

## 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义

——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例

林森虎,袁选俊,杨 智

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**鄂尔多斯盆地延长组7段富含大量页岩油,但由于对页岩与泥岩特征差异缺乏深入了解,阻碍了该层系页岩油的有效开发。为此,采用岩心观察、薄片鉴定等直接观察手段与XRD、Rock-Eval、TOC、氯仿沥青“A”抽提、主微量元素等实验相结合,对研究区长7段页岩和泥岩的岩石学、矿物学、有机地球化学与无机地球化学特征进行了深入研究。结果表明:长7段页岩的颜色较深,发育明显页理,切面光滑,而泥岩不具有纹层和页理,断口不整齐且切面粗糙;页岩的有机质以顺层富集为主,泥岩有机质以分散赋存为主;页岩的粘土矿物含量较高,泥岩的石英含量较高;页岩的TOC平均值为18.5%,约为泥岩的5倍,生烃潜量是泥岩的5~8倍;氯仿沥青“A”组分对比显示页岩含较多的芳烃,泥岩则含有较多的饱和烃;页岩沉积水体的盐度相对泥岩略低,且水深相对较浅。长7段页岩呈西北-东南走向分布,厚度主要为15~30 m,与泥岩呈互补式分布。页岩油“源内聚集”的特点使长7段的页岩油宏观分布受到页岩相控制。开展泥岩与页岩的对比研究,对准确预测富有机质页岩分布及指导页岩油气勘探具有重要意义。

**关键词:**页岩;泥岩;页岩油;延长组;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE122.1

**文献标识码:**A

## Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7<sup>th</sup> member of Yanchang Formation in the Ordos Basin

Lin Senhu, Yuan Xuanjun, Yang Zhi

(Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The 7<sup>th</sup> member of Yanchang Formation (Chang 7) in Ordos Basin is rich in shale oil resources. However, a poor understanding of the differences of characteristics between shale and mudstone has hindered the exploitation of shale oil. Various methods including direct observation of core and thin section and analyses of XRD, Rock-Eval, TOC, chloroform bitumen “A” extraction as well as major and trace element analysis are used to study the sedimentological, mineralogical and geochemical characteristics of shale and mudstone in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, Northwest China. The results indicate that the shale shows darker color, obvious lamination and smooth surface, while the mudstone has grey color, no fissiles, and non-smooth cut surface. The organic matters in shale are mainly enriched along beddings, the organic matters in the mudstone are scattered. The clay content is high in the shale, while quartz content is relatively high in the mudstone. The average TOC of the shale (18.5%) is more than 5 times that of the mudstone and the hydrocarbon generation potential in shale is 5~8 times that in mudstone. More aromatic hydrocarbons and less saturated hydrocarbon is contained in the component of chloroform bitumen “A” of shale than that of mudstone. The shale was deposited in an environment with lightly lower paleosalinity and shallower paleo-water depth than that of the mudstone. The shales in Chang7 strike NW-SE and have thickness in the range of 15–30 m. The macroscopic distribution of shale oil is controlled by shale facies, therefore the comparative study between shale and mudstone is of great significance for accurate prediction of organic-rich shale and guiding shale oil/gas exploration.

**Key words:** shale, mudstone, tight oil, Yanchang Formation, Ordos Basin

收稿日期:2016-08-16;修订日期:2017-04-20。

第一作者简介:林森虎(1986—),男,硕士,储层沉积与非常规油气。E-mail: lsh2012@petrochina.com.cn。

基金项目:国家油气重大专项(2016ZX05046-001)。

中国页岩油气资源十分丰富,目前在四川盆地页岩气开发已经取得突破,在渤海湾、鄂尔多斯、松辽、南襄等多个中生代陆相湖盆中也已不同程度地获得了工业页岩油流,显示出良好的勘探开发前景。近年来,随着页岩油气勘探开发过程的进行,人们发现对页岩与泥岩特征对比的研究,无论是广度还是深度都还远远不够,陆相页岩的分类研究尤甚。

陆相页岩和泥岩在矿物学特征、有机质赋存状态、沉积构造、形成条件、分布特征等方面具有显著差异,这些差异在油气富集及后期开发过程中表现出明显不同的地质意义,针对性地划分页岩和泥岩并开展对比研究将为陆相页岩油气资源发展产生长远影响。

本文拟利用岩心、岩石薄片、地球化学、XRD、元素分析等资料对鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)湖相页岩和泥岩的发育与分布特征、矿物岩石学及有机地球化学等特征进行研究,对鄂尔多斯盆地长7段页岩油的富集高产因素展开讨论,以期页岩油藏富集区评价、资源潜力分析等深入研究奠定基础 and 提供指导。

## 1 样品地质背景及实验测试

鄂尔多斯盆地为稳定的克拉通盆地,发育早古生代、晚古生代、中生代多套含油气组合,是一个含油气远景丰富的大型沉积盆地<sup>[1-8]</sup>。根据现今构造格局,盆地划分为6大构造单元,分别为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷和西缘逆冲带(图1)。晚三叠世时期,华北陆块与扬子陆块碰撞拼接,受秦岭造山活动的影响,在华北陆块西南部的鄂尔多斯地区形成了大型陆相湖盆<sup>[1-3]</sup>,中生界延长组记录了整个湖盆发生、发展到消亡的全过程<sup>[1-3]</sup>。根据岩性、沉积特征,可以将延长组自上而下划分为长1—长10等10个油层组,其中长7期为湖泊发展的鼎盛时期,大范围发育了一套深湖—半深湖相页岩和泥岩地层<sup>[4]</sup>。该套地层埋深1 500~3 000 m,厚度10~100 m,分布稳定,具有区域对比性。干酪根类型以I—II<sub>1</sub>型为主,有机碳含量高,镜质体反射率为0.7%~1.3%,处于成熟生油及伴生气阶段。

本次研究选取湖盆中部长7段218块烃源岩样品,以黑色泥岩为主,部分为油页岩,分别采自72口探井或评价井。取样深度从960 m至2 792 m不等。对22块样品进行了氯仿沥青“A”分析;对88块样品进行了薄片鉴定和XRD分析;对57块样品进行了主量元

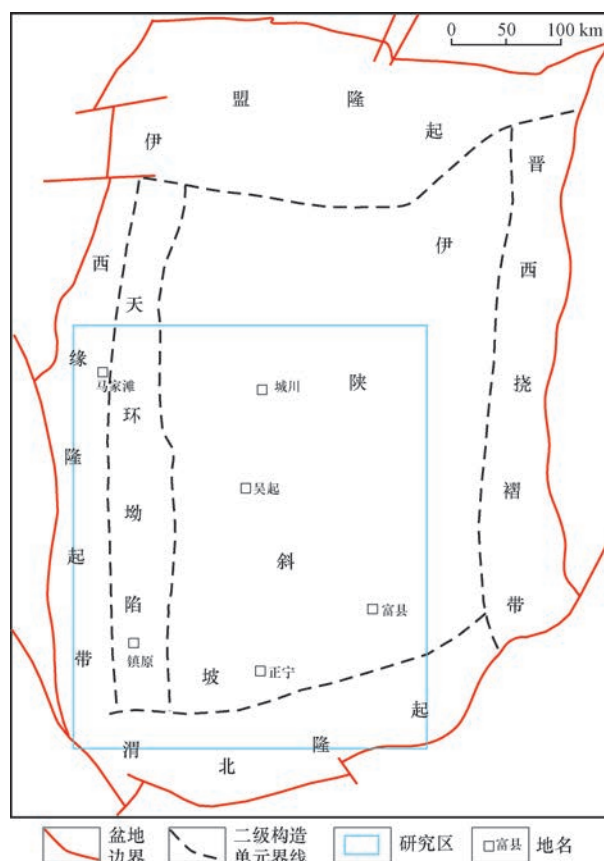


图1 鄂尔多斯盆地构造区划

Fig. 1 Structure division of the Ordos Basin

素、微量元素(31)和硼元素分析;对全部样品进行了热解、有机碳分析。矿物组分(XRD)检测选用SY/T6201—1996沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物X—衍射定量分析方法;主量元素(全分析12项)检测选用GB/T14506.28—93硅酸盐岩石化学分析方法X—荧光光谱法测定主、次元素量元素方法;微量元素(44项)检测选用DZ/T0223—2001电感耦合等离子体质谱(ICP—MS)方法通则;硼元素检测选用JY/T015—1996感耦等离子体原子发射光谱方法通则。

## 2 陆相页岩与泥岩的特征差异

### 2.1 岩石学特征及形成机制

传统意义上讲,泥岩是具有结构和组分的硬化泥,缺乏细纹层或易裂性,是一种块状的细粒沉积岩,通常粘土矿物与粉砂含量近等。页岩是一种细粒的,硬化的,碎屑沉积岩,由粘土矿物、粉砂或泥的固结作用形成(压实或胶结)。具有细纹层结构(层厚0.1~0.4 mm)和/或层面易裂性(在风化表面最为显著)。

在鄂尔多斯盆地长7段,页岩和泥岩具有5个方面的岩石学特征差异:①泥岩主要呈现灰色,页岩颜色则以黑色为主,并且具有光泽;②泥岩含砂较多,约5%~20%,页岩含砂量一般小于5%;③页岩断口整齐,泥岩的断口往往有粗糙感;④泥岩岩屑通常质软并且无结晶形状和结构构造,页岩岩屑则比较坚固并表现出局部剥落;⑤页岩普遍发育水平层理,容易裂开。

长7段泥岩大多由非常均一且可能相当快速的沉积作用形成,所以往往具有槽模、沟模、重荷模、火焰构造、块状构造等沉积特征(图2)。页岩则由水流作用形成,并非在静水环境下沉积。因为粘土级颗粒更倾向于凝聚形成粉砂级颗粒,沉降到湖底并在水流作用下产生波痕,波痕都带着一个很长很薄的“尾巴”,然后一个尾巴叠置另一个尾巴之上,叠置过程中会剥蚀掉最前端波痕(大部分),只留下一层又一层的“尾巴”,最终形成页理<sup>[9-10]</sup>,故此在页岩里常常可以见到微小的透镜体结构(图2)。

## 2.2 有机质赋存状态

薄片观察分析发现,长7段泥岩和页岩的有机质赋存状态差异较大。页岩的细纹层间夹有更多的暗色

有机质,有机质赋存状态主要为顺层富集型,其次为局部富集型;泥岩的砂质夹层更多,有机质赋存状态主要为分散型,其次为生物碎屑型(图3)。

不同类型的有机质赋存状态表现出较大的有机质含量差异,顺层富集型的 $TOC$ (有机碳含量)明显高于分散型的 $TOC$ 。这些特征充分展现了页岩和泥岩有机质富集和保存方式的差异,并将影响到烃类的赋存、甜点的寻找及开发措施的选择,在今后的研究中应更关注有机质保存多样性在非常规油气勘探开发中的具体应用<sup>[5]</sup>。

## 2.3 矿物组分含量

泥岩和页岩的岩石学特征差异,很大程度源于矿物组分。 $XRD$ 分析结果显示,长7段泥岩含较多的石英和较少的粘土矿物(图3)。泥岩的石英含量具有较宽的分布范围,从10.9%到38.0%不等,平均含量为21.5%;页岩的石英含量为6.7%~18.2%,平均含量为12.5%(表1)。较高的石英含量反映距离物源更近,有机质易被稀释从而导致 $TOC$ 较低(图4),一般只有当沉积速率小于5 cm/ka, $TOC$ 才随沉积速率的增加而增加。石英含量的不同也是造成泥岩和页岩结构差异的重要原因。



图2 鄂尔多斯盆地长7段泥岩、页岩典型沉积构造

Fig. 2 Typical sedimentary structures of mudstone and shale in Chang 7 Member, Ordos Basin

- a. 泥岩槽模, 庄143井, 埋深1 861.2 m; b. 泥岩沟模, 宁23井, 埋深1 621.4 m; c. 泥岩重荷模, 里231井, 埋深2 080.7 m;  
d. 页岩微小透镜体, 庄30井, 埋深1 846.9 m; e. 页岩微小透镜体, 宁70井, 埋深1 713.6 m

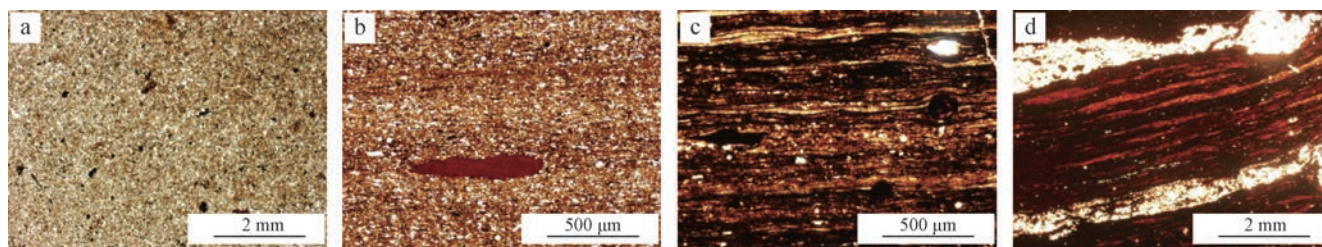


图3 鄂尔多斯盆地长7段页岩、泥岩有机质赋存形态与特征

Fig. 3 Organic matter occurrences and characteristics of shale and mudstone in Chang 7 Member, Ordos Basin

- a. 环38井, 埋深2 316 m, 分散型有机质,  $TOC=0.7\%$ ; b. 盐56井, 埋深2 997 m, 分散型有机质,  $TOC=3.7\%$  c. 庄233井, 埋深1 757 m, 有机质顺层富集,  $TOC=11.7\%$ ; d. 山105井, 埋深1 912 m, 有机质条带顺层富集,  $TOC=21.0\%$



表 1 鄂尔多斯盆地长 7 段泥岩、页岩全岩矿物平均含量

Table 1 All rock average mineral contents of mudstone and shale in Chang 7 Member, Ordos Basin

| 岩性 | 矿物含量/% |     |     |     |     |     |      |      | 粘土矿物相对含量/% |      |      |     |     |     | S 在<br>I/S<br>中占<br>比/% | S 在<br>C/S<br>中占<br>比/% |
|----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------------|------|------|-----|-----|-----|-------------------------|-------------------------|
|    | 石英     | 钾长石 | 斜长石 | 方解石 | 白云石 | 黄铁矿 | 非晶态  | 粘土矿物 | S          | I/S  | I    | K   | C   | C/S |                         |                         |
| 泥岩 | 21.5   | 1.0 | 7.1 | 0.7 | 5.0 | 2.3 | 19.0 | 43.4 | —          | 60.3 | 25.1 | 5.1 | 9.5 | —   | 17.5                    | —                       |
| 页岩 | 12.5   | 1.9 | 7.1 | 0.3 | 5.5 | 7.6 | 13.0 | 52.1 | —          | 67.3 | 20.8 | 4.6 | 7.3 | —   | 14.3                    | —                       |

注: S 为纯蒙脱石; I/S 为伊蒙混层; I 为纯伊利石; K 为高岭石; C 为绿泥石; C/S 为绿蒙混层

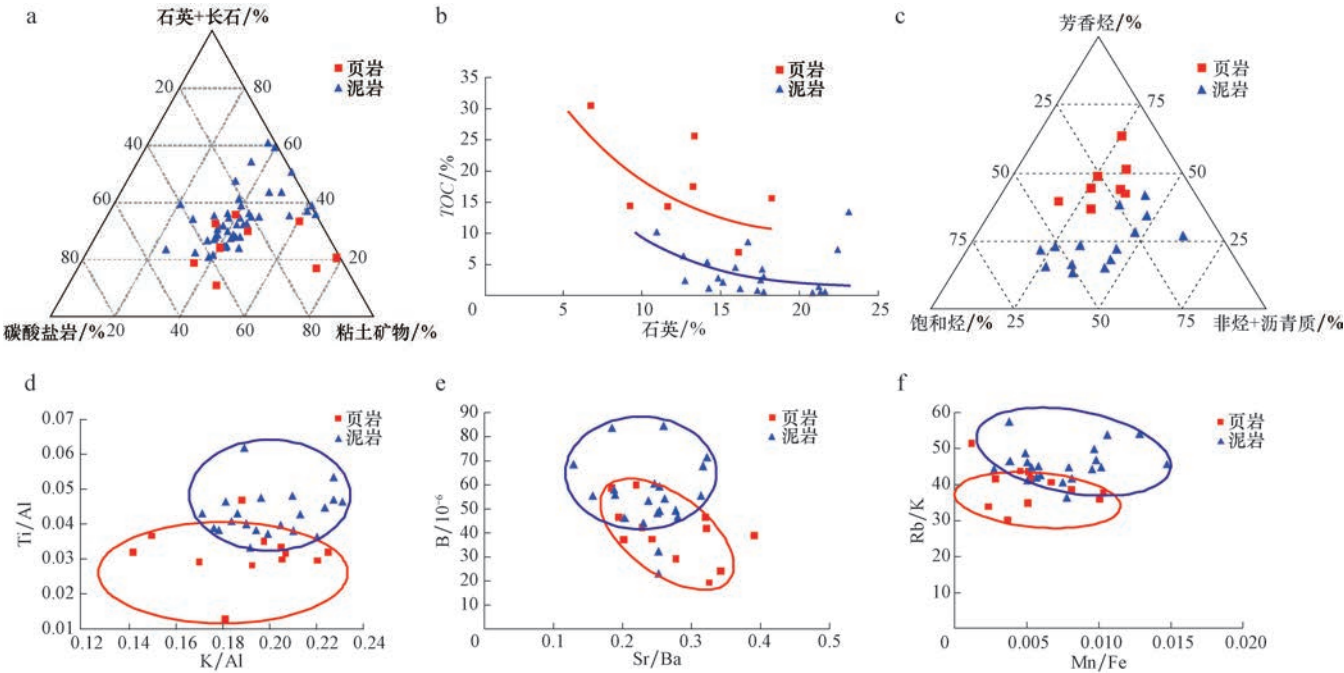


图 4 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩与泥岩的矿物组成及化学性质差异

Fig. 4 Differences between shale and mudstone in mineralogy and geochemistry in Chang 7 Member, Ordos Basin.

a. 三端元矿物组成; b. TOC 与石英含量关系; c. 氯仿沥青“A”组分; d. K/Al 与 Ti/Al 散点图; e. B 与 Sr/Ba 散点图; f. Rb/K 与 Mn/Fe 散点图

泥岩的粘土矿物含量为 23.2% ~ 67.5%, 平均值为 43.3%, 页岩的粘土矿物含量为 36.1% ~ 79.5%, 平均值为 52.1% (表 1)。由于页岩的形成需要能吸附有机分子的粘土矿物, 因此较多的粘土矿物则可能使更多的有机质得到保存。泥岩和页岩的长石含量差异较小, 其中斜长石都为 7%, 但页岩的钾长石含量略高 (页岩为 1.9%, 泥岩为 1.0%)。此外, 两者碳酸盐矿物的含量差异也较小, 其中页岩的白云石含量略高, 泥岩的方解石含量略高 (表 1)。难以界定的是, 这些矿物是否在成岩过程中发生过蚀变转化, 所以不易讨论两者的成因差异。

长 7 段页岩的黄铁矿含量为泥岩的 3 倍以上。黄铁矿含量较高可能是页岩 TOC 明显高于泥岩的原因之一, 因为鄂尔多斯盆地延长组最主要的黄铁矿类型是分散状黄铁矿, 在显微镜下往往呈霉球状, 散布在有机质纹层中, 这种黄铁矿的形成往往与生物作用密切相关, 在有机质含量高的沉积物中, HS<sup>-</sup> 对活性 Fe

(Ⅲ) 氧化物的化学还原形成黄铁矿。

粘土矿物 X-衍射分析结果显示, 长 7 段泥岩的粘土矿物组成较为复杂, 多以伊利石为主, 次为高岭石、蒙脱石、绿泥石及自生非粘土矿物, 页岩多以伊蒙混层 (或蒙脱石) 为主, 次为高岭石、绿泥石 (表 1)。由于蒙脱石的层间结构对有机质的吸附能力远超其它粘土矿物 (蒙脱石吸附有机质的能力约为绿泥石的 6 倍, 高岭石的 12 倍), 因此蒙脱石含量高是页岩具有较高 TOC 的原因之一。

2.4 有机地球化学特征

长 7 段页岩以 I 型干酪根为主要母质类型, 泥岩以 II 型为主, 87% 的泥岩为 II 型干酪根 (表 2)。地球化学分析结果显示, 页岩的 TOC 平均为 18.5%, 是泥岩的 5 倍; 页岩的生烃潜力平均为 63.8 mg/g, 是泥岩的 8 倍, 氯仿沥青“A”含量约为泥岩的 2 倍 (表 2), 即页岩拥有更大的页岩油气勘探潜力。

表 2 鄂尔多斯盆地长 7 段泥岩、页岩有机地球化学参数平均值  
Table 2 Geochemical parameters of mudstone and shale in Chang 7 Member, Ordos Basin

| 岩性 | 母质类型                                                    | 有机碳含量<br>(TOC)/% | 可溶烃含量<br>(S <sub>1</sub> )/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 热解烃含量<br>(S <sub>2</sub> )/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 最高热解<br>峰温<br>(T <sub>max</sub> )/℃ | 生油潜量<br>(S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> )/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 残余碳含量<br>(S <sub>4</sub> )/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 氢指数(HI)/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 降解率/<br>% | 氯仿沥青“A”<br>含量/% |
|----|---------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------|
| 泥岩 | I:50%;<br>II <sub>1</sub> :48%;<br>II <sub>2</sub> :2%  | 3.74             | 1.01                                                 | 6.88                                                 | 446.65                              | 7.90                                                                | 30.83                                                | 143.96                            | 14.47     | 0.25            |
| 页岩 | I:13%;<br>II <sub>1</sub> :41%;<br>II <sub>2</sub> :46% | 18.50            | 5.24                                                 | 58.63                                                | 450.60                              | 63.87                                                               | 131.93                                               | 296.20                            | 27.20     | 0.44            |

值得注意的是,研究区内页岩的氯仿沥青“A”组分以较高的芳烃为主要特征,泥岩的氯仿沥青“A”则含有较多的饱和烃(图 4)。根据前人的研究结果,长 7 段富有机质页岩具有较高的三环萜烷类化合物(芳烃类),表明生油母质与细菌输入和藻类有机质来源有关;泥岩具有较高的重排藿烷特征(饱和烃类),陆源碎屑和粘土矿物有利于重排作用的发生,重排藿烷含量较高可能与弱氧化和酸性介质有关<sup>[6]</sup>。

2.5 无机地球化学特征

长 7 段泥岩 Si, Mg, Ti, Ca 和 K 元素含量较高,页岩 P 和 Fe 元素较高。由于 Ti/Al 值越高指示粗颗粒物越多<sup>[7]</sup>,且泥岩的 K/Al 值高于页岩,因此在 Ti/Al 和 K/Al 交会图(图 4d)上泥岩和页岩的区分度明显。长 7 段泥岩 Ti/Al 值较高表明泥岩的颗粒相对较粗。

B 元素和 Sr/Ba 比值常被用来判断泥质岩沉积时的古盐度。一般而言,海相环境下硼质量分数为  $80 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ ,而淡水环境下硼质量分数多小于  $60 \times 10^{-6}$ ;海相沉积物中 Sr/Ba 值大于 1,淡水沉积物中 Sr/Ba 值小于 1。长 7 段泥岩、页岩的 Sr/Ba 比值均为 0.13 ~ 0.39,差异较小;泥岩的硼质量分数为  $23.1 \times 10^{-6} \sim 84.2 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $55.5 \times 10^{-6}$ ;页岩的硼质量分数为  $19.2 \times 10^{-6} \sim 59.8 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $40.1 \times 10^{-6}$ (图 4e),表明两者沉积时都属于淡水环境,但泥岩沉积水体的相对盐度较页岩略高,通常越靠近湖盆沉积中心,盐度越高。

元素的聚集和分散与水深度(离岸距离)有一定相关性,很多过渡元素、微量元素及 REE 对古水深具有很好的指示意义。例如 Fe 易氧化,多在离岸近的地区聚集,Mn 相对 Fe 较稳定,能在离岸远的地区聚集;Rb 和 K 在水中的迁移和富集均与粘土密切相关,并且 Rb 比 K 更容易被粘土吸附而远移<sup>[8]</sup>。因此, Mn/Fe

和 Rb/K 比值变大,揭示水体加深,比值变小则水体变浅。长 7 段泥岩和页岩的 Mn/Fe 平均值分别为 0.007 5 和 0.005 5, Rb/K 平均值分别为 45.67 和 39.35 (图 4f),表明泥岩的沉积水体相对页岩较深,这与泥岩相对盐度较大吻合。

3 平面分布特征及其勘探意义

利用盆地 295 口探井的综合录井资料,厘定了长 7 段的页岩和泥岩的岩相格局。统计结果表明,长 7 段页岩在盆地的分布总体呈西北-东南走向,范围遍布整个盆地,厚度主要为 15 ~ 30 m,集中分布在马家滩—姬塬—华池一线,最大厚度可达 70 ~ 80 m(图 5a),主要位于姬塬、环县、吴起地区。长 7 段泥岩厚度 10 ~ 20 m 为主,最大厚度可达 60 ~ 70 m,集中分布在惠安堡、演武和吴起地区,整体具有分布稀疏,厚度较小的特点(图 5b)。与页岩相比,泥岩的分布范围与页岩基本不重合,特别在页岩集中发育的区域泥岩厚度很小,两者总体呈互补式分布。

鄂尔多斯盆地中生界长 7 段页岩层系液态烃大面积分布,面积约  $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,资源规模超过  $20 \times 10^8 \text{ t}$ 。目前长 7 段绝大多数页岩油工业油流井位于页岩累积厚度 20 m 范围以内,即页岩相控制了页岩油的宏观分布。

由于 TOC 会直接决定页岩含烃量,从而影响页岩油气和页岩油气资源的甜点区评价<sup>[11-13]</sup>;同时不同的矿物组成,会造成页岩的脆性和力学性质具有明显差异<sup>[14-15]</sup>,进而影响完井等开发方案的设计;不同的成岩机制,更会导致孔隙结构的严重差异<sup>[16-19]</sup>,这些都会对页岩油气资源的开发产生巨大的影响。因此开展泥岩与页岩的对比研究,具有两个方面的油气勘探意义:第一,可以建立富有机质页岩形成与分布规律,明确其沉积模式,以此指导陆相页岩层系纵向及平面分

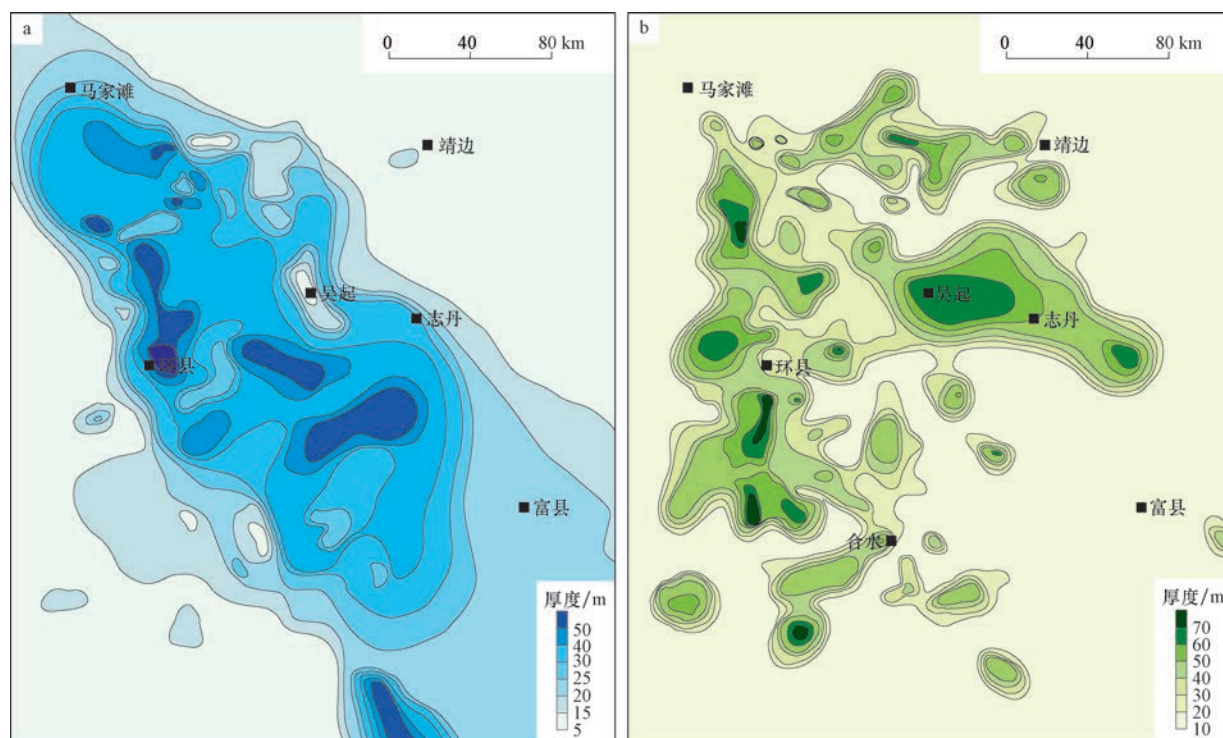


图5 鄂尔多斯盆地长7段页岩、泥岩平面分布

Fig. 5 Isopach maps of shale and mudstone of Chang 7 Member in the Ordos Basin

a. 长7段页岩等厚图;b. 长7段泥岩等厚图

布预测,为最有利的页岩发育位置提供科学依据;第二,可以确定富有机质页岩形成和分布的主控因素,帮助发掘页岩油资源“甜点区”评价的核心参数,有效指导页岩油的勘探和开发。

## 4 结论

1) 鄂尔多斯盆地长7段的泥岩和页岩由不同的沉积机制形成,因而具有显著不同的岩石学特征。页岩实际上由水流作用形成,泥岩则大多由非常均一且可能相当快速的沉积作用形成。页岩颜色较深,以黑色为主且具有一定光泽,泥岩以灰色为主;页岩具有细纹层结构且易裂,含砂量小,断口整齐,泥岩含砂较多,断口具有粗糙感;泥岩的岩屑通常质软,页岩岩屑则比较坚固并表现出局部剥落。页岩的细纹层间夹有更多的暗色有机质,有机质赋存状态主要为顺层富集型,泥岩的有机质赋存状态主要为分散型。

2) 页岩的有机质丰度和生烃潜量远高于泥岩。页岩干酪根以Ⅰ型为主,泥岩干酪根以Ⅱ型为主;氯仿沥青“A”组分中,页岩含有较高的芳烃,泥岩则含有较多的饱和烃。矿物学特征方面,页岩以较高的粘土矿物含量为主要特征,泥岩则具有较高的石英含量。同时页岩的黄铁矿含量远高于泥岩,并且粘土矿物组分以

伊蒙混层(或蒙脱石)为主,这是页岩中大量有机质形成与保存的控制因素之一。页岩和泥岩都形成于淡水环境,但泥岩的沉积环境相对盐度较高,水体更深。

3) 长7段页岩在盆地的分布总体呈西北-东南走向,与泥岩呈互补式分布。页岩厚度大,分布广;泥岩厚度较小,分布稀疏。页岩油“源内聚集”的特点使长7段的页岩油宏观分布受到页岩相控制,开展泥岩与页岩的对比研究,可以更准确地预测富有机质页岩层系纵向及平面分布特征,为页岩油气资源“甜点区”评价的核心参数提供参考,指导页岩油气的有效勘探与开发。

## 参考文献

- [1] 张文正,杨华,李剑峰,等.论鄂尔多斯盆地长7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 [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [2] 杨俊杰.鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M].北京:石油工业出版社,2002.  
Yang Junjie. Structural evolution and hydrocarbon distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [3] 邓秀芹,蔺防晓,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演

- 化及其与早印支运动关系的探讨[J]. 古地学报, 2008, 10(2): 159–166.
- Deng Xiuqin, Lin Fangxiao, Liu Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 159–166.
- [4] 杨华, 田景春, 王峰. 鄂尔多斯盆地三叠纪延长组沉积期湖盆边界与底形及事件沉积研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- Yang Hua, Tian Jingchun, Wang Feng. Study on basin boundary and the bed form and event deposits in depositional period of Triassic Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [5] 刘伟新, 朱晓军, 马安林, 等. 不同泥岩相有机质赋存特征及对比表面积的影响——以渤海湾盆地沾化凹陷古近系为例 [J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 204–210.
- Liu Weixin, Zhu Xiaojun, Ma Anlin, et al. Occurrence of organic matter in different mudstone lithofacies and its influence on specific surface area: A case study of the Paleogene in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and experiment, 2016, 38(2): 204–210.
- [6] 吴凯, 张文正, 陈芳, 等. 鄂尔多斯盆地固城地区延长组长7 富有机质油页岩有机地球化学特征[J]. 低渗透油气田, 2008(3): 5–10.
- Wu Kai, Zhang Wenzheng, Chen Fang, et al. Organic geochemical characteristics of organic-matter-rich oil shale in the Yanchang Formation Chang7 reservoirs of Gucheng Area, Ordos Basin [J]. Low Permeability Oil & Gas Fields, 2008(3): 5–10.
- [7] Rimmer, Susan M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, central Appalachian Basin (USA) [J]. Chemical Geology, 2004, (3): 373–391.
- [8] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 95–104.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environment analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 95–104.
- [9] Juergen S, John B, S. Bed load transport of mud by floccule ripples—Direct observation of ripple migration processes and their implications [J]. Geology, 2009, 37(6): 483–486.
- [10] Juergen S, John B S. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds—interpreting the rock record in the light of recent flume experiments [J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80: 119–128.
- [11] Nick Snow. Marcellus shale's sweet spot [J]. Oil & Gas Journal, 2010, 108: 30–30.
- [12] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190–198.
- Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 190–198.
- [13] 吴伟涛, 邓静, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区长7 油层组致密油成藏条件与成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 874–881.
- Wu Weitao, Deng Jing, Zhao Jingzhou, et al. Accumulation conditions and models of tight oil reservoirs in Chang-7 of Huaqing area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 874–881.
- [14] 刘致水, 孙赞东. 新型脆性因子及其在泥页岩储集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 117–124.
- Liu Zhishui, Sun Zandong. New brittleness indexes and their application in shale/clay gas reservoir prediction [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 117–124.
- [15] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7 致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62–71.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 62–71.
- [16] 吴松涛, 朱如凯, 崔京钢, 等. 鄂尔多斯盆地长7 湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 167–176.
- Wu Songtao, Zhu Rukai, Cui Jinggang, et al. Characteristics of lacustrine shale porosity evolution, Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 185–195.
- [17] 王香增, 张丽霞, 李宗田, 等. 鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型划分方案及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 1–7.
- Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Li Zongtian, et al. Pore type classification scheme for continental Yanchang shale in Ordos Basin and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 1–7.
- [18] 耳闯, 赵靖舟, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7 油层组页岩—致密砂岩储层孔隙特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 341–353.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Yao Jingli, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 341–353.
- [19] 钟大康. 致密油储层微观特征及其形成机理——以鄂尔多斯盆地长6—长7 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 49–61.
- Zhong Dakang. Micro-petrology, pore throat characteristics and genetic mechanism of tight oil reservoirs—A case from the 6th and 7th members of Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 49–61.

(编辑 张亚雄)