李晓龙,白玉彬,闫新智,等.坳陷湖盆细粒沉积特征:以鄂尔多斯盆地甘泉地区长7段为例.吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4):1144-1161. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250054.
Li Xiaolong, Bai Yubin, Yan Xinzhi, et al. Fine-Grained Sedimentary Characteristics of Depression Lake Basin: Taking Chang 7 Member in Ganquan Area of Ordos Basin as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026, 56(4):1144-1161. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250054.

坳陷湖盆细粒沉积特征
——以鄂尔多斯盆地甘泉地区长7段为例

李晓龙[1,2],白玉彬[1,2],闫新智[3],赵靖舟[1,2],王聪娥[4],张 鑫[4]
1.西安石油大学地球科学与工程学院,西安 710065
2.西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室,西安 710065
3.延长油田股份有限公司,陕西 延安 716000
4.延长油田股份有限公司下寺湾采油厂,陕西 延安 716100

摘要:坳陷湖盆细粒沉积岩已经成为油气勘探的重要领域,开展细粒沉积岩相学及沉积微相研究可为勘探选区提供理论及实践依据。本研究以鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组长7段为例,通过岩心观察,结合测井曲线、粒度分析和试油试采等资料,明确了长7段岩相、沉积相类型及特征,预测了沉积相展布规律并探讨了其对油藏分布的控制作用。研究表明:研究区长7段发育块状层理、平行层理、滑塌变形、球枕构造、泄水构造和火焰状构造等沉积构造;长7_1、7_2亚段植物化石富集,长7_3未见;粒度概率曲线表现为单段悬浮、两段递变和宽缓上拱3种类型;长7段为半深湖—深湖及三角洲前缘沉积环境。根据岩性和沉积构造共划分出10种岩相类型和4种岩相组合模式,其中以块状层理细砂岩相、流水波纹层理细砂岩相、浪成交错层理粉砂岩相、变形层理泥质粉砂岩相、韵律层理粉砂质泥岩相和块状泥岩相等6种岩相为主。识别出水下分流河道、分流间湾、半深湖—深湖泥、浊流、砂质碎屑流和滑动—滑塌6种沉积微相。水下分流河道砂体、浊流砂体和砂质碎屑流砂体均可作为优质储集体,而水下分流河道砂体是研究区的主力产层。

关键词:细粒沉积岩;沉积特征;相标志;沉积相;岩相;长7段;油藏分布;鄂尔多斯盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250054 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Fine-Grained Sedimentary Characteristics of Depression Lake Basin: Taking Chang 7 Member in Ganquan Area of Ordos Basin as an Example

Li Xiaolong[1,2], Bai Yubin[1,2], Yan Xinzhi[3], Zhao Jingzhou[1,2], Wang Cong'e[4], Zhang Xin[4]

收稿日期:2025-03-06
作者简介:李晓龙(2000—),男,硕士研究生,主要从事致密油、致密储层等方面的研究,E-mail:1326030435@qq.com
通信作者:白玉彬(1981—),男,副教授,硕士生导师,主要从事致密油(页岩油)成藏机理与富集规律、储层致密史与成藏史耦合关系及机理等方面的研究,E-mail:baiyubin@xsyu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(42372155);陕西省自然科学基础研究计划项目(2025JC-YBQN-437);陕西省教育厅专项科研计划项目(24JK0603)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (42372155), the Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (2025JC-YBQN-437) and the Special Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education (24JK0603)

1. *School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an* 710065, *China*
2. *Shaanxi Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an* 710065, *China*
3. *Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an* 716000, *Shaanxi, China*
4. *Xiasiwan Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an* 716100, *Shaanxi, China*

Abstract: Fine-grained sedimentary rocks have become an important field of oil and gas exploration in the depression lake basin. The study of fine-grained sedimentary petrography and sedimentary microfacies can provide a theoretical and practical basis for exploration and target selection. Taking the Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ganquan area of Ordos basin as an example, the types and characteristics of lithofacies and sedimentary facies of Chang 7 Member were clarified by core observation, logging curve, grain size analysis, and oil test and production test. The distribution law of sedimentary facies was predicted, and its control effect on reservoir distribution was discussed. The results show that the sedimentary structures such as massive bedding, horizontal bedding, slump deformation, ball pillow structure, water discharge structure, and flame structure are developed in the Chang 7 Member of the study area. Plant fossils are enriched in Chang 7_1 and 7_2 Submembers, but not found in Chang 7_3 Submember. The probability curve of grain size shows three types: Single-stage suspension, two-stage gradual change, and wide and gentle arching. It is comprehensively reflected that the sedimentary environment of Chang 7 Member is semi-deep lake-deep lake and delta front. According to lithology and sedimentary structure, 10 lithofacies types and 4 lithofacies combination modes are divided, and 6 lithofacies are mainly developed, such as massive bedding fine sandstone facies, flow cross bedding fine sandstone facies, wave cross bedding siltstone facies, deformed bedding argillaceous siltstone facies, rhythmic bedding silty mudstone facies, and massive mudstone facies. Six sedimentary microfacies are identified, including underwater distributary channel, interdistributary bay, semi-deep lake-deep lake mud, turbidity current, sandy debris flow, and slip-slump. Underwater distributary channel sand body, turbidite sand body and sandy debris flow sand body can act as high-quality reservoirs, and the underwater distributary channel sand body is the main production layer in the study area.

Key words: fine-grained sedimentary rocks; sedimentary characteristics; phase mark; sedimentary facies; lithofacies; Chang 7 Member; reservoir distribution; Ordos basin

0　引言

随着非常规油气勘探开发进程的推进，细粒沉积岩已经成为油气勘探及研究的重点对象[1-4]。细粒沉积岩指粒径小于 62.5 μm、颗粒体积分数大于 50%的沉积岩，由黏土矿物、粉砂和细砂等陆源碎屑颗粒组成[5-7]。中国陆相湖盆广泛发育细粒沉积岩，如鄂尔多斯盆地延长组[8-9]、渤海湾盆地沙河街组[10]、准噶尔盆地风城组[11]和松辽盆地青山口组[12]等。细粒沉积岩不仅作为烃源岩控制着油气资源的形成与分布，而且作为油气的储集载体与页岩油气、致密油气等非常规油气的发展密切相关[13-14]。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段为陆相坳陷型三角洲－湖泊沉积体系，其沉积特征复杂，整体为一套先变细再变粗的细粒沉积序列[15-16]。长 7 段作为主力生油层系，发育大规模的碎屑型细粒沉积岩，以富有机质泥页岩夹薄层细砂岩、粉砂质泥岩夹粉砂岩为主[17-18]。湖盆细粒沉积物主要来源于陆地、火山-热液或盆地化学-生物沉积作用，鄂尔多斯盆地作为典型的陆相坳陷湖盆，形成的细粒沉积矿物主要包括黏土矿物、石英、长石和黄铁矿等[19]。长 7 段岩相主要为细砂岩相、粉砂岩相、泥页岩相和凝灰岩相[20]。深水重力流是形成湖相细粒沉积物的重要方式之一[21-22]，而长 7 段细粒沉积的形成存在多种成因，包括正常三角洲形成的牵引流沉积，三角洲前缘滑塌引起的滑动－滑塌，半深湖—深湖环境形成的砂质碎屑流、浊流等多种重力流沉积方式[23-25]。

甘泉地区的致密油气勘探开发始于 2008 年，目

前长7段探明储量已达千万吨级,探明含油面积105.37 km^2,具有良好勘探前景。已有的研究表明,沉积微相是控制油藏分布的重要因素[26]。前人针对甘泉地区长7段的研究主要侧重于储层及含油性方面[27-30],对细粒沉积特征及展布规律的研究则较为薄弱。鉴于此,本次依托11口井共计130 m的厘米级精细岩心观测资料,结合300余口井的测井数据和粒度分析测试结果等,对研究区长7段岩相及沉积微相展布规律进行了细致刻画,旨在明确细粒沉积体系的发育规律,为甘泉地区长7段有利勘探区的井位部署提供可靠的地质依据。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国东部与西部构造带的接合部位,是一个中生界、新生界叠加在古生界之上的大型多旋回克拉通盆地,面积可达25×10^4 km^2。盆地整体按照基底性质、构造形态可分为6个一级构造单元(图1a)。延长组自上而下发育长1—长10等10个油层组,主要为内陆坳陷湖泊—三角洲沉积(图1b);长7沉积期湖泊为鼎盛发展阶段,长7段自上而下分为长7$_1$、长7$_2$和长7$_3$三个亚段[31]。鄂尔多斯盆地长7段沉积期,湖盆区内沉积了一套成因类型多样、分布范围广的细粒沉积岩,细粒沉积岩厚度所占比例介于60%~80%之间,湖盆中心比例可达90%以上[32]。

甘泉地区位于鄂尔多斯盆地东南地区,构造上位于伊陕斜坡东南部、晋西挠褶带西侧(图1a)。在地理上研究区西北、西南和北方向分别与志丹、富县和安塞地区接壤,整体呈自东向西下倾的单斜,局部发育低幅度构造,受渭北隆起与晋西挠褶带形成与演化的控制[33]。研究区总面积约为4 000 km^2,目前长7段探明含油面积仅为105.37 km^2。鄂尔多斯盆地已发现油藏的烃源岩主要为长4+5段—长9段暗色泥岩和黑色页岩,其中长7段主要发育黑色页岩,平均埋深1 400 m,是盆地中生界最主要的烃源岩[34]。

2 沉积相类型及特征

2.1 沉积相标志

2.1.1 岩石颜色

碎屑岩的颜色是推断沉积环境性质的重要线索之一[35]。岩心观察发现,研究区长7$_3$亚段岩石颜色普遍呈现为黑色、灰黑色(图2a、b),富含高纯度的泥质成分,且局部发育黄铁矿,这一特征指示长7$_3$

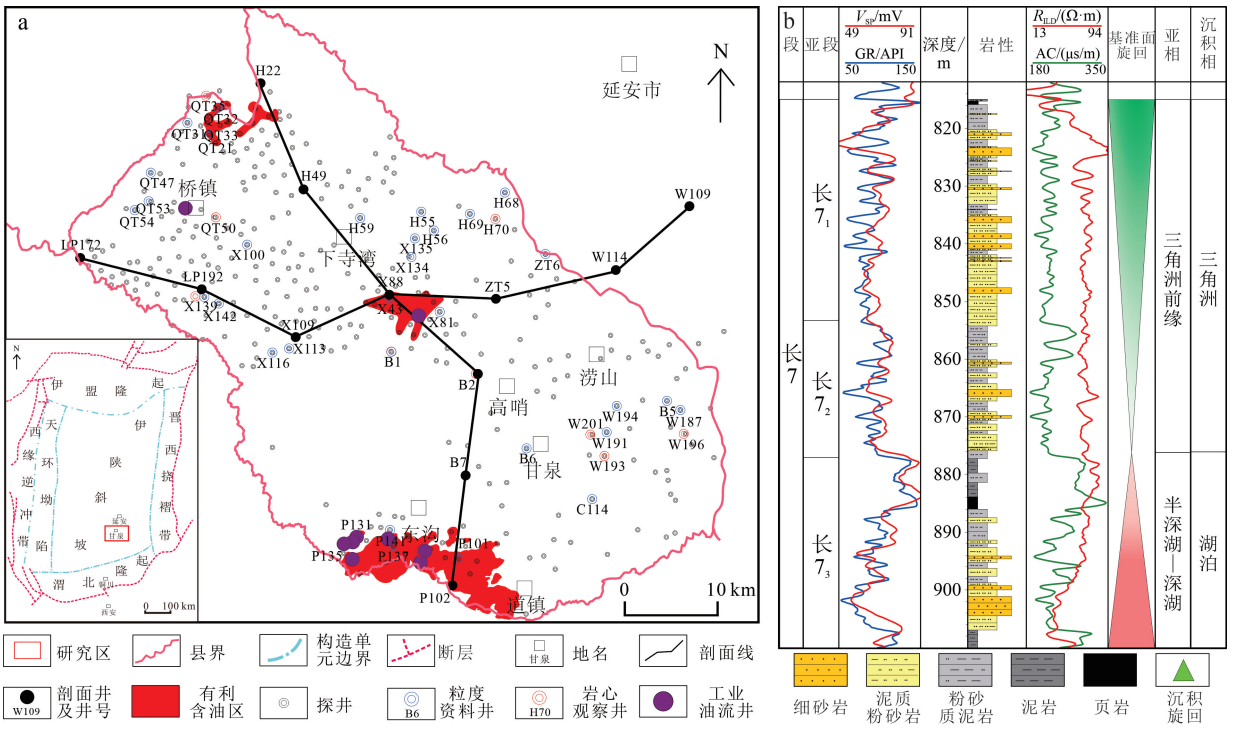


图1 研究区构造位置(a)及长7段地层综合柱状图(b)

Fig.1 Structural location (a) and comprehensive column of Chang 7 Member (b) in the study area

时期主要为还原环境，水体深度较大。长 7_2、长 7_1 亚段砂体以灰色、灰绿色为主（图 2c、d），反映沉积环境为弱氧化－弱还原[36]；岩石的颜色变化同时也是岩性的变化，砂质沉积物增加，可能是由于水体深度发生变化，该类沉积环境多为深湖线或湖岸线沉积区[37]。

2.1.2　沉积构造

沉积构造是沉积环境及沉积相的重要反映[38]。研究区长 7 段发育块状层理（图 3a—c）、平行层理（图 3d、e）、变形层理（图 3f—j）、包卷层理、火焰状构造和泄水构造（图 3k—m）等。其中，块状层理、泥包砾（图 3n）和泥岩撕裂屑（图 3o）等构造则表示该时期发育砂质碎屑流[39-40]。

此外，滑塌变形构造是在沉积环境不稳定的情况下，块体因重力作用沿着平面发生连续的位移，主要发育在研究区长 7_1 和长 7_2 亚段，其岩性包括细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩，表现为砂泥岩混杂，泥岩被砂岩侵入，纹层弯曲变形（图 3h）。在斜坡稳定性丧失的条件下，泥质沉积物会沿着斜坡表面向下滑移，在沉积物饱含水分且保持其塑性和层间黏结特性的状态下，经历滑动、翻滚和包卷等多种形式的复杂变形，是三角洲沉积向重力流转化的开始[21,23]。重荷模、火焰状构造等变形构造反映当时沉积环境为快速沉积，表现为浊流的沉积物。

2.1.3　生物标志

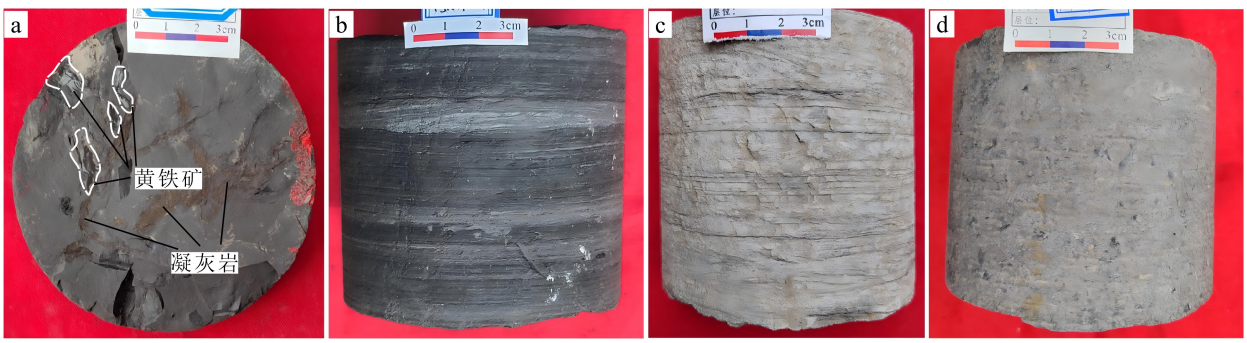
岩心观察发现长 7 段发育大量虫孔（图 4a）及植物化石（图 4b）、介壳化石（图 4c）、碳化植物碎屑（图 4d）、植物茎秆化石（图 4e）和植物碳屑（图 4f）等，多见于富含泥质的沉积物中。长 7_1 和长 7_2 亚段的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩中植物叶片化石较为多见，反映当时为浅水沉积环境且水动力条件相对稳定。大量虫孔及植物化石反映生物活动强烈，表明研究区该时期处于三角洲前缘沉积环境。

2.1.4　粒度分析

粒度分析表明，研究区长 7 段以细砂岩为主，其次为粉砂岩。基于 164 块样品的砂岩粒度概率累积曲线特征，研究区曲线可划分为单段悬浮（图 5a）、两段递变（图 5b、c）和宽缓上拱（图 5d）三种类型，可反映研究区长 7 段重力流和牵引流共同发育的沉积特征。两段式概率累积曲线（图 5b、c）较为常见，由跳跃总体和悬浮组成，表现为三角洲的牵引流沉积及牵引流向重力流的过渡型沉积[41]，其跳跃总体相对比较发育，其体积分数可达 50%～75%，表明分选较好，悬浮组分相对较少，不含滚动组分，跳跃总体之间的交截点的变化区间在 2～4Φ 内，斜率为 45°～65°（图 5b、c）。宽缓上拱型跳跃和悬浮总体发育，无明显拐点，斜率逐渐变缓，反映沉积物粒度由粗变细、大小混杂的特点。长 7 段 $C-M$ 图总体分布在 QR 段和 RS 段（图 5e），且样品点基本平行于 $C=M$ 基线，浊流沉积明显发育，表现出递变悬浮、快速沉积的特点，属于粒序悬浮区，C 值平均为 174.9 μm，M 值平均为 93.4 μm，C/M 值为1.87，具有缓坡滑塌型浊积岩特征。陡坡滑塌型浊积岩 C、M 值较大[42]。

2.2　沉积相类型及特征

研究区长 7 段发育三角洲前缘和半深湖—深湖 2 种亚相，识别出 6 种类型沉积微相，包括水下分流河道沉积、分流间湾沉积、砂质碎屑流沉积、浊流沉



a. W193 井，长 7_3 亚段，883.31～883.35 m，黑色块状泥岩，见棕色凝灰岩和星点状黄铁矿；b. QT33 井，长 7_3 亚段，1 510.73～1 510.80 m，灰黑色泥岩，水平层理；c. X135，长 7_2 亚段，1 232.80～1 232.92 m，灰色细砂岩，平行层理；d. QT50 井，长 7_1 亚段，1 287.18～1 287.31 m，灰绿色细砂岩，波状层理。

图 2　鄂尔多斯盆地甘泉地区长 7 段岩心颜色特征

Fig.2　Core color characteristics of Chang 7 Member in Ganquan area, Ordos basin



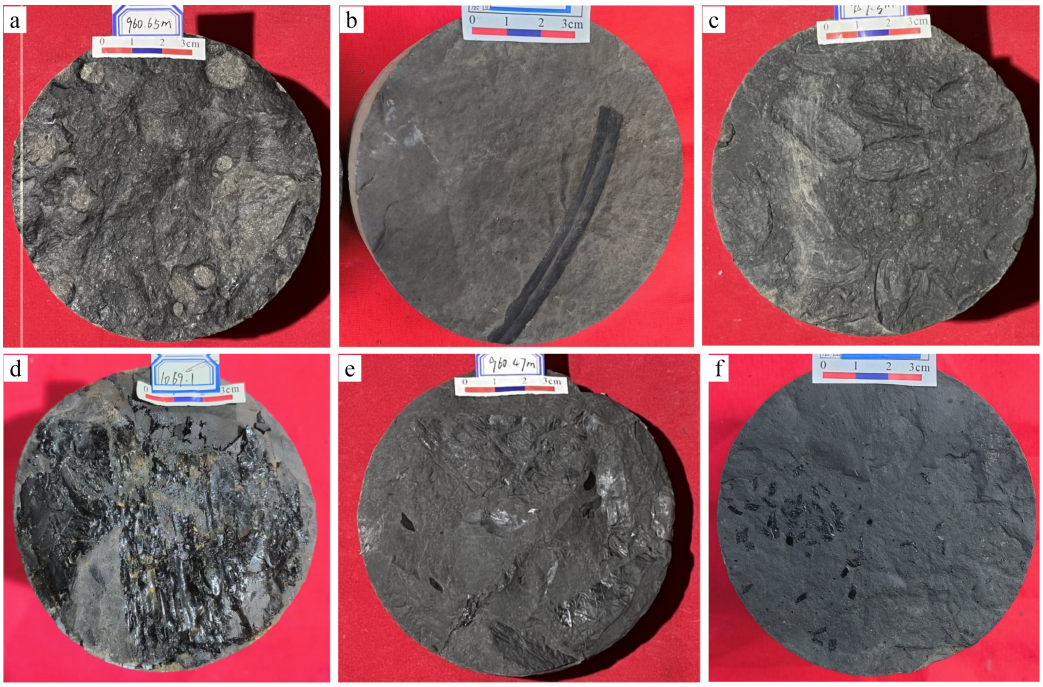
a. B2井,长7_1亚段,1 053.45～1 053.65 m,灰褐色细砂岩,块状层理;b. X139井,长7_1亚段,1 421.57～1 421.71 m,灰褐色细砂岩,块状层理;c. W201井,长7_1亚段,943.60～943.75 m,深灰色细砂岩,块状层理;d. H70井,长7_2亚段,1 200.10～1 200.18 m,深灰色细砂岩,平行层理;e. QT50井,长7_1亚段,1 284.90～1 284.95 m,灰褐色细砂岩,平行层理;f. W196井,长7_2亚段,1 071.50～1 071.58 m,灰色泥质粉砂岩,变形构造;g. X135井,长7_2亚段,1 233.80～1 233.95 m,灰色含泥粉砂岩,揉皱变形;h. QT50井,长7_1亚段,1 292.30～1 292.35 m,深灰色粉砂岩,滑塌变形;i. B1井,长7_1亚段,1 248.90～1 248.94 m,深灰色泥质粉砂岩,重荷模;j. B1井,长7_1亚段,1 255.50～1 255.57 m,深灰色粉细砂岩,球枕构造;k. X135井,长7_2亚段,1 237.33～1 237.41 m,灰褐色粉砂岩,包卷层理;l. W196井,长7_2亚段,1 068.01～1 068.09 m,灰色细砂岩,泄水构造;m. W196井,长7_2亚段,1 066.60～1 066.68 m,灰色细砂岩,火焰状构造;n. W201井,长7_3亚段,980.26～980.43 m,灰色细砂岩,泥包砾;o. QT35井,长7_1亚段,1 472.54～1 472.70 m,灰色细砂岩,泥岩撕裂屑。

图3 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7段沉积构造特征

Fig.3 Sedimentary structure characteristics of Chang 7 Member in Ganquan area, Ordos basin

积、滑动—滑塌沉积和半深湖—深湖沉积。

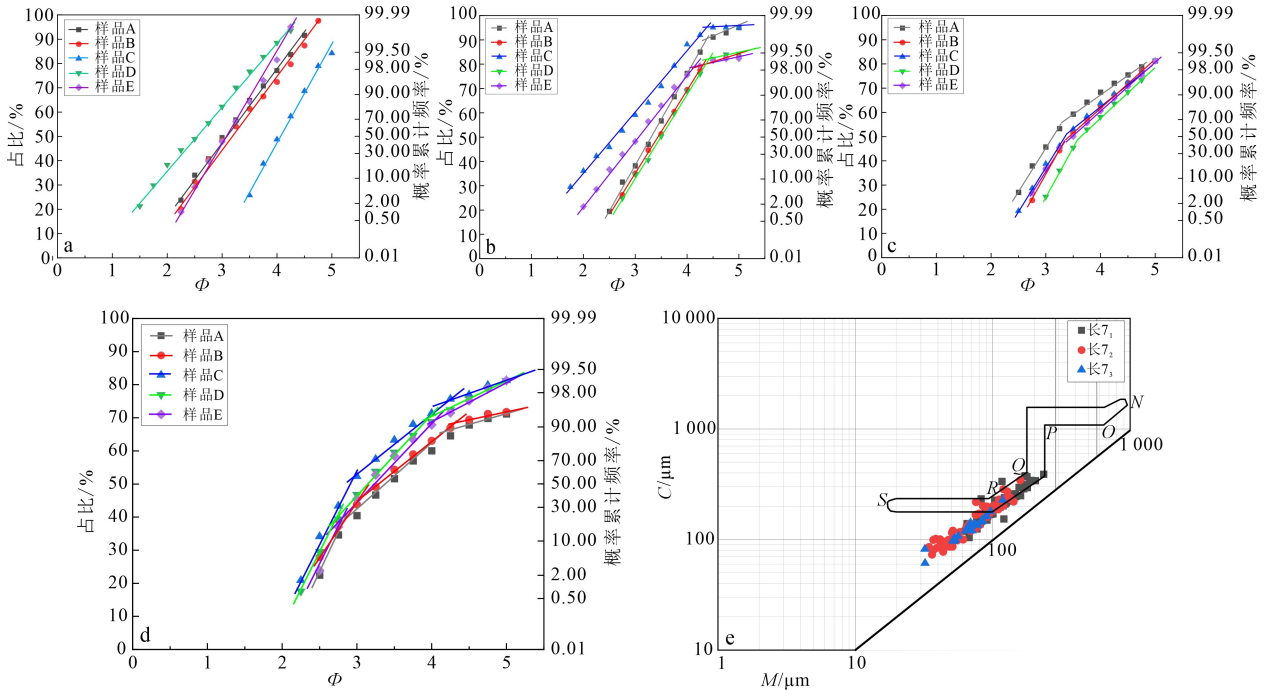
水下分流河道垂向上可多期叠加形成巨厚砂体。水下分流河道主要在长7_1和长7_2亚段较为发育,自然伽马值为60～90 API,自然电位曲线形态表现为向下收敛的锯齿状箱形(图6a)。分流间湾沉积由于分流现象带来的沉积物的运动和沉积过程不同,分流间湾的沉积物通常会形成明显的结构和层理,自然伽马值为80～120 API,自然电位曲线形态表现为钟形和齿形(图6b)。滑动—滑塌沉积典型特征在于砂泥的混杂共存,单层厚度从十余厘米至数米厚度,区域内分布广泛。内部富含软沉积物的变形构造,并且相对大规模的滑塌褶皱构造发育良好。岩性构成主要以细砂岩、粉砂岩为主,其间夹杂泥质沉积物,底部区域有微弱的剪切带痕迹,指示整体塑性块状搬运特征。自然伽马值为60～90 API,自然电位曲线形态表现为起伏的钟形(图6c)。砂质碎屑流沉积砂岩整体呈块状,沉积厚度大,单砂体厚度可达米级,局部含有泥砾,主要发育于半深湖－深湖区,可伴随滑动—滑塌沉积,自然伽马值为70～100 API,自然电位曲线形态表现为钟形和箱形(图6d)。浊流是一种具牛顿流变性质和紊乱状态的沉积物重力流,颗粒被湍流支撑且呈悬浮状态搬运和沉降,体现出流体的不稳定性[43-44]。浊流沉积在研究区非常发育,主要表现为砂泥频繁互层,自然伽马值为100～150 API,岩性变化大,自然电位曲线形态表现为齿化漏斗形(图6e)。半深湖—深



a. B7 井，长 7_1 亚段，960.65～960.71 m，深灰色粉砂质泥岩，虫孔发育；b. QT33 井，长 7_2 亚段，1 500.70～1 500.79 m，深灰色含粉砂泥岩，植物茎秆化石；c. B7 井，长 7_1 亚段，959.30～959.35 m，深灰色含粉砂泥岩，介壳化石富集；d. W196 井，长 7_2 亚段，1 069.10～1 069.24 m，深灰色粉砂质泥岩，碳化植物碎屑；e. B7 井，长 7_1 亚段，960.47～960.52 m，灰黑色粉砂质泥岩，植物茎秆化石定向排列；f. QT33 井，长 7_2 亚段，1 498.96～1 499.07 m，灰黑色粉砂质泥岩，植物碳屑。

图 4　鄂尔多斯盆地甘泉地区长 7 段生物化石特征

Fig.4　Biological fossil characteristics of Chang 7 Member in Ganquan area, Ordos basin



a. 一段悬浮式；b. 两段递变式；c. 两段递变式；d. 宽缓上拱型；e. 长 7 段 $C-M$ 图。

图 5　研究区长 7 段岩石概率粒度曲线特征和 $C-M$ 图解

Fig.5　Probabilistic grain size curve characteristics and $C-M$ diagram of Chang 7 Member rocks in the study area

湖沉积局部发育黄铁矿和凝灰质夹层,反映了该沉积时期处于还原环境。自然伽马值为120～150 API,自然电位曲线形态表现为钟形和漏斗形(图6f)。

3 岩相类型及特征

3.1 岩相类型划分及特征

岩相是在一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,包括岩石的成分、颜色、粒度和纹层结构等,是对沉积环境的系统表现,而且能够指示水动力条件变化及沉积物搬运方式[45-46]。研究区长7段主要发育细砂岩、粉砂岩、泥岩和凝灰岩4种岩石类型;根据长7段岩心观察的岩石类型、沉积构造特征,将长7段共划分出10种岩相类型(表1)。其中以块状层理细砂岩相、流水波纹层理细砂岩相、浪成交错层理粉砂岩相、变形层理泥质粉砂岩相、韵律层理粉砂质泥岩相和块状泥岩相等6种岩相为主。

1)块状层理细砂岩相:该岩石类型主要发育于三角洲前缘长7_1、长7_2亚段,颜色主要为灰色、灰褐色及灰绿色,厚度以中—厚层为主,发育块状层理,几乎不见其他沉积构造,砂岩成熟度较高。

2)平行层理细砂岩相:该岩石类型主要发育于三角洲前缘长7_1、长7_2亚段,颜色主要为浅灰色、灰色,厚度以中—厚层为主,发育平行层理,可见砂纹交错层理与其共生。

3)流水波纹层理细砂岩相:该岩石类型主要发育于三角洲前缘长7_1、长7_2亚段,颜色以浅灰色、灰色和灰褐色为主,厚度主要为中—薄层,发育砂纹交错层理、板状交错层理,发育不连续,中部见块状层理,纹层呈灰黑色与灰色相间,生物化石稀少,砂岩成熟度较高。

4)浪成交错层理粉砂岩相:该岩石类型主要发育于三角洲前缘长7_1、长7_2亚段,颜色主要为灰色、深灰色,局部含有钙质,厚度以中—薄层为主,浪成交错层理发育,局部可见透镜状层理。

5)变形层理泥质粉砂岩相:该岩石类型在长7段整个层段均有出现,颜色以深灰色、灰黑色为主,厚度以中—厚层为主。

6)水平层理泥质粉砂岩相:该岩石类型主要发育在浅湖—半深湖沉积区域,在长7段整个层段都有发育,颜色以深灰色、灰黑色为主,厚度中—厚层状,发育水平层理。

7)韵律层理粉砂质泥岩相:该岩石类型主要发育在半深湖—深湖沉积区域,发育层段主要为长7_2、长7_3亚段,颜色以灰色、深灰色为主,发育韵律层理、球枕构造,可见植物化石。

8)水平层理含粉砂泥岩相:该岩石类型主要发育在半深湖—深湖沉积区域,发育层段主要为长7_2、长7_3亚段,岩石颜色深灰色、灰黑色为主,发育水平层理,局部发育碳质结核,见植物化石、碳屑等。

9)块状泥岩相:该岩石类型主要发育在深湖沉积区域,发育层段为长7_3亚段,颜色以灰黑色、黑色为主,显示块状层理,局部发育黄铁矿,指示了沉积环境为还原性,可作为有利的生烃场所。

10)凝灰岩相:该岩石类型主要发育在深湖区域,在长7_3亚段局部可见,颜色为黄褐色,厚度呈现薄层状,2 mm左右,发育在泥岩夹层中,指示了长7_3时期有火山活动发生。

3.2 岩相组合及特征

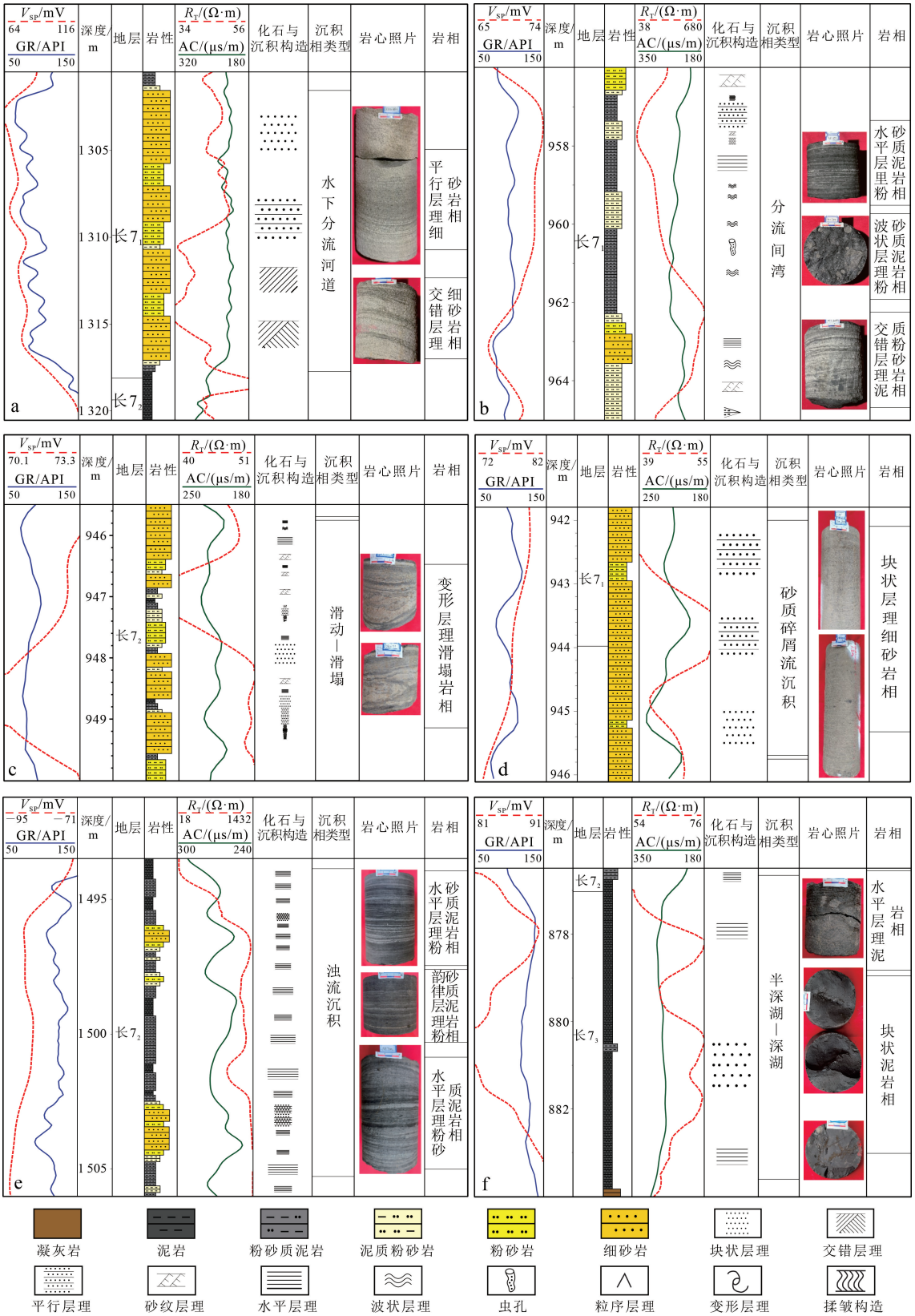
岩相组合是特定环境持续演变的结果,展现出多样化的形态,而每一种独特的岩相组合及其沉积序列,均可作为识别不同沉积微相的重要指示标志[47]。通过分析不同沉积环境作用下形成的岩相在垂直方向上的层叠排列与沉积特性,归纳出4种主要的岩相组合模式(图7)。

3.2.1 岩相组合1

该岩相组合的上部主要以小型交错层理与变形层理构成的粉砂岩为主,其间夹杂薄层块状泥岩;下部展现出软沉积物变形构造和相对较大规模的揉皱变形构造特征(图7a)。这些变形构造的规模和形态,不仅反映了浊流的强度和持续时间,还能帮助推测古地形坡度与物源供给情况。当浊流能量逐渐衰减,水动力条件由紊流转变为层流,上部的粉砂岩小型交错层理和波状层理开始发育,这与水下分流河道和分流间湾的沉积特征相契合。水下分流河道水动力较强,形成小型交错层理,代表相对稳定的单向水流;而分流间湾水动力较弱,波状层理的出现表明水流方向频繁变化且能量较低。这种从下到上由浊流沉积向上水下分流河道和分流间湾沉积的转变,暗示了沉积环境从高能的重力流环境逐渐过渡到相对低能的三角洲—湖泊环境。该组合典型特征是整体呈现砂泥岩的混合状态,单层厚度通常较为细小,一般不会超过10 cm。

3.2.2 岩相组合2

该岩相组合整体以变形层理粉砂岩、块状层理细砂岩为主,块状砂岩中可见漂浮泥砾,其间夹薄层



a. QT50 井，水下分流河道沉积；b. B7 井，分流间湾沉积；c. W201 井，滑动—滑塌沉积；d. W201 井，砂质碎屑流沉积；e. QT33 井，浊流沉积；f. W193 井，半深湖—深湖沉积。

图 6　甘泉地区长 7 段测井相特征

Fig.6　Logging facies characteristics of Chang 7 Member in Ganquan area

表1 甘泉地区长7段细粒沉积岩相类型划分

Table 1 Division of fine-grained sedimentary facies types of Chang 7 Member in Ganquan area

岩性	岩相类型	沉积特征	沉积环境	主要发育层位	岩心照片
细砂岩	块状层理细砂岩相	灰色、灰褐色为主,中—厚层,发育块状层理,不含其他沉积构造,质纯,局部含油	三角洲前缘,浅湖—半深湖	长 7_1、长 7_2亚段	
	平行层理细砂岩相	以浅灰色、灰色为主,中—厚层,发育平行层理,含油性较差	三角洲前缘	长 7_1、长 7_2亚段	
	流水波纹层理细砂岩相	浅灰色、灰色和灰褐色为主,中—薄层状,发育砂纹交错层理,发育不连续,中部见块状层理,纹层灰黑色与灰色相间	三角洲前缘	长 7_1、长 7_2亚段	
粉砂岩	浪成交错层理粉砂岩相	灰色、深灰色为主,中—薄层状,发育透镜状层理,部分含钙,底部见冲刷面,含油性差	三角洲前缘	长 7_1、长 7_2亚段	
	变形层理泥质粉砂岩相	深灰色、灰黑色为主,中—厚层状,发育包卷层理、生物扰动构造、小型褶皱	三角洲前缘-浅湖	均发育	
	水平层理泥质粉砂岩相	深灰色、灰黑色为主,中—厚层状,发育水平层理	浅湖—半深湖	均发育	
泥岩	韵律层理粉砂质泥岩相	灰色、深灰色为主,发育韵律层理、球枕构造,可见植物化石	半深湖—深湖	长 7_2、长 7_3亚段	
	水平层理含粉砂泥岩相	深灰色、灰黑色为主,发育水平层理,局部发育碳质结核,见植物化石、碳屑	半深湖—深湖	长 7_2、长 7_3亚段	
	块状泥岩相	灰黑色、黑色为主,块状层理,局部发育黄铁矿	深湖	长 7_3亚段	
凝灰岩	凝灰岩相	黄褐色,薄层状,厚度在2 mm左右,发育在泥岩夹层中	深湖	长 7_3亚段	

的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩(图 7b)。由于斜坡沉积物的破坏促使沉积物沿斜坡整体滑动，经历扭转作用后形成了滑塌变形沉积，伴随这些滑塌的沉积物向盆地内部迁移，在迁移过程中随着陆源碎屑含量的逐渐减少，其逐渐与水体融合，最终演化成砂质碎屑流和浊流沉积。漂浮泥砾与变形层理的存在，暗示沉积期湖盆边缘存在陡峭斜坡与活跃的物源供给，而砂质碎屑流与浊流沉积的发育，则指示深水区的沉积环境。此岩相组合反映了湖盆边缘的重力流沉积以滑动—滑塌和浊流为主的沉积特征，这种转变标志着流体性质从块体搬运向紊流悬浮搬运的演化，反映了重力流能量耗散与流体动力学机制的动态调整。

3.2.3　岩相组合 3

该岩相组合由粉砂岩和细砂岩组成，整体呈厚层块状，单层厚度可达 10 cm 以上，上部为水下分流河道的波状层理细砂岩，中间由高浓度的沉积物重力流中悬浮载荷快速沉积，形成以块状层理粉、细砂岩和高密度浊流沉积形成的平行层理细砂岩(图 7c)。该岩相组合完整记录了沉积环境从高能重力流(浊流、砂质碎屑流)到相对低能但较稳定水流(水下分流河道)的演变过程，反映了沉积区域在空间上从深水向浅水、水动力条件从强紊流到相对稳定水流的转换。这种复杂的沉积序列，对于后续重建区域古地理格局、解析沉积盆地的演化历史具有关键意义。

3.2.4　岩相组合 4

该岩相组合整体由泥岩组成，偶夹少量薄层粉砂质泥岩及凝灰岩，颜色以深灰—黑色为主，暗示沉积环境为还原环境，水体中溶解氧含量较低，有机质

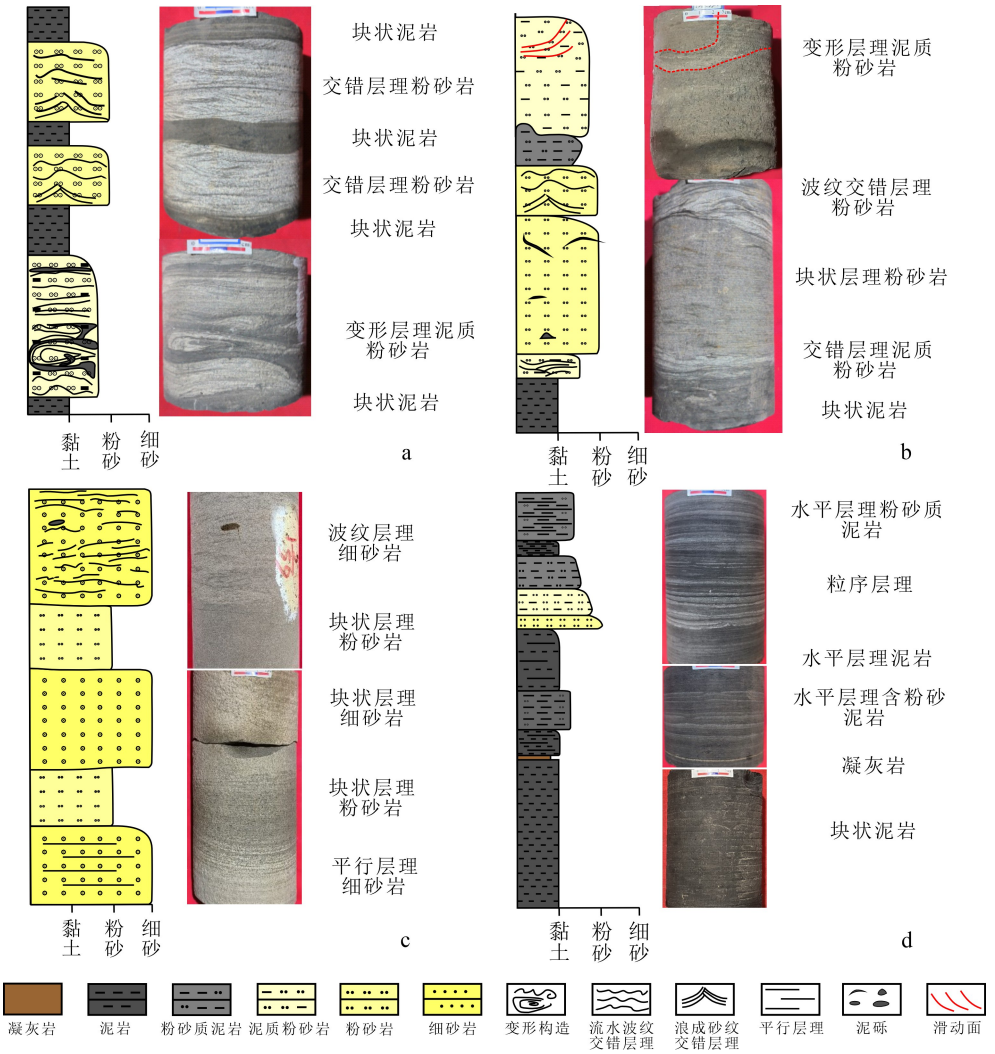


图 7　鄂尔多斯盆地甘泉地区长 7 段岩相垂向组合模式

Fig.7　Vertical lithofacies association model of Chang 7 Member in Ganquan area, Ordos basin

得以较好保存,泥岩厚度变化较大,从2 cm到数十厘米不等。上部分发育断续水平纹层,可见粒序层理,下部分具微弱水平层理和块状层理(图7d)。此岩相组合反映了从高能浊流事件沉积到低能半深湖—深湖泥连续沉积的过程,以及沉积区域在空间上靠近浊流物源区,且整体处于半深湖—深湖的深水沉积环境。

4 沉积相展布规律及其控油性

根据长7段岩心观察和粒度概率累积曲线特征,结合岩相类型及测井相分析结果,明确了三角洲前缘与半深湖—深湖沉积的界限,从剖面和平面上剖析其沉积微相分布特征。

4.1 剖面相特征

前人[48]研究表明,甘泉地区长7段沉积时物源主要来自北东方向。因此,选取顺物源(图8a)和垂直物源方向(图8b)研究沉积相剖面分布特征。研究区三角洲前缘沉积砂体展布方向为南西—北东向,向北东更为发育,单砂体厚度为0.2～5.5 m,平均厚度为1.7 m;重力流砂体展布方向呈北西—南东向,主要发育在湖盆边缘及向南西一侧,单砂体厚度为0.3～5.5 m,平均厚度为1.9 m。

顺物源的北东方向主要为三角洲前缘沉积,发育多期河道,砂体连续性较好,到深湖边缘坡折带开始出现滑动—滑塌沉积,滑塌岩砂体连续性较差,在垂向上相互叠置分布;向西南方向主要为砂质碎屑流和浊流微相沉积组合,浊流和砂质碎屑流砂体呈多期交替。湖盆中心砂体厚度从长7_1—长7_3亚段逐步递减,发育少量砂质碎屑流沉积(图8a)。这可能是由于远离物源区,沉积物在搬运过程中不断卸载,加之湖盆中心水动力条件较弱,难以携带和沉积大量砂质物质。

在垂直物源的剖面上,西北部受东北部物源影响主要发育三角洲沉积,中部发育重力流沉积,主要为滑动—滑塌沉积和砂质碎屑流沉积,东南部发育浊流沉积和砂质碎屑流沉积,浊流沉积连续性相对较好,而砂质碎屑流连续性差,多呈孤立状。在垂向上,长7_1、长7_2亚段主要发育三角洲沉积,说明这一时期物源供应稳定,水动力条件适宜三角洲的持续发育,而长7_3亚段为重力流沉积(图8b),暗示沉积环境发生了显著变化。这可能是由于物源区构造活动增强,引发大规模山体滑坡,大量沉积物快速注入湖盆;或是湖盆地形发生改变,致使重力流更易发育[49]。

4.2 平面相特征

4.2.1 长7_3亚段

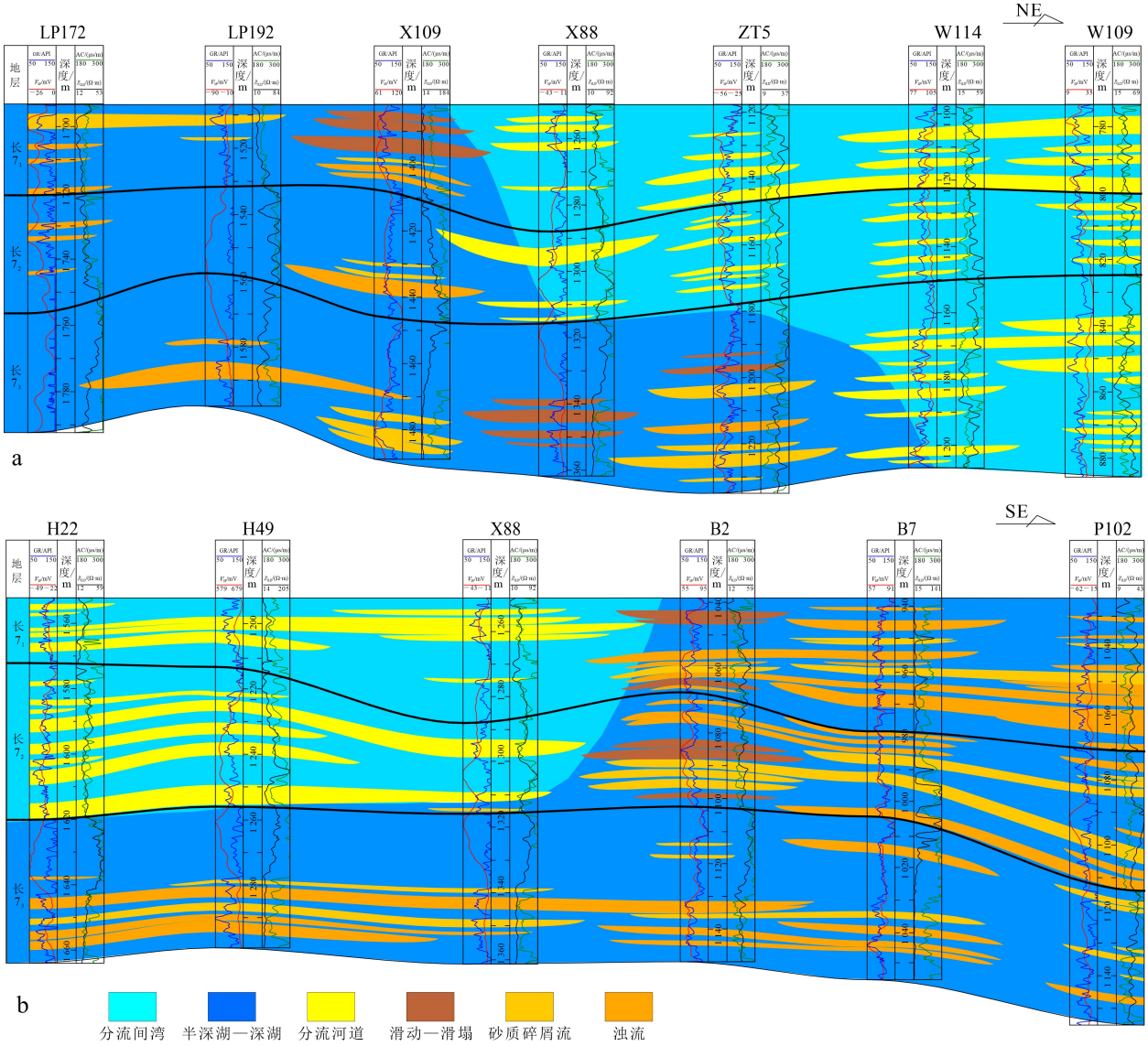
研究区长7_3亚段平均厚度为47.0 m,相较于长7_1、长7_2亚段,其砂体发育程度显著降低。受湖盆扩张作用影响,研究区大部分为半深湖—深湖沉积,且泥质沉积物厚度自湖盆边缘向中心呈梯度递增趋势;分流间湾于研究区东北部富集;水下分流河道规模较小,集中发育于研究区东部和东北部;湖盆中部零星分布浊流沉积和滑动—滑塌沉积,砂质碎屑流沉积主要发育于研究区东南部区域(图9a)。长7_3亚段沉积期深湖区占据研究区西南部和中部,暗色沉积物向南西—北东方向逐渐变薄,这主要受沉积环境的影响,因长7_3亚段为最大湖泛期,黑色泥页岩广泛发育,水体的低能还原环境有效抑制了有机质降解,促使大量有机质得以保存并富集,形成优质烃源岩。这种下源上储的源储配置模式,为长7致密油气富集提供了丰富的油源基础[28]。

4.2.2 长7_2亚段

研究区长7_2亚段平均厚度为32.4 m,其沉积相类型丰富,涵盖水下分流河道、分流间湾、半深湖—深湖、砂质碎屑流、浊流和滑动—滑塌等多种沉积类型。在湖盆东北侧边缘,受物源供给方向与水动力条件控制,水下分流河道砂体发育良好,形成厚度较大的砂质沉积体,可构成良好的储集空间;靠近湖盆中心区域,受水动力条件减弱与沉积物卸载机制影响,砂体逐渐减少,主要以浊流沉积为主,砂质碎屑流沉积和滑动—滑塌沉积主要分布在半深湖—深湖过渡带,该区域地形坡度变化显著,易触发沉积物失稳搬运(图9b)。

4.2.3 长7_1亚段

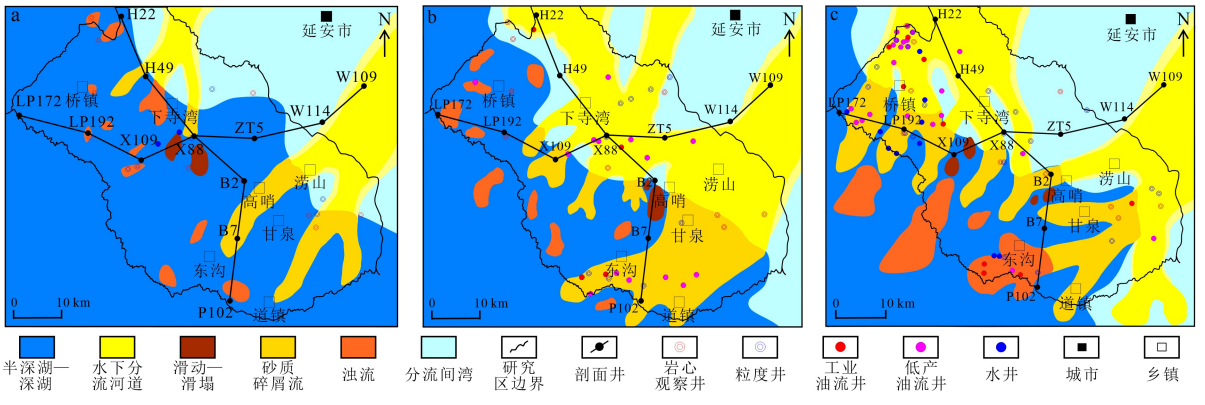
研究区长7_1亚段平均厚度为30.7 m,主要发育水下分流河道、分流间湾、浊流沉积、滑动—滑塌及砂质碎屑流沉积。相较于长7_2和长7_3时期,长7_1沉积时期河道更宽,延伸距离更远,砂质碎屑流和浊流更加发育。长7_1亚段的沉积特征与湖平面变化密切相关,湖退时期三角洲前缘砂体向西南推进,湖盆界限向西南后移,湖盆面积明显减小,重力流物源供给更加充分。滑动—滑塌沉积主要位于研究区中部的湖盆边缘地带;砂质碎屑流主要分布于湖盆斜坡地带向湖盆中心一侧,夹杂着滑塌岩和碎屑流沉积物;浊流主要分布在湖盆中心部位;分流间湾和水下分流河道发育于研究区东北区域(图9c)。



a. 顺物源剖面；b. 垂直物源剖面。剖面位置见图 1a。

图 8　鄂尔多斯盆地甘泉地区长 7 段沉积微相剖面展布图

Fig.8　Sedimentary facies profile of Chang 7 Member connecting wells in Ganquan area, Ordos basin



a. 长 7_3 亚段；b. 长 7_2 亚段；c. 长 7_1 亚段。

图 9　甘泉地区延长组长 7 段沉积微相平面展布图

Fig.9　Sedimentary facies map of Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ganquan area

4.3 控油性及油气地质意义

细粒沉积岩在深水盆地中既广泛发育优质烃源岩,还发育大量细粒储集砂体,如细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩等。这些岩性不仅适宜作为致密砂岩油气的储集层,也展现出对页岩油气储集的良好潜力[50-51]。

重力流驱动的细粒沉积物广泛展布于从三角洲前缘斜坡至盆地沉积中心的广大区域,这些沉积物能够累积形成较厚的储集层[16]。研究区西北部储量区主要为三角洲砂体,中部重力流砂体和三角洲砂体均发育,东南部为重力流砂体。工业油流井主要分布在下分流河道沉积位置,其次是浊积岩,少量在砂质碎屑流部位(图10)。在90口试油井中,包括50口油井和40口非油井,其中水下分流河道微相油井占比52%,浊流微相油井占比34%,砂质碎屑流油井占比12%,分流间湾占比2%。对不同沉积微相产油井类型分析表明:水下分流河道油井共26口,工业油流占比26.9%,浊积岩油井共17口,工业油流井占比17.6%,砂质碎屑流油井共6口,工业油流井占比33.3%。综合来看,水下分流河道可作为研究区最有利产层,砂质碎屑流次之,浊流相对最差。砂质碎屑流和浊流沉积在研究区均具备良好的勘探潜力。不同沉积微相反映了沉积环境的细微变化,对砂体的形成、分布和性质具有重要影响。因此,在水平井开发过程中,了解目标区域的沉积微相特征,对于准确追踪砂体具有重要意义[52]。结合研究区水平井开发数据,不同沉积微相水平井开发皆有很好的产量,展现出良好的勘探前景,水下分流河道平均日产明显高于浊流和砂质碎屑流(图11)。

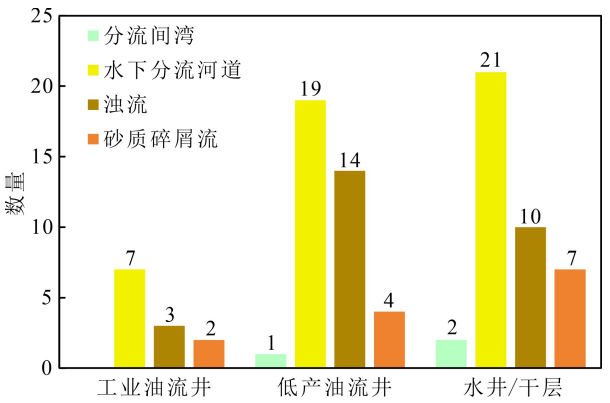
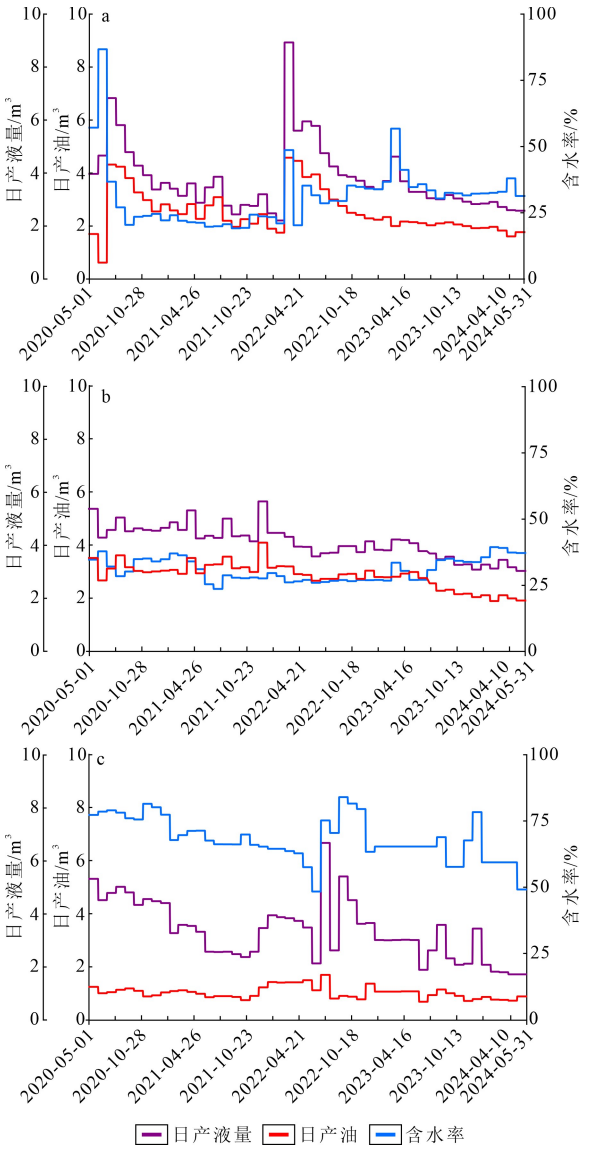


图10 甘泉地区长7试油结果统计

Fig.10 Statistics of Chang 7 oil test results in Ganquan area



a. QT21井,水下分流河道;b. P平52井,浊流;c. P平4井,砂质碎屑流。

图11 甘泉地区不同沉积微相水平井排采曲线

Fig.11 Drainage curves of horizontal wells with different sedimentary microfacies in Ganquan area

总而言之,厘清长7段的沉积格局对油气勘探具有重要指示意义。水下分流河道砂体因粒度粗、分选好、物性优,构成了理想的储集层;而分流间湾发育的泥岩可作为优质盖层,与河道砂体形成良好的储盖组合。同时,砂质碎屑流与浊流沉积形成的砂体,虽横向连续性较差,但垂向叠置特征显著,在合适的圈闭条件下同样具备油气聚集潜力。这一认识与鄂尔多斯盆地延长组致密油藏勘探实践相符。前人[53-54]研究表明,类似沉积环境下形成的砂体已成为重要的勘探目标。此外,湖退期的进积型沉积

序列往往伴随生储盖组合的有序配置，也为油气成藏提供了优越的地质条件[55]。

5　结论

1）甘泉地区长 7 段主要为三角洲前缘及半深湖—深湖沉积，发育块状层理、平行层理、滑塌变形、球枕构造、泄水构造和火焰状构造等沉积构造，粒度概率曲线表现为单段悬浮、两段递变和宽缓上拱 3 种类型。

2）甘泉地区长 7 段共划分出 10 种岩相类型和 4 种岩相组合模式。其中以块状层理细砂岩相、流水波纹层理细砂岩相、浪成交错层理粉砂岩相、变形层理泥质粉砂岩相、韵律层理粉砂质泥岩相和块状泥岩相 6 种岩相类型为主。

3）甘泉地区长 7 段共识别出水下分流河道、分流间湾、砂质碎屑流、浊流、滑动—滑塌和半深湖—深湖沉积 6 种沉积微相。三角洲前缘沉积砂体展布方向为南西—北东向，向北东更为发育，单砂体厚度为 0.2～5.5 m，平均厚度为 1.7 m；重力流砂体展布方向呈北西—南东向，主要发育在湖盆边缘及向南西一侧，单砂体厚度为 0.3～5.5 m，平均厚度为 1.9 m；半深湖—深湖泥沉积发育在研究区西南方向，向湖盆中部增加。

4）三角洲前缘砂体和重力流砂体均有工业油流产出，即水下分流河道、浊流和砂质碎屑流沉积的砂体均可作为良好储集体。其中，水下分流河道形成的储集层为研究区最有利的产层，砂质碎屑流次之，浊流相对最差。

参考文献（References）：

[1] 贾承造，郑民，张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发，2012，39(2)：129－136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional Hydrocarbon Resources in China and the Prospect of Exploration and Development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129－136.

[2] 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 油层组为例[J].石油勘探与开发，2015，42(1)：34－43.
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): 34－43.

[3] 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. Discussionon 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.

[4] 操应长，梁超，韩豫，等.基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J].古地理学报，2023，25(4)：729－741.
Cao Yingchang, Liang Chao, Han Yu, et al. Discussions on Classification Scheme for Fine-Grained Sedimentary Rocks Based on Sediments Sources and Genesis[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 729－741.

[5] 罗顺社，牛小兵，李士祥，等.鄂尔多斯盆地长 7 细粒沉积岩分类及命名初探[C]//2015 年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集.武汉：长江大学地球科学学院，2015：2.
Luo Shunshe, Niu Xiaobing, Li Shixiang, et al. Preliminary Exploration on the Classification and Naming of Long 7 Dedientary Rocks in Ordos Basin[C]//Summary of Papers on Sedimentary and Unconventional Resourcesin 2015. Wuhan: School of Earth Sciences, Changjiang University, 2015: 2.

[6] Picard Dane M. Classification of Fine-Grained Sedimentary Rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 1971, 41(1): 179－195.

[7] Macquaker J H S, 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.

[8] 黄军平，杨田，张艳，等.湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式：以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长 7 油层组露头为例[J].沉积学报，2023，41(4)：1227－1239.
Huang Junping, Yang Tian, Zhang Yan, et al. Sedimentary Dynamics and Deposition Model of Lacustrine Finegrained Sedimentary Rocks: A Case Study of the Chang 7 Oil Member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1227－1239.

[9] 吕奇奇，辛红刚，王林，等.鄂尔多斯盆地宁县地区三叠

系延长组7段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式[J].古地理学报,2023,25(4):823-840.
Lü Qiqi, Xin Honggang, Wang Lin, et al. Sedimentary Types, Characteristics and Model of Lacustrine Fine-Grained Gravity Flow in the Member 7 of Trassic Yanchang Formation in Ningxian Area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25 (4): 823-840.

[10] 张建国,姜在兴,刘立安,等.渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化[J].石油学报,2021,42(3):293-306.
Zhang Jianguo, Jiang Zaixing, Liu Li'an, et al. Lithofacies and Depositional Evolution of Fine-Grained Sedimentary Rocks in the Lower Submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42 (3): 293-306.

[11] 李振明,熊伟,王斌,等.准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式[J].石油实验地质,2023,45(4):693-704.
Li Zhenming, Xiong Wei, Wang Bin, et al. Fine-Grained Sedimentary Characteristics and Evolution Model of Permian Fengcheng Formation in Hashan Area, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45 (4): 693-704.

[12] 孟庆涛,张训,杨亮,等.陆相拗陷湖盆细粒沉积有机质富集机制研究:以松辽盆地长岭凹陷青山口组为例[J].古地理学报,2024,26(2):401-415.
Meng Qingtao, Zhang Xun, Yang Liang, et al. Mechanism Study of Organic Matter Enrichment in Fine-Grained Sediments in Continental Depression Lacustrine Basin: An Example from the Qingshankou Formation in Changling Sag, Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2024, 26 (2): 401-415.

[13] 付金华,刘显阳,李士祥,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J].中国石油勘探,2021,26(5):1-11.
Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, et al. Discovery and Resource Potential of Shale Oil of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26 (5): 1-11.

[14] 杨仁超,尹伟,樊爱萍,等.鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义[J].古地理学报,2017,19(5):791-806.
Yang Renchao, Yin Wei, Fan Aiping, et al. Geological Deposits in the Triassic Yanchang Formation and Its Geological Significance in the Southern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (5): 791-806.

[15] 刘显阳,李士祥,周新平,等.鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报,2023,44(12):2070-2090.
Liu Xianyang, Li Shixiang, Zhou Xinping, et al. New Fields, New Typesand Resource Potentials of Petroleum Exploration in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44 (12): 2070-2090.

[16] 邹才能,冯有良,杨智,等.中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油"甜点段"发育的影响[J].石油勘探与开发,2023,50(5):883-897.
Zou Caineng, Feng Youliang, Yang Zhi, et al. Fine-Grained Gravity Flow Sedimentation and Its Influence on Development of Shale Oil Sweet Spot Intervals in Lacustrine Basins in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50 (5): 883-897.

[17] 贾承造,张永峰,赵霞.中国天然气工业发展前景与挑战[J].天然气工业,2014,34(2):8-18.
Jia Chengzao, Zhang Yongfeng, Zhao Xia. Prospects of and Challenges to Natural Gas Industry Development in China [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (2): 8-18.

[18] 朱筱敏,王晓琳,张美洲,等.中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J].石油与天然气地质,2024,45(4):873-892.
Zhu Xiaomin, Wang Xiaolin, Zhang Meizhou, et al. Sedimentary Environments and Lithofacies Characteristics of Fine-Grained Sediments in Typical Continental Basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45 (4): 873-892.

[19] 姜道广,罗顺社,陈亮,等.陇东地区延长组7_3亚段细粒沉积岩相分布规律及沉积模式:基于水槽沉积模拟实验[J].古地理学报,2025,27(3):625-640.
Jiang Daoguang, Luo Shunshe, Chen Liang, et al. The Fine-Grained Sedimentary Facies Distribution and Sedimentary Model of the 7_3 Sub-Member of Yanchang Formation in Longdong Area: Based on the Flume Sedimentary Simulation Experiment [J]. Journal of Palaeogeography, 2025, 27 (3): 625-640.

[20] 吕奇奇,罗顺社,付金华,等.湖泊深水重力流沉积露头精细解剖:以鄂尔多斯盆地瑶曲剖面长7油层组为例[J].地质学报,2017,91(3):617-628.
Lü Qiqi, Luo Shunshe, Fu Jinhua, et al. Outcrop-Based Analysis of a Deep-Water Gravity Flow

Sedimentsin Lake: A Case Study from the Chang 7 of Yaoqu Section, Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91 (3): 617 - 628.

[21] Boulesteix K, Poyatos - Moré M, Flint S S, et al. Transport and Deposition of Mud in Deep - Water Environments: Processes and Stratigraphic Implications[J]. Sedimentology, 2019, 66(7): 2894 - 2925.

[22] Shanmugam G. New Perspectives on Deep-Water Sandstones: Implications[J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2013, 40(3): 316 - 324.

[23] Zou C, Wang L, Li Y, et al. Deep-Lacustrine Transformation of Sandy Debrites into Turbidites, Upper Triassic, Central China [J]. Sedimentary Geology, 2012, 265/266: 143 - 155.

[24] Fan A, Yang R, Loon V A, et al. Classification of Gravity-Flow Deposits and Their Significance for Unconventional Petroleum Exploration, with a Case Study from the Triassic Yanchang Formation (Southern Ordos Basin, China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 161: 57 - 73.

[25] 李相博，刘化清，潘树新，等.中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J].沉积学报，2019，37(5)：904 - 921.
Li Xiangbo, Liu Huaqing, Pan Shuxin, et al. The Past, Present and Future of Research on Deep-Water Sedimentary Gravity Flow in Lake Basins of China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37 (5): 904 - 921.

[26] 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.

[27] 李红进，张道勇，葛云锦，等.甘泉—富县地区长 7 致密砂岩储层成岩相的定量识别及其对含油性的控制作用[J].吉林大学学报(地球科学版)，2019，49(6)：1529 - 1539.
Li Hongjin, Zhang Daoyong, Ge Yunjin, et al. Quantitative Identification of Diagenetic Facies of Tight Sandstone Reservoirs and Its Control on Oil-Bearing Property: A Case Study of Chang 7, Ganquan-Fuxian[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019, 49(6): 1529 - 1539.

[28] 张凤奇，张凤博，钟红利，等.鄂尔多斯盆地甘泉南部地区延长组长 7 致密油富集主控因素[J].岩性油气藏，2016，28(3)：12 - 19.
Zhang Fengqi, Zhang Fengbo, Zhong Hongli, et al. Main Controlling Factors of the Enrichment of Chang 7 Tight Oil of Yanchang Formation in Southern Ganquan Area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28 (3): 12 - 19.

[29] 葛云锦，任来义，贺永红，等.鄂尔多斯盆地富县—甘泉地区三叠系延长组 7 油层组致密油富集主控因素[J].石油与天然气地质，2018，39(6)：1190 - 1200.
Ge Yunjin, Ren Laiyi, He Yonghong, et al. Main Factors Controlling the Tight oil Enrichment in the 7th Oil Layer Group of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian-Ganquan Area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (6): 1190 - 1200.

[30] 王香增，张丽霞，高潮.鄂尔多斯盆地下寺湾地区延长组页岩气储层非均质性特征[J].地学前缘，2016，23(1)：134 - 145.
Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Gao Chao. The Heterogeneity of Shale Gas Reservoir in the Yanchang Formation, Xiasiwan Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (1): 134 - 145.

[31] 卢进才，李玉宏，魏仙样，等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J].吉林大学学报(地球科学版)，2006，36(6)：928 - 932.
Lu Jincai, Li Yuhong, Wei Xianyang, et al. Research on the Depositional Environment and Resources Potential of the Oil Shale in the Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 928 - 932.

[32] 李威，文志刚.鄂尔多斯盆地西南地区延长组长 7 段细粒沉积物特征研究[J].地质学报，2017，91(5)：1120 - 1129.
Li Wei, Wen Zhigang. Characteristics of Fine-Grained Sediments from the 7th Member of the Yanchang Formation in the Southwestern Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91 (5): 1120 - 1129.

[33] 朱必清，陈世加，白艳军，等.鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长 8 段原油地球化学特征及来源[J].现代地质，2022，36(2)：742 - 754.
Zhu Biqing, Chen Shijia, Bai Yanjun, et al. Geochemical Characteristics and Source of Crude Oil in Chang 8 Member of Yanchang Formation, Ganquan Area, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2022, 36

(2):742-754.

[34] 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,2002:130-181.
Yang Junjie. Tectonic Evolution and Oil and Gas Distribution Law of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:130-181.

[35] 胡修棉,王成善,李祥辉,等.藏南上白垩统大洋红层:岩石类型、沉积环境与颜色成因[J].中国科学:D辑:地球科学,2006,36(9):811-821.
Hu Xiumian, Wang Chengshan, Li Xianghui, et al. Upper Cretaceous Ocean Red Layer: Rock Type, Sedimentary Environment and Color Origin [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2006, 36(9): 811-821.

[36] 王熠哲,吴朝东,马健,等.准噶尔盆地白垩纪—新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化[J].古地理学报,2019,21(3):451-468.
Wang Yizhe, Wu Chaodong, Ma Jian, et al. Strata Color Rhythm of the Cretaceous-Neogene and Evolution of Palaeoenvironment and Palaeoclimate in Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3): 451-468.

[37] 王秀娟,陈冬霞,郭文杰,等.拗陷湖盆"古湖岸线""古深湖线"位置判别方法:以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长6油层组为例[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(3):495-507.
Wang Xiujuan, Chen Dongxia, Guo Wenjie, et al. Location Discrimination Methods of "Ancient Lake Shoreline" and "Ancient Deep Lake Line" in Continental Lacustrine Basin: Taking Chang 6 Layers of Yanchang Formation in Ordos Basin as an Example [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2022, 52(3): 495-507.

[38] 朱筱敏.沉积岩石学[M].5版.北京:石油工业出版社,2020.
Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology [M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.

[39] Baker M L, Baas J H. Mixed Sand-Mud Bedforms Produced by Transient Turbulent Flows in the Fringe of Submarine Fans: Indicators of Flow Transformation[J]. Sedimentology, 2020, 67(5): 2645-2671.

[40] 李相博,刘化清,张忠义,等.深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据:"泥包砾"结构:以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例[J].沉积学报,2014,32(4):611-622.
Li Xiangbo, Liu Huaqing, Zhang Zhongyi, et al. "Argillaceous Parcel"Structure: A Direct Evidence of Debris Flow Origin of Deep-Water Massive Sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 611-622.

[41] 袁静,杨学君,路智勇,等.东营凹陷盐22块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征[J].沉积学报,2011,29(5):815-824.
Yuan Jing, Yang Xuejun, Lu Zhiyong, et al. Probability Cumulative Grain Size Curves in Sandy Conglomerate of the Upper Es_4 in Yan 22 Block, Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 815-824.

[42] 刘秀婵,杨帅,常童,等.甘泉地区长7段沉积岩特征与地质评价[J].延安大学学报(自然科学版),2023,42(2):24-29.
Liu Xiuchan, Yang Shuai, Chang Tong, et al. Sedimentary Rock Characteristics and Geological Evaluation of Chang 7 Member in Ganquan Area[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2023, 42(2): 24-29.

[43] Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding [J]. The Journal of Geology, 1950, 58(2): 91-127.

[44] Bouma A H. Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation[M]. Amsterdam: Elseviel, 1962: 1-168.

[45] 谢宗奎.柴达木台南地区第四系细粒沉积岩相与沉积模式研究[J].地学前缘,2009,16(5):245-250.
Xie Zongkui. Research on the Quaternary Fine-Fraction Lithofacies and Sedimentation Model in Tainan Area, Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 245-250.

[46] 刘芬,朱筱敏,梁建设,等.鄂尔多斯盆地延长组深水重力流岩相发育特征及其储集性[J].海洋地质前沿,2020,36(6):46-55.
Liu Fen, Zhu Xiaomin, Liang Jianshe, et al. Lithofacies Characteristics of Gravity Flow Deposits and Their Impacts on Reservoir Quality in the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(6): 46-55.

[47] 张雷,李振海,张学娟,等.重力流沉积岩相划分及其发育规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(1):17-24.
Zhang Lei, Li Zhenhai, Zhang Xuejuan, et al. Lithofacies Classification and Development Rule of

Gravity Flows Deposits [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 17 - 24.

[48] 时保宏，郑飞，张艳，等.鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组石油成藏条件分析[J].石油实验地质，2014，36(3)：285 - 290，298.
Shi Baohong, Zheng Fei, Zhang Yan, et al. Hydrocarbon Accumulation Conditions of Chang 7 Section, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 285 - 290, 298.

[49] Ko L T, Loucks R G, Zhang T, et al. Pore and Pore Network Evolution of Upper Cretaceous Boquillas (Eagle Ford-Equivalent) Mudrocks: Results from Gold Tube Pyrolysis Experiments [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(11): 1693 - 1722.

[50] 姚泾利，赵彦德，邓秀芹，等.鄂尔多斯盆地延长组致密油成藏控制因素[J].吉林大学学报(地球科学版)，2015，45(4)：983 - 992.
Yao Jingli, Zhao Yande, Deng Xiuqin, et al. Controlling Factors of Tight Oil Reservior in Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(4): 983 - 992.

[51] Li W, Li S T M, Alves M, et al. The Role of Sediment Gravity Flows on the Morphological Development of a Large Submarine Canyon (Taiwan Canyon), North - East South China Sea [J]. Sedimentology, 2021, 68(3): 1091 - 1108.

[52] 雷卞军，李跃刚，李浮萍，等.鄂尔多斯盆地苏里格中部水平井开发区盒 8 段沉积微相和砂体展布[J].古地理学报，2015，17(1)：91 - 105.
Lei Bianjun, Li Yuegang, Li Fuping, et al. Sedimentary Microfacies and Sandbody Distribution of the Member 8 of Xiashihezi Formation in Horizontal Well Zone, Central Sulige Area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17 (1): 91 - 105.

[53] 杨智，付金华，郭秋麟，等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J].中国石油勘探，2017，22(6)：9 - 15.
Yang Zhi, Fu Jinhua, Guo Qiulin, et al. Discovery, Characteristics and Resource Potential of Continental Tight Oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9 - 15.

[54] 张军，白玉彬，闫新智，等.鄂尔多斯盆地富县地区长 7 段深水重力流沉积及勘探意义[J].沉积学报，2026，44(2)：596 - 613.
Zhang Jun, Bai Yubin, Yan Xinzhi, et al. Sedimentary Characteristics of Deep-Water Gravity Flow in the Chang 7 Member of the Yanchang Formation in the Fuxian Area, Ordos Basin and Its Significance for Petroleum Exploration [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2026, 44(2): 596 - 613.

[55] 柳朝阳，姚东升，辛毅超，等.致密砂岩油差异富集主控因素：以鄂尔多斯盆地志丹地区长 61 - 4 段为例[J].西安石油大学学报(自然科学版)，2025，40(5)：22 - 33，56.
Liu Chaoyang, Yao Dongsheng, Xin Yichao, et al. Main Controlling Factors for Differential Enrichment of Tight Sandstone Oil: Taking Chang 61 - 4 Member in Zhidan Area of Ordos Basin as an Example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2025, 40(5): 22 - 33, 56.