

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

张亚雄

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)为典型的湖相沉积。在鄂尔多斯盆地中部地区,由于靠近湖泊的边缘,长7段泥页岩厚度偏薄,针对该地区的烃源岩研究尤其是泥岩的研究薄弱。基于15口探井开展了暗色泥岩的甄别工作并进行了采样,然后运用岩心观察、有机碳测定、岩石热解、色谱-质谱等分析手段,全面获得了暗色泥岩的烃源岩特征参数。研究表明,长7段暗色泥岩发育于弱还原-弱氧化的沉积环境。暗色泥岩的有机质丰度高, TOC 平均值2.39%;有机质以 II_2 型和 III 型为主;生烃潜力好, S_1+S_2 平均值7.65 mg/g;热演化适中, R_o 平均值0.98%。暗色泥岩的生烃量总计 7.93×10^8 t,排烃量总计 3.37×10^8 t,残留烃量总计 4.56×10^8 t,综合排烃效率42.50%。暗色泥岩与页岩对研究区油气资源的贡献比为1:1.8。长7段暗色泥岩的生烃有机质包括陆源性输入来源和水体有机质来源。

关键词:暗色泥岩;页岩;烃源岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Source rock characterization: The dark mudstone in Chang 7 Member of Triassic, central Ordos Basin

Zhang Yaxiong

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The seventh member of Yanchang Formation (Chang 7 Member) in Ordos Basin is typical lacustrine dark mudstone, which thins out while approaching lake rim at the central part of the basin. The study of source rocks, especially the dark mudstone as source rock in that part, has been very limited due to its thinness. Dark mudstone samples from 15 exploration wells in the area are collected and analyzed through core observation, TOC determination, rock pyrolysis, GC-MS and organic carbon isotope analysis. The results indicate a sedimentary environment of weak reduction and oxidation with mixed inputs of plankton and terrestrial plants for the dark mudstone and provide parameters that define the dark mudstone as a good source rock: high TOC (averaged at 2.39%), type II_2 and type III dominated organic matter with an average S_1+S_2 at 7.65 mg/g, and moderate thermal evolution with R_o averaged at 0.98%. The total hydrocarbon generation amount, hydrocarbon expulsion amount and residual hydrocarbon amount of the dark mudstone are respectively measured to be 793, 337 and 456 million tons. And the comprehensive hydrocarbon expulsion efficiency is 42.50%. The contribution ratio of dark mudstone and shale to the oil and gas resources in the area is 1:1.8. All indicate great source rock potential of the stone.

Key words: dark mudstone, shale, source rock, Yanchang Formation, Ordos Basin

晚三叠世,鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)经历了一次湖泛事件,在此期间沉积了富含有机质的黑色页岩和暗色泥岩。前人针对长7段开展了广泛而深入的工作,普遍认为,长7段是鄂尔多斯盆地的主力烃

源岩^[1-2]。但是,已有研究集中在盆地的西部、西南部和南部等湖盆区,对盆地中部地区的研究较少。

由于鄂尔多斯盆地中部地区靠近湖泊边缘(图1),泥岩和页岩的厚度规模有限,针对该地区的烃源岩研

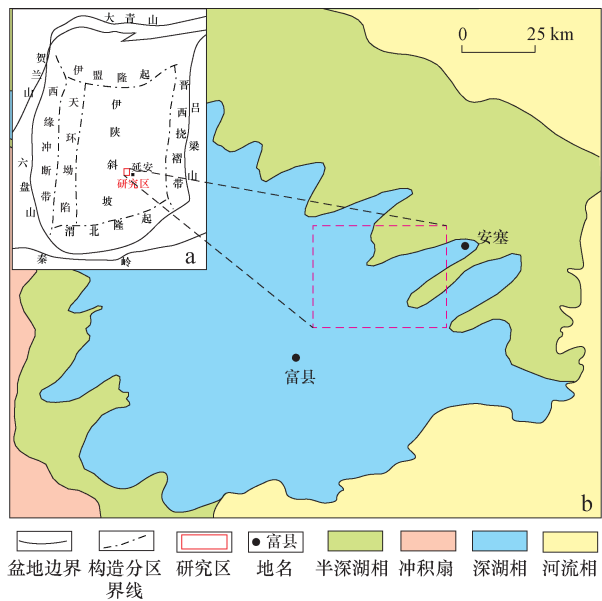


图1 鄂尔多斯盆地中部研究区位置(a)及长7段沉积相(b)
Fig.1 Location of the study area(a) and sedimentary facies of Chang 7 Member(b), central Ordos Basin

究十分薄弱。有学者认为,湖泊边缘地区的有效烃源岩不发育,其油气来自湖盆中心并经过长距离的侧向

运移而聚集;有学者认为,未经长距离运移的原地生成油气广泛存在^[1-4]。鄂尔多斯盆地中部地区,页岩的平均厚度不足2.5 m,但该地区的暗色(深灰色以及黑色)泥岩发育。对长7段暗色泥岩开展烃源岩评价,有助于判断泥岩和页岩对油气资源的贡献,合理评价研究区的油气资源潜力。

1 暗色泥岩岩石学特征

鄂尔多斯盆地中部地区靠近古湖泊边缘,由此导致长7段的埋深变化巨大;同时导致页岩的厚度较薄,而泥岩则十分发育。在岩石学特征上,研究区泥岩的颜色以灰色、深灰色以及灰黑色为主,泥岩中易保存植物化石或遗迹,个别样品可见鱼鳞(图2)^[5]。研究区长7段暗色(灰黑色)泥岩与页岩的平面分布相对稳定,页岩的厚度普遍在1.0~2.5 m;暗色泥岩厚度普遍在0.5~3.5 m,多数井的厚度为1.0~2.5 m。

为了充分揭示研究区长7段泥岩的地球化学特征,本次研究基于15口重点探井采集了36块泥岩样

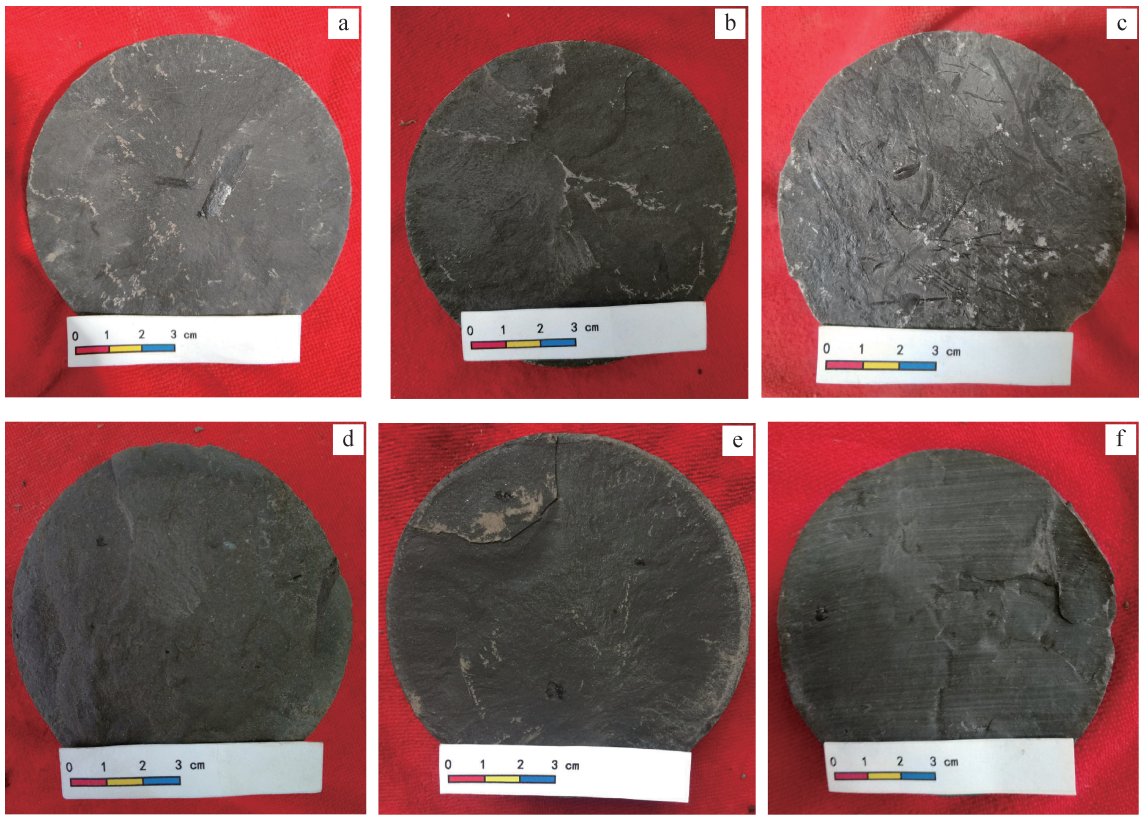


图2 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩与页岩岩石学特征(岩心照片)

Fig.2 Petrological characteristics of dark mudstone and shale,Chang 7 Member,central Ordos Basin

a. 深灰色泥岩含植物碎屑,P10井,埋深1 380.11 m;b. 深灰色泥岩,C14井,埋深1 253.68 m;c. 深灰色泥岩含植物碎屑,P10井,埋深1 080.89 m;
d. 灰黑色泥岩,R3井,埋深1 161.22 m;e. 灰黑色泥岩,Y2井,埋深1 249.89 m;f. 深灰色泥岩,C19井,埋深1 334.39 m

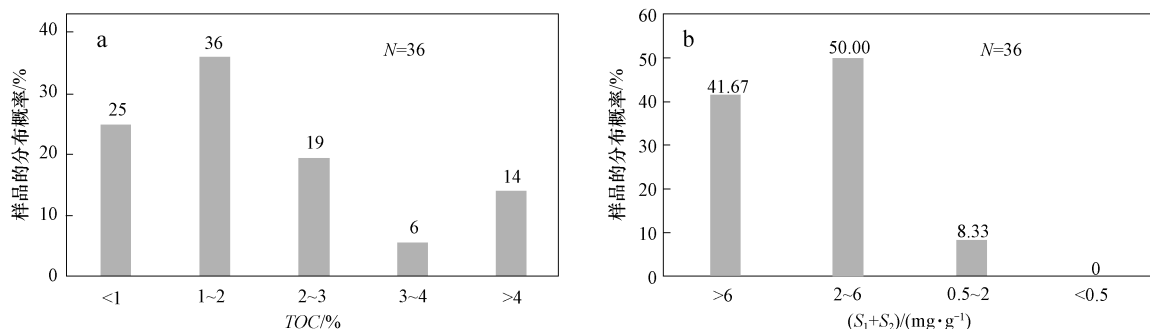


图3 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩有机质丰度特征

Fig. 3 Organic matter abundance in dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

a. 暗色泥岩 TOC 分布; b. 暗色泥岩生烃潜量分布

品。其中,开展总有机碳测试、岩石热解实验的样品数均为36个;开展镜质体反射率测试的样品数为11个(另收集了25个测试数据);开展烃类抽提及饱和烃色-质测试的样品数为20个;开展全岩X射线衍射的样品数为8个。全岩X射线衍射测试结果显示,长7段暗色泥岩的石英含量为25%~43%,平均33%;长石含量为15%~31%,平均24%;粘土矿物含量为29%~55%,平均43%。从矿物组成上看,长7段暗色泥岩的脆性矿物含量较低,粘土矿物含量较高。

2 暗色泥岩基本地化特征

2.1 有机质丰度

常用的有机质丰度评价参数包括有机碳含量(TOC)和生烃潜量($S_1 + S_2$)等。鄂尔多斯盆地中部地区,长7段暗色泥岩的TOC最大值为9.58%,最小值为0.40%,平均值为2.39%。从TOC的分布图来看,TOC分布范围在1%~2%的样品数量最多,占样品总数的36%;TOC小于1%的样品所占比例次之,占样品总数的25%;TOC分布范围在2%~3%的样品所占比例较低,占总数的19%;TOC大于4%的样品占总数的14%;TOC分布在3%~4%的样品最少,仅占总数的6%(图3a)。整体来看,TOC小于2%的样品所占比例较大,达到样品总数的半数以上。

暗色泥岩生烃潜量主要分布在0.60~29.19 mg/g,平均值为7.65 mg/g。其中, $S_1 + S_2 > 6$ mg/g的样品占比最大,样品数量有15个,占总数的41.67%; $S_1 + S_2$ 分布在2~6 mg/g的样品有18个,占总数的50.00%; $S_1 + S_2$ 分布在0.5~2.0 mg/g的样品数量最少,有3个,占总数的8.33%(图3b)。整体来看,暗色泥岩的生烃潜力较高。

2.2 有机质类型

氢指数(HI)与最大热解温度(T_{max})是研究烃源岩地球化学特征的重要参数,利用它们能够对烃源岩的类型进行可靠识别^[6-8]。对研究区36个样品进行测试。结果表明,HI最大值为559.84 mg/g,最小值为13.99 mg/g,平均值为135.69 mg/g; T_{max} 主要分布在435~460℃,平均为448.61℃。长7段暗色泥岩整体处于低成熟-成熟的热演化阶段。从有机质类型上看,大部分样品分布在Ⅱ₂型有机质范围内,其样品数占样品总数的52.78%(共有19个样品);Ⅲ型有机质范围内样品分布次之,占总数的22.22%(共有8个样品);而Ⅱ₁型有机质中样品占总数的13.89%(共有5个样品);Ⅰ型有机质样品数占总数的11.11%(共有4个样品)。从样品整体分布来看,Ⅱ₂型有机质和Ⅲ型有机质占主导地位,Ⅱ₁型有机质较少,Ⅰ型有机质极少(图4)。

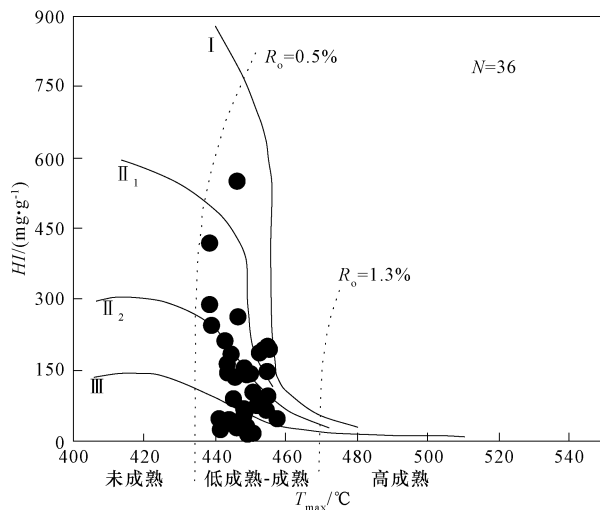


图4 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩有机质类型

Fig. 4 Organic matter types in dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

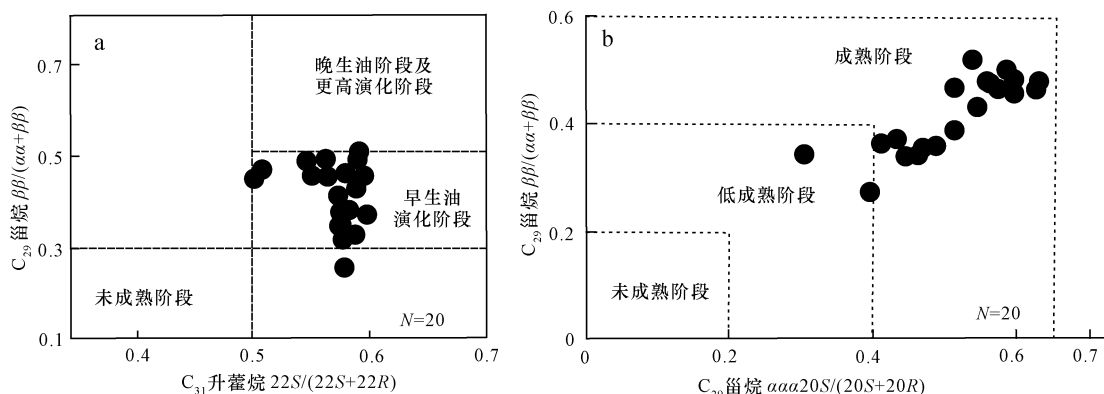


图5 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩的成熟度

Fig. 5 Thermal maturity of dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

a. 基于甾烷和升藿烷参数识别成熟度; b. 基于不同甾烷参数识别成熟度

2.3 有机质成熟度

在生物标志化合物中,甾烷的异构化参数 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 与 $20S/(20S + 20R)$ 可以作为判断成熟度的参考,它对于未成熟到成熟热演化阶段的烃源岩十分有效^[8]。长7段暗色泥岩 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 的最大值为0.51,最小值为0.30,平均值为0.42; C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 的最大值为0.63,最小值为0.30,平均值为0.51。从 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 与 C_{31} 升藿烷 $22S/(22S + 22R)$ 的分布关系上看,样品主要分布在早期生油的热演化阶段(图5a)。从 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 与 C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 的分布关系上看,大部分样品分布在成熟阶段,只有两个样品位于低成熟阶段(图5b)。

镜质体反射率(R_o)是用来反映烃源岩成熟度的直接指标,受到国内外学者的一致认可^[9-11]。长7段暗色泥岩 R_o 主要分布范围为0.73%~1.18%,平均 R_o 为0.98%,大体处在成熟生油气的热演化阶段(图6)。整体来看,研究区样品达到了中等热成熟的演化阶段。个别样品处于低成熟阶段,有可能是实验误差或者样品的非均质性造成的。

3 生、排烃能力及油气资源贡献

3.1 生、排烃能力

在通常情况下,烃源岩富含有机质含量,则其具有更强的生烃能力,其产油潜量也更大^[12-13]。当同一套烃源岩处于相同热演化程度时,有机质含量容易表现出与游离烃含量(S_1)、裂解烃含量(S_2)、生烃潜量($S_1 + S_2$)正相关关系。长7段暗色泥岩, TOC 与 S_2 具

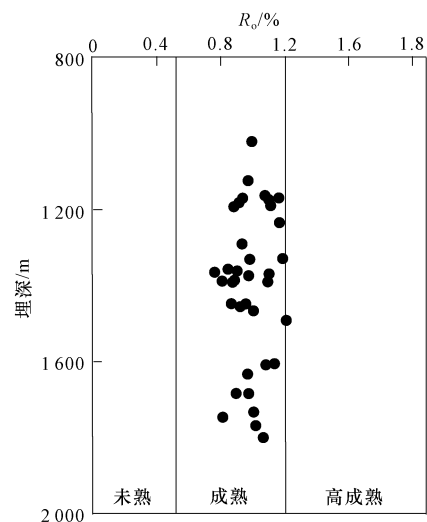


图6 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩镜质体

反射率与埋深关系

Fig. 6 Vitritine reflectance vs. burial depth, Chang 7 Member dark mudstone, central Ordos Basin

有一定的正相关关系, S_2 随着 TOC 含量的增加其数值明显增大,这与上述地质规律大体相似(图7)。但是, S_1 与 TOC 基本毫无相关性(图7)。对于 S_1 与 TOC 无相关性的原因,推测是由于泥岩中的微孔隙以及部分微裂缝发育差异造成的。在烃源岩的生烃和排烃过程中,游离烃在烃源岩内进行短距离运移。由此导致实验获得的 S_1 并不能代表原地生成的烃量。尽管热演化程度处于中等水平,但从 $S_1 + S_2$ 的数值上看,研究区泥岩整体上达到了中等或者中等偏上的生烃能力。

烃源岩的排烃能力可以通过生烃潜力指数,即 $IHGP$ 的变化特征来进行表征^[14]。从研究区样品分析来看,有机质 $IHGP$ 指数主要分布在43.79~4515.21 mg/g,平均值为571.38 mg/g。为了显示数据的整体规律,3个大于2000 mg/g的数据在图上未画出(图8)。依据

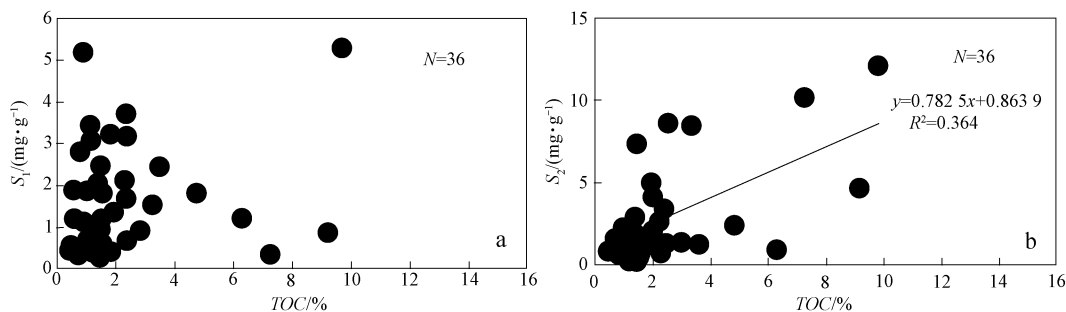


图7 鄂尔多斯盆地中部长7段泥岩热解参数与TOC关系

Fig. 7 Pyrolysis parameters vs. TOC, Chang 7 Member dark mudstone, central Ordos Basin

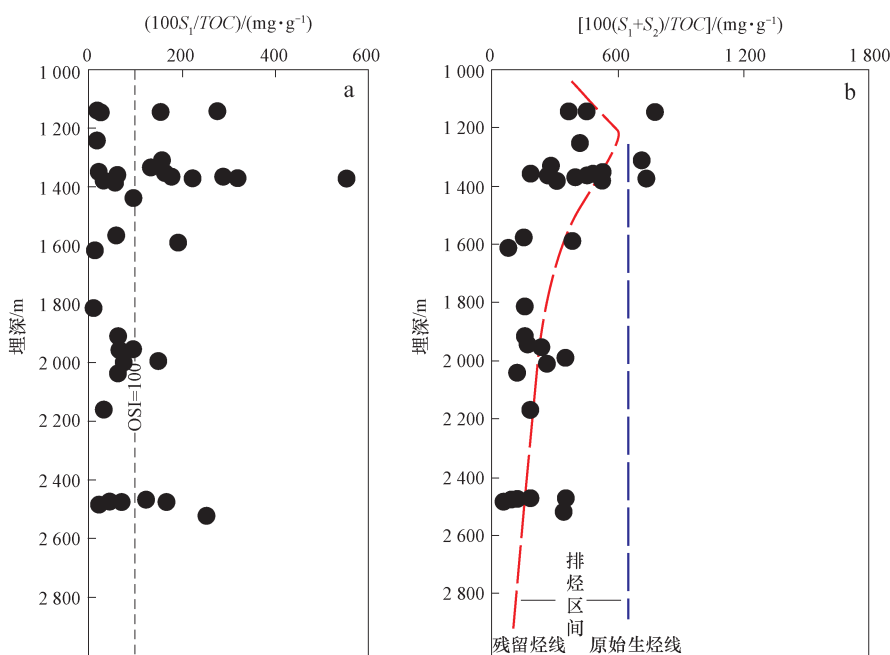
a. S_1 与 TOC 相关关系; b. S_2 与 TOC 相关关系

图8 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩热解参数与埋深关系

Fig. 8 Pyrolysis parameters vs. burial depth, Chang 7 Member dark mudstone, central Ordos Basin

a. 油饱和度参数与埋深相关关系; b. 生烃潜力指数与埋深相关关系

生烃潜力法的判识原理,生烃潜力指数随热演化程度的增大表现为先增大后降低的趋势,趋势的拐点为排烃门限。考虑到样品的非均质性,往往对样品的生烃潜力指数数值进行加权平均,然后确定残留烃趋势线^[15]。长7段暗色泥岩排烃门限的深度大约为1 250 m,即暗色泥岩在该深度开始大量排烃;随深度的增大,烃源岩的排烃率逐渐增大。

基于长7段暗色泥岩的排烃率变化,结合研究区暗色泥岩的空间展布及基本参数,即可获得烃源岩的单层排烃效率、残留烃量、排烃量等信息。不同的埋深段,长7段暗色泥岩的排烃效率不同,排烃效率在20%~75%变化(表1)。研究区长7段泥岩的生烃量总计 7.93×10^8 t,排烃量总计 3.37×10^8 t,残留烃量总

计 4.56×10^8 t,综合排烃效率总计42.50%。

3.2 泥岩对油气资源的贡献

相对于其他层位而言,长7段为主力烃源岩,其暗色泥岩和页岩为延长组及其他地层提供了充足的油气来源^[16]。可以认为,暗色泥岩和页岩对油气资源的贡献程度也即是它们各自的排烃贡献大小。由于研究区长7段页岩较薄且厚度分布稳定,无法采用生烃潜力法来判断其排烃程度。基于此,本文特采用岩石的热解参数来定量判断暗色泥岩和页岩的排烃程度。

在数学模型的建立上,需要作以下假定,即岩石的现今生烃能力大体可以反映其原始生烃能力。也即是

表 1 鄂尔多斯盆地中部长 7 段暗色泥岩排烃特征

Table 1 Hydrocarbon expulsion characteristics of dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

深度/m	排烃率/ (mg · g ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)	暗色泥岩厚度/ m	排烃强度/ (10 ⁴ t · km ⁻²)	单层排烃 效率/%	面积/km ²	残留烃量/ (10 ⁸ t)	排烃量/ (10 ⁸ t)
1 250	0	2.53	1.0	0	0	88	0.53	0
1 450	120	2.53	3.0	36.43	20	79	1.15	0.29
1 650	150	2.53	2.0	30.36	25	95	0.86	0.29
1 850	270	2.53	1.5	40.98	45	123	0.62	0.50
2 050	330	2.53	2.0	66.79	55	137	0.75	0.92
2 250	390	2.53	2.0	78.94	65	115	0.49	0.91
2 450	450	2.53	1.5	68.31	75	68	0.15	0.46

说,岩石的现今生烃能力(即裂解烃 S_2)与岩石的原始生烃能力(即游离烃 S_1 ,裂解烃 S_2 ,排出烃 S_e)呈正相关关系。则数学模型如下:

$$\frac{S_{1\text{页}} + S_{2\text{页}} + S_{e\text{页}}}{S_{1\text{泥}} + S_{2\text{泥}} + S_{e\text{泥}}} = \frac{S_{2\text{页}}}{S_{2\text{泥}}} \quad (1)$$

式中: $S_{1\text{页}}$ 代表页岩的游离烃含量,mg/g; $S_{2\text{页}}$ 代表页岩的热解烃含量,mg/g; $S_{e\text{页}}$ 代表页岩的排出烃含量,mg/g; $S_{1\text{泥}}$ 代表暗色泥岩的游离烃含量,mg/g; $S_{2\text{泥}}$ 代表暗色泥岩的裂解烃含量,mg/g; $S_{e\text{泥}}$ 代表暗色泥岩的排出烃含量,mg/g。

基于本文对暗色泥岩的热解参数统计, $S_{1\text{泥}} = 3.05$ mg/g, $S_{2\text{泥}} = 4.99$ mg/g;基于研究区 20 个页岩的统计, $S_{1\text{页}} = 5.41$ mg/g, $S_{2\text{页}} = 8.47$ mg/g。利用上述数学模型和参数采用单纯形法(本次在具体计算中采用 Lingo 单纯形法软件)进行求解。由此获得 $S_{2\text{页}}$ 为 0.31 mg/g, $S_{2\text{泥}}$ 为 0.17 mg/g。由此可见,单位质量页岩的排烃能力大致是单位质量暗色泥岩排烃能力的 1.8 倍,页岩明显具有更好的排烃能力。对于暗色泥岩与页岩的排烃能力差异,部分研究者认为与页岩的裂缝(尤其是层理缝)发育息息相关^[2-4]。鄂尔多斯盆地中部地区,由于长 7 段暗色泥岩的厚度略大于页岩(或者与页岩大致相当),因此可近似认为,长 7 段暗色泥岩与页岩对研究区油气资源的贡献比为 1 : 1.8。

4 生烃有机质来源

多数情况下,低碳正构烷烃($< C_{20}$)来源于低等水体生物,最常见的如藻类和细菌等;高碳正构烷烃($> C_{25}$)来源于高等植物^[17-18]。研究区泥岩样品,正构烷烃的碳数分布都呈现“单峰型”形态,主峰碳集中分布于 C_{16} 到 C_{23} 之间,基本上没有奇偶碳优势, C_{19} 以上正构烷烃的含量高于 C_{19} 以下正构烷烃的含量(图 9)。研究区正构烷烃的上述特征表明,陆地来源的高等植物对生烃有机质具有较大的贡献。如前所述,研究区

有机质类型主要为 II₂ 型和 III 型,就其根本原因在于,有机质的来源具有大量陆地来源的高等植物。

基于规则甾烷和姥植比(Pr/Ph)等参数也可以判断有机质的来源^[17-18]。由于 C_{27} 规则甾烷大多来源于低等植物和藻类, C_{29} 规则甾烷则大多来源于陆生高等植物,因此可以利用规则甾烷判断生烃有机质的来源。研究区泥岩样品中, C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量呈“V”型和反“L”型分布; C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷的相对丰度分别 25.25%、30.32%和 44.43%(平均数值),三者呈逐渐增大的变化趋势。由此可见,高等植物对生烃有机质的来源具有较高贡献。此外,研究区暗色泥岩的 Pr/Ph 分布范围为 1.23 ~ 2.28,平均值为 1.63; C_{27}/C_{29} 规则甾烷含量分布范围为 0.40 ~ 1.20,平均值为 0.60。上述数值表明长 7 段暗色泥岩的沉积背景为弱还原-弱氧化的沉积环境;长 7 段暗色泥岩的物质组成既有水生藻类,又有陆地植物。同时,Pr/ nC_{17} 分布范围为 0.17 ~ 0.55,平均值为 0.28;Ph/ nC_{18} 分布范围为 0.09 ~ 0.29,平均值为 0.15。上述数值同样表明,长 7 段暗色泥岩的物质来源为混合相来源,它既包括陆地生物中输入,还包括了水体生物的贡献(图 10)。

此外,长 7 段暗色泥岩的 C_{27} 规则甾烷含量最大值为 41%,最小值为 19%,平均值为 26%; C_{28} 规则甾烷含量最大值为 25%,最小值为 16%,平均值为 32%; C_{29} 规则甾烷含量最大值为 53%,最小值为 33%,平均值为 43%。从规则甾烷的三端元分布来看,暗色泥岩的物质来源也为混合来源,即浮游生物和陆地植物的混合(图 11)。全世界范围而言,大量的陆相烃源岩可以形成于上述的沉积背景^[19-30]。因此,长 7 段暗色泥岩具备形成烃源岩的沉积背景条件。前人的研究还表明,晚三叠世火山活动强烈,这对陆源有机质的输入起到了关键作用^[30]。

5 结论

1) 长 7 段暗色泥岩发育于弱还原-弱氧化的沉

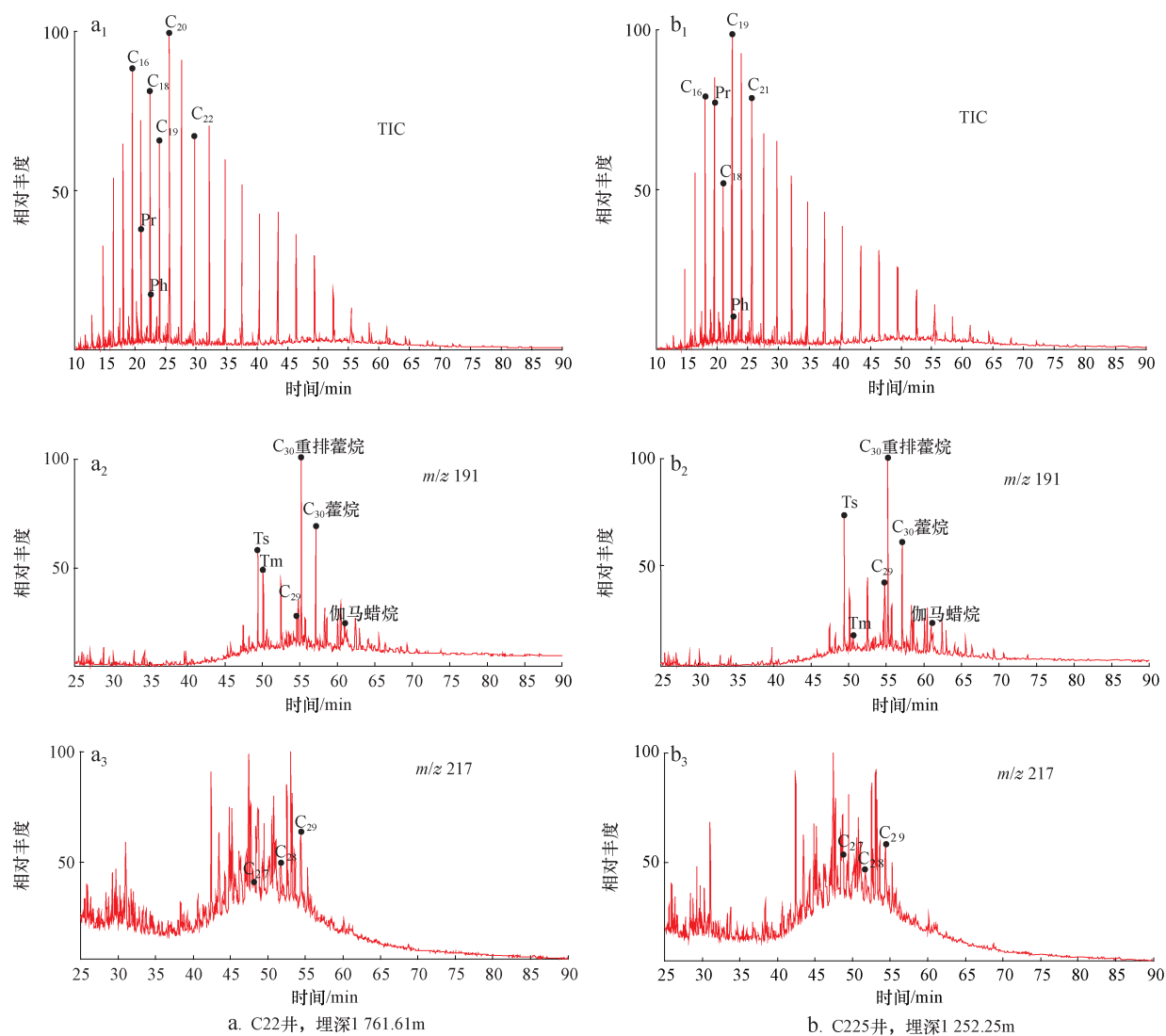


图9 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩饱和烃-质谱特征

Fig. 9 Chromatin characteristics of saturated hydrocarbon, Chang 7 Member dark mudstone, central Ordos Basin

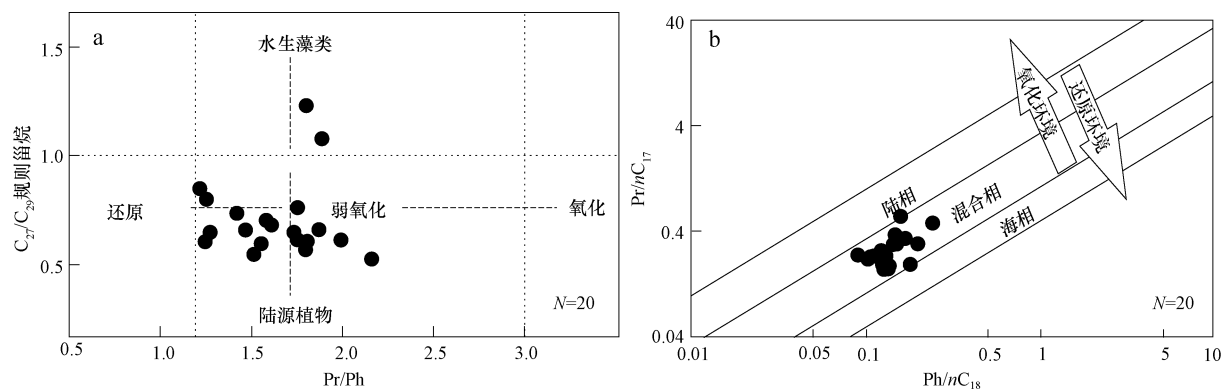


图10 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩沉积环境

Fig. 10 Sedimentary environment of dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

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

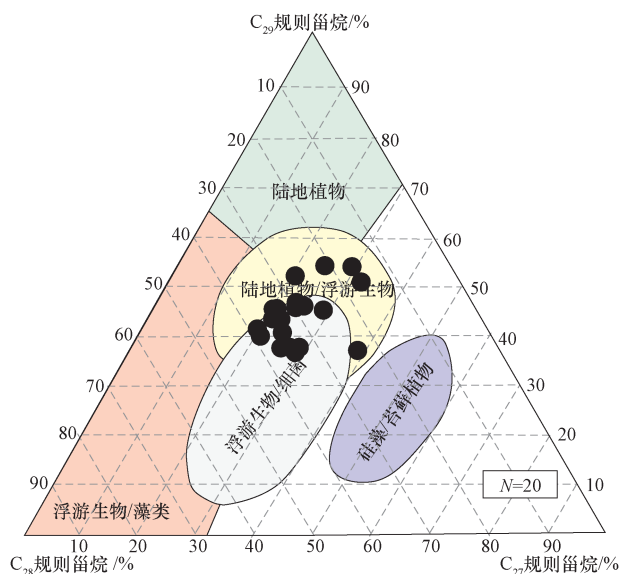


图11 鄂尔多斯盆地中部长7段暗色泥岩物质来源特征
Fig. 11 Material sources of dark mudstone, Chang 7 Member, central Ordos Basin

积环境、物质来源为浮游生物和陆地植物的混合来源。其生烃有机质包括陆源性输入来源和水体有机质来源,但陆源性输入有机质是主要来源。

2) 长7段暗色泥岩的有机质丰度较高, TOC 含量平均值 2.39%; 有机质以 II_2 型和 III 型有机质为主; 生烃潜力好, $S_1 + S_2$ 的平均值 7.65 mg/g; 热演化适中, R_o 的平均值为 0.98%。生烃量总计 7.93×10^8 t, 排烃量总计 3.37×10^8 t, 残留烃量总计 4.56×10^8 t, 综合排烃效率总计 42.50%。长7段暗色泥岩与页岩对研究区油气资源的贡献比为 1:1.8。整体而言, 长7段暗色泥岩对油气资源具有重要的贡献。

参 考 文 献

- [1] 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 254–263.
Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of Chang 7 Member in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254–262.
- [2] 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.
- [3] 郭彦如, 刘俊榜, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 417–425.
Guo Yanru, Liu Junbang, Yang Hua, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 417–425.
- [4] 楚美娟, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组石油成藏机理及成藏模式[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 683–692.
Chu Meijuan, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Accumulation mechanisms and modes of Yanchang Formation Chang 8 interval hydrocarbons in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 683–692.
- [5] 范柏江, 梅启亮, 王小军, 等. 泥岩与页岩地化特征对比——以鄂尔多斯盆地安塞地区延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 5–14.
Fan Bojiang, Mei Qiliang, Wang Xiaojun, et al. Geochemical comparison of mudstone and shale—A case study of the 7th member of Yanchang Formation in Ansai area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 5–14.
- [6] 柳广弟, 杨伟伟, 冯渊, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组原油地球化学特征及成因类型划分[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 108–115.
Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, et al. Geochemical characteristics and genetic types of crude oil from Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 108–115.
- [7] 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): 135–145.
Deng Nantao, Zhang Zhihuan, Bao Zhidong, et al. Geochemical features and identification marks for efficient source rocks of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2013, 37(2): 135–145.
- [8] 杨亚南, 周世新, 李靖, 等. 鄂尔多斯盆地南缘延长组烃源岩地球化学特征及油源对比[J]. 天然气地质科学, 2017, 28(4): 550–565.
Yang Yanan, Zhou Shixin, Li Jing, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin, China [J]. Natural Gas Geology, 2017, 28(4): 550–565.
- [9] 高辉, 何梦卿, 赵鹏云, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 133–140.
Gao Hui, He Mengqing, Zhao Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics between Chang 7 Shale Oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133–140.
- [10] 郭凯. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段有效烃源岩及生排烃研究[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 15–23.
Guo Kai. Active Source Rocks of Chang 7 Member and hydrocarbon generation and expulsion characteristics in Longdong Area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 15–23.
- [11] 张海, 雷华伟, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地靖边油田西部延9原油地球化学特征与油源[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 836–842.
Zhang Hai, Lei Huawei, Zhang Tao, et al. Geochemical characteristics of Yan 9 crude oil and oil-source correlation in western Jingbian Oil Field, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 836–842.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 范柏江, 董月霞, 庞雄奇. 有效源岩的精确厘定及其排烃量: 以南堡凹陷为例 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2012, 43(1): 229 – 237.
- Fan Bojiang, Dong Yuexia, Pang Xiongqi. Desorption analysis of shale and its geochemical characteristics: A case study of the Chang 7 Member Shale in the Central South Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 46(3): 554 – 562.
- [15] 李微, 庞雄奇, 赵正福, 等. 松辽盆地青一段常规与非常规油气资源评价 [J]. *中国海上油气*, 2018, 30(5): 46 – 54.
- Li Wei, Pang Xiongqi, Zhao Zhengfu, et al. Evaluation on the conventional and unconventional oil and gas resources in K1qn1 of Songliao Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(5): 46 – 54.
- [16] 吴康军, 刘洛夫, 徐正建, 等. 鄂尔多斯盆地长7段致密油成藏物性下限研究 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 63 – 69.
- Wu Kangjun, Liu Luofu, Xu Zhengjian, et al. Study on lower limit of tight oil reservoir forming property in Chang 7 Member of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 63 – 69.
- [17] 骆垠山, 张哨楠, 罗小明, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组原油生物标志物特征及油源对比 [J]. *科技导报*, 2016, 34(2): 129 – 134.
- Luo Yinshan, Zhang Shaonan, Luo Xiaoming, et al. Biomarker characteristics and oil-source correlation of the Yanchang Crude Oil in Fuxian Area, Ordos Basin [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(2): 129 – 134.
- [18] 董丽红, 杜彦军, 李军, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组烃源岩生物标志化合物特征 [J]. *西安科技大学学报*, 2018, 34(4): 604 – 610.
- Dong Lihong, Du Yanjun, Li Jun, et al. Biomarker characteristics of hydrocarbon source rocks of Yanchang Formation in Central Ordos Basin [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 34(4): 604 – 610.
- [19] 张翔宇. 陆相烃源岩的地球化学评价标准之有机质类型简析 [J]. *化工管理*, 2014, 29: 64.
- Zhang Xiangyu. Analysis of Organic matter types in geochemical evaluation criteria of continental source rocks [J]. *Chemical Management*, 2014, 29: 64.
- [20] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨 [J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 35 – 44.
- Zhu Yangming, Gu Shengxiao, Li Ying, et al. Biological Organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. *Geochemica*, 2012, 41(1): 35 – 44.
- [21] 江怀友, 鞠斌山, 李治平, 等. 世界页岩气资源现状研究 [J]. *中外能源*, 2014, 19(3): 14 – 22.
- Jiang Huaiyou, Ju Binshan, Li Zhiping, et al. A study on the world's shale gas resources today [J]. *Sino-global Energy*, 2014, 19(3): 14 – 22.
- [22] Chen Z, Osadetz K G. An assessment of tight oil resource potential in Upper Cretaceous Cardium Formation, Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Petroleum Exploration & Development Online*, 2013, 40(3): 344 – 353.
- [23] 罗鹏, 吉利明. 陆相页岩气储层特征与潜力评价 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 1060 – 1068.
- Luo Peng, Ji Liming. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 1060 – 1068.
- [24] 赵静. 陆相页岩气成藏条件分析——以松辽盆地南部S洼槽为例 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(3): 290 – 293, 313.
- Zhao Jing. Accumulation conditions of shale gas in continental facies: taking S Depression of Songliao Basin as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(3): 290 – 293, 313.
- [25] 袁伟, 柳广弟, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段有机质富集主控因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 326 – 334.
- Yuan Wei, Liu Guangdi, Xu Liming, et al. Main controlling factors for organic matter enrichment in Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 326 – 334.
- [26] 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.
- [27] 张洪洁, 王凤琴, 刘航, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长7段页岩气含量及影响因素 [J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(6): 666 – 672.
- Zhang Hongjie, Wang Fengqin, Liu Hang, et al. Shale gas content and its influencing factors in Chang 7 member of Southeastern Ordos basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(6): 666 – 672.
- [28] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 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 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 558 – 570.
- Li Zhiming, Tao Guoliang, Li Maowen, et al. Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3rd sub-member of the Triassic Chang 7 member in Binchang block, southwestern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 558 – 570.
- [29] 蔡振家, 雷裕红, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组7段页岩有机孔发育特征及其影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 367 – 379.
- Cai Zhenjia, Lei Yuhong, Luo Xiaorong, et al. Characteristics and controlling factors of organic pores in the 7th member of Yanchang Formation shale in the Southeastern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 367 – 379.
- [30] 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 Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. *Geochemica*, 2009, 38(6): 573 – 582.