

湖相泥岩、页岩的沉积环境和特征对比

——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例

刘群¹,袁选俊²,林森虎²,郭浩³,成大伟²

(1. 阿伯丁大学,英国 AB243UE; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;

3. 中国石油南方石油勘探开发公司,海口 海南 572000)

摘要:泥质岩可分为泥岩和页岩两大类,二者在成因机制、有机质含量及赋存状态、矿物组成等方面存在显著差异。开展湖相泥岩、页岩的分布特征研究以及其差异特征的对比,有助于建立富有机质页岩的沉积模式。鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)沉积时期为湖盆发展的鼎盛时期,湖盆中心沉积了大套的泥岩和页岩。该文应用典型剖面分析、岩心-薄片观察、地球化学分析等手段揭示了长7段泥岩和页岩在分布特征、地球化学特征、岩石组分、组构、主微量元素等五方面的差异。①分布特征:泥岩和页岩互补分布,泥岩主要发育在三角洲前缘、深湖-浊积岩相和半深湖相,页岩主要沉积于深湖相;②组构特征:页岩有页理,有机质顺层分布,泥岩无页理,有机质分散分布;③岩石组分:页岩更富集黄铁矿,是泥岩的11倍,泥岩的白云岩、菱铁矿含量更高;④有机地球化学指标:页岩TOC平均含量为6.6%,是泥岩的3倍, S_1 值平均含量为3.1 mg/g,是泥岩的2.5倍;⑤主微量元素:页岩中U, Th, Mo, Co, Ni等微量元素显著高于泥岩且U/Th, V/Cr和P/Al的比值较高,泥岩中Ti/Al和K/Al比值更高。综合分析,鄂尔多斯盆地长7泥岩和页岩的形成主要受沉积相带、湖水深度和湖盆生产力控制。页岩沉积时,水体生产力更高,离物源更远,水体更为缺氧。

关键词:长7段;富有机质页岩;沉积环境;泥岩;页岩;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Depositional environment and characteristic comparison between
lacustrine mudstone and shale: A case study from the chang 7
Member of the Yanchang Formation, Ordos Basin

Liu Qun¹, Yuan Xuanjun², Lin Senhu², Guo Hao³, Cheng Dawei²

(1. University of Aberdeen, Aberdeen AB243UE, United Kingdom; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Southern Petroleum Exploration & Development Corporation, PetroChina, Haikou, Hainan 572000, China)

Abstract: Argillaceous rocks (or argillite) can be subdivided into two categories, mudstone and shale, which differ significantly in genetic mechanism, content of organic matters and mode of occurrence, constituent minerals, etc. A study on distribution patterns of lacustrine mudstone and shale as well as comparisons of their distinguished characteristics would be of great help in building up an organic-rich shale depositional model. The Chang 7 Member of the Yachang Formation is represented by a large set of mudstone and shale, which was deposited in the period of maximum lake depth of the Ordos Basin during the Triassic. Their differences, which are ascribed into five aspects (distribution pattern, geochemical characteristics, rock composition, fabric, and main and trace elements), have been disclosed by typical vertical profile analysis, core-thin section observation, geochemical analysis, etc. That is, (1) distribution pattern: mudstone and shale are complementarily deposited, with mudstone mainly deposited in delta front, deep-lacustrine-turbidite facies, and semi-deep lacustrine facies, while shale mainly in deep lacustrine facies; (2) fabric feature: shale is characterized by laminae and organic matters occurring along layers, while mudstone exhibits no laminae and its organic matters scattered; (3) rock composition: shale is rich in pyrite, eleven times the content of mudstone pyrite, whereas

收稿日期:2017-02-21;修订日期:2018-04-26。

第一作者简介:刘群(1991—),女,博士,深海沉积。E-mail: r01ql14@abdn.ac.uk。

mudstone holds more dolomite and siderite; (4) organic geochemistry indices: the TOC of shale with an average of 6.6%, is three times as much as that of mudstone, and the value of S_1 averaging at 3.12 mg/g, is 2.5 times that of mudstone; (5) main and trace elements: shale is significantly higher in trace elements content like U, Th, Mo, Co, Ni, and in ratios like U/Th, V/Cr and P/Al than those in mudstone, while Ti/Al and K/Al ratios are higher in mudstone. In a word, the formation of mudstone and shale in the Chang 7 Member is mainly controlled by sedimentary facies, lake depth, and lake basin productivity. Shale is deposited further away from sediment source area with higher productivity and less oxygen in water.

Key words: Chang 7 Member, organic-rich shale, depositional environment, mudstone, shale, Ordos Basin

近年来,随着非常规油气的蓬勃发展,作为自生自储的泥质岩受到了大家的广泛关注^[1-5]。泥质岩是指由含量大于50%的粒径小于0.003 9 mm的颗粒组成的岩石^[6]。根据是否具有页理的特征,泥质岩可分为泥岩和页岩两大类:页岩是有页理的泥质岩,泥岩是没有页理的泥质岩^[6]。湖相泥质岩层段岩相变化快且非均质性强^[7-10],表明了泥岩和页岩沉积受沉积环境影响大,二者在岩石组分和地球化学指标等各方面存在显著差异。海相泥岩和页岩交互沉积:页岩成层性好,主要形成于缺氧环境,有机质含量高;泥岩沉积时水体含氧量更高,受生物扰动影响大,有机质含量较低^[11]。富有机质页岩的沉积机理和成因机制目前仍存在争议^[12-21]。以 Pederson 和 Calvert^[22] (1990) 为代表的学者认为高生产率是富有机质页岩中有机质富集的主要原因,而以 Demaison 和 Moore^[23] (1980) 等认为闭塞的缺氧环境是富有机质页岩中有机质富集的必要条件。研究泥岩和页岩特征的差异,找出差异指标,可以明确泥岩和页岩的成因机制,帮助建立预测富有机质页岩的有利因素。

鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)发育一套沉积厚度为100~150 m^[24]的非均质性强的泥质岩层段。本文旨在通过分析长7段典型剖面的垂向岩性演化特征以及对比研究泥岩和页岩的岩石组分、地化指标、微量元素等方面的区别,揭示泥岩、页岩的形成与沉积环境的关系,探讨区分泥岩和页岩在石油地质学上的意义和富有机质页岩的形成机制。

1 地质背景及样品选择

1.1 地质背景

晚三叠世时期,华北陆块和扬子板块相撞,受秦岭造山活动影响,在华北陆块的西南部形成了大型陆相湖盆^[25]。鄂尔多斯盆地中生界的延长组则记录了整个湖盆的初始、发展到消亡的全过程。根据岩性、电性和含油性,将延长组自上而下分为10段(长1段—长

10段)^[26],其中长7段沉积期是三叠纪湖盆发育的鼎盛时期,湖盆面积超过了 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,深湖区水深可达150 m^[27],发育了大范围的泥岩、页岩和重力流砂体。长7段沉积厚度100~150 m^[28],自下而上可分为3个小层(图1):长7³主要为黑色油页岩,长7²以暗色泥岩为主,夹薄层粉—细砂岩,长7¹发育暗色泥岩和中—薄层细砂岩。

1.2 样品、剖面选择及研究方法

该文选取了湖盆中心的2口长7段连续取心井进行重点解剖(图2,盐66井和环317井)。盐66井的垂向剖面反映了从长7³到长7¹,由深湖相演化到

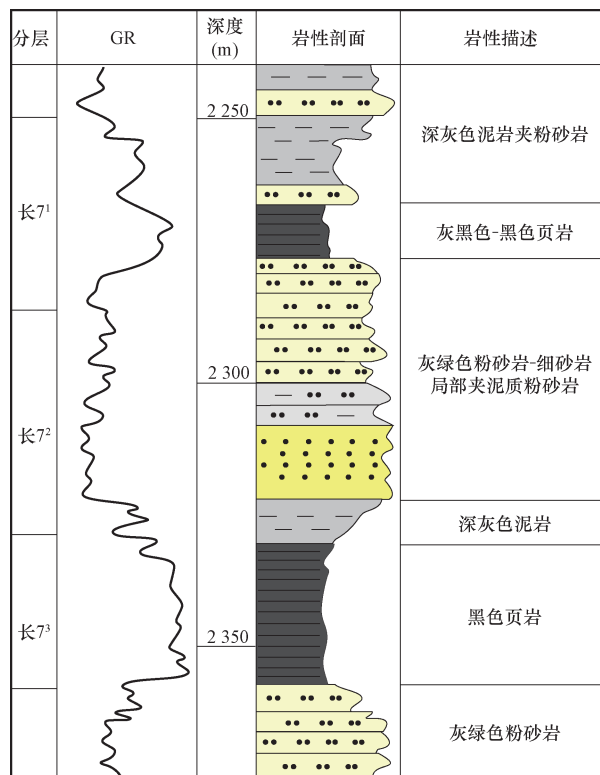


图1 鄂尔多斯盆地延长组7段里57井岩性柱状示意图

Fig. 1 Stratigraphic column of the Chang 7 Member from Well Li 57, Yanchang Formation, Ordos Basin

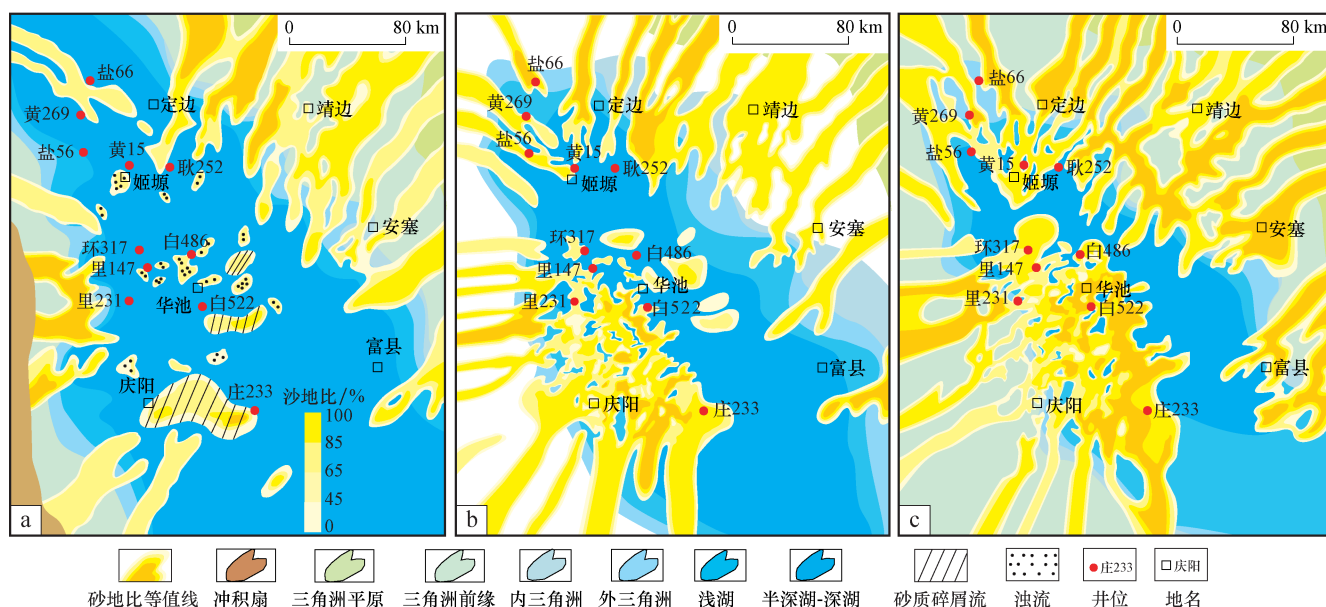


图2 鄂尔多斯盆地延长组7段沉积相和样品点分布

Fig. 2 Sedimentary facies and sample point distribution of the Chang 7 Member in the Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 长7³沉积相; b. 长7²沉积相; c. 长7¹沉积相

前三三角洲相;环317井的垂向剖面则反映了从长7³到长7²,由深湖相演化到深湖浊流相。针对盐66井和环317井两口连续取心井,建立了以岩心-薄片观察、X-衍射、地球化学测试和有机碳测井定量计算为主的垂向剖面,旨在揭示长7段泥岩和页岩的垂向分布规律与沉积相带的关系,以推测泥岩和页岩平面分布特征。

同时对湖盆中心的11口长7段连续取心井进行观察取样(图2)。本次研究分别采集了覆盖全盆的长7³到长7¹的62块泥质岩样品(图2),对其进行了薄片鉴定和X-衍射全岩矿物分析,在显微镜下确定岩性后(肉眼难以区分),分别进行岩石热解和微量元素等分析。

2 长7段泥岩、页岩沉积特征对比

2.1 垂向演化特征

盐66井位于研究区西北部定边地区,连续取心长度达75 m,取心层位包括长8段顶部与长7段(图3)。长7³底部沉积了一套高伽马、高电阻率、有机质含量极高(平均含量为10%)的黑色页岩。长7³过渡到长7²时,西北部三角洲生长,该地区处于前三三角洲一半深湖相带,以灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和粉砂岩页岩互层为主,该相带形成的泥岩有机碳含量明显较低,一般小于2%(图3)。长7²中上段,沉积环境

变的相对安静,沉积了一套10 m左右的有机质含量较高的页岩;长7²过渡至长7¹,水体变浅,沉积了一套30 m左右的灰黑色块状泥岩,总体解释为半深湖环境。

环317井位于研究区中部环县地区,连续取心长度达55 m,取心层位包括长7³和长7²(图4)。长7³底部沉积了一套有机质含量平均值大于10%的页岩(图4),在薄片下观察,主要为透镜体层理页岩,即有机质-粘土透镜体定向分布(图4)。长7³上部受外来浊流影响,以泥岩沉积为主、夹薄层粉砂岩或泥质粉砂岩;长7²以块状泥岩沉积为主。长7³底部页岩的黄铁矿含量较高,可达12%,而长7²泥岩黄铁矿含量相对较低,部分层段含量最高可达5%(图4)。另外,泥岩的石英含量高于页岩,粘土矿物含量则相对偏低。

通过典型剖面分析可以看出,泥岩和页岩的沉积受沉积相带控制,长7段页岩主要发育在长7³底部,主要发育于湖盆中心。而长7段泥岩多发育在三角洲前缘,深湖-浊积岩相和半深湖相。

2.2 岩石组分特征

2.2.1 组构特征对比

长7段泥岩中比较常见的层理构造有递变层理(图5a)、块状层理(图5b)、断续状层理(图5c)以及波浪扰动层理(图5d);页岩中常见的层理有长英-粘土

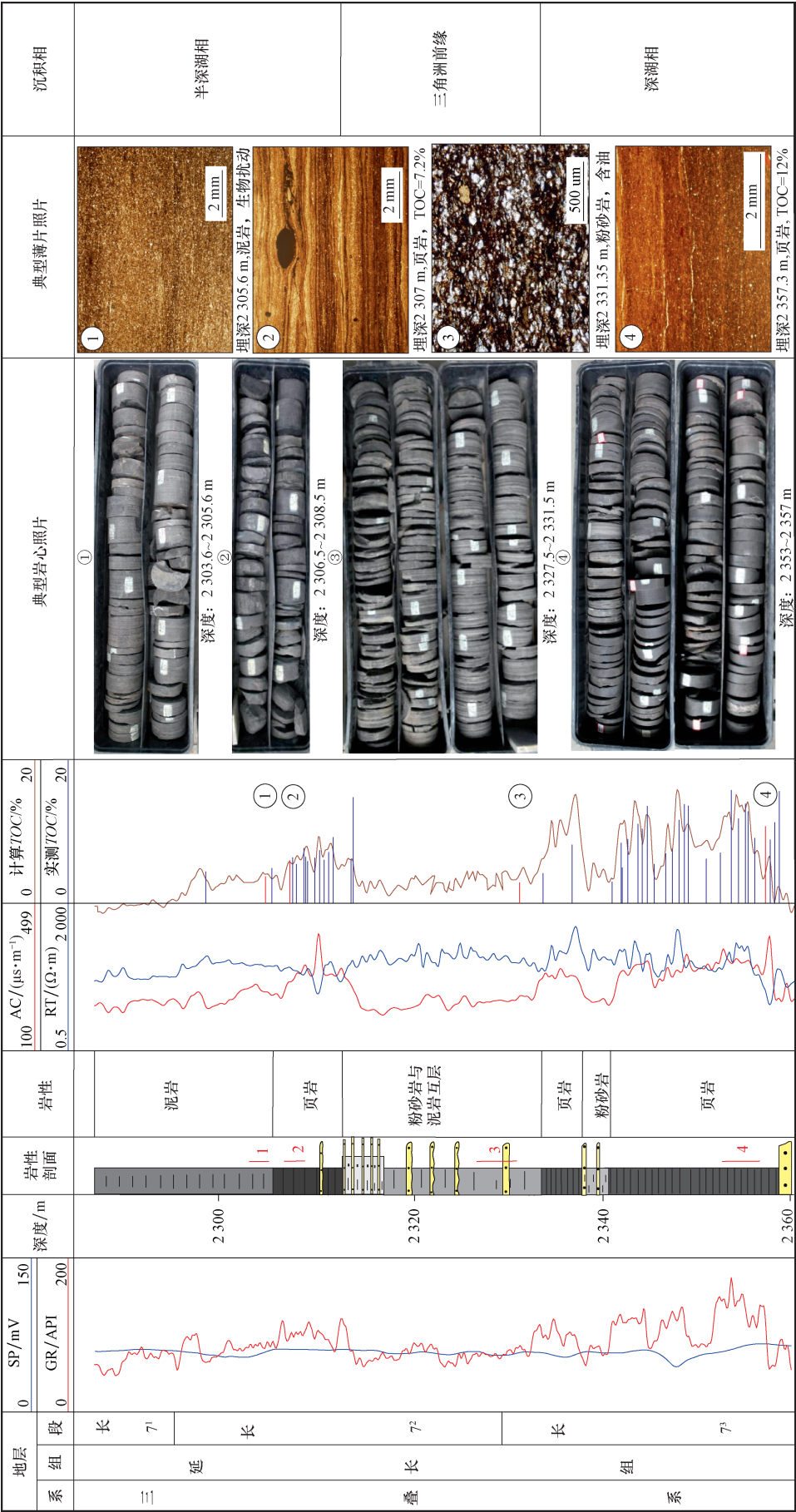


图3 鄂尔多斯盆地盐66井延长组7段组特征综合分析
Fig. 3 Comprehensive analysis of Well Yan 66, Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

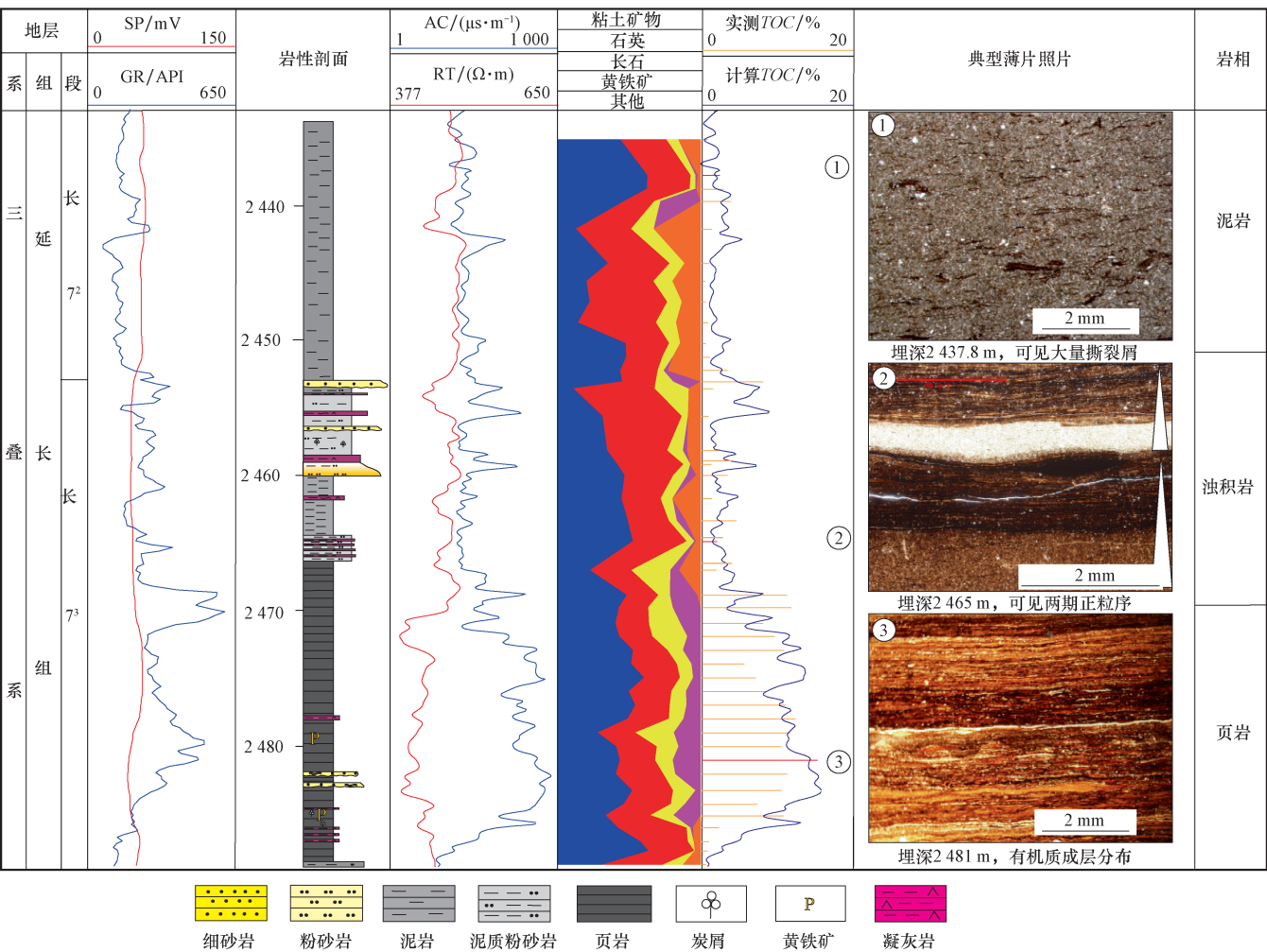


图 4 鄂尔多斯盆地环 317 井延长组 7 段组特征综合分析
Fig. 4 Comprehensive analysis of the fabric feature of the Chang 7 Member from Well Huan 317, Yanchang Formation, Ordos Basin

与有机质互层的“二元结构”(图 5e)、似波状层理(图 5f)和透镜状粘土集合体层理(图 5g,h)。

通过泥岩、页岩组构特征对比,可以看出,泥岩多发育于前三角洲、半深湖和深湖-重力流发育相带,陆源碎屑多,受湖流、浊流等影响更大。前三角洲环境形成的泥岩,受三角洲物源和水动力影响,泥岩中粉砂质含量较高,有机质被生物分解。在深湖-重力流发育的泥岩,浊流的快速沉积会有助于有机质的快速埋藏。页岩主要形成于相对封闭的深湖或湖湾环境,陆源碎屑物质供给不足,沉积速率低,底栖生物不发育,水体分层、季节性的水体循环是其“长英-有机质”纹层形成的主要原因。长 7³页岩中透镜状有机质-粘土复合体(藻类雪)的出现,反映当时湖盆极高的生产力。

2.2.2 岩石成分特征

长 7 段泥岩和页岩的岩石组分以粘土矿物和石英

为主(图 6),且两种组分含量相差不大,占泥岩中总含量的 82.5%,占页岩总含量的 82.7%;其次为长石、碳酸盐岩以及含铁化合物等(图 6)。泥岩中菱铁矿、白云石含量显著高于页岩,而页岩中黄铁矿含量约为泥岩的 11 倍(图 6)。

2.3 有机地球化学特征

长 7 段泥岩和页岩的 S_1 指数与 TOC 含量正相关(图 7a)。长 7 泥岩 TOC 含量主要分布于 0.6%~4.5%,平均含量为 2.1%, S_1 值分布于 0.2~3.2mg/g,平均含量为 1.2 mg/g(图 7a);长 7 页岩 TOC 含量分布于 4.2%~17.9%,平均含量为 6.6%, S_1 值主要分布于 1.9~6.3 mg/g,平均含量为 3.1mg/g。页岩中氢指数(HI)含量相对较高(平均为 287×10^{-3} mg/g),有机质类型为 I-II₁型(图 7b);泥岩中氢指数(HI)含量相对较低(平均为 171×10^{-3} mg/g),有机质类型为 II₁-II₂型(图 7b)。

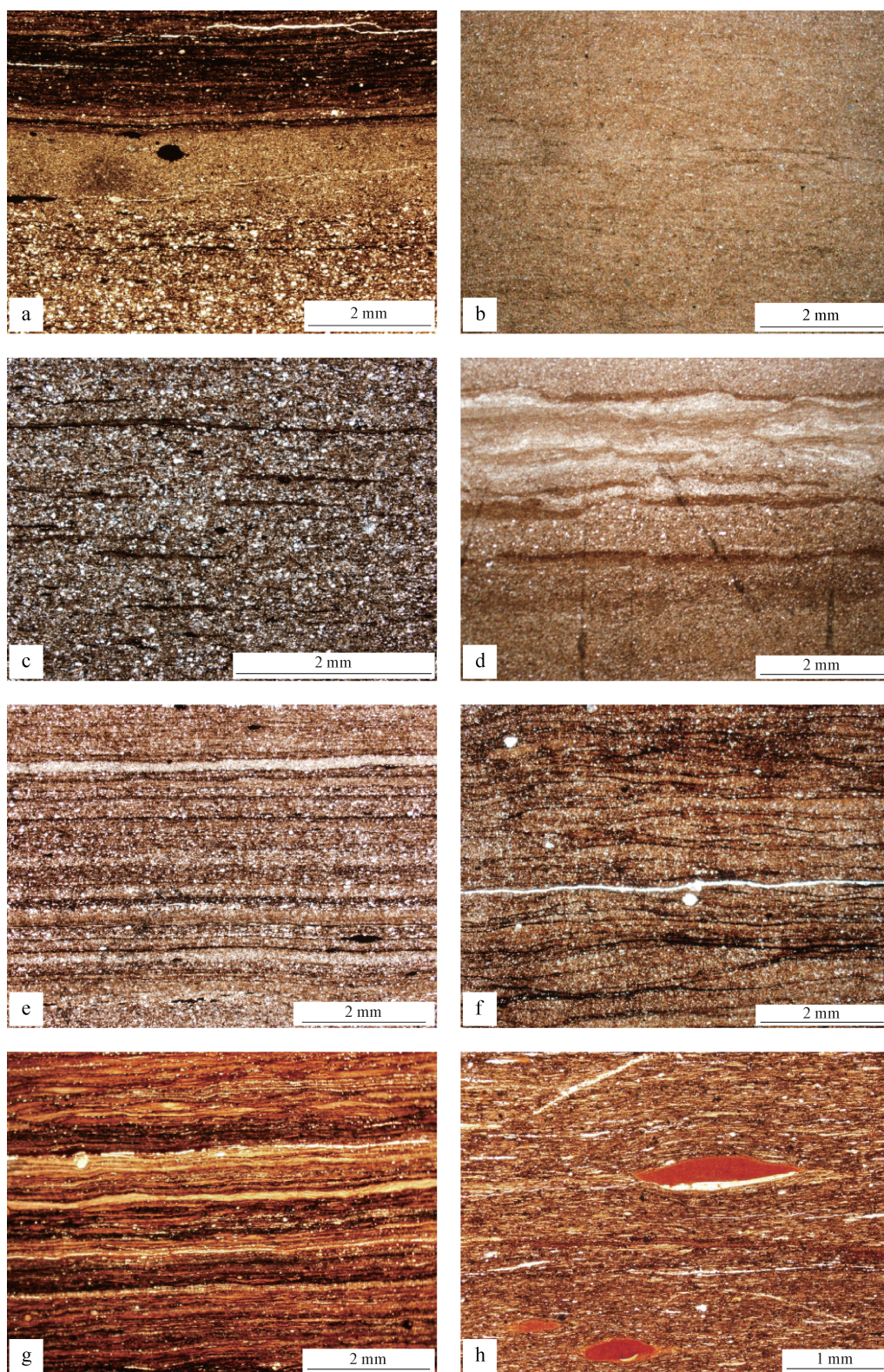


图5 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩和页岩结构特征

Fig. 5 Fabrics of mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 庄 233 井, 埋深 1 961 m, 泥岩, 递变层理, 向上粒度变细 (浊积岩特征), $TOC = 2\%$, 单偏光; b. 黄 269 井, 埋深 2 513 m, 泥岩, 块状层理, $TOC = 1\%$, 单偏光; c. 环 317 井, 埋深 2 431.8 m, 泥岩, 断续状层理, $TOC = 3\%$, 单偏光; d. 罗 91 井, 埋深 2 475 m, 泥岩, $TOC = 0.26\%$, 单偏光; e. 里 231 井, 埋深 2 057.4 m, 页岩, 长英-粘土有机质的二元结构, $TOC = 8.6\%$, 单偏光; f. 里 147 井, 埋深 2 368 m, 似波状层理, 有机质不连续分布, $TOC = 6.5\%$, 单偏光; g. 正 70 井, 埋深 1 959 m, 页岩, 透镜状粘土集合体层理, $TOC = 16\%$, 单偏光; h. 黄 15 井, 埋深 2 494.2 m, 透镜状粘土集合体层理, $TOC = 11\%$, 单偏光

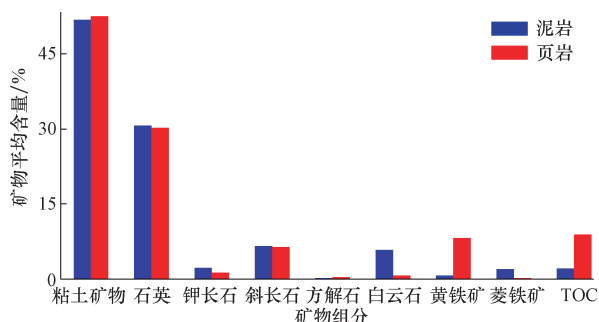


图6 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩、页岩矿物组分平均含量百分比对比(样品数 $n=62$)

Fig. 6 Comparison of the average content of constituent minerals between mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin (Sample $n=62$)

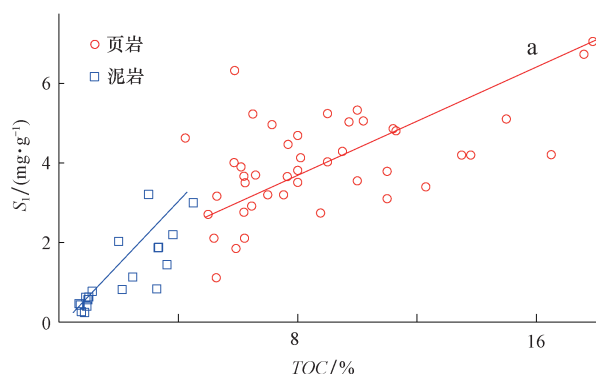
2.4 主、微量元素特征

2.4.1 主要元素特征

泥岩中 Si, Mg, Ti, K 等元素含量比页岩高, 页岩中 P 和 S 元素含量比泥岩高。泥岩中 K/Al 和 Ti/Al 的值明显大于页岩(图 8b) (Ti/Al 是用来判别碎屑颗粒大小的指标, Ti/Al 值越高, 表示粗粒物质相对更多)。K/Al 值高, 与钾长石含在泥岩中高于页岩一致。页岩中 P/Al 比泥岩高几倍到几十倍(图 8b), 说明页岩沉积时湖泊生产力比泥岩沉积时高。泥岩中 Mg 和 Ca 与 Al 元素呈现出负相关的趋势(图 8c, d), 表明方解石和白云石离物源较近。页岩中 Mg 与 Al 呈现正相关, 可能与绿泥石含量随着粘土矿物含量增加有关(图 8d)。

2.4.2 微量元素特征对比

页岩比泥岩更为富集 Cu, Mo, U, Sr 和 Cd 等元素



(图 9)。Mo 和 U 与 TOC 正相关(图 9a, b), 表明微量元素富集与有机质保存有关。Cu, Mo, U, Sr 和 Cd 等微量元素在页岩中的富集, 指示了页岩沉积时更为缺氧。U/Th, V/Cr 和 V/Sc 等常被用来辨识泥质岩的沉积环境^[29-30]。页岩的 U/Th 值比泥岩高(图 9c), 且 U/Th 与 TOC 呈正相关(图 9d), 说明缺氧环境有助于有机质保存。

2.5 泥岩、页岩差异特征对比总结

综上所述, 长 7 段泥岩和页岩在以下 5 个方面存在差异(表 1): 分布特征: 泥岩和页岩互补式分布, 泥岩主要发育在三角洲前缘、深湖-浊流相、半深湖相, 页岩主要发育在深湖相, 湖盆中心; 有机地球化学特征: 页岩 TOC 平均含量为 6.6%, 是泥岩的 3 倍, S_1 值平均含量为 3.1 mg/g, 是泥岩的 2.5 倍; 岩石成份特征: 泥岩中白云石和菱铁矿含量更高, 页岩中更富集黄铁矿, 平均含量为泥岩的 11 倍; 组构特征: 泥岩无页理, 有机质分散分布, 页岩有页理, 有机质顺层分布; 主微量元素: 泥岩 Ti/Al 和 K/Al 平均值更高, 页岩中 U, Th, Cu, Mo, Sc, Co 和 Ni 等微量元素更为富集。因此, 我们可以得出页岩沉积时水体生产力更高, 更为缺氧且水动力条件弱。页岩中高 TOC, 高 S_1 , 脆性矿物含量高、有机质纹层微裂缝发育等特性, 使其成为更为有利的生油层。

3 结论

1) 泥岩和页岩在组构特征、分布特征、有机地化特征、岩石组分和主微量元素等 5 个方面存在很大差异。

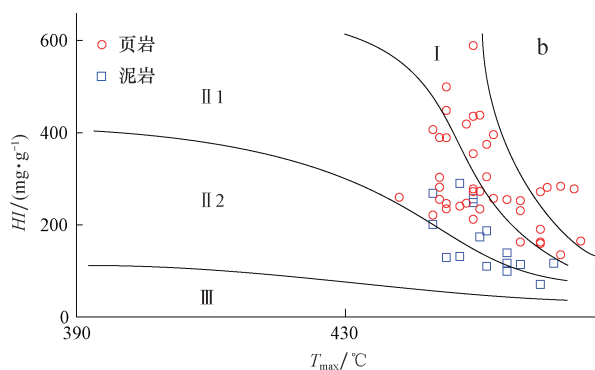


图7 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩、页岩地球化学特征对比

Fig. 7 Comparison of geochemical characteristics between mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. S_1 与 TOC 关系 ($n=62$); b. 有机质类型分布特征 ($n=62$)

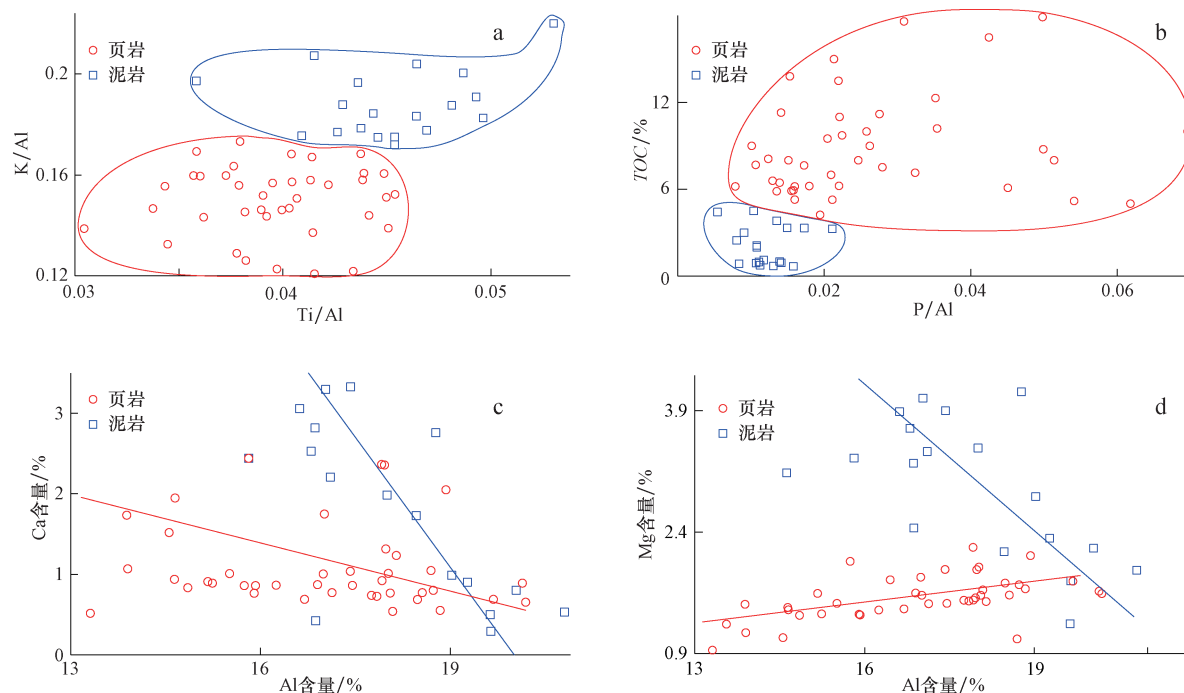


图8 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩、页岩主量元素特征对比

Fig. 8 Comparison of main elements in mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 长7段泥岩、页岩 K/Al 与 Ti/Al 关系 ($n=62$); b. 长7段泥岩、页岩 P/Al 与 TOC 散点图 ($n=62$); c. 长7段泥岩、页岩 Ca 与 Al 含量关系 ($n=62$); d. 长7段泥岩、页岩 Mg 与 Al 含量关系 ($n=62$)

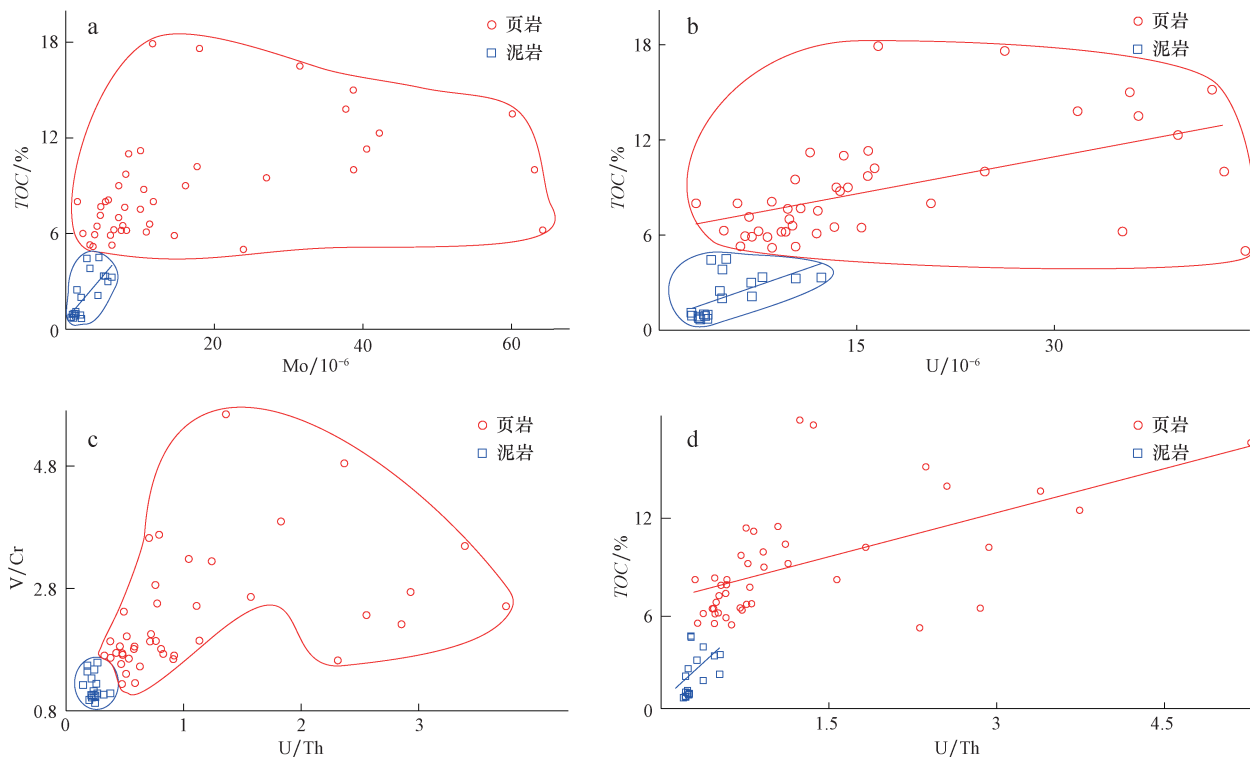


图9 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩、页岩微量元素特征对比

Fig. 9 Comparison of trace elements in mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 长7段泥岩、页岩 MO 含量 (10^{-6}) 与 TOC 关系 ($n=62$); b. 长7段泥岩、页岩 U 含量 (10^{-6}) 与 TOC 关系 ($n=62$); c. 长7段泥岩、页岩 U/Th 与 V/Cr 散点图; d. 长7段泥岩、页岩 U/Th 与 TOC 关系

表1 鄂尔多斯盆地延长组7段泥岩与页岩特征差异总结

Table 1 Characteristic differences of mudstone and shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin

特征	泥岩	页岩
分布特征	三角洲前缘、深湖-浊流相和半深湖相	深湖相,湖盆中心
有机地球化学	TOC:0.6%~4.5%,平均含量为2.1%;S ₁ 值:0.2~3.2 mg/g,平均含量为1.2 mg/g;有机质为Ⅱ ₁ -Ⅱ ₂ 型	TOC:4.2%~17.9%,平均含量为6.6%;S ₁ 值:1.9~6.3 mg/g,平均含量为3.1 mg/g;有机质为Ⅰ-Ⅱ ₁ 型
岩石成分	白云岩、菱铁矿含量更高	更富集黄铁矿
结构特征	无页理,有机质分散分布	有页理,有机质顺层分布
主、微量元素	Ti/Al和K/Al平均值更高	U,Th,Cu,Mo,Sc,Co和Ni等微量元素更为富集
成因	水体相对浅,有氧环境,水动力作用强	高生产力,缺氧环境,水动力弱
石油地质意义	主要可作为盖层	富含更多的页岩油气资源

2) 泥岩和页岩的发育受沉积相带主控。页岩多发育于深湖相,泥岩则发育于三角洲前缘、深湖-浊流相和半深湖相。

3) 富有机质页岩主要形成于高水体生产力的环境,且水体一般缺氧。长7³时水体深度最高,湖泊生产力大,且水体极度缺氧,导致了大面积富有机质页岩的形成。

4) 泥质岩层段的非均质性强,页岩的高TOC,高S₁,脆性矿物含量高、有机质纹层微裂缝发育等特性,使其成为更为有利的生油层,而泥岩则主要可作盖层。

参 考 文 献

[1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型,特征,机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.

Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.

[2] 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, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics, and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Explanation and Development, 2013, 40(1): 14-26.

[3] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.

Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.

[4] 卢双舫,陈国辉,王民,等. 辽河拗陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油富集资源潜力评价[J]. 石油与天然气地质,2016,37(1):8-14.

Lu Shuangfang, Chen Guohui, Wang Min, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaoh Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 8-14.

[5] 龙胜祥,曹艳,朱杰,等. 中国页岩气发展前景及相关问题初探[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):847-853.

Long Shengxiang, Cao Yan, Zhu Jie. A preliminary study on prospects for shale gas industry in China and relevant issues[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 847-853.

[6] Macquaker, Joe HS, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: an inclusive nomenclature for mudstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 735-744.

[7] 孟志勇. 四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段纵向非均质性及其发育主控因素[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):838-846.

Meng Zhiyong. Vertical heterogeneity and its controlling factors of the gas shale in the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 838-846.

[8] 彭丽,陆永潮,彭鹏,等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙三下亚段页岩非均质性特征及演化模式—以罗69井为例[J]. 石油与天然气地质,2017,38(2):219-229.

Peng Li, Lu Yongchao, Peng Peng, et al. Heterogeneity and evolution model of the Lower Shahejie Member 3 mud-shale in the Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin: An example from Well Luo 69[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 219-229.

[9] 林森虎,袁选俊,杨智. 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[J]. 石油与天然气地质,2017,38(3):517-523.

Lin Senhu, Yuan Xuanjun, Yang Zhi. Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7th Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 517-523.

[10] 魏琳,许文国,杨仓,等. 页岩层序划分的界面沉积标志及地球化学指示[J]. 石油与天然气地质,2017,38(3):524-533.

Wei Lin, Xu Wenguo, Yang Cang, et al. Sedimentary boundary mar-

- kers and geochemical indexes of shale sequence stratigraphy[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 524–533.
- [11] Calvert S E, Bustin R M, Ingall E D. Influence of water column anoxia and sediment supply on the burial and preservation of organic carbon in marine shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(9): 1577–1593.
- [12] Tyson R V. The ‘productivity versus preservation’ controversy: cause, flaws, and resolution, in Harris, N. B., ed., *The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences* [J]: SEPM, Special Publication 2005, 82, 17–33.
- [13] Sageman, Bradley B. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin[J]. *Chemical Geology* 1951(2003): 229–273.
- [14] Rimmer, Susan M. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 215(1): 125–154.
- [15] Murphy, Adam E, Bradley B et al. Eutrophication by decoupling of the marine biogeochemical cycles of C, N, and P: a mechanism for the Late Devonian mass extinction[J]. *Geology*, 2000, 28(5): 427–430.
- [16] Murphy, Adam E. Black shale deposition and faunal overturn in the Devonian Appalachian Basin: Clastic starvation, seasonal water-column mixing, and efficient biolimiting nutrient recycling[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(3): 280–291.
- [17] Macquaker, Joe HS, Margaret A, et al. Algal blooms and ‘marine snow’: mechanisms that enhance preservation of organic carbon in ancient fine-grained sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 934–942.
- [18] Powell, Wayne G, Paul A. et al. Geochemical evidence for oxygenated bottom waters during deposition of fossiliferous strata of the Burgess Shale Formation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 201(3): 249–268.
- [19] 李浩, 陆建林, 左宗鑫, 等. 长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 209–218.
- Li Hao, Lu Jianlin, Zuo Zongxin, et al. Controlling factors of high-quality lacustrine hydrocarbon source rocks in southern Changling Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 209–218.
- [20] 王鹏万, 张磊, 李昌, 等. 黑色页岩氧化还原条件与有机质富集机制—以昭通页岩气示范区 A 井五峰组—龙马溪组下段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 933–943.
- Wang Pengwan, Zhang Lei, Li Chang, et al. Redox conditions and organic enrichment mechanisms of black shale: A case from the Wufeng-lower Longmaxi Formations in Well A in Zhaotong shale gas demonstration area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 933–943.
- [21] 唐文斌, 徐胜林, 陈洪德, 等. 吐哈盆地台北凹陷中部地区喀拉扎组一段震积岩的发现及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 345–354.
- Tang Wenbin, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. Discovery of seismites in the first member of the Kelaza Formation in central Taibei Sag of Tuha Basin and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 345–354.
- [22] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. Productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(4): 454–466.
- [23] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG*, 1980, 64(8): 1179–1209.
- [24] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1016–1025.
- Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its depositional environment[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1016–1025.
- [25] 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: 4–65.
- Yang Hua, Tian Jingchun, Wang Feng. Lake boundary bottom feature, and accidental sedimentology of Yanchang Formation, Triassic system in Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 4–65.
- [26] 邓秀芹, 蔺昉晓, 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]. *古地理学报*, 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.
- [27] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式—以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34–42.
- Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34–42.
- [28] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩岩石学、元素地球化学特征及发育环境. [J]. *地质化学*, 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.
- [29] Wignall, Paul B. Black shales [M]. USA: Oxford University Press, 1994: 30.
- [30] Rimmer, Susan M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, central Appalachian Basin (USA) [J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3): 373–39