

鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段烃组分的运移分异作用

师良¹, 范柏江¹, 李忠厚¹, 余紫巍², 蔺子瑾¹, 戴欣洋¹

(1. 延安大学石油工程与环境工程学院, 陕西延安 716000; 2. 中国石油青海油田公司采油三厂, 青海茫崖 816400)

摘要:鄂尔多斯盆地延长组7段页岩体系是泥岩、页岩和砂岩的组合物。为了深入揭示页岩油组分在不同岩性中的运移分异现象, 针对鄂尔多斯盆地中部地区开展了典型烃类组分的运移分异研究。研究表明:在不同的岩性中4类族组分含量存在差异。砂岩中饱和烃(SAT)含量高, 非烃与沥青质(NSO+Asph)含量低。页岩和泥岩的SAT含量低, NSO+Asph含量高。砂岩的 nC_{11-15} 烃类组分含量较高, nC_{23-39} 烃类组分含量较低;页岩和泥岩的 nC_{11-15} 烃类组分含量较低, nC_{23-39} 烃类组分含量较高。页岩和泥岩的Pr/Ph, Pr/ nC_{17} 和Ph/ nC_{18} 等含量比值参数数值变化大, 砂岩的数值变化小。页岩和泥岩的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量比值较低, 砂岩则较高。页岩和泥岩的藿烷Ts/Tm与Ts/(Ts+Tm)比值较低, 砂岩则较高。页岩和泥岩的 C_{32} 升藿烷22S/(22S+22R)比值变化较大, 砂岩则具有相对集中的数值。砂岩的伽马蜡烷指数较高且数值分布范围较广, 而页岩与泥岩则相反;页岩和泥岩 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷的含量比值普遍大于1, 而砂岩的数值普遍小于1。综合研究认为, 不同石油组分在烃源岩内部的分布差异是吸附差异和不同石油组分运移分异共同导致的。

关键词:运移分异; 烃组分; 页岩; 延长组7段; 三叠系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Migration differentiation of hydrocarbon components in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, central Ordos Basin

SHI Liang¹, FAN Bojiang¹, LI Zhonghou¹, YU Ziwei², LIN Zijin¹, DAI Xinyang¹

[1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2. No. 3 Oil Extraction Factory, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China]

Abstract: The shale sequence of the 7th member of the Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7 Member) in the Ordos Basin consists of mudstones, shales, and sandstones. To delve into the migration differentiation of shale oil components in different lithologies, we investigate the migration differentiation of typical hydrocarbon components in the central Ordos Basin. The findings show that the rocks exhibit different contents of the four group components: saturated hydrocarbons (SAT), aromatic hydrocarbons (ARO), polar nitrogen-, sulfur-, and oxygen-containing compounds (NSO), and asphaltenes (Asph). Specifically, the sandstones manifest high SAT content and low NSO+Asph content. Conversely, the shales and mudstones exhibit low SAT content and high NSO+Asph content. Regarding n-alkanes, the sandstones demonstrate high nC_{11-15} content and low nC_{23-39} content, while the shales and mudstones display low nC_{11-15} content and high nC_{23-39} content. Compared to the sandstones, the shales and mudstones show more significant variations in the Pr/Ph, Pr/ nC_{17} , and Ph/ nC_{18} ratios. These rocks manifest low C_{27}/C_{29} regular sterane ratios and low Ts/Tm and Ts/(Ts+Tm) ratios, while the sandstones show opposite trends. They demonstrate substantial variability in 22S/(22S+22R) ratios for C_{32} homohopane, in contrast to the relatively concentrated ratios for the sandstones. Besides, the sandstones are characterized by high gammacerane index values varying in a broad range, whereas the shales and mudstones exhibit the opposite trend. Notably, the shales and mudstones generally have $8\beta(H)$ -drimane/ $8\beta(H)$ -homodrimane ratios

收稿日期:2023-11-05;修回日期:2023-12-14。

第一作者简介:师良(1988—),女,实验师,烃源岩及储层的测试及分析。E-mail: 459942621@qq.com。

通信作者简介:范柏江(1983—),男,教授、硕士生导师,油气成藏机理及油气资源评价。E-mail: 632258611@qq.com。

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-277)。

exceeding 1, which, however, are typically less than 1 for the sandstones. A comprehensive analysis indicates that the variations in the distributions of the various hydrocarbon group components within the source rocks can be attributed to both differential adsorption and migration differentiation.

Key words: migration differentiation, hydrocarbon component, shale, Chang 7 Member of Yanchang Formation, Triassic, Ordos Basin

引用格式: 师良, 范柏江, 李忠厚, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段烃组分的运移分异作用[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 157-168. DOI: 10. 11743/ogg20240111.

SHI Liang, FAN Bojiang, LI Zhonghou, et al. Migration differentiation of hydrocarbon components in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 157-168. DOI: 10. 11743/ogg20240111.

20世纪30年代, Illing认识到油气从低渗透烃源岩向高渗透输导层或储层的排运过程, 由此建立初次运移的雏形^[1]。Tissot和Welte认为, 初次运移过程极其复杂, 它涉及生烃、残留烃和排烃过程的综合作用^[2]。80年代以来, 研究者在初次运移的动力、相态、距离、路径、方式等方面开展了大量探索^[3-8]。在揭示初次运移的研究中, 油气及其组分的运移分异现象不断得以证实^[9-11]。

受河流和湖泊共同作用的影响, 湖相烃源岩的岩性复杂多变, 湖相烃源岩本质上是不同岩性的组合体^[10]。岩性及岩性的组合差异导致生烃、残留烃及排烃作用的差异, 由此可能导致油气组分的差异性分布。针对湖相烃源岩的研究表明, 厚层泥页岩中滞留的油气多, 薄层泥页岩中赋存的油气少; 泥页岩与砂岩的交互组合越频繁, 赋存的油气量差异越小^[12-14]。在不同的岩性以及岩性组合下, 油气组分(如族组分)甚至微量元素都会产生运移分异现象^[10-11, 14-15]。随着页岩油的成功开发, 页岩油“自生自储”的特性得以揭示。然而, 针对页岩油在源内的运移分异作用, 当前还少有探索。为了深入揭示湖相烃源岩内部的初次运移作用, 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)页岩油为对象, 开展了典型烃类组分的运移分异作用研究。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地三叠系长7段沉积于古湖的最大扩张期, 暗色烃源岩异常发育, 业界普遍将其称为长7页岩体系^[16-17]。长7页岩体系为鄂尔多斯盆地的常规油气及非常规油气提供了丰富的油气来源, 这已经被广泛证实^[16-17]。然而, 鄂尔多斯盆地中部地区, 长7页岩体系的岩性并不单一, 岩心揭示其不仅存在页岩和泥岩, 还夹杂了大量砂岩(图1)^[18]。不同岩性的差异发育还导致了纵向上的不同岩性组合^[18]。

长7段泥岩与页岩在岩石学特征上易进行区分^[18]。

其中, 页岩的颜色深, 以黑色、深灰色为主; 砂质成分少、质感细腻; 易沿节理面破裂; 断面较平整; 含动、植物遗体及遗迹, 偶见完整化石(图2a,b)。泥岩的颜色较浅, 以灰黑色、深灰色、灰色为主; 含砂质成分、质感略粗糙; 不易发生破裂; 断面不平整; 含动植物遗体及遗迹(图2c,d)。此外, 研究区页岩和泥岩的电性特征存在差异。页岩自然伽马值>100 API, 声波时差>250 $\mu\text{s}/\text{m}$, 电阻率>40 $\Omega \cdot \text{m}$, 密度<2.5 g/cm^3 ; 泥岩自然伽马值 $\approx$ 100 API, 声波时差=220~250 $\mu\text{s}/\text{m}$, 电阻率=30~40 $\Omega \cdot \text{m}$, 密度<2.8 g/cm^3 。长7段砂岩以岩屑长石砂岩为主, 含部分长石岩屑砂岩和长石砂岩。岩心特征上, 砂岩颜色浅, 以灰色为主; 粒度细, 多为粉-细砂粒级; 截面粗糙不平整; 普遍发育平行、块状、波状、交错等各类层理; 动、植物遗迹少, 但可见植物碎屑(图2e,f)。

2 实验方法与测试结果

本次针对研究区32口井采集了74块样品, 基于研究需要选择了49块样品开展各类分析测试。其中, 37块泥页岩样品以及5块砂岩样品开展了有机碳测试、抽提烃分离及饱和烃色谱-质谱分析; 3个样品开展了微-纳米CT扫描; 4个样品开展了饱和状态下的二维核磁共振测试。

2.1 实验方法

本次重点开展了总有机碳含量(TOC)、低温抽提、组分分离、色谱-质谱相关实验。TOC的测定采用干烧重量法。实验流程为: ①将岩样碾磨至100目左右粉末; ②用盐酸(5%浓度)去除无机碳; ③置入高温氧气流进行燃烧; ④用碱石棉吸收二氧化碳; ⑤以碱石棉的增量换算获得TOC。

抽提实验中, 轻烃组分极易挥发散失, 特采用低温抽提实验来降低轻烃的散失。实验流程为: ①利用碾子炉将岩样彻底碾磨均匀, 然后置入密封罐; ②配

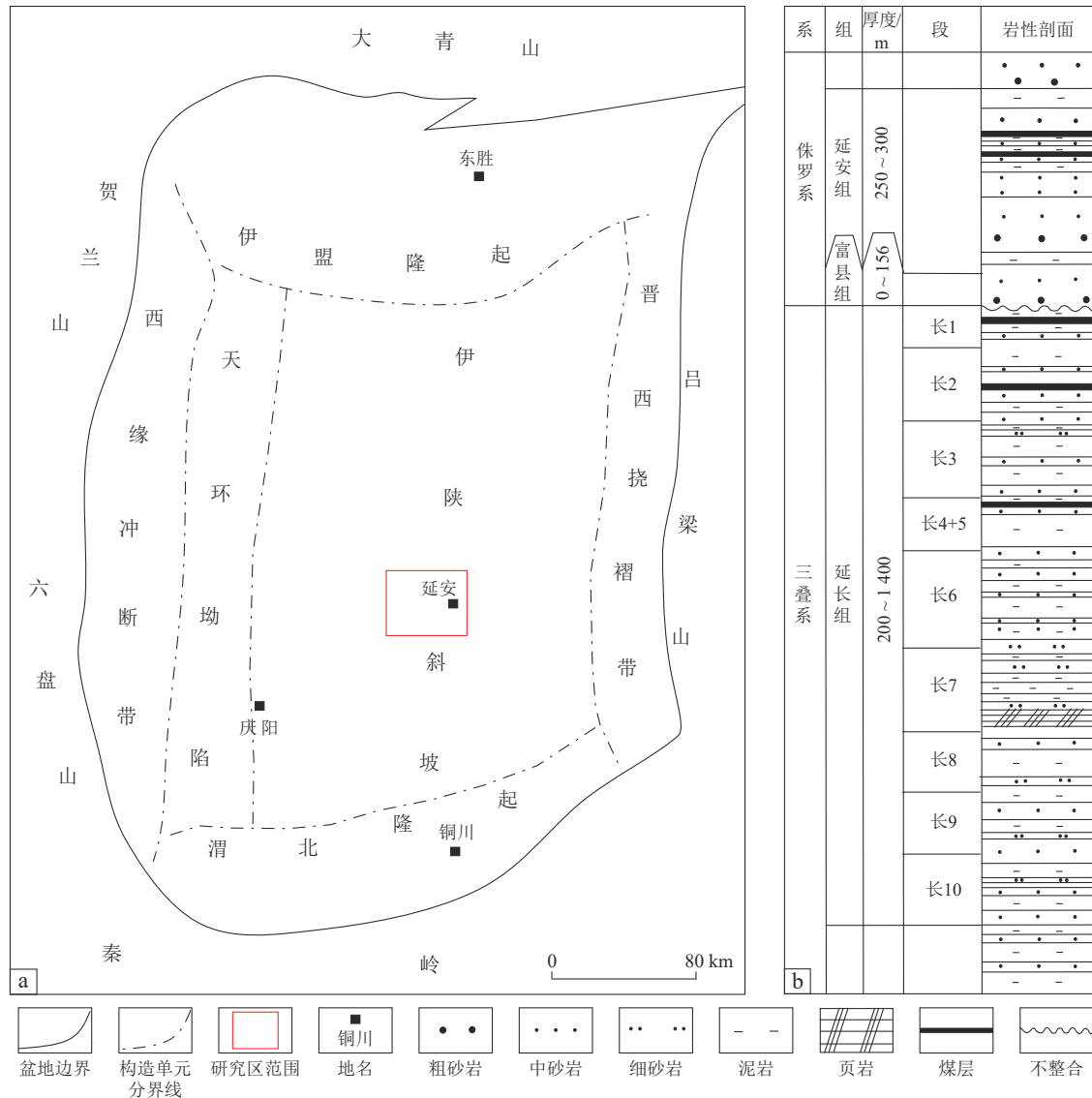


图 1 鄂尔多斯盆地中部研究区位置(a)及地层岩性剖面(b)

Fig. 1 Location (a) and lithologic profile of strata (b) in the study area, central Ordos Basin

置 1-壬烯与 1-己烯标准溶液(内标物质),配置足量氟利昂(样品降温);③将完成配置的密封罐充分振荡;④对密封罐内物质进行低温过滤;⑤对过滤液体进行低温浓缩。

石油族组分包括饱和烃组分(SAT)、芳香烃组分(ARO)、极性及沥青质组分(NSO+Asph)。族组分的实验流程为:①将浓缩液置于充填硅胶的液管柱,置于 120 °C 的温度下约 12 h;②用戊烷将 SAT 分离;③用戊烷/二氯甲烷(7:3 比例)混合液将 ARO 分离;④利用二氯甲烷/甲醇混合液(9:1 比例)将 NSO+Asph 分离;⑤将 SAT、ARO 和 NSO+Asph 分别置于通风柜中干燥并称重。针对 SAT,开展色谱-质谱(5975MSD 型色谱-质谱联用仪)测试。

针对饱和流体的岩样进行核磁共振测量时, T_2 弛

豫时间本质上是孔隙、矿物和流体的综合反映。因此,利用核磁共振 T_2 弛豫时间的特征可对流体的赋存状态进行分析。二维核磁共振波谱包含两个时间变量,两次傅里叶变换,两个独立的频率信号。由于横坐标和纵坐标均为频率信号,因而其强度信号能避免一维谱图中的多重峰重叠现象。基于此,采用核磁共振岩样分析仪(MARAN-2S2 型)开展了二维核磁测试。

2.2 测试结果

从测试结果来看,页岩 TOC 整体较高,其次为泥岩,砂岩的 TOC 极低。页岩和泥岩的抽提烃组分含量整体差异不大,但砂岩的抽提烃含量较低。由于砂岩的孔渗性明显优于页岩和泥岩,砂岩的散失烃量可能更多,因此,砂岩的抽提烃含量较低并不代表其页岩油

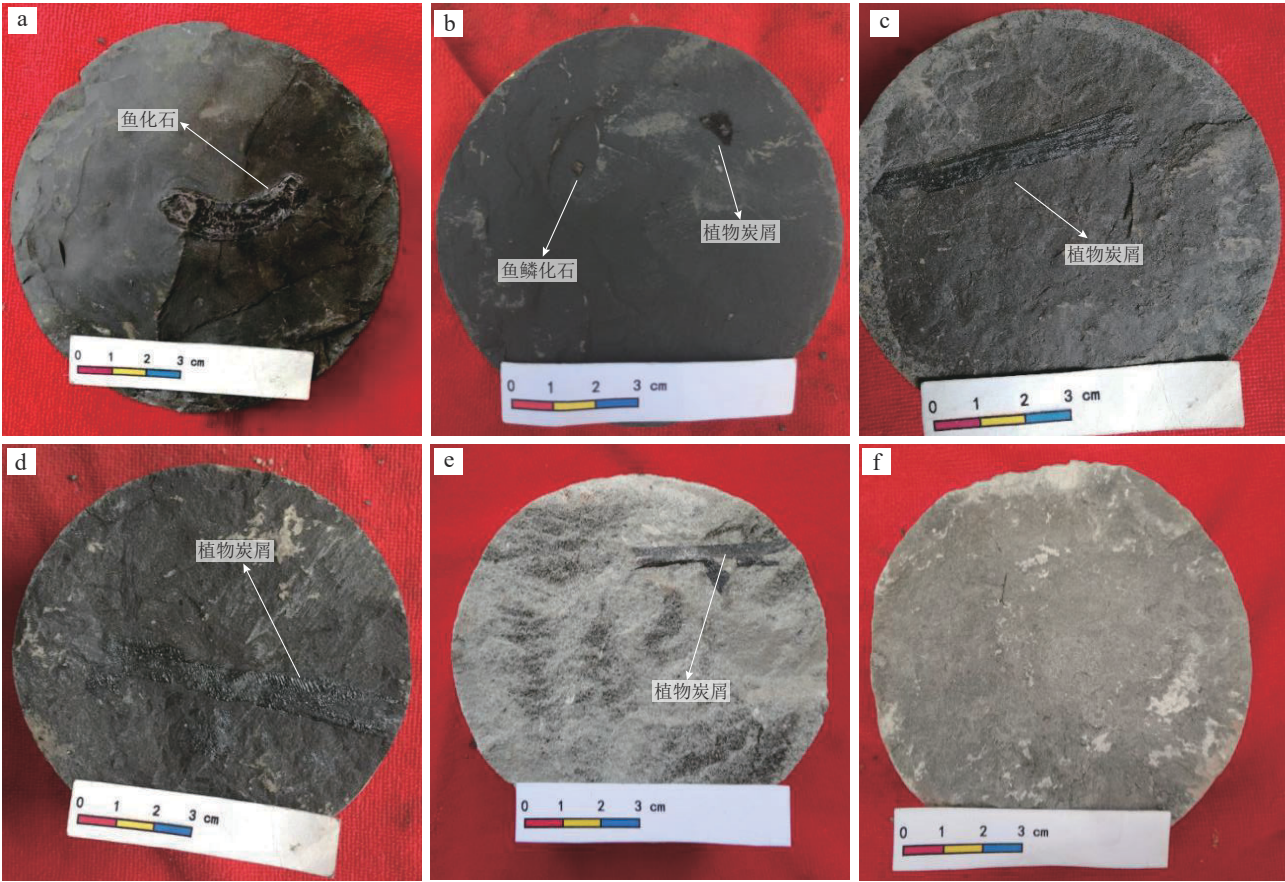


图2 鄂尔多斯盆地中部长7段泥岩、页岩与砂岩的岩心特征照片

Fig. 2 Core photographs showing the petrological characteristics of mudstones , shales , and sandstones from the Chang 7 Member , central Ordos Basin

a. S3114井,埋深1 141.16 m,黑色页岩出露完整鱼化石; b. E318井,埋深1 428.86 m,黑色页岩含动植物遗迹; c. E325井,埋深1 103.19 m,深灰色泥岩含植物遗迹; d. E339井,埋深1 154.89 m,深灰色泥岩含植物遗迹; e. E306井,埋深1 048.37 m,灰色砂岩含植物遗迹; f. R211井,埋深1 387.19 m,浅灰色砂岩

含量较低。在族组分组成上,页岩和泥岩SAT的相对含量整体较低,NSO+Asph的相对含量整体较高;砂岩SAT的相对含量整体较高,NSO+Asph的相对含量整体较低(表1)。在色谱-质谱特征上,不同岩性的饱和烃色谱-质谱亦存在一定的差异(图3)。

3 页岩油组分分异特征

石油组分的含量差异不仅可以由运移分异作用导致,还可以由水洗、气洗和生物降解等其他地质作用导

表1 鄂尔多斯盆地中部长7段不同岩性样品的有机碳含量及抽提烃组分含量

Table 1 TOC content and extracted hydrocarbon content from the samples of various lithologies in the Chang 7 Member , central Ordos Basin

岩性	样品数/个	数值	TOC/%	抽提烃总量/(mg/g)	SAT 含量占比/%	ARO 含量占比/%	NSO+Asph 含量占比/%
页岩	20	最大值	16.24	13.29	71.29	46.31	65.54
		最小值	1.63	1.27	11.38	2.68	12.06
		平均值	6.58	5.79	48.79	15.80	35.41
泥岩	17	最大值	12.20	13.73	70.80	29.51	54.44
		最小值	1.76	0.89	16.05	1.38	22.16
		平均值	4.95	5.64	51.20	14.49	37.35
砂岩	5	最大值	0.28	4.77	81.21	9.71	37.17
		最小值	0.05	0.75	56.31	3.40	14.01
		平均值	0.15	2.45	70.58	5.71	23.71

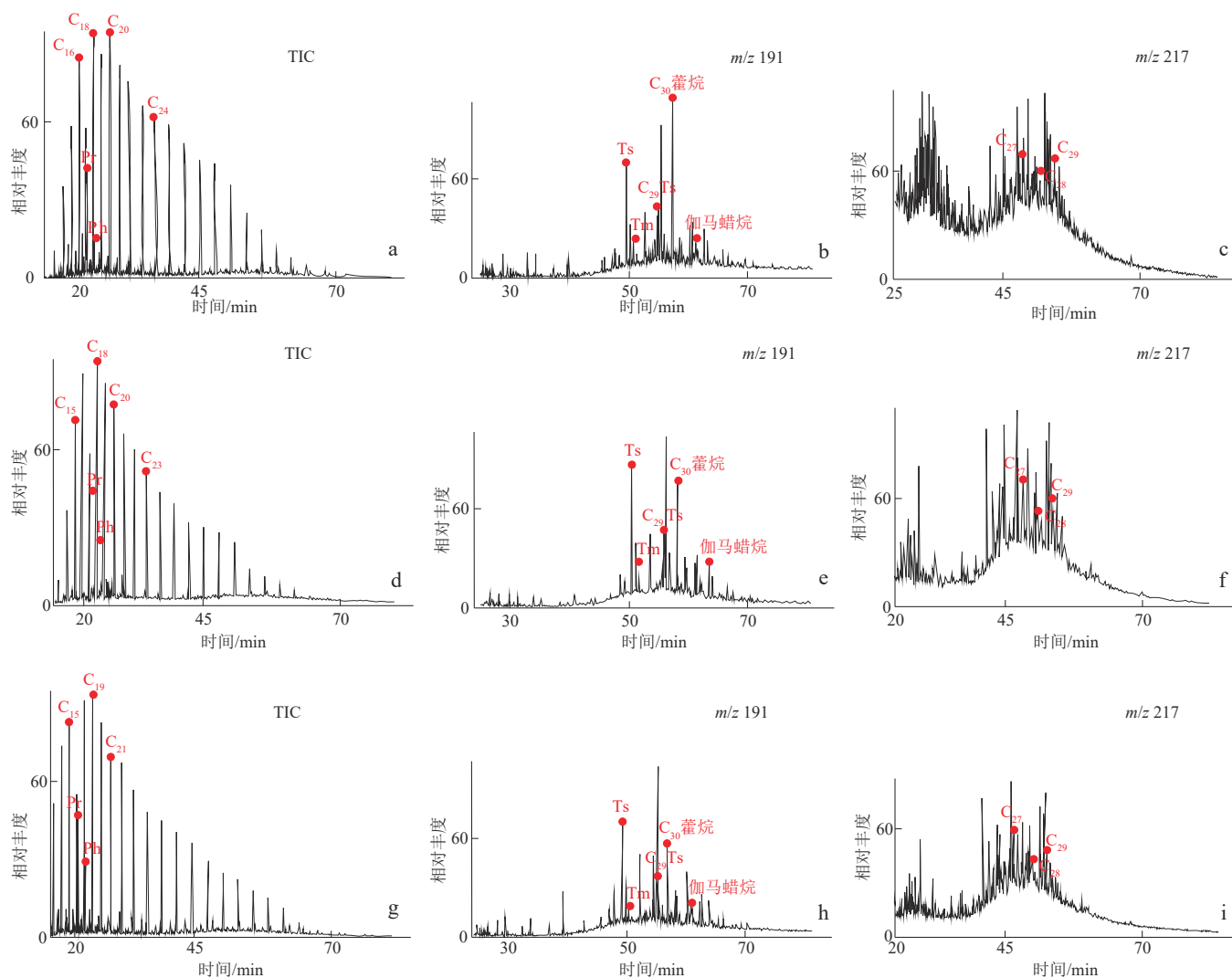


图3 鄂尔多斯盆地中部长7段泥岩、页岩与砂岩的饱和烃色谱-质谱特征

Fig. 3 Chromatography-mass spectrometry of saturated hydrocarbons from mudstones, shales, and sandstones of the Chang 7 Member, central Ordos Basin

C_{15} 具有15个C原子的正烷烃; C_{16} 具有16个C原子的正烷烃; C_{18} 具有18个C原子的正烷烃; C_{19} 具有19个C原子的正烷烃; C_{20} 具有20个C原子的正烷烃; C_{23} 具有23个C原子的正烷烃; C_{24} 具有24个C原子的正烷烃; C_{27} 、 C_{28} 规则甾烷; C_{29} 、 C_{29} 规则甾烷; Pr. 姥鲛烷; Ph. 植烷; Tm. 17 α (H)-22,29,30-三降藿烷; Ts. 18 α (H)-22,29,30-三降藿烷; C_{29} Ts. 降新藿烷

a. E310井,埋深1 352.9 m,泥岩,TIC色谱; b. E310井,埋深1 352.9 m,泥岩, m/z 191质谱; c. E310井,埋深1 352.9 m,泥岩, m/z 217质谱; d. E310井,埋深1 372.9 m,页岩,TIC色谱; e. E310井,埋深1 372.9 m,页岩, m/z 191质谱; f. E310井,埋深1 372.9 m,页岩, m/z 217质谱; g. Q145井,埋深1 228.2 m,砂岩,TIC色谱; h. Q145井,埋深1 228.2 m,砂岩, m/z 191质谱; i. Q145井,埋深1 228.2 m,砂岩, m/z 217质谱

致,因此需要对测试结果进行甄别。首先,针对不同层位或不同岩性的样品进行分类,并对每类样品的 TIC (总离子流色谱)谱图进行对比观察。其次,由于谱图基线不完整或变化大的样品往往遭受了水洗、气洗和生物降解等地质作用,需要剔除。谱图基线完整且保持水平的样品代表了正常作用的样品。然后,针对正常样品的4类族组分开展整体的含量对比。最后,对族组分内部的不同组分进行精细的含量对比。一般而言,发生运移分异作用的烃类,不仅其4类族组分含量存在整体差异,其单一族组分内部的不同组分也存在

含量差异。本研究中的样品,TIC 色谱图基线完整且保持水平,保证了样品有效性。此外,对于不同岩性而言,不仅其4类族组分存在含量差异,其单一族组分内部的不同组分也存在含量差异。因此,组分的含量差异可以指示运移分异。

3.1 族组分和正构烷烃

针对4类族组分的统计表明,它们在不同岩性中的含量存在差异。其中,页岩 SAT 含量为 11.38% ~ 71.29%,平均值 48.79%;泥岩 SAT 含量为 16.05% ~

70.80%, 平均值51.20%; 砂岩SAT含量为56.31%~81.21%, 平均值70.58%。页岩NSO+Asph含量为12.06%~65.54%, 平均值35.41%; 泥岩NSO+Asph含量为22.16%~54.44%, 平均值37.35%; 砂岩NSO+Asph含量为14.01%~37.17%, 平均值23.71%。相对于页岩和泥岩, 砂岩的SAT含量高, NSO+Asph含量低。在三端元图版上, 页岩和泥岩样品主要分布于图版右下角; 砂岩样品主要分布于图版左上角(图4a)。由此可见, 对于不同的岩性, 其赋存烃存在族组分的分异作用。

针对正构烷烃(碳数为11—15, 16—22和23—39的正构烷烃分别开展统计)的统计表明, 它们在不同岩性中的含量存在差异(图4b)。其中, 页岩 nC_{11-15} 含量为2.02%~12.62%, 平均值8.33%; 泥岩 nC_{11-15} 含量为5.12%~10.90%, 平均值8.48%; 砂岩 nC_{11-15} 含量为9.42%~16.34%, 平均值13.27%。页岩 nC_{23-39} 含量为27.73%~52.03%, 平均值41.18%; 泥岩 nC_{23-39} 含量为34.91%~52.03%, 平均值43.91%。砂岩 nC_{23-39} 含量为21.70%~42.70%, 平均值36.48%。与页岩和泥岩相比, 砂岩抽提烃的 nC_{11-15} 含量较高, 而 nC_{23-39} 含量较低。

基于正构烷烃获得的奇偶优势指数(OEP)和碳优势指数(CPI)是反映烃类特征和有机质热转化特征的常用指标。研究区页岩CPI为1.05~1.15, 平均值1.09; 泥岩CPI为1.05~1.11, 平均值1.08; 砂岩CPI为1.07~1.11, 平均值1.09。页岩OEP为0.99~

1.07, 平均值1.02; 泥岩OEP为0.99~1.07, 平均值1.02; 砂岩OEP为1.01~1.04, 平均值1.03。尽管OEP和CPI在3类岩性中并无明显差异, 但砂岩的OEP变化较小, 而页岩和泥岩则具有相对较大的数值变化(图5)。然而, 由于砂岩样品的数量较大, 上述差异也可能是由样品选取及样品数量所导致。

3.2 类异戊二烯烷烃

姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)是最常见的类异戊二烯烷烃。Pr/Ph, Pr/ nC_{17} 和Ph/ nC_{18} 含量比等参数普遍被用以表征有机质成因。研究区页岩Pr/Ph为0.60~2.17, 平均值1.48; 泥岩Pr/Ph为1.22~2.17, 平均值1.64; 砂岩Pr/Ph为0.79~1.13, 平均值1.00(图6a)。页岩Pr/ nC_{17} 为0.18~0.62, 平均值0.31; 泥岩Pr/ nC_{17} 为0.16~0.62, 平均值0.30; 砂岩Pr/ nC_{17} 为0.19~0.34, 平均值0.22。页岩Ph/ nC_{18} 为0.11~0.50, 平均值0.20; 泥岩Ph/ nC_{18} 为0.09~0.25, 平均值0.14; 砂岩Ph/ nC_{18} 为0.16~0.36, 平均值0.22(图6b)。上述参数的数值分布无明显差异, 但页岩和泥岩具有数值分布范围广的特征, 而砂岩则比较集中。在Pr/ nC_{17} -Ph/ nC_{18} 图版上, 砂岩样品与泥岩、页岩样品亦存在显著的分异现象。

3.3 甾烷化合物

C_{27} , C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷中, 页岩 C_{27} 规则甾烷相对丰度为20.23%~41.11%, 平均值30.46%; 泥岩 C_{27}

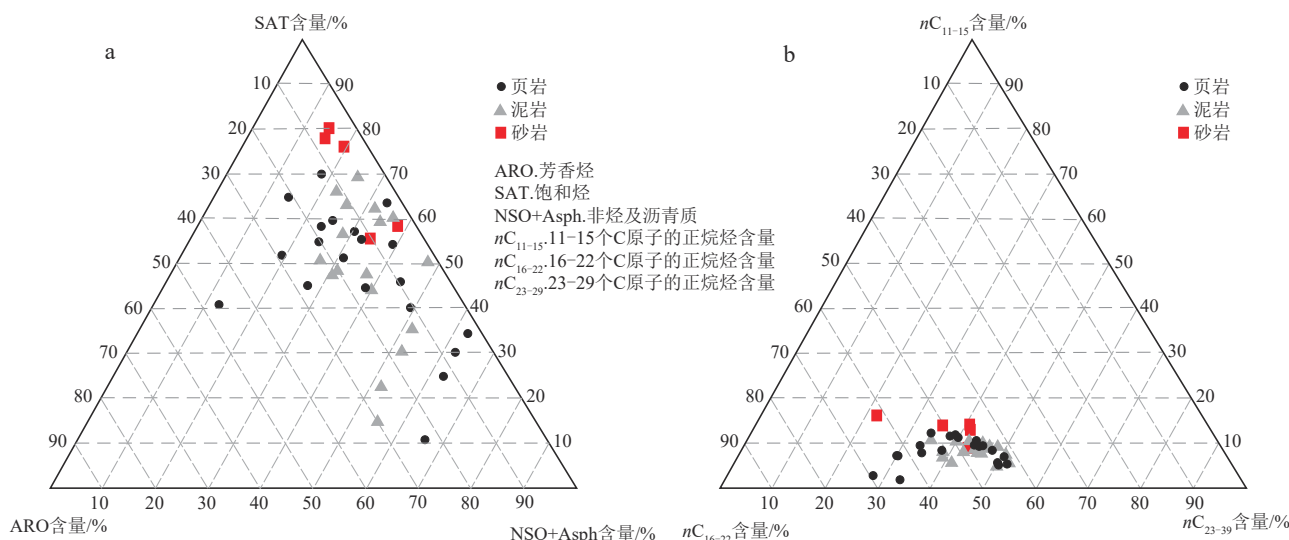


图4 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃的族组分和正构烷烃分布特征

Fig. 4 Ternary diagrams showing the characteristics of the four group components and n-alkanes of extracted hydrocarbons from samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

a. 族组分特征 b. 正构烷烃特征

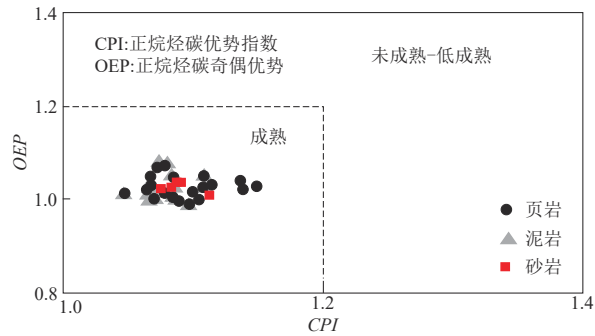


图5 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃的OEP与CPI分布特征

Fig. 5 OEP (odd-even predominance) and CPI (carbon preference index) of hydrocarbons extracted from the samples of different lithologies in the central Ordos Basin

规则甾烷相对丰度为19.80%~28.49%,平均值23.93%;砂岩 C_{27} 规则甾烷相对丰度为45.08%~56.75%,平均值49.69%。页岩 C_{29} 规则甾烷相对丰度为31.08%~53.67%,平均值40.36%;泥岩 C_{29} 规则甾烷相对丰度为36.46%~51.82%,平均值43.34%;砂岩 C_{29} 规则甾烷相对丰度为19.68%~28.29%,平均值24.35%。在 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量三端元图版上,砂岩与泥岩、页岩存在显著的分异现象(图7)。此外,页岩和泥岩具有较低的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量比值,而砂岩具有较高的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量比值(图6a)。由此可见, C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量是识别运移分异作用的可靠指标。

页岩孕甾烷/升孕甾烷含量比值为0.00~14.82(大于4的样品数3个),平均值2.88;泥岩孕甾烷/升孕甾烷含量比值为0.00~5.72,平均值2.54;砂岩孕甾烷/升孕甾烷含量比值为2.53~6.21,平均值4.37。

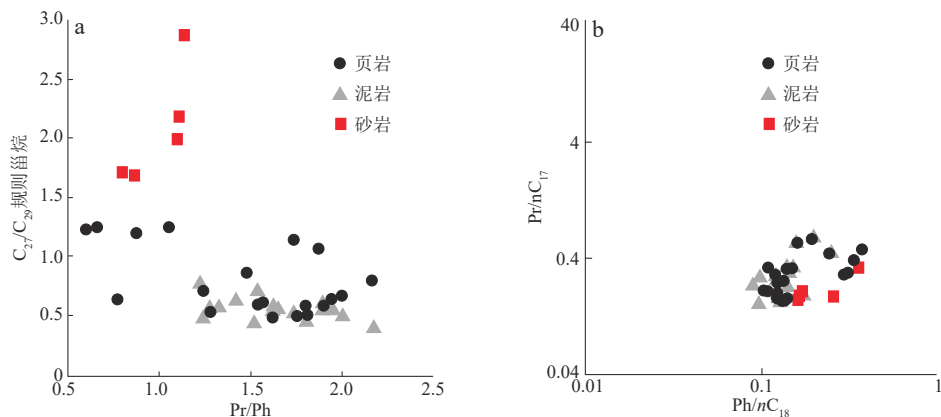


图6 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃中典型类异戊二烯烃参数分布特征

Fig. 6 Distributions of typical isoprenoid alkene parameters for hydrocarbons extracted from the samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

a. C_{27}/C_{29} 规则甾烷与 Pr/Ph 的分布关系; b. Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 的分布关系

整体而言,砂岩样品的数值较高,页岩和泥岩的数值较低(图8)。在(孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷含量比参数上,砂岩样品的数值相对集中,页岩和泥岩的数值则变化较大(图8)。

页岩 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比值为0.25~0.57,平均值0.43;泥岩 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比值为0.27~0.50,平均值0.42;砂岩 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比值为0.59~0.62,平均值0.61。砂岩具有较高的 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比值,而页岩和泥岩的比值较低(图9)。页岩 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 含量比值为0.30~0.63,平均值0.45;泥岩 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 含量比值为0.39~0.62,平均值0.53。砂岩 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 含量比值为0.43~0.53,平均值0.49。在 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 含量比参数上,砂岩样品的数值相对集中,页岩和泥岩的数值则变化较大(图9)。

3.4 萜烷化合物

萜烷是以异戊二烯为基本结构单元构成环状化合物。藿烷、补身烷、伽马蜡烷和奥利烷是最常用的萜烷指标。藿烷中,Ts代表 $18\alpha(H)-22,29,30$ 三降藿烷;Tm代表 $17\alpha(H)-22,29,30$ 三降藿烷。页岩Ts/Tm含量比值为0.09~10.88,平均值4.09;泥岩Ts/Tm含量比值为0.63~7.71,平均值3.99;砂岩Ts/Tm含量比值为8.64~31.13,平均值17.82(图10a)。页岩Ts/(Ts+Tm)含量比值为0.08~0.92,平均值0.66;泥岩Ts/(Ts+Tm)含量比值为0.39~0.89,平均值0.72;砂岩的Ts/(Ts+Tm)含量比值为0.89~0.97,平均值0.94(图10b)。整体上,页岩和泥岩的Ts/Tm与Ts/(Ts+Tm)含量比的

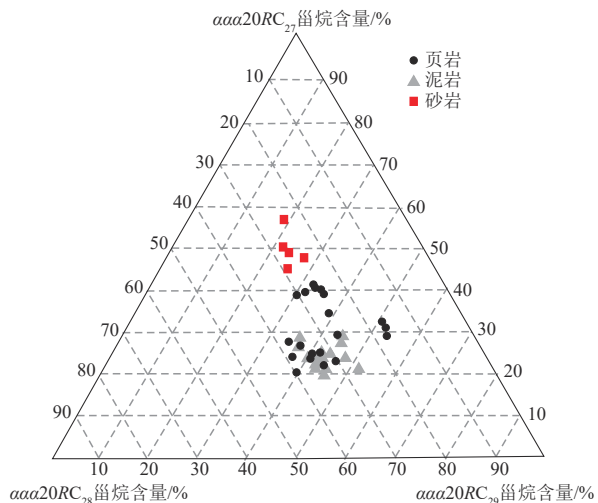


图7 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃中 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量分布特征

Fig. 7 Distributions of C_{27} , C_{28} , and C_{29} regular steranes contents for hydrocarbons extracted from the samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

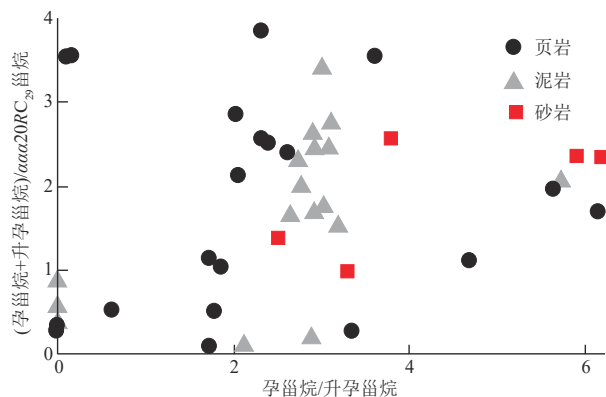


图8 鄂尔多斯盆地中部(孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 甾烷含量比与孕甾烷/升孕甾烷含量比分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of (pregnane + homopregnane)/ $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ and pregnane/homopregnane ratios of various rocks in the central Ordos Basin

值都较低,而砂岩则具有较高的数值。

页岩 C_{32} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 含量比值为0.45~0.59,平均值0.53;泥岩 C_{32} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 含量比值为0.52~0.58,平均值0.56;砂岩 C_{32} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 含量比值为0.48~0.53,平均值0.50(图10b)。页岩和泥岩的 C_{32} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 含量比值变化较大,而砂岩则具有相对集中的数值。

研究区页岩伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷含量比)为0.06~0.42,平均值0.23;泥岩伽马蜡烷指数为0.07~0.39,平均值0.19;砂岩伽马蜡烷指数为

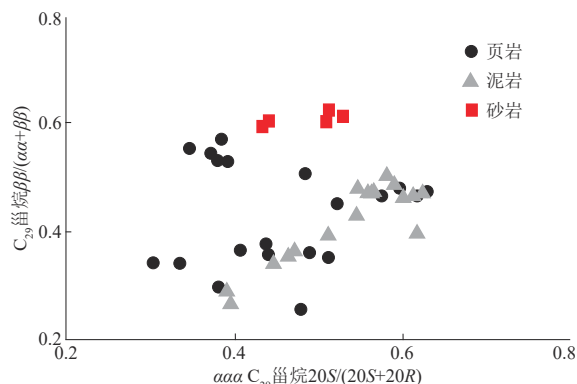


图9 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃中 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比与 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 含量比分布特征
Fig. 9 Characteristics of $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ and $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ ratios for C_{29} sterane of hydrocarbons extracted from the samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

0.12~0.81,平均值0.35。页岩 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷含量比为0.16~2.26,平均值1.25;泥岩样品数值为0.79~1.61,平均值1.23;砂岩样品的数值为0.69~0.81,平均值0.78(图11)。整体上,砂岩的伽马蜡烷指数较高且分布范围较广,而页岩与泥岩则相反;页岩和泥岩 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷含量比值普遍大于1,而砂岩则小于1。

4 石油组分差异运移原因

4.1 石油组分的溶解及吸附差异

Young和McIver认为,烃源岩内部的石油组分会受到干酪根的强烈吸附作用^[19]。Leythaeuser等学者认为,不同石油组分所受的干酪根吸附作用存在强弱程度的差异^[20]。Stainforth和Reinders认为,干酪根的聚合物结构与石油的不同分子结构发生不同强弱程度的吸附,并主张用化学势梯度的概念来描述石油组分的差异性运移^[21]。但是,越来越多的研究表明,石油组分在干酪根结构中会遵循聚合物溶解理论。基于该理论,石油化合物组分溶解于干酪根后,干酪根会发生急剧的体积膨胀。由于不同组分的溶解性存在差异,芳烃组分、非烃和沥青质组分相对于饱和烃组分优先溶解^[22-23]。因此,芳烃组分、非烃和沥青质组分更容易溶解残留于干酪根中,而饱和烃则相对容易发生运移作用。鄂尔多斯盆地长7段泥岩和页岩都是有效烃源岩,它们生成的石油与干酪根发生聚合物溶解作用,页岩油在运移过程中会发生族组分的差异运移作用。同

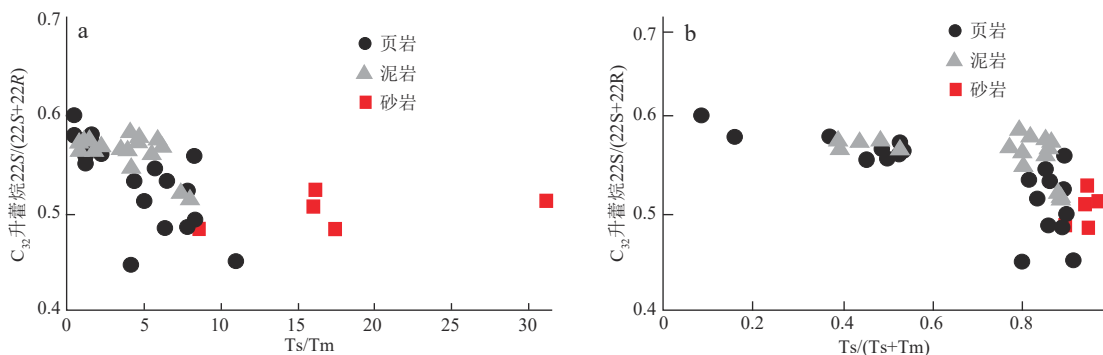


图10 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃中 C_{32} 升藿烷22S/(22S+22R)含量比与Ts和Tm含量等参数分布特征

Fig. 10 Characteristics of 22S/(22S+22R) ratio for C_{32} homohopane, Ts, and Tm of hydrocarbons extracted from the samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

a. Ts/Tm 含量比与 C_{32} 升藿烷22S/(22S+22R)含量比的关系; b. Ts/(Ts+Tm)含量比与 C_{32} 升藿烷22S/(22S+22R)含量比的关系

Tm: 17 α (H)-22, 29, 30-三降藿烷; Ts: 18 α (H)-22, 29, 30-三降藿烷。

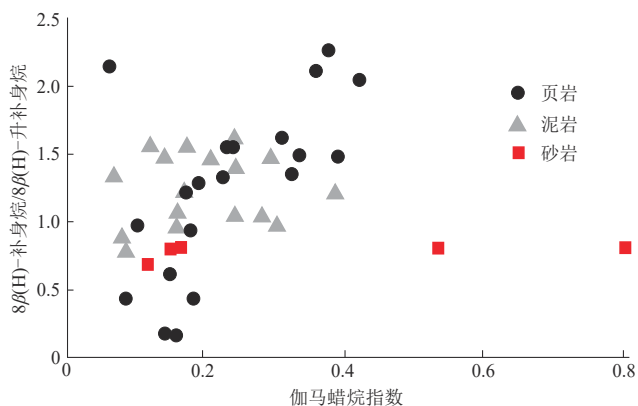


图11 鄂尔多斯盆地中部不同岩性样品抽提烃中伽马蜡烷指数与 8β (H)-补身烷/ 8β (H)-升补身烷含量比分布特征

Fig. 11 Characteristics of gammacerane index and 8β (H)-trimane/ 8β (H)-homodrimane ratio of hydrocarbons extracted from the samples of diverse lithologies in the central Ordos Basin

时,在饱和烃组分中,由于环烷烃相对于正构烷烃会优先发生溶解,使得正构烷烃相对于环烷烃会优先发生运移^[22-23]。

泥页岩体系普遍致密,广泛发育纳米级孔隙。泥页岩体系中,纳米孔隙导致的吸附作用不容忽视。纳米级孔隙的尺寸跟非烃和沥青质的大分子很接近,这些大分子与孔隙壁之间的范德华力非常强,导致这些分子在泥页岩体系中非常难以运移。Ritter等人针对镜质组组分在纳米孔隙中的吸附行为开展了大量的研究,证实了纳米孔隙的吸附会导致明显的烃类滞留和化学组分分馏效应^[24]。Ritter等人的多数实验研究表明,与聚合物溶解对烃类滞留的贡献相比,镜质体在纳米孔隙中的吸附行为对烃类滞留的贡献可能要高^[24]。因此,对于陆相泥页岩体系,聚合物溶解作用

和孔隙吸附作用对页岩油的滞留作用均有重要的影响。

4.2 石油组分分子尺寸差异

长7段页岩油赋存于页岩、泥岩和砂岩3类不同的岩性储层之中,但研究区3类岩性都比较致密,孔、渗条件普遍较差^[25-27]。对比而言,页岩和泥岩的孔隙以纳米尺度孔隙为主,含少量的微米孔隙;砂岩的孔隙则含有相对较多的微米孔隙^[25-27]。事实上,纳米级孔隙的半径与非烃组分、沥青质组分的分子尺寸接近,这些大分子物质在纳米级孔隙中运移非常困难;饱和烃组分的分子尺寸相对较小,它们更容易在纳米级孔隙中进行运移^[28-29]。尽管砂岩的微米孔隙相对页岩和泥岩略多,但其导致的渗透性差异却非常明显。基于CT扫描技术和数字岩心算法的孔隙网络刻画发现,页岩和泥岩的孔隙容易呈孤立状发育或呈小型团簇状发育,孔隙连通性弱,渗透性普遍较差。但是,砂岩的孔隙容易呈团簇状发育,孔隙连通性较好,使得渗透率得以大幅度改善(图12)。

从泥岩、页岩、砂岩的对比来看,砂岩中80%的可动油赋存于直径大于0.5 μm 的孔隙,即绝大部分石油组分赋存于砂岩的大孔隙中,它们可以在其中轻松流动。然而,泥岩以及页岩中的可动油主要赋存于直径小于0.5 μm 的孔隙(占比超过55%),即大部分石油组分赋存于泥岩及页岩的小孔隙中(图13)。石油从泥页岩向砂岩的运移过程中(图13),由于首先通过尺寸较小的泥页岩孔隙,不同尺寸的石油组分必然存在运移难度的差异,由此导致差异性运移。相对于分子量大的烃类,分子量小的小尺寸烃类更容易运移;相对

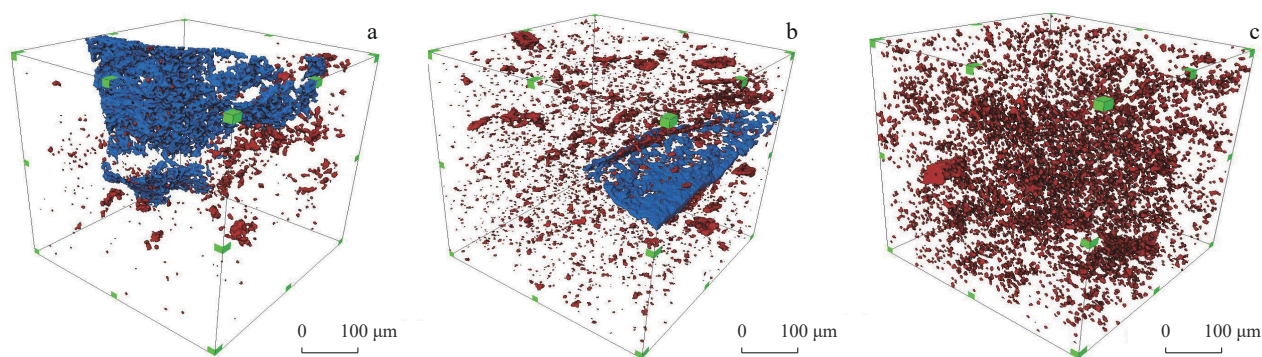


图12 鄂尔多斯盆地中部E88井长7段不同岩性的孔隙连通程度特征

Fig. 12 Pore connectivity of different lithologies in the Chang 7 Member in well E88, central Ordos Basin

a. 砂岩,埋深1 252.90 m; b. 页岩,埋深1 250.40 m; c. 泥岩,埋深1 251.22 m

(图中红色表示孤立的孔隙,蓝色表示连通孔隙。)

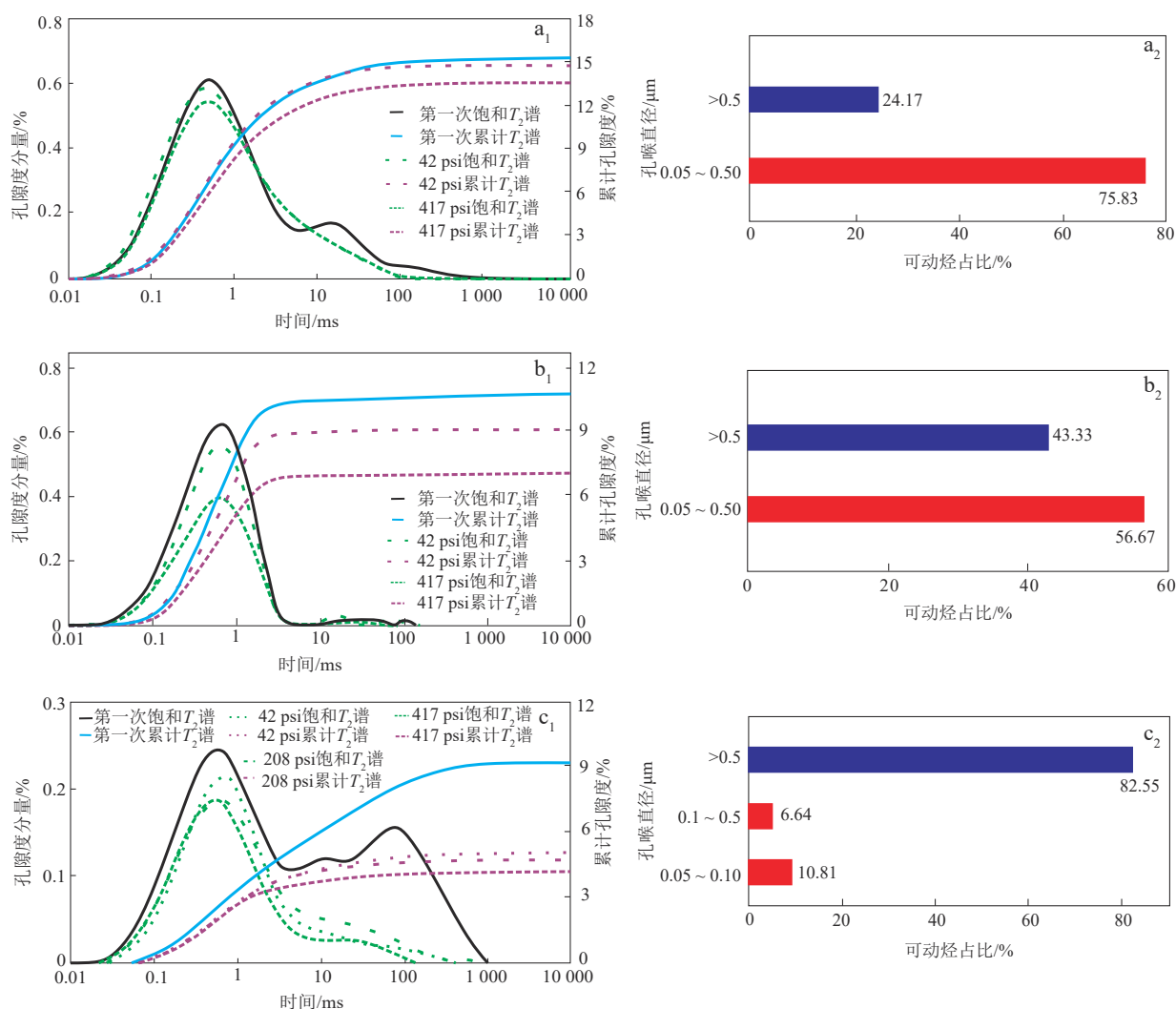


图13 鄂尔多斯盆地中部长7段不同岩性的可动流体分布

Fig. 13 Distributions of movable fluids in the different lithologies of the Chang 7 Member, central Ordos Basin

a₁, a₂. 页岩, R60井, 埋深1 427.26 m; b₁, b₂. 泥岩, R60井, 埋深1 418.22 m; c₁, c₂. 砂岩, R118井, 埋深1 666.88 m

于高碳数烷烃,小尺寸的低碳数烷烃更容易运移;相对于高环数萜烷,小尺寸的低环数萜烷更容易运移;相对

于立体结构的复杂化合物,小尺寸的简单结构化合物更容易运移。

5 结论

1) 在不同的岩性中,4类族组分含量存在差异。砂岩的SAT含量高,NSO+Asph含量低;页岩和泥岩的SAT含量低,NSO+Asph含量高。在不同的岩性中,正构烷烃(饱和烃)含量存在差异。砂岩的 nC_{11-15} 组分含量较高, nC_{23-39} 组分含量较低;页岩和泥岩的 nC_{11-15} 组分含量较低, nC_{23-39} 组分含量较高。

2) 典型类异戊二烯烷烃上,Pr/Ph,Pr/ nC_{17} 和Ph/ nC_{18} 含量比等参数没有显著的数值差异,但页岩和泥岩的数值变化大,砂岩的数值变化小。

3) 典型甾烷化合物上,页岩和泥岩具有较低的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量比值,砂岩具有较高的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量比值。页岩和泥岩具有较低的孕甾烷/升孕甾烷含量比值,砂岩具有较高的孕甾烷/升孕甾烷含量比值。页岩和泥岩的(孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha C_{29}20R$ 甾烷含量比值变化大,砂岩的数值则相对集中。页岩和泥岩具有较低的 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 含量比值,砂岩具有较高的数值。

4) 典型萜烷化合物分布上,页岩和泥岩具有较低的Ts/Tm与Ts/(Ts+Tm)含量比值,砂岩则具有较高的数值。页岩和泥岩的 C_{32} 升藿烷22S/(22S+22R)含量比值变化较大,砂岩则具有相对集中的数值。砂岩的伽马蜡烷指数较高且数值分布范围较广,而页岩与泥岩则相反;页岩和泥岩 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷含量比值普遍大于1,而砂岩则小于1。

参 考 文 献

- [1] ILLING V C. The migration of oil and natural gas (with discussion) [J]. Journal of the Institution of Petroleum Technologists, 1933, 19(114): 229-274.
- [2] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration[M]. Berlin: Springer, 1978: 438-524.
- [3] 李传亮,张景廉,杜志敏. 油气初次运移理论新探[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 132-142.
LI Chuanliang, ZHANG Jinglian, DU Zhimin. New viewpoints of the primary migration of oil and gas[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 132-142.
- [4] 黄志龙,马剑,吴红烛,等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油流体压力与初次运移特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 7-11, 19.
HUANG Zhilong, MA Jian, WU Hongzhu, et al. Fluid pressure and primary migration characteristics of shale oil of Lucaogou Formation in Malang Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(5): 7-11, 19.
- [5] 马中良,郑伦举,赵中熙,等. 烃源岩孔隙流体介质对石油初次运移的影响[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 97-101, 108.
MA Zhongliang, ZHENG Lunju, ZHAO Zhongxi, et al. Effect of fluid medium in source rock porosity on oil primary migration[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(1): 97-101, 108.
- [6] 刘道理,杜忠明,许新明,等. 古近系油气初次运移有效性的主控因素——以珠江口盆地西江A和西江B构造圈闭油气勘探效果对比为例[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(10): 40-48.
LIU Daoli, DU Zhongming, XU Xinming, et al. The main control factors on effective Paleogene primary oil and gas migration: A comparative study of exploration results from Xijiang A and Xijiang B structural traps, Zhujiangkou Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(10): 40-48.
- [7] 张焕旭,陈世加,张亚,等. 烃源岩生烃增压研究进展[J]. 地质科技情报, 2018, 37(2): 199-207.
ZHANG Huanxu, CHEN Shijia, ZHANG Ya, et al. Research progress of the overpressure caused by hydrocarbon generation [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(2): 199-207.
- [8] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in north America [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [9] STAINFORTH J G, REINDERS J E A. Primary migration of hydrocarbons by diffusion through organic matter networks, and its effect on oil and gas generation[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1/3): 61-74.
- [10] FAN Bojiang, SHI Liang. Deep-lacustrine shale heterogeneity and its impact on hydrocarbon generation, expulsion, and retention: A case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. Natural Resources Research, 2019, 28(1): 241-257.
- [11] 陈中红,查明. 东营凹陷烃源岩排烃的地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(1): 79-87.
CHEN Zhonghong, ZHA Ming. Geological and geochemical characteristics of hydrocarbon-expulsion from source rocks in Dongying Depression [J]. Geochimica, 2005, 34(1): 79-87.
- [12] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [13] 马卫,李剑,王东良,等. 烃源岩排烃效率及其影响因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1742-1751.
MA Wei, LI Jian, WANG Dongliang, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency of source rocks and its influencing factors [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1742-1751.
- [14] 完颜泽,龙国徽,杨巍,等. 柴达木盆地英雄岭地区古近系油气成藏过程及其演化特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 94-102.

- WANYAN Ze, LONG Guohui, YANG Wei, et al. Hydrocarbon accumulation and evolution characteristics of Paleogene in Yingxiongling area, Qaidam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 94–102.
- [15] 张景坤, 曹剑, 施春华, 等. 油源对比微量元素新指标研究 [J]. *科学通报*, 2023, 68(10): 1247–1265.
- ZHANG Jingkun, CAO Jian, SHI Chunhua, et al. Evaluating novel trace element proxies for oil-source rock correlations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(10): 1247–1265.
- [16] 范柏江, 师良, 杨杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 648–657.
- FAN Bojiang, SHI Liang, YANG Jie, et al. Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 648–657.
- [17] 张亚雄. 鄂尔多斯盆地中部地区三叠系延长组7段暗色泥岩烃源岩特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1089–1097.
- ZHANG Yaxiong. Source rock characterization: The dark mudstone in Chang 7 Member of Triassic, central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1089–1097.
- [18] 范柏江, 晋月, 师良, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段湖相页岩油勘探潜力 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1078–1088.
- FAN Bojiang, JIN Yue, SHI Liang, et al. Shale oil exploration potential in central Ordos Basin: A case study of Chang 7 lacustrine shale [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1078–1088.
- [19] YOUNG A, MCIVER R D. Distribution of hydrocarbons between oils and associated fine-grained sedimentary rocks—physical chemistry applied to petroleum geochemistry, II [J]. *AAPG Bulletin*, 1977, 61(9): 1407–1436.
- [20] LEYTHAEUSER D, MACKENZIE A, SCHAEFER R G, et al. A novel approach for recognition and quantification of hydrocarbon migration effects in shale-sandstone sequences [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(2): 196–219.
- [21] ZHANG T, WANG X, ZHANG J, et al. Geochemical evidence for oil and gas expulsion in Triassic lacustrine organic-rich mudstone, Ordos Basin, China [J]. *Interpretation*, 2017, 5(2): SF41–SF61.
- [22] SANDVIK E I, YOUNG W A, CURRY D J. Expulsion from hydrocarbon sources: The role of organic absorption [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1/3): 77–87.
- [23] KELEMEN S R, WALTERS C C, ERTAS D, et al. Petroleum expulsion part 2. Organic matter type and maturity effects on kerogen swelling by solvents and thermodynamic parameters for kerogen from regular solution theory [J]. *Energy and Fuels*, 2006, 20(1): 301–308.
- [24] RITTER U, GRØVER A. Adsorption of petroleum compounds in vitrinite: Implications for petroleum expulsion from coal [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 62(3): 183–191.
- [25] 许璟, 葛云锦, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区长7油层组泥页岩孔隙结构定量表征与动态演化过程 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 292–307.
- XU Jing, GE Yunjin, HE Yonghong, et al. Quantitative characterization and dynamic evolution of pore structure in shale reservoirs of Chang 7 oil layer group in Yanchang area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 292–307.
- [26] 席颖洋, 文志刚, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组页岩气地质特征及富集规律 [J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1936–1950.
- XI Yingyang, WEN Zhigang, ZHAO Weibo, et al. Study on geological characteristics and enrichment law of shale gas of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1936–1950.
- [27] 赵可英, 牟凯. 基于灰色关联度分析法和主成分分析法对泥页岩储层评价方法的探讨 [J]. *地质与勘探*, 2023, 59(2): 443–450.
- ZHAO Keying, MU Kai. Evaluation of shale reservoirs based on grey relation analysis and principal component analysis [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(2): 443–450.
- [28] 孙照通, 辛红刚, 吕成福, 等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段泥页岩型页岩油赋存状态与有机地球化学特征 [J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(8): 1304–1318.
- SUN Zhaotong, XIN Honggang, LYU Chengfu, et al. Occurrence states and organic geochemical characteristics of shale-type shale oil from Chang 7₃ sub-member in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(8): 1304–1318.
- [29] 钟红利, 卓自敏, 张凤奇, 等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7页岩油储层非均质性及其控油规律 [J]. *特种油气藏*, 2023, 30(4): 10–18.
- ZHONG Hongli, ZHUO Zimin, ZHANG Fengqi, et al. Heterogeneity of Chang 7 Shale Oil Reservoir and Its Oil Control Law in Ganquan Area, Ordos Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(4): 10–18.

(编辑 张亚雄)