:科学出版社,2016:198-215.  
Strategic Research Center of oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources. National shale gas resource potential survey and evaluation and favorable area selection [M]. Beijing: Science Press, 2016: 198-215.
- [15] 邓南涛,张枝焕,任来义,等.鄂尔多斯盆地南部延长组油页岩地球化学特征及分布规律[J].石油实验地质,2013,35(4):432-437.  
DENG Nantao, ZHANG Zhihuan, REN Laiyi, et al. Geochemical characteristics and distribution rules of oil shale from Yanchang Formation, southern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 432-437.
- [16] 马中豪,陈清石,史忠汪,等.鄂尔多斯盆地南缘延长组长 7 油页岩地球化学特征及其地质意义[J].地质通报,2016,35(9):1550-1558.  
MA Zhonghao, CHEN Qingshi, SHI Zhongwang, et al. Geochemistry of oil shale from Chang 7 reservoir of Yanchang Formation in south Ordos Basin and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(9): 1550-1558.
- [17] 侯茂杰,张善文,肖建新,等.济阳坳陷优质烃源岩特征与隐蔽油气藏的关系分析[J].地质学前沿,2008,15(2):137-146.  
HOU Dujie, ZHANG Shanwen, XIAO Jianxin, et al. The excellent source rocks and accumulation of stratigraphic and lithologic traps in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 137-146.
- [18] 卢双舫,马廷伶,曹瑞成,等.优质烃源岩评价标准及其应用:以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(3):535-544.  
LU Shuangfang, MA Yanling, CAO Ruicheng, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications; taking the Wuertun Sag in Hailaer Basin as an example [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(3): 535-544.
- [19] 刘招君,柳蓉,孙平昌,等.中国典型盆地油页岩特征及赋存规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(2):313-325.  
LIU Zhaojun, LIU Rong, SUN Pingchang, et al. Oil shale characteristics and distribution in typical basins of China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 313-325.
- [20] 邬立言,顾信章,盛志纬,等.生油岩热解快速定量评价[M].北京:科学出版社,1986.  
WU Liyan, GU Xinzhang, SHENG Zhiwei, et al. Rapid quantitative evaluation of source rock pyrolysis [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [21] 王香增.延长石油集团非常规天然气勘探开发进展[J].石油学报,2016,37(1):137-144.  
WANG Xiangzeng. Advances in unconventional gas exploration and development of Yanchang petroleum group [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 137-144.
- [22] 杜燕,刘超,高潮,等.鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气勘探开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,2020,25(2):33-42.  
DU Yan, LIU Chao, GAO Chao, et al. Progress, challenges and prospects of the continental shale gas exploration and development in the Yanchang exploration area of the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 33-42.
- [23] 马中良,郑伦举,赵中熙.不同边界条件对油页岩原位转化开采的影响及启示[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(2):431-441.  
MA Zhongliang, ZHENG Lunju, ZHAO Zhongxi. Influence and its revelation of oil shale in-situ mining simulation in different boundary conditions [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(2): 431-441.
- [24] 赵文智,胡素云,侯连华.页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J].石油勘探与开发,2018,45(4):537-545.  
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 537-545.
- [25] 付金华,刘显阳,李士祥,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段页岩油勘探发现与资源潜力[J].中国石油勘探,2021,26(5):1-11.  
FU Jinhua, LIU Xianyang, LI Shixiang, et al. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 1-11.