

鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系排烃效率及其含油性

黄振凯^{1,2}, 刘全有^{1,2}, 黎茂稳^{1,2}, 陈建平³, 李鹏^{1,2}, 张瑞⁴

[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. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100081; 4. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:泥页岩层系的排烃效率是当前页岩油气研究领域关注的重点问题之一,也是评价页岩油气资源潜力的关键参数。以鄂尔多斯盆地延长组长7段泥页岩层系为研究对象,通过系统地球化学分析,揭示了长7段泥页岩层系的排烃效率并探讨了泥页岩层系中不同岩性的含油性及其页岩油意义。中等成熟度阶段($R_o=0.8\%$), I型有机质泥页岩的排烃效率在33%~37%, II型排烃效率在16%~26%。成熟度较高阶段($R_o=1.1\%$), I型有机质泥页岩的排烃效率在64%~67%, II型排烃效率在54%~58%。在综合考虑不同类型岩性的含油性、滞留油族组分特征、气油比及滞留油流动性等地质因素后认为,成熟度较高的长7段泥页岩层系中($R_o=1.1\%$)游离烃含量和OSI指数高的砂岩段和粉砂质泥岩段等可作为页岩油勘探开发的有利目标。游离烃含量和OSI指数较高的块状泥岩段可作为页岩油勘探点潜在目标。黑色页岩段(或纯页岩段)因受若干地质因素的影响,可能会制约其成为研究区内页岩油勘探的有效目标。块状泥岩段可作为页岩油勘探的潜在目标;而黑色页岩(或纯页岩段)因受若干地质因素的影响,可能会制约其成为研究区内页岩油勘探的有效目标。

关键词:排烃效率;含油性;泥页岩;长7段;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin

Huang Zhenkai^{1,2}, Liu Quanyou^{1,2}, Li Maowen^{1,2}, Chen Jianping³, Li Peng^{1,2}, Zhang Rui⁴

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;
2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;
3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing 100081, China;
4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Hydrocarbon expulsion efficiency of the shale system is one of the most important issues in the shale oil and gas research, and also a key parameter for evaluating the potential of shale oil and gas resources. This paper chooses the mud shale system from Chang 7 Member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, as the investigation object. It measures the expulsion efficiency of the shale system and also reveals the variation of oil-bearing properties among various lithologies of mud shale system, via systematic geochemical analyses. Their significance in shale oil production is also discussed. The result shows that at the medium maturity stage ($R_o=0.8\%$), the hydrocarbon expulsion efficiency of Type I organic mud shale and Type II mud shale is 33% to 37% and 16% to 26%, respectively, while at the mature stage ($R_o=1.1\%$), the expulsion efficiency of Type I and Type II is 64% to 67% and 54% to 58%, respectively. Thus we conclude that in the shale system with higher maturity ($R_o=1.1\%$), the sandstone and silty mudstone with higher free hydrocarbon content and OSI index can be the favorable targets for shale oil exploration and development; the blocky mudstone with high free hydrocarbon content and OSI index would be a potential target for shale oil exploration, with integrated consideration of geological factors including oil-bearing properties of different lithologies, composition character-

收稿日期:2018-03-27;修订日期:2018-05-03。

第一作者简介:黄振凯(1985—),男,博士,油气地质与地球化学。E-mail:huang_zhenkai@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41625009,41702137);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239101)。

istics, gas/oil ratio, and fluidity of retained oil. However, the black shale (or pure shale section) might not become an effective target for shale oil exploration in the study area, restrained by some of its geological factors.

Key words: hydrocarbon expulsion efficiency, oil-bearing property, shale, Chang 7 Member, Ordos Basin

陆相富有机质泥页岩广泛分布于我国诸多含油气盆地,其大多形成于中新生的陆相湖盆沉积背景,具有优越的页岩油形成条件^[1-4],如松辽盆地青山口组^[4-6],渤海湾盆地沙河街组^[7-9]、鄂尔多斯盆地延长组^[10-12],江汉盆地潜江组^[13-14],泌阳凹陷核桃园组^[15]。这些烃源岩层系有机质类型较好,目前多处于生油阶段,不仅是我国常规油藏的主力烃源岩系,也是目前我国页岩油勘探关注的重要层位。

鄂尔多斯盆地为我国第二大沉积盆地,含有丰富的油气资源。三叠系延长组长7段沉积时,为盆地湖泊发展的鼎盛时期,大范围发育了一套深湖-半深湖相泥页岩沉积^[16-18]。长7段泥页岩顶面埋深分布在500~2 000 m,厚度可达80~130 m,分布相对稳定^[19]。随着针对陆相页岩油气勘探的不断深入,长庆油田先后在陇东地区通过对延长组泥页岩层段进行体积压裂获得工业油流,在直罗-下寺湾地区通过工程措施成功获得低产气流,形成了中国第一个陆相页岩气先导试验区,揭示了鄂尔多斯盆地具有良好的页岩油气资源前景^[12,20]。

近些年来随着页岩油气研究热潮的兴起,泥页岩层系的排烃效率与残留烃量再次引起了学者们的广泛关注。如果从物质平衡的角度来看,泥页岩层系的排烃效率越高,排出泥页岩层系的烃类的量也就越高,相反残留在泥页岩层系内部的烃类也就越少。因此泥页岩层系排烃效率的高低决定了泥页岩层系中保留的油气资源量。从业已发表的文献来看,针对长7段泥页岩层系排烃效率方面的文献报道相对较少。因此本文选取长7段不同热演化程度泥页岩样品为研究对象,以物质平衡作为理论基础,通过系统的地球化学分析,探讨其排烃效率、含油性及其页岩油意义,为揭示鄂尔多斯盆地延长组陆相泥页岩层系的生排烃机理、特征以及页岩油资源评价等重要问题提供思路和技术方法。

1 研究区基础地球化学特征

长7段泥页岩层系生烃母质发育十分丰富,残余有机碳含量很高^[12]。*TOC*(有机碳含量)大多在2%~6%,最高可达到30%~40%,氯仿沥青“A”含量大多分布在0.22%~1.03%。不同地区长7段泥页岩层

系的有机质丰度变化也较为明显。盆地西南部的西峰地区*TOC*分布在2.8%~25%,平均为14%,氯仿沥青“A”含量分布在0.48%~1.03%,平均为0.785%;盆地东部的蟠龙地区*TOC*分布在0.69%~5.24%,平均为3.32%,氯仿沥青“A”含量分布在0.216%~0.492%,平均为0.391%^[21]。全盆的有机质丰度由湖盆中心向湖盆边部逐渐降低,但总体上大多属于优质烃源岩,*TOC*达到高-极高级别^[12]。

形成于深湖-半深湖相沉积的长7段泥页岩层系水体盐度整体较低,水体分层并不明显,属于较强的还原环境。长7段泥页岩干酪根主要以无定形体为主(85%~99%),并有少量的源于刺球藻的形态组份和孢子体,属湖相低等藻类生物^[12],有机质的类型应该以I型和II₁型为主。

长7段泥页岩层系的热演化程度普遍较高,但不同地区的热演化程度存在一定的差异。盆地东南部*R_o*(镜质体反射率)值一般大于1.0%,东北和西南部*R_o*值普遍低于0.7%,中南部大部分地区*R_o*值分布在0.7%~1.1%,说明泥页岩已进入成熟阶段。总体来看,盆地的热演化程度具有南北向偏低,而中部热演化程度较高的特点^[21]。

2 研究样品与实验方法

本文选取研究区内处于半深湖-深湖相不同演化阶段的延长组长7段泥页岩样品进行排烃效率及含油性分析(图1)。DP1井、Z233井和H317井的泥页岩镜质体反射率分别大致为0.8%,0.9%和1.1%。由于长7段泥页岩层系未熟-低熟的钻井和野外露头样品非常少,因此选用有机质丰度、类型与长7近乎相似的ZK808井长2段泥页岩层系的野外露头样品(*R_o*=0.4%)作为未熟-低熟样品。

本研究中涉及的岩石热解分析使用法国Vinci Technologies生产的Rock-Eval 6型岩石热解仪完成。有机碳分析使用Leco CS-200碳硫分析仪完成。岩石抽提物组份分析中,首先使用索氏抽提获得氯仿沥青“A”,然后使用柱层析法对抽提物进行组份的分离和定量计算。本文中使用的分析测试方法均按照GB/T 19145—2003, GB/T 215—2003和SY/T 5118—2005等国家标准或行业标准执行。

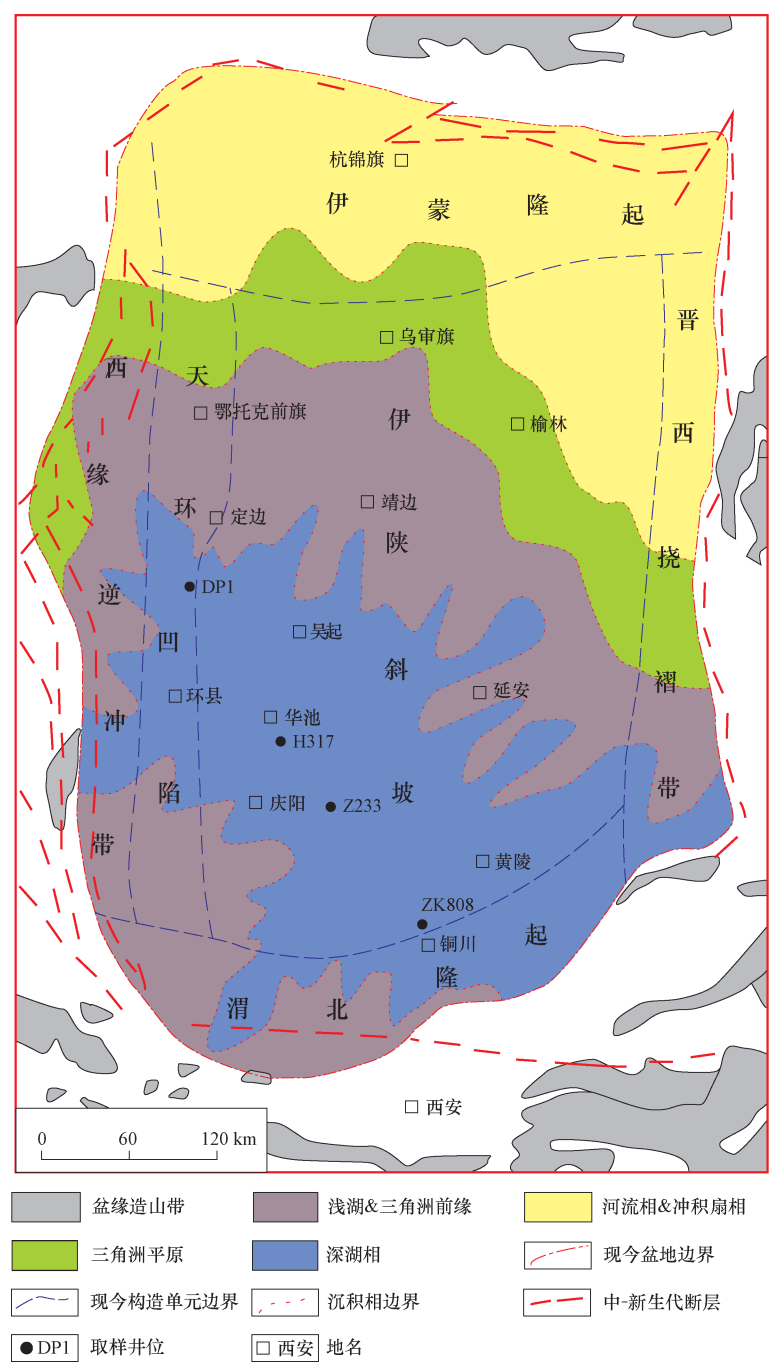


图 1 研究区自然演化剖面样品采集位置分布

Fig. 1 Diagram for distribution of samples collected from a natural outcrop profile in the study area

3 泥页岩层系排烃效率

确定泥页岩层系排烃效率有很多方法,包括地质剖面法^[22-25]、岩石热解法^[26-28]、模拟实验法^[29-33]和生烃动力学法^[34-36]等。其中最为常用、最可靠的方法是利用泥页岩热解生烃参数的物质平衡算法^[37]。

计算泥页岩排烃效率的基本地球化学参数有 3 个:原始生烃潜量(S_0)、残余生烃量(也称为热解烃,

S_2)及残留烃量(也称为热解游离烃, S_1),获得上述 3 个参数后可以确定原始生烃指数(即单位有机碳对应的原始生烃潜量)、残余生烃指数(即单位有机碳对应的残余生烃潜量)、已生成烃量和排出烃量。岩石的残余生烃量和残留烃量可以通过岩石热解法获得^[38-39],岩石的原始生烃潜量(S_0)可以通过选取未熟-低熟泥页岩样品进行热解分析后获得,计算方法如下:

排烃效率 = 排出烃量/原始生烃潜量(S_0)

排出烃量 = 原始生烃潜量(S_0)

(1)

—残余生烃潜量(S) (2)

残余生烃潜量(S) = 热解 S_1 + 热解 S_2 (3)

将公式(2)和公式(3)与公式(1)整合之后即为公式(4):

排烃效率 = [原始生烃潜量(S_0) - 热解 S_1 - 热解 S_2]/ S_0 (4)

首先对 I 型未熟—低成熟及 $R_o = 0.8\%$ 和 $R_o = 1.1\%$ 的样品系列进行系统的热解分析, 获得不同热演化阶段泥页岩样品的 TOC 与生烃潜量($S_1 + S_2$) 关系式(图2), 对实测岩石热解数据进行数据拟合后得到 I 型未熟—低熟及不同热演化程度泥页岩样品的生烃潜量($S_1 + S_2$) 与 TOC 线性关系式。

$R_o(0.4\%)$ 原始生烃潜量公式:

$$y = 6.5222x + 5.2688, \quad R^2 = 0.9574 \quad (5)$$

$R_o(0.8\%)$ 残余生烃潜量公式:

$$y = 3.8629x + 1.3602, \quad R^2 = 0.8219 \quad (6)$$

$R_o(1.1\%)$ 残余生烃潜量公式:

$$y = 2.1446x - 2.2523, \quad R^2 = 0.9318 \quad (7)$$

同理, 可计算获得 II 型不同热演化程度泥页岩的生烃潜量($S_1 + S_2$) 与 TOC 线性关系式(图3)。

$R_o(0.4\%)$ 原始生烃潜量公式:

$$y = 5.2037x - 0.9278, \quad R^2 = 0.9753 \quad (8)$$

$R_o(0.8\%)$ 残余生烃潜量公式:

$$y = 3.718x + 0.8260, \quad R^2 = 0.8840 \quad (9)$$

$R_o(1.1\%)$ 残余生烃潜量公式:

$$y = 2.1110x + 0.1860, \quad R^2 = 0.9063 \quad (10)$$

通过将关系式(5)—(10) 带入关系式(1)—(4) 中, 即可进行计算不同热演化程度、不同 TOC 的泥页岩样品的排烃效率。

计算结果表明, R_o 为 0.8% 的 I 型有机质泥页岩的排烃效率在 $33\% \sim 37\%$, II 型排烃效率在 $16\% \sim 26\%$, R_o 为 1.1% 的 I 型有机质泥页岩的排烃效率在 $64\% \sim 67\%$, II 型排烃效率在 $54\% \sim 58\%$ (表1, 表2)。I 型与 II 型有机质泥页岩的排烃效率随着热演化程度不断增加具有逐渐增高的趋势。近期学者研究表明^[40], 有利于页岩油产出泥页岩层系对应的 R_o 。

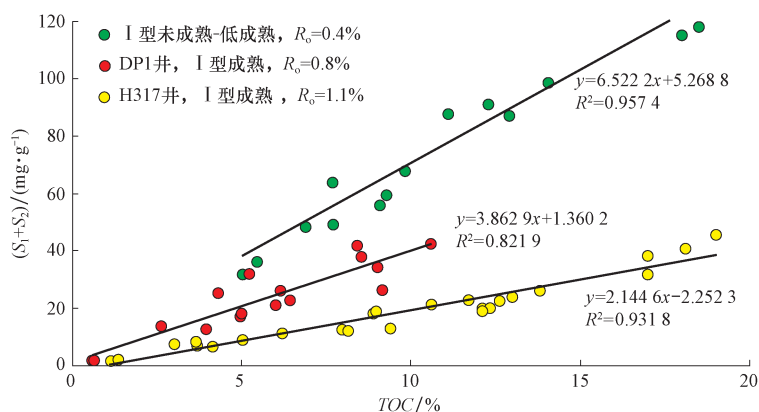


图2 鄂尔多斯盆地 I 型不同热演化程度长 7 段泥页岩排烃效率数学模型

Fig. 2 Mathematical model of hydrocarbon expulsion efficiency of shale system with type I organic matters in Chang 7 Member with different thermal evolution degree.

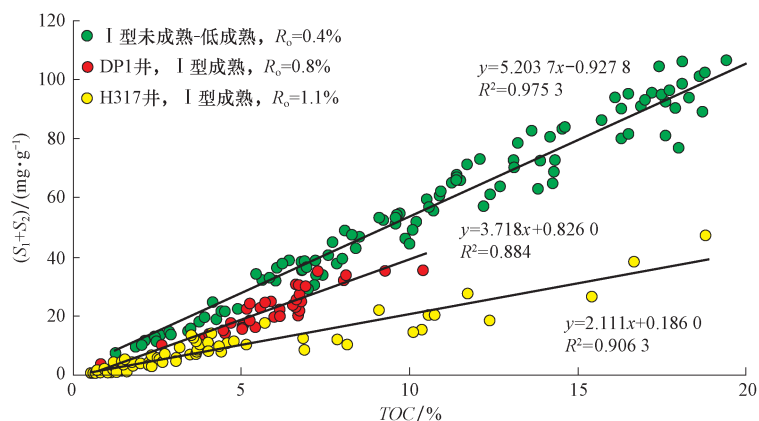


图3 鄂尔多斯盆地 II 型不同热演化程度长 7 段泥页岩排烃效率数学模型

Fig. 3 Mathematical model of hydrocarbon expulsion efficiency of shale system with type II organic matters in Chang 7 Member with different thermal evolution degree.

大致分布在 1.1%~1.2%,当前选取的 R_o 为 1.1% 的长 7 段泥页岩样品排烃效率基本在 50%~70%。虽然泥页岩排烃效率较高,但泥页岩内尚残留大致 30%~50% 左右的烃类,这部分尚未排出泥页岩体系的烃类是否能使泥页岩层系具有一定的含油性? 滞留烃的组份特征如何? 是否具有一定的流动性? 这是下文将详细讨论的问题。

4 泥页岩层系含油性及其页岩油意义

当前评价泥页岩层系含油性时,通常使用 S_1/TOC ,

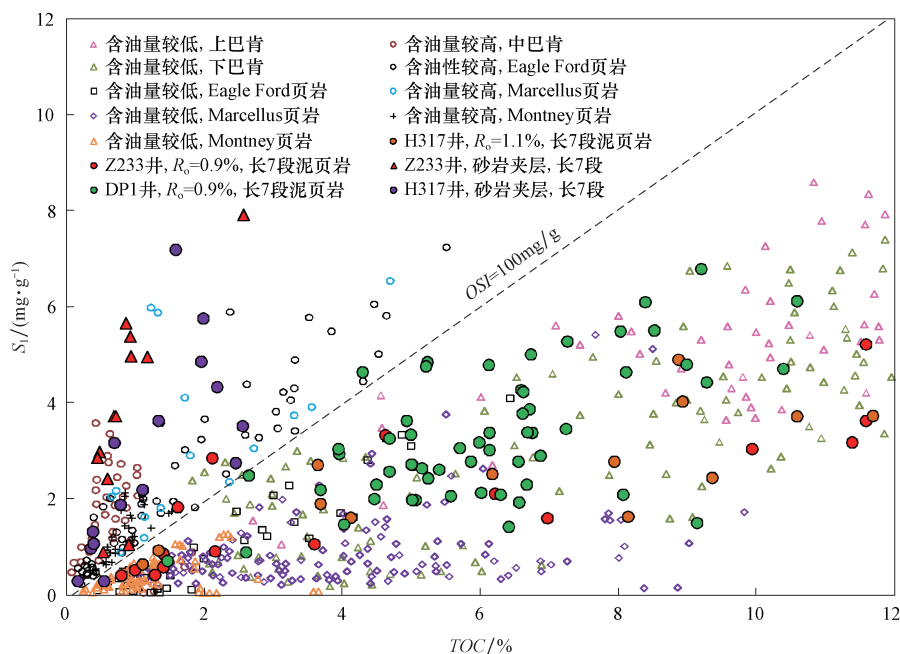
即含油饱和度指数 (Oil Saturation Index, 简称 OSI , 下同),通过汇总 Bakken, Eagle Ford, Marcellus 和 Montney 等北美主要的页岩油产层的 S_1 与 TOC 数据(图 4),同时将鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩及砂岩夹层的数据投点并进行对比分析。通过与国外数据的对比发现,长 7 段泥页岩的 OSI 大多低于 100 mg/g,而砂岩夹层的 OSI 却远高于 100 mg/g,其中 H317 井砂岩夹层的 OSI 最高可达 452 mg/g,平均为 260 mg/g;Z233 井砂岩夹层 OSI 最高可达 651 mg/g,平均 466 mg/g。相比之下两口井中处于成熟阶段的泥页岩 OSI 相对较低,Z233 井和 DP1 井的长 7 段泥页岩刚进入生油窗

表 1 鄂尔多斯盆地不同热演化程度的 I 型有机质泥页岩排烃效率
Table 1 Hydrocarbon expulsion efficiency of shale system with type I organic matters in Chang 7 Member with different thermal evolution degree, Ordos Basin

有机碳含量/%	I 型未成熟长,2, $R_o=0.4\%$		I 型低成熟长,7, $R_o=0.8\%$			
	原始生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	原始生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$))	排烃量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	排烃效率/%
2.5	16.64	666	11.02	441	5.63	33.82
4.0	25.86	646	16.81	420	9.05	35.00
6.0	38.14	636	24.53	409	13.61	35.68
8.0	50.43	630	32.26	403	18.17	36.04
12.0	75.00	625	47.70	398	27.30	36.39
有机碳含量/%	I 型成熟长,7, $R_o=1.1\%$					排烃效率/%
	残余生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$))	排烃量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			
2.5	5.97	239	10.68	64.16		
4.0	8.84	221	17.02	65.83		
6.0	12.66	211	25.48	66.80		
8.0	16.49	206	33.94	67.30		
12.0	24.15	201	50.85	67.80		

表 2 鄂尔多斯盆地不同热演化程度的 II 型有机质泥页岩排烃效率
Table 2 Hydrocarbon expulsion efficiency of shale system with type II organic matters in Chang 7 Member with different thermal evolution degree, Ordos Basin

有机碳含量/%	Ⅱ型未成熟长,2, $R_0=0.4\%$		Ⅱ型低成熟长,7,, $R_0=0.8\%$			
	原始生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	原始生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	排烃量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	排烃效率/%
2.5	12.08	483	10.12	405	1.96	16.23
4.0	19.89	497	15.70	392	4.19	21.06
6.0	30.29	505	23.13	386	7.16	23.64
8.0	40.70	509	30.57	382	10.13	24.89
12.0	61.52	513	45.44	379	16.07	26.13
有机碳含量/%	Ⅱ型成熟长,7, $R_0=1.1\%$					排烃效率/%
	残余生烃潜力/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	残余生烃指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	排烃量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			
2.5	5.46	219	6.62	54.78		
4.0	8.63	216	11.26	56.60		
6.0	12.85	214	17.44	57.58		
8.0	17.07	213	23.63	58.05		
12.0	25.52	213	36.00	58.52		

图4 国内外不同地区泥页岩 TOC 与 S_1 关系对比Fig. 4 Correlation of TOC and S_1 of shale system in different regions both in China and abroad

($R_o = 0.8\% \sim 0.9\%$), 干酪根刚开始逐渐向烃类转化, 尚未生成大量烃类, 因此其 OSI 低于 100 mg/g ; H317 井的长 7 段泥页岩热演化程度较高 ($R_o = 1.1\%$), 目前正处于生油高峰阶段, 虽然其在该阶段生成了大量的烃类, 但由于该阶段泥页岩整体的排烃效率较高 (前文计算结果显示排烃效率大致在 $50\% \sim 70\%$), 已经生成的烃类大多都排出了泥页岩层系, 因此使得滞留在泥页岩层系中的烃量整体较少, 导致其 OSI 较低。

Jarvie 等^[41]通过对 Bakken 组富有机质泥页岩层系页岩油地质特征的研究认为, 当泥页岩层系中 OSI 大于 100 mg/g 以上时, 该套地层就具有页岩油的生产潜力。如果从这个角度来看, OSI 较高的砂岩夹层应该是页岩油勘探的有利目标, 而含有饱和度相对较低的泥页岩作为页岩油勘探的有利目标的难度较大。但值得注意的是, 非烃源岩层其 TOC 值很低, 少量原油的充注即可导致 OSI 的高值, 其实际资源量可能是有限的。以 Bakken 组页岩为例, 上下 Bakken 的 OSI 值较低 ($< 75 \text{ mg/g}$), S_1 值为中 Bakken 的 2~3 倍, 产出原油的色谱特征表明上下 Bakken 页岩贡献了很高的产能^[42]。再如我国潜江凹陷盐间页岩层虽然 S_1/TOC 值普遍可达数百, 但一部分 S_1 值比较低的地层实际上并未获得较好的工业油流^[43]。因此在分析地层含油性时应将泥页岩游离烃量 S_1 和 OSI 两者结合进行综合考虑^[44]。

H317 井泥页岩层段的热解地球化学剖面显示 (图 5), 粉砂岩-细砂岩中均具有一定的游离烃含量, OSI 大多高于 100 mg/g 。2 468 m 以浅的块状泥岩和粉砂质泥岩有机碳分布在 $0.6\% \sim 8.9\%$, 游离烃含量 S_1 分布在 $0.3 \sim 5.8 \text{ mg/g}$, 粉砂质泥岩 OSI 大多高于 100 mg/g , 块状泥岩 OSI 一般分布在 $53 \sim 73 \text{ mg/g}$ 。2 468 m 以深的黑色页岩 TOC 和游离烃含量 S_1 整体高于浅部的泥岩和粉砂质泥岩, 分别分布于 $4\% \sim 19\%$ 和 $1.6 \sim 5.1 \text{ mg/g}$, OSI 明显低于浅部, 整体低于 40 mg/g 。典型样品氯仿沥青“A”族组份显示, 粉砂岩中饱和烃和芳香烃组份含量最高, 可达 94% (图 6a)。粉砂质泥岩和块状泥岩次之 (图 6c, b), 含量分别为 85% 和 84% 。黑色页岩最低, 含量仅有 53% (图 6d)。

通过实验结果来看, 长 7 段中砂岩夹层中油质较轻, 具有较高含量的游离烃 (S_1) 和较高的 OSI, 因此这类砂岩夹层可作为页岩油勘探开发的有利目标, 这与前人的研究认识基本一致 (张文正, 2015)。含有一定粉砂质的泥岩中滞留油的饱和烃及芳香烃含量基本与砂岩夹层相似, 油质相对较轻, 且同样具有较高含量的游离烃 (S_1) 和高 OSI, 因此粉砂质泥岩也具备成为页岩油赋存的有利目标的可能性 (图 5, 图 6)。

块状泥岩和黑色页岩相似之处在于二者 OSI 均相对较低 (低于 100 mg/g), 游离烃量也都相对较高。二者不同之处表现在: ①虽然二者的游离烃含量均相对较高, 但块状泥岩的有机质丰度明显低于黑色页岩 (图 4); ②块状泥岩滞留烃类的组份偏轻, 其饱和烃和

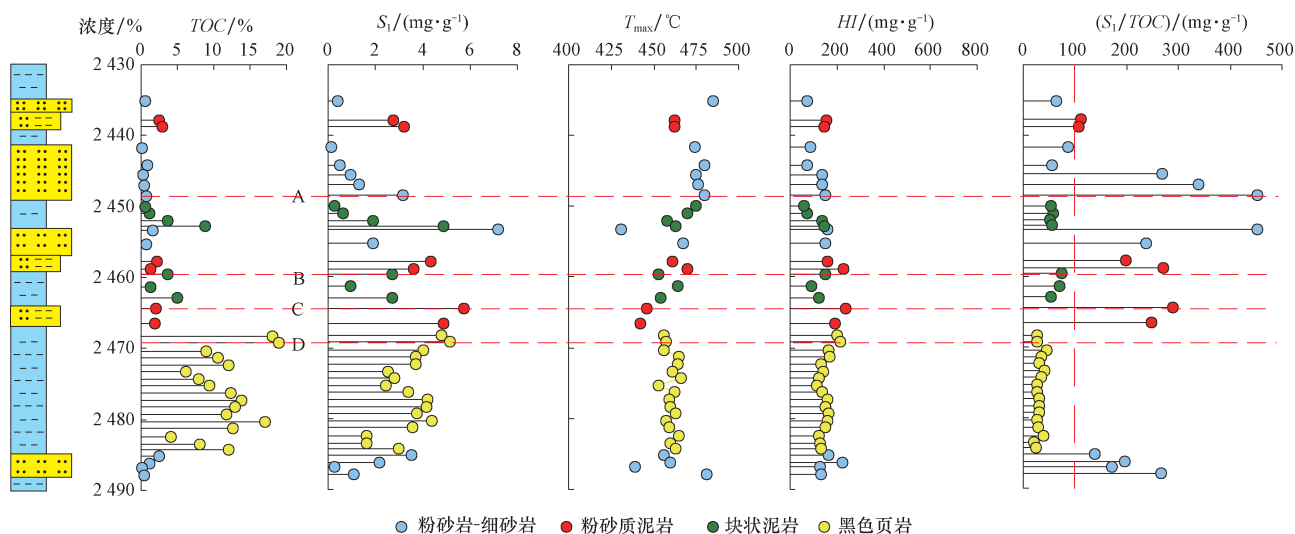


图5 鄂尔多斯盆地 H317 井长7段泥页岩层系热解地球化学剖面

Fig. 5 Pyrolysis geochemical profile of shale system in the Chang 7 Member from Well H317, Ordos Basin

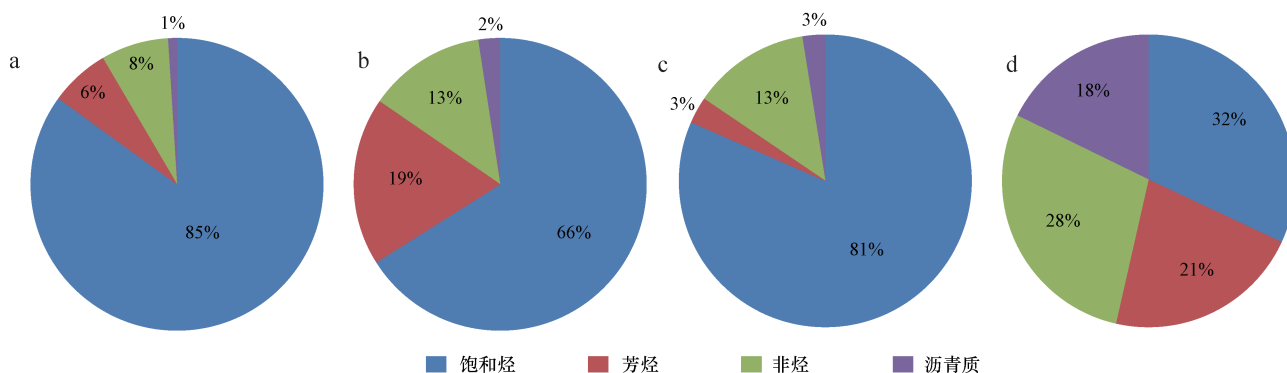


图6 鄂尔多斯盆地 H317 井典型样品氯仿沥青“A”族组分含量

Fig. 6 Component of chloroform bitumen A of typical samples from Well H317, Ordos Basin

a. 埋深 2 448.5 m, 长7段, 粉砂岩; b. 埋深 2 459.6 m, 长7段, 块状泥岩; c. 埋深 2 464.4 m, 长7段, 粉砂质泥岩;
d. 埋深 2 469.2 m, 长7段, 黑色页岩

芳香烃百分含量可达 85%, 非烃和沥青质含量只有 15%。相比之下, 黑色页岩滞留烃的组份明显重于块状泥岩, 饱和烃和芳香烃含量只有 53%, 而非烃和沥青质含量却高达 47% (图 5b, d)。如果从相似相溶的角度来说, 有机质含量越高, 其吸附的烃类也就越多, 这会导致黑色页岩中游离烃可动性变差, 相比之下块状泥岩中有机质含量低, 游离烃受其吸附作用的影响相对弱一些, 其可动性会强于黑色页岩。本文使用周文等 (2013) 建立的通过镜质体反射率确定地层油气相态的方法计算得到当前处于成熟阶段的长7段泥页岩层系中的滞留油属于单一油相态, 气油比很低, 大致在 141 ~ 162 m³/t。研究区内实际地质样品的模拟实验 (王香增等, 2014) 也证实, 在生油窗范围内, 泥页岩内部的气油比整体偏低, 大致分布在 100 ~ 1 000 m³/t, 主要以生油为主, 只伴有少量湿气。因此初步认为: 长7段块状泥岩与黑色页岩中的滞留油虽然主体以单一油相为主且

气油比较低, 但块状泥岩中烃类的组份明显偏轻, 且受有机质和粘土矿物的吸附作用明显弱于黑色页岩^[45], 因此块状泥岩中的滞留油流动性比黑色页岩的可能更好一些, 针对其进行页岩油开采可能要比黑色页岩更具实际意义。

综上所述, 泥页岩层系在成熟度较高时 ($R_o = 1.1\%$), 虽然泥页岩层系中仍滞留了将近 30% ~ 50% 的烃类, 但在综合考虑不同类型岩性的游离烃含量 (S_1), OSI , 滞留油族组份特征、气油比及滞留油流动性等地质因素后认为, 在长7段泥页岩层系中游离烃含量和 OSI 指数高的砂岩段、粉砂质泥岩段等可作为页岩油勘探开发的有利目标, 游离烃含量和 OSI 指数较高的块状泥岩可作为页岩油勘探的潜在目标, 而游离烃含量较高, 但 OSI 指数较低黑色页岩 (或纯页岩段) 受前文提及的若干地质因素的影响, 可能会制约其成为研究区内页岩油勘探的有效目标。这里需要说明

是,泥页岩层系滞留油中可动油和吸附油(与粘土矿物、有机质呈吸附或互溶状态,难以流动的油)的相对比例本文尚未进行讨论,该问题对于明确泥页岩中现实可动用的滞留油具有重要意义,该部分研究工作将在下一阶段的研究中系统开展。

5 结论

1) 中等成熟度($R_o = 0.8\%$)的Ⅰ型有机质泥页岩的排烃效率在33%~37%,Ⅱ型排烃效率在16%~26%,较高成熟度($R_o = 1.1\%$)的Ⅰ型有机质泥页岩的排烃效率在64%~67%,Ⅱ型排烃效率在54%~58%之间。排烃效率随着热演化程度不断增加具有逐渐增高的趋势。

2) 泥页岩层系在成熟度较高时($R_o = 1.1\%$),泥页岩层系中仍滞留了将近30%~50%左右的烃类。在综合考虑不同类型岩性的含油性、滞留油族组份特征、气油比及滞留油流动性等地质因素后认为,在长7段泥页岩层系中游离烃含量和 OSI 指数高的砂岩段、粉砂质泥岩段等可作为页岩油勘探开发的有利目标,游离烃含量和 OSI 指数较高的块状泥岩可作为页岩油勘探的潜在目标,而游离烃含量较高,但 OSI 指数较低的黑色页岩(或纯页岩段)因受若干地质因素的影响,可能会制约其成为研究区内页岩油勘探的有效目标。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] 金之钧. 中国页岩油成因、类型与分布特征[C]. 页岩油勘探技术国际研讨会, 2012, 无锡.
Jin Zhijun. The Genesis, Types and distribution characteristics of China's shale oil[C]. International Symposium on Shale Oil Resources and Exploration Technology, 2012, Wuxi.
- [3] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [4] 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, Cuijingwei, 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.
- [5] 柳波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, (2): 280-285.
Liu Bo, Lv Yanfang, Ran Qingchang, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, (2): 280-285.
- [6] 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.
- [7] 张林晔,李政,李钲源,等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 1-11.
Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the Palaeogene shale of Dongying Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 1-11.
- [8] 张林晔,包友书,李钲源,等. 湖相页岩油可动性—以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 641-649.
Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 641-649.
- [9] 张善文,王永诗,张林晔,等. 济阳坳陷渤南洼陷页岩油气形成条件研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 49-63.
Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Zhang Linye, et al. Formation conditions of shale oil and gas in Bonan sub-sag, Jiyang Depression[J]. Engineering Science, 2012, 14(6): 49-63.
- [10] 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 Petroli Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [11] 高岗,刘显阳,王银会,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 140-146.
Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinwei, et al. Characteristics and resource potential of the oil shale of Chang 7 Layer in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 140-146.
- [12] 张文正,杨华,杨伟伟,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价[J]. 地球化学, 2015, 44(5): 505-515.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, et al. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geochimica, 2015, 44(5): 505-515.
- [13] 吴世强,唐小山,杜小娟,等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 282-286.
Wu Shiqiang, Tang Xiaoshan, Du Xiaojuan, et al. Geologic characteristics of continental shale oil in the Qianjiang Depression, Jianghan Salt Lake Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology

- (Natural Science), 2013, 36(3): 282–286.
- [14] 肖枫, 张士万, 何幼斌, 等. 潜江凹陷潜三段盐间页岩油特征及油源研究[J]. 能源与环境, 2017, 39(7): 96–101.
Xiao Feng, Zhang Shiwan, He Youbin, et al. Geochemistry and oil-source study of inter-salt shale oil of Eq ~3 in Qianjiang Depression [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(7): 96–101.
- [15] 陈祥, 王敏等. 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, Wangmin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 568–576.
- [16] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147–154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147–154.
- [17] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用—强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289–293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation-Hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289–293.
- [18] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59–64.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59–64.
- [19] 王香增, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部长7陆相泥页岩生烃过程研究[J]. 非常规油气, 2014(1): 2–10.
Wang Xiangzeng, Gao Chao. The Hydrocarbon generation process of the Mesozoic Chang 7 lacustrine shale in south of Ordos Basin [J]. Unconventional oil and gas, 2014(1): 2–10.
- [20] 周文, 陈文玲, 邓昆, 等. 陆相页岩油气地层油气相态的确定方法初探—以鄂尔多斯盆地延长组长7段为例[J]. 成都理工大学学报(自科版), 2013, 40(6): 640–647.
Zhou Wen, Chen Wenling, Deng Kun, et al. Determination of oil/gas phase in continental shale: Taking member Chang 7 shale of Yanchang Formation in Ordos Basin for example [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 640–647.
- [21] 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 Chaoliang, 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.
- [22] Leythaeuser D, Bjoroy M, Mackenzie A, et al. A novel approach for recognition and quantification of hydrocarbon migration effects in shale-sandstone sequences [J]. AAPG Bull.; (United States), 1984, 68; 2(2): 196–219.
- [23] Leythaeuser D, Radke M, Schaefer R G. Efficiency of petroleum expulsion from shale source rocks [J]. Nature, 1984, 311 (5988): 745–748.
- [24] Leythaeuser D, Schaefer R G, Radke M. On the primary migration of petroleum. Proceedings 12th Word Congress, Houston, Vol. 2, Special paper No. 2. London: Wiley J& Sons, 1987, 227–236.
- [25] Leythaeuser D, Schaefer R G, Radke M. Geochemical effects of primary migration of petroleum in Kimmeridge source rocks from Brae field area, North Sea. I: Gross composition of C 15 + – soluble organic matter and molecular composition of C 15 + – saturated hydrocarbons [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1988, 52(3): 701–713.
- [26] Cooles G P, Mackenzie A S, Quigley T M. Calculation of petroleum masses generated and expelled from source rocks [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1): 235–245.
- [27] Pepper A S. Estimating the petroleum expulsion behaviour of source rocks: a novel quantitative approach [J]. Geological Society of London Special Publications, 1991, 59(1): 9–31.
- [28] 庞雄奇, 陈章明. 排油气门限的基本概念, 研究意义与应用[J]. 现代地质, 1997, (4): 510–521.
Pang Xiongqi, Chen Zhangming. Basic concept of hydrocarbon expulsion threshold and its research significance and application [J]. Geoscience, 1997, (4): 510–521.
- [29] Lafargue E, Espitalie J, Jacobsen T, et al. Experimental simulation of hydrocarbon expulsion [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1): 121–131.
- [30] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1–371.
Fu Jiamo, Liu Dehan, Sheng Guoying. Coal Hydrocarbon Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1990: 1–371.
- [31] Esem E, Litke R, Krooss B M, et al. Experimental investigation of the compositional variation of petroleum during primary migration [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(8): 1373–1397.
- [32] 郑伦举, 秦建中, 何生, 等. 地层孔隙热压生排烃模拟实验初步研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 296–302.
Zheng Lunju, Qin Jianzhong, He Sheng, et al. Preliminary study of formation porosity thermocompression simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 296–302.
- [33] 马中良, 郑伦举, 李志明. 烃源岩有限空间温压共控生排烃模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 955–963.
Ma Zhongliang, Zheng Lunju, Li Zhiming. The Thermocompression Simulation Experiment of Source Rock Hydrocarbon Generation and Expulsion in Formation Porosity [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 955–963.

- tary rocks from seismic data [C] // Offshore Technology Conference. Houston; 11th Annual OTC, 1979; 2667 – 2676.
- [4] Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressures from seismic data [C] // Annual International Meeting. America; SEG, 1982; 502 – 503.
- [5] Foster J B, Whalen H E. Estimation of formation pressures from electrical surveys-Offshore Louisiana [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, 18(2): 165 – 171.
- [6] 刘震, 张厚福. 辽西凹陷北洼下第三系异常地层压力分析 [J]. *石油学报*, 1993, 14(1): 14 – 24.
Liu Zhen, Zhang Houfu. An analysis of abnormal formation pressures of paleogene in the north sag of liaoxi depression [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1993, 14(1): 14 – 24.
- [7] 曾涛, 徐宏节. 地震层速度在断层封堵性研究中的应用 [J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(2): 161 – 163.
Zeng Tao, Xu Hongjie. Application of Seismic interval Velocity in the study of fault plugging [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(2): 161 – 163.
- [8] 管志川, 魏凯. 利用已钻井资料构建区域地层压力剖面的方法 [J]. *中国石油大学学报*, 2013, 37(5): 71 – 76.
Guan Zhichuan, Wei Kai. Method for constructing regional formation pressure profile by using drilled data [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, 37(5): 71 – 76.
- [9] 桂俊川, 陈颖杰. 基于两种压实趋势线计算地层孔隙压力的新方法 [J]. *国外测井技术*, 2015, 205(1): 24 – 31.
Gui Junchuan, Chen Yingjie. A new method to calculate formation pore pressure of two kinds of compaction trend line based on [J]. *Foreign Logging Technology*, 2015, 205(1): 24 – 31.
- [10] 陈鑫, 魏小东, 李艳静, 等. 基于地震资料的探井钻前孔隙压力预测 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 1039 – 1046.
Chen Xin, Wei Xiaodong, Li Yanjing. Pre-drilling pore pressure prediction based on seismic data for exploratory well; Oilfield A in Iraq [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1039 – 1046.
- [11] 吴海生, 郑孟林, 何文军, 等. 准格尔盆地腹部地层压力异常特征与控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1136 – 1145.
Wu Haishen, Zheng Menglin, He Wenjun. Formation pressure anomalies and controlling factors in central Juggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1136 – 1145.
- [12] 梁瑶, 王真理. 利用双路径积分算法进行高密度偏移速度建模 [J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 142 – 164.
Liang Yao, Wang Zhenli. High-density migration velocity model building using double path integral [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(1): 142 – 164.
- [13] 董良国, 马在田, 曹景忠, 等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 37 – 41.
Dong Liangguo, Ma Zaitian. One order elastic wave equation staggered grid high-order difference method [J]. *Chinese Journal of Geophysical*, 2000, 43(3): 37 – 41.
- [14] 徐嘉亮, 常旭, 王一博, 等. 角度域剩余深度对剩余速度的敏感性分析 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2928 – 2934.
Xu Jialiang, Chang Xu, Wang Yibo. Sensitivity analysis of angle domain residual depth on residual velocity [J]. *Chinese Journal of Geophysical*, 2015, 58(8): 2928 – 2934.
- [15] 张国栋, 马光克. 速度体高精度建模法在深水 M 气田时深转换中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(5): 2246 – 2254.
Zhang Guodong, Ma Guangke. Application of high precision velocity modeling methods for time-depth conversion in deepwater M gas field [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 2246 – 2254.

(编辑 张亚雄)

(上接第 521 页)

- [34] Burnham A K, Braun R L. Development of a detailed model of petroleum formation, destruction, and expulsion from lacustrine and marine source rocks [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(1–3): 27 – 39.
- [35] Ungerer P. State of the art in kinetic modeling of oil formation and expulsion [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(1–3): 1 – 25.
- [36] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part III: Modelling an open system [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 1995, 12(4): 417 – 452.
- [37] 陈建平, 孙永革, 钟宁宁, 等. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式 [J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2005 – 2032.
Chen Jianping, Sun Yongge, Zhong Ningning, et al. The Efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within Geological Frame [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2005 – 2032.
- [38] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Springer Berlin Heidelberg, 1984.
- [39] 郭立言, 顾信章, 盛志伟, 等. 生油岩热解快速定量评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1986, 1 – 198.
Wu Liyan, Gu Xinzhang, Sheng Zhiwei, et al. Rapid quantitative evaluation of pyrolysis of source rocks [M]. Beijing: Science Press, 1986, 1 – 198.
- [40] 黎茂稳. 有关页岩油赋存富集的几点思考 [C]. 第七届中国石油地质年会, 2017, 北京.
Li Maowen. Some reflections on the enrichment of shale oil [C]. The 7th China Petroleum Geological Society, 2017, Beijing.
- [41] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: Shale-oil resource systems [J]. *AAPG Memoir*, 2012, 97: 89 – 119.
- [42] Jarvie D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems [J]. *Geologica Acta*, 2014, 12(4): 307 – 325.
- [43] 黎茂稳. 中国石化探区陆相页岩油富集机理研究进展 [C]. 中国油气勘探开发工程技术论坛, 2018, 北京.
Li Maowen. Research progress of continental shale oil enrichment mechanism in Sinopec exploration area [C]. China Petroleum Exploration and Development Engineering Technology Forum, 2018, Beijing.
- [44] Li Jijun, Wang Weiming, Cao Qun, et al. Impact of hydrocarbon expulsion efficiency of continental shale upon shale oil accumulations in eastern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 467 – 479.
- [45] Li Jijun, Liu Zhao, Li Junqian, et al. Fractal characteristics of continental shale pores and its significance to the occurrence of shale oil in China: A case study of Biyang Depression [J]. *Fractals*, 2018, 26(2): 1840008.

(编辑 张玉银)