

文章编号: 1671-1505(2024)04-0779-17 DOI: 10.7605/gdxb.2024.04.051

鄂尔多斯盆地庆城油田延长组页岩层系 层序地层与沉积相特征*

刘明成^{1,2} 吴胜和^{1,2} 万晓龙^{1,2,4} 李 桢³
樊建民³ 陈朝晖^{1,2} 王梓洋^{1,2} 刘海旭^{1,2}

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

4 中国石油长庆油田分公司第十一采油厂, 甘肃庆阳 745000

摘 要 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩层系蕴藏着丰富的油气资源, 但其层序格架及沉积相展布存在较大的争议, 从而影响着页岩油气的精细勘探与开发。以庆城油田西 233 区块为例, 应用岩心、测井及最新的三维地震资料重构了层序地层格架及沉积相分布。研究表明, 在延长组原长 8₁—长 3₂ 砂组内, 地层向湖盆中心呈进积叠置样式, 可分为 2 个长期基准面旋回和 10 个中期基准面旋回。在每个中期旋回内, 向盆地方向的古地貌依次为浅水带、斜坡带和盆底带。浅水带主要发育三角洲; 斜坡带发育重力流水道, 顺斜坡呈窄条带状分布; 在盆底带近端发育重力流朵叶体沉积, 砂体夹于泥页岩中, 而盆底带远端主要为深湖页岩夹滑塌体沉积。原长 7 油层组页岩层系为 1 套穿时地层, 由多个中期旋回的斜坡带下部、盆底带湖底扇砂体和半深湖—深湖泥岩组成。这一研究不仅对鄂尔多斯盆地夹层型页岩油的有效开发(开发区优选及水平井部署)具有重要的指导作用, 亦对拗陷湖盆层序与沉积演化理论的发展具有一定的促进作用。

关键词 鄂尔多斯盆地 延长组 长 7 油层组 湖底扇 页岩层系 层序地层格架 沉积相

第一作者简介 刘明成, 男, 1996 年生, 中国石油大学(北京)博士研究生, 主要从事沉积学、储层表征与建模研究。E-mail: cupliumingcheng@163.com。

通讯作者简介 吴胜和, 男, 1963 年生, 中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事沉积古地理、储层表征与建模研究。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the shale strata of Yanchang Formation in Qingcheng Oilfield, Ordos Basin

LIU Mingcheng^{1,2} WU Shenghe^{1,2} WAN Xiaolong^{1,2,4} LI Zhen³
FAN Jianmin³ CHEN Zhaohui^{1,2} WANG Zifeng^{1,2} LIU Haixu^{1,2}

1 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

* 中石油与中国石油大学(北京)战略合作课题(编号: ZLZX2020-02)以及国家自然科学基金(编号: 42272110)联合资助。[Co-funded by the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (No. ZLZX2020-02), and the National Natural Science Foundation of China (No. 42272110)]

收稿日期: 2023-07-15 改回日期: 2023-09-16

3 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

4 The 11th Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Gansu Qingyang 745000, China

Abstract The shale succession of Yanchang Formation in Ordos Basin is rich in hydrocarbon resources, but its sequence framework and sedimentary facies distribution are controversial, which affects the exploration and development of shale hydrocarbon. Taking the Xi233 area of Qingcheng Oilfield as an example, this paper reconstructs the sequence stratigraphic framework and sedimentary facies distribution using core, logging, and the latest 3D seismic data. Research has shown that in the original Chang 8₁–Chang 3₂ interval of the Yanchang Formation, the strata represent a progradational superposition pattern towards the center of the lake basin, which can be divided into two long-term base-level cycles and ten mid-term base level cycles. In each mid-term cycle, the paleogeomorphology towards the basin is followed by shallow-water area, slope area and basin floor area. The shallow-water area mainly develops deltas. The slope belt develops gravity flow channels, which are distributed in narrow bands along the slope; the gravity flow lobe deposits are developed in the proximal basin floor, and the sand bodies are sandwiched in mud shale. The distal basin floor is mainly deep-lake shale interbedded with slump deposits. The original “Chang 7 interval” shale strata is a set of diachronous strata, which is composed of sublacustrine fan sand bodies and semi-deep to deep lake shale in the lower part of the slope belt and basin floor belt of multiple mid-cycles. This study not only plays an important guiding role in the effective development of interbedded shale oil in the Ordos Basin (optimization of development areas and deployment of horizontal wells), but also promotes the development of the theory of sequence and sedimentary evolution in depression lake basins.

Key words Ordos Basin, Yanchang Formation, Chang 7 interval, sublacustrine fan, shale strata, sequence stratigraphic framework, sedimentary facies

About the first author LIU Mingcheng, born in 1996, is a Ph.D. candidate of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentology palaeogeography, reservoir characterization and modeling research. E-mail: cupliumingcheng@163.com.

About the corresponding author WU Shenghe, born in 1963, is a professor and Ph.D. supervisor of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentary palaeogeography, reservoir characterization and modelling. E-mail: reser@cup.edu.cn.

鄂尔多斯盆地三叠系延长组内部发育 1 套厚度较大的页岩层系, 蕴含丰富的油气资源。近年来在庆城地区延长组页岩层系 (原长 7 油层组), 发现了储量超过 10×10^8 t 的页岩油田 (付锁堂等, 2020, 2021), 即庆城油田。目前, 主要采用水平井方式开发其中的夹层型页岩油 (付金华等, 2021)。然而, 在开发过程中, 出现了水平井砂体钻遇率差异大等问题, 其主要原因是砂体分布及其叠置关系认识不清, 关键是对页岩层系的层序地层格架及沉积相分布认识不足。前人利用测井、岩心和露头资料, 根据泥岩和凝灰岩标志层将延长组划分了 5 个岩性段和 10 个油层组 (杨俊杰等,

1992), 并通过旋回对比的方法建立了延长组层序地层格架 (倪新锋等, 2007; 郭彦如等, 2008; 刘自亮等, 2013; 熊林芳等, 2015), 编制了相关的沉积相分布图 (宋凯等, 2002; 武富礼等, 2004; 付金华等, 2005; 陈飞等, 2012)。然而, 之前的层序地层及沉积相分布研究主要是基于井资料, 而由于陆相盆地旋回具有演化迅速、多物源、岩相变化快等特点, 基于井资料的标志层对比及旋回对比的等时性不强, 造成地层格架 (如以页岩层系为主的长 7 段) 具有穿时现象。随着庆城油田勘探开发工作的进行, 这个穿时现象逐渐引起学者们的重视 (李慧琼等, 2014; 李慧琼, 2018; 冯雪等,

2021; 惠潇等, 2022; 崔景伟等, 2023)。在传统分层格架下, 地层均为加积叠置, 以此为基础编制的沉积相图难以反映湖盆充填演化规律及砂体叠置关系。因此, 重构高精度等时层序地层格架, 明确沉积相分布规律是鄂尔多斯盆地延长组油气开发最为重要的一项任务。

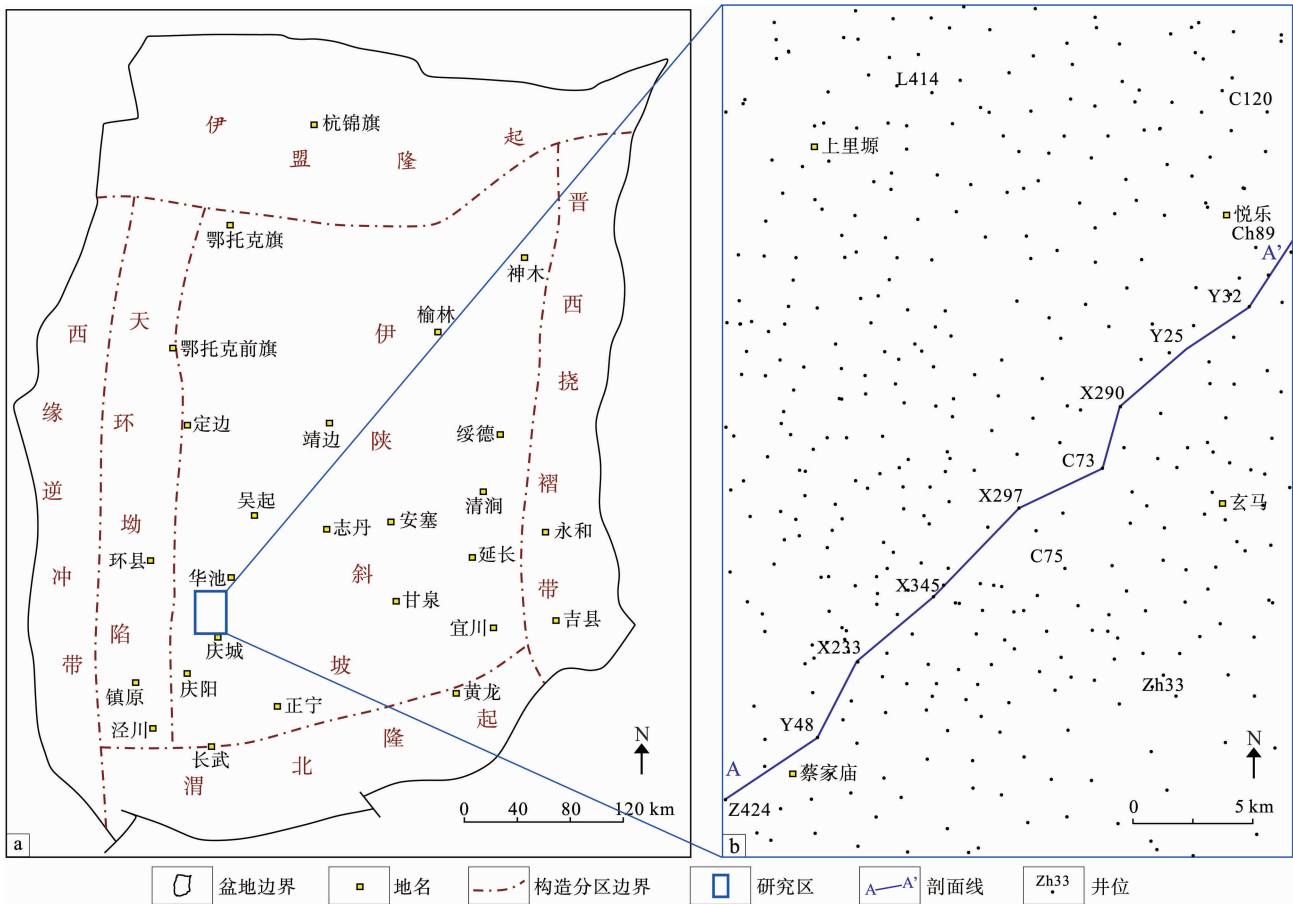
随着黄土塬地震勘探技术和资料处理手段的不断进步, 目前已在庆城油田地区获得了 5000 km² 的高品质三维地震资料 (惠潇等, 2022)。以庆城油田西 233 区块为例, 应用最新的三维地震资料, 结合岩心和测井资料, 重点针对页岩层系进行高分辨率层序地层分析和沉积相研究, 阐明层序结构样式及其控制下的沉积相分布, 为下一步页岩油精细勘探与开发奠定必要的地质基础。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是中国最重要的含油气盆地之

一, 为典型的叠合盆地。盆地跨越陕西、甘肃、宁夏等多个省, 分为伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷和晋西挠褶带 6 个一级构造单元 (杨俊杰等, 1992; 赵红格, 2004; 刘化清等, 2007) (图 1-a)。陆相盆地形成于早二叠系晚期, 此前主要为海相沉积。中上三叠统延长组为一套完整的河流—三角洲—湖泊陆源碎屑沉积。延长组可进一步分为 5 个岩性段和 10 个油层组 (自上而下为长 1 油层组至长 10 油层组) (杨俊杰等, 1992) (图 2)。延长组为一个完整的超长期基准面旋回, 其内部三级层序 (长期基准面旋回) 的划分有多种方案, 包括三分 (刘少峰和杨士恭, 1997)、四分 (杨雷等, 2001; 屈红军等, 2003; 杨友运等, 2005; 陈林等, 2015)、五分 (李凤杰等, 2006; 张凤奎等, 2008; 刘自亮等, 2013) 和六分 (李相博等, 2006; 郭彦如等, 2008) 的观点 (图 2)。

在中晚三叠世, 鄂尔多斯盆地的构造演化受印



a—盆地构造单元分布及研究区地理位置; b—研究区井位分布图 (仅显示预探井与评价井)

图 1 鄂尔多斯盆地庆城油田地理—构造位置与井位分布

Fig. 1 Geographical-tectonic location and well location distribution map of Qingcheng Oilfield in Ordos Basin

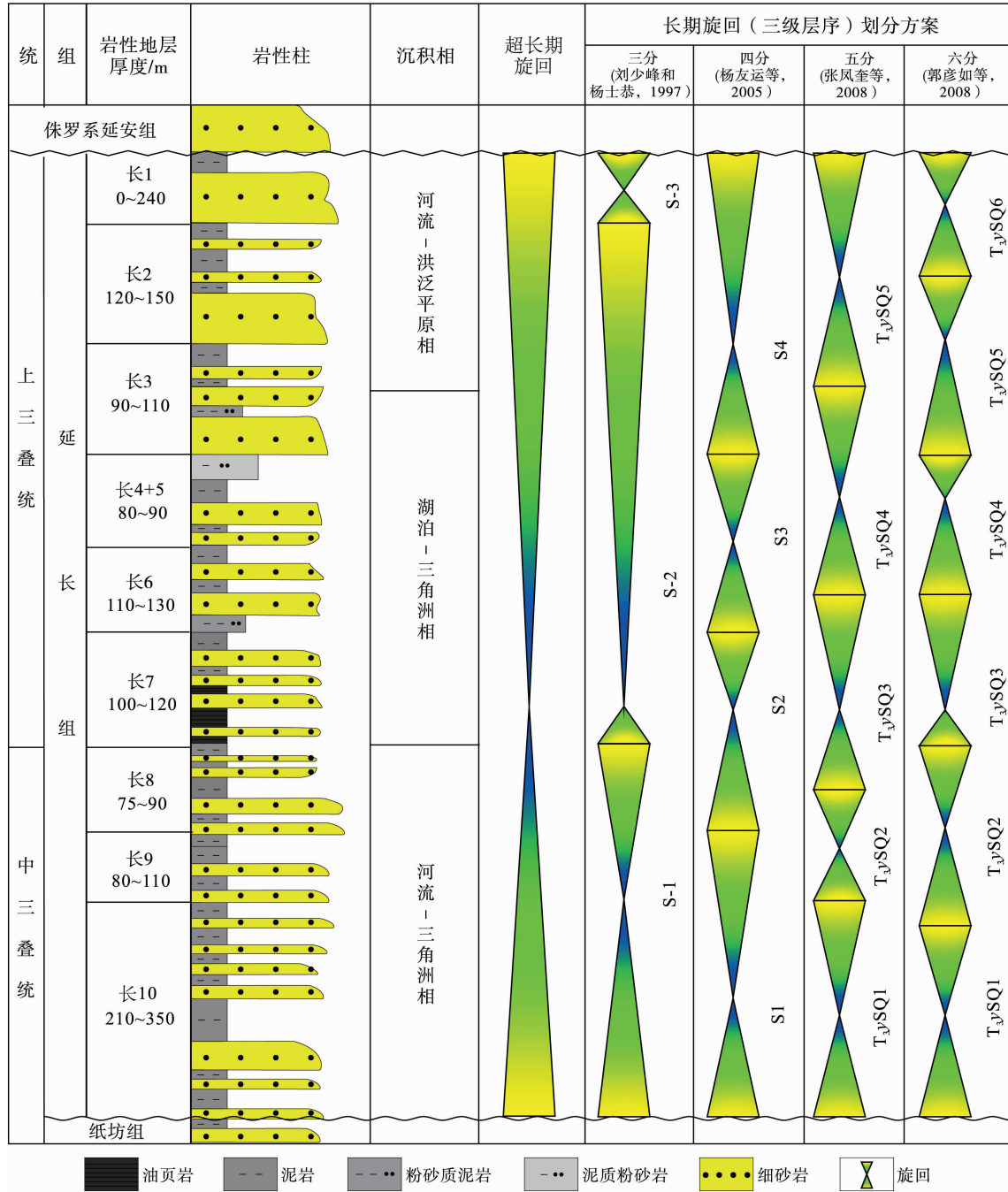


图 2 鄂尔多斯盆地延长组地层发育情况与层序划分

Fig. 2 Stratigraphic development and sequence division of the Yanchang Formation in Ordos Basin

支运动影响。在延长组超长期基准面上升旋回时期 (长 10—长 8 沉积时期), 印支运动强度较弱, 盆地广泛发育河流—三角洲沉积; 到长 8 末期—长 7 早期, 构造活动增强, 湖盆处于强烈拗陷时期, 湖盆范围迅速扩大, 湖盆范围达到鼎盛; 其后, 印支运动强度减弱, 湖盆充填直至消亡。延长组页岩层系发育于延长组中部 (超长期基准面升降转换面

附近), 在湖盆中心广泛发育半深湖—深湖页岩及重力流沉积, 是页岩油勘探开发的重要目标 (Zhang *et al.*, 2021; 李华等, 2022; 吕奇奇等, 2022; 庞军刚等, 2022)。

研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡西南部, 处于庆城油田内部, 面积为 832 km²。有取心井 9 口, 岩心长度 494.6 m; 具有测录井资料的钻井 864 口

(图 1-b)；全区三维地震覆盖，地震主频为 35~40 Hz，带宽为 10~52 Hz，地震垂向分辨率范围为 20~35 m。

2 页岩层序地层格架

前人对延长组层序地层划分方案进行了大量的研究，虽然对三级层序的划分方案不同（有三分、四分、五分和六分等方案），但对包含页岩层系在内的延长组第 3 段（长 7 至长 4+5）属于 2 个三级层序（长期旋回）达到了基本共识。然而，前人认为该段层序地层结构呈加积式（张凤奎等，2008；刘自亮等，2013），但最新采集的三维地震资料表明其呈进积式，因此有必要对其内部层序结构特征进行进一步研究。

2.1 前积地层结构特征

在庆城油田西 233 区块，通过制作 437 口井的

合成记录(图 3)，进行了层位标定。延长组与下伏纸坊组平行不整合接触(图 4 的 SLSB1 界面)，与上覆侏罗系角度不整合接触(图 4 的 SLSB2 界面)。

通过与原钻井分层的对比，发现在原长 7—长 3₂油层组内地层具有明显的前积反射特征，可见明显向湖盆中心倾斜的强波峰同相轴，且均呈下超特征(图 4 中绿色虚线)，井震联合分析发现这些波峰同相轴为连续的泥岩沉积，为湖泛作用产物；该段地层下伏的长 8 至长 10 油层组以及其上覆的长 3₂ 以上地层的地震同相轴基本呈平行反射。按照延长组内部三级层序五分的方案（张凤奎等，2008；刘自亮等，2013），其 T_{3y}SQ1、T_{3y}SQ2 和 T_{3y}SQ5 层序（即本文的 LSC1、LSC2 和 LSC5）的层序结构均呈加积式（层序界面如图 4 的 LSB1、LSB2、LSB4 所示），而 T_{3y}SQ3 和 T_{3y}SQ4（即本文的 LSC3 和 LSC4）层序结构为进积式（层序界面如图 4 的 LSB2、LSB3、LSB4 所示）。

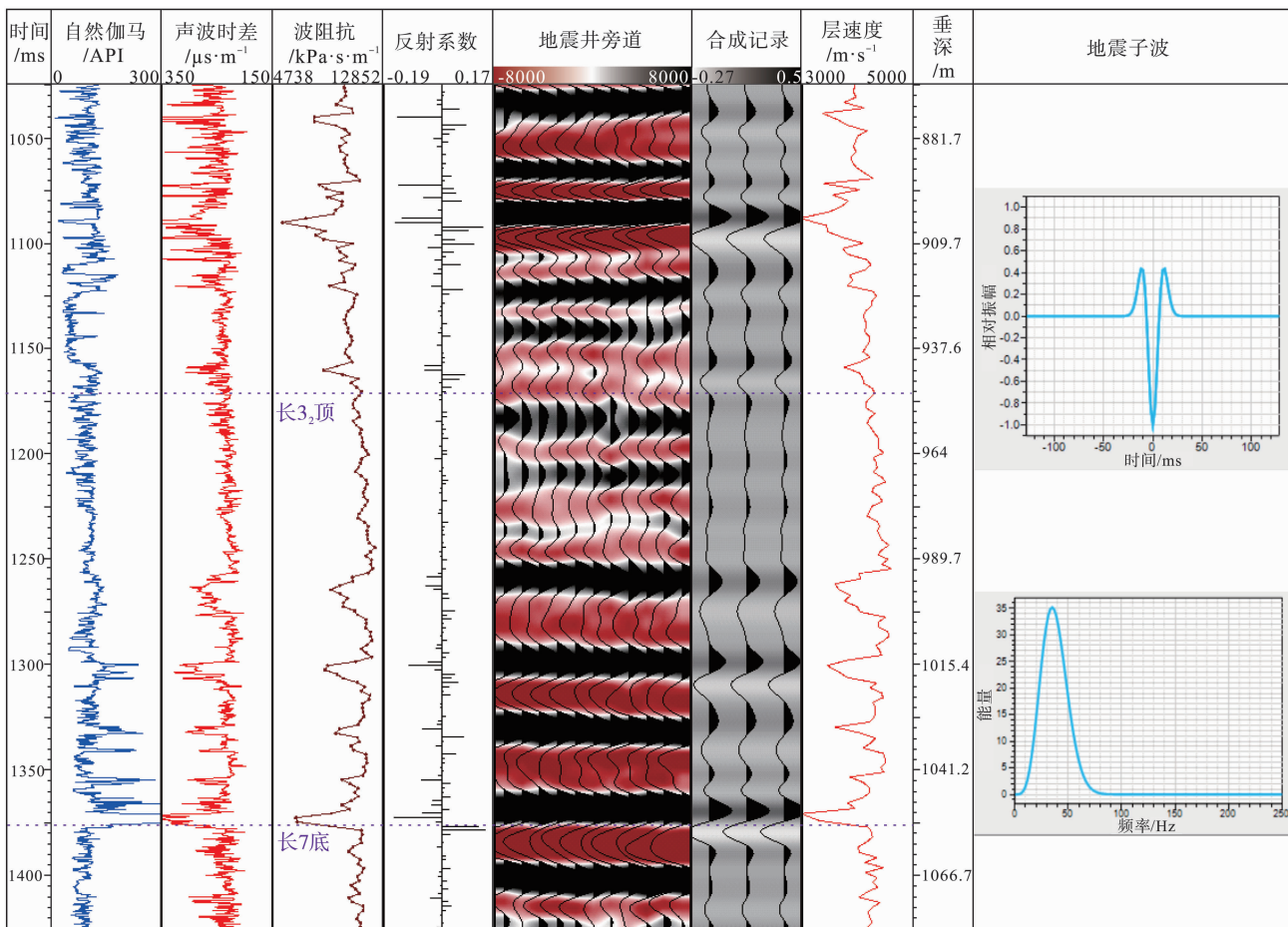
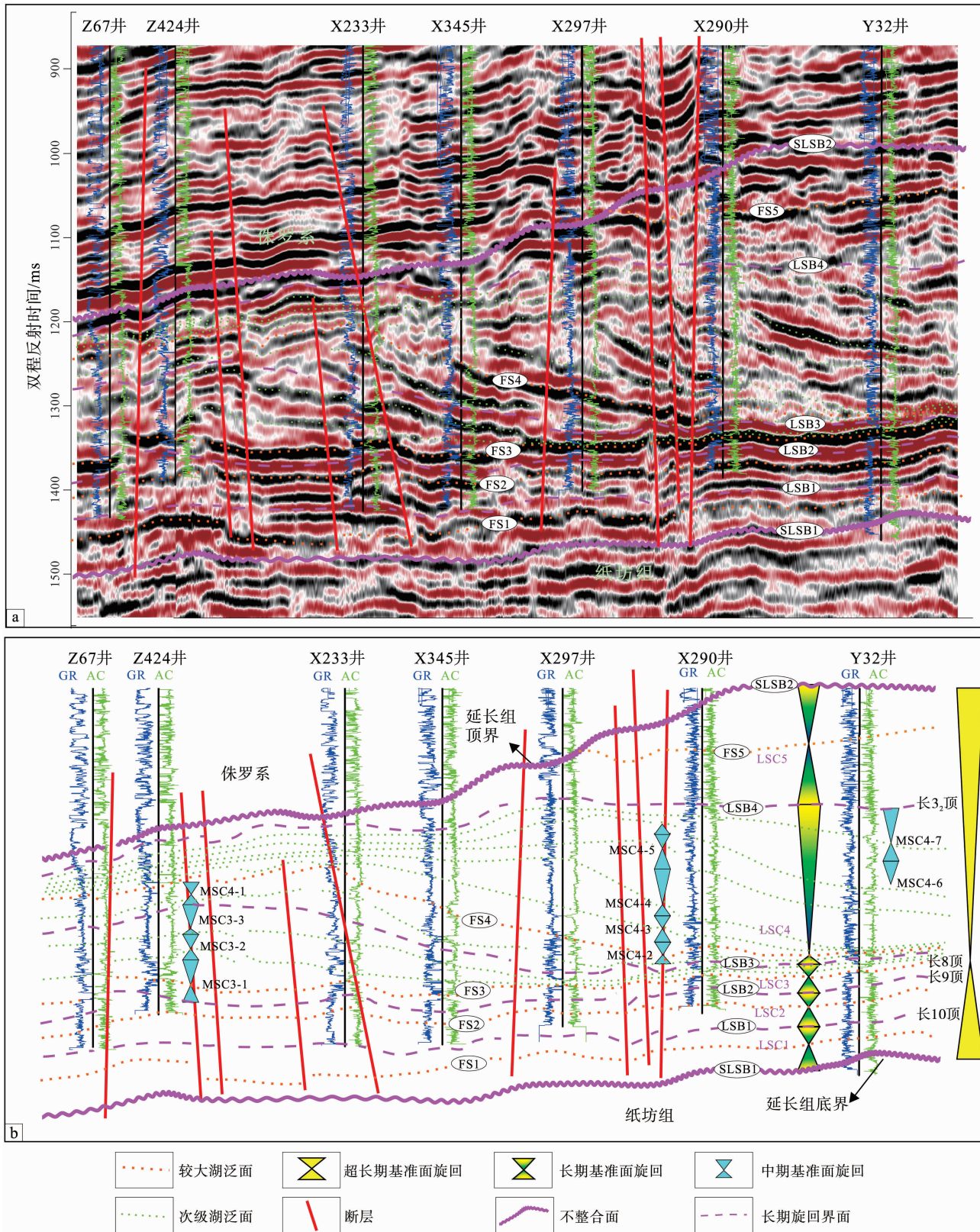


图 3 鄂尔多斯盆地西 233 区块 X345 井地震合成记录

Fig. 3 Synthetic seismogram of Well X345 in Xi 233 area, Ordos Basin



a—三维地震剖面；b—a图的地质解释

图 4 鄂尔多斯盆地西 233 区块层序地震解释 (剖面位置见图 1-b, A-A')

Fig. 4 Seismic interpretation of sequences in Xi 233 area, Ordos Basin (See A-A' in Fig. 1-b for the cross-sectional position)

从顺源地震剖面(图4)可以明显看出,在地震反射界面LSB2与LSB4之间,地震反射结构呈前积反射,可识别出9条明显的前积反射轴。以1条强波谷反射同相轴(图4中LSB3)为界,界面之下为明显的S型反射,各前积反射层由盆地边缘到盆地中心倾斜,呈低角度向下收敛于长7底部,具有典型的下超特征;界面之上为斜交型前积反射,各个前积体向上减薄收敛甚至消失在LSB4界面,向下下超于LSB3界面(图4)。据此,以LSB3界面作为长8—长3₂内部的2个长期基准面旋回界面(2个旋回分别定名为LSC3和LSC4)。

在各长期基准面旋回内部,可识别出明显的湖泛面。湖泛沉积在地震剖面中有很好的反映,显示为强振幅的波峰反射(图4中的FS1至FS5),测井曲线表现为高自然伽马(图4-b)。其中,FS1为LSC1长期旋回内的最大湖泛面,位于长10中上部,相当于延长组初次湖泛面;FS2为LSC2长期旋回内的最大湖泛面,相当于“李家畔页岩”;FS3为LSC3长期旋回内的最大湖泛面,实际上也是延长组超长期旋回内部的最大湖泛面,被称为“张家滩页岩”;FS4为LSC4长期旋回内的最大湖泛面,为一倾斜的湖泛面,在研究区西南部近物源区大体相当于岩性地层认识中长4+5内部的“细脖子高阻泥岩”;FS5为LSC5长期旋回内的最大湖泛面,位于长2上部。

在长期基准面旋回LSC3和LSC4内部,分别识别了2个和6个次级湖泛面(图4中绿色虚线),这些次级湖泛面在地震上呈较连续的强波峰反射,测井曲线上表现高自然伽马(图4),易于识别。湖泛面是湖水位上升达高点位置后折向较大幅下降前形成的界面,每个湖泛面代表着1次湖进—湖退沉积旋回(Cross, 1988; 郑荣才等, 2001)。根据长期基准面旋回LSC3和LSC4内部地震剖面上可识别的湖泛面沉积,将LSC3内部划分为3个中期旋回(图4),自下而上依次为MSC3-1、MSC3-2和MSC3-3;LSC4内部划分为7个中期旋回,自下而上依次为MSC4-1至MSC4-7(图4)。

根据上述方案,采用井震联合对比的方法,建立了研究区页岩层系(长8₁—长3₂)的中期旋回级次的等时地层格架。

2.2 页岩层系内部岩性地层的穿时性

目前,庆城油田夹层型页岩油勘探开发的主要

目的层为原长7油层组的页岩层系。原长7油层组自上而下被进一步分为长7₁、长7₂和长7₃砂组,分别对应于页岩油的“上甜点”、“中甜点”和“下甜点”。按照传统的加积地层结构样式,原长7油层组3个砂组在垂向上呈近平行叠置,顺源方向上砂体呈孤立状,互不连通(图5)。在按照新的进积层序结构样式建立的等时层序地层格架中,地层向湖盆中心方向不断进积,原长7油层组范围内的地层实际上由多个不同时期形成的楔状体组成(图6)。从图6可以看出,在原长7油层组的底界与顶界(图中紫色虚线)之间,包含了LSC3长期旋回内3个中期旋回(MSC3-1、MSC3-2和MSC3-3)及LSC4长期旋回内5个中期旋回(MSC4-1至MSC4-5)的下部地层。例如,在研究区西南部的Z424井中,原长7油层组相当于MSC3-1旋回及MSC3-2旋回下部地层,而随着地层向湖盆中心的进积,在研究区东北部的Y32井中,原长7油层组则相当于从MSC3-1至MSC4-5的8个中期旋回的沉积,其中,各旋回地层厚度均变薄(如MSC3-1至MSC3-3旋回沉积主要为薄层泥岩沉积)。显然,原长7油层组为1套穿时地层。2种地层结构下的砂体分布样式完全不同,这对于页岩油开发过程中的水平井部署及井轨迹设计有极大的影响。

3 进积层序地层格架下的沉积相分布

针对原长7油层组的沉积相,前人做了大量的研究(张家强等, 2021; 李华等, 2022; 吕奇奇等, 2022; 庞军刚等, 2022),但由于原长7油层组地层存在穿时性,已有沉积相图难于反映进积层序地层格架下的沉积相展布特征。本研究拟对包含页岩层系的LSC3和LSC4这2个长期基准面旋回内部各中期旋回的沉积相展布进行研究。

3.1 沉积底形分析

在上述的进积层序地层格架中,每个中期旋回地层均由顶积层、前积层和底积层组成。顶积层对应于湖盆浅湖区,前积层对于湖盆斜坡区,底积层对应于湖底区。据此,根据湖盆底形变化,将湖盆划分为浅水带、斜坡带、盆底带(近端和远端)3个沉积区(图7)。其中,斜坡带为浅水坡折带至深水坡折带的区域,深水坡折带以下统称为盆底带,邻近深水坡折带的盆地缓坡区称为盆底带近端,其

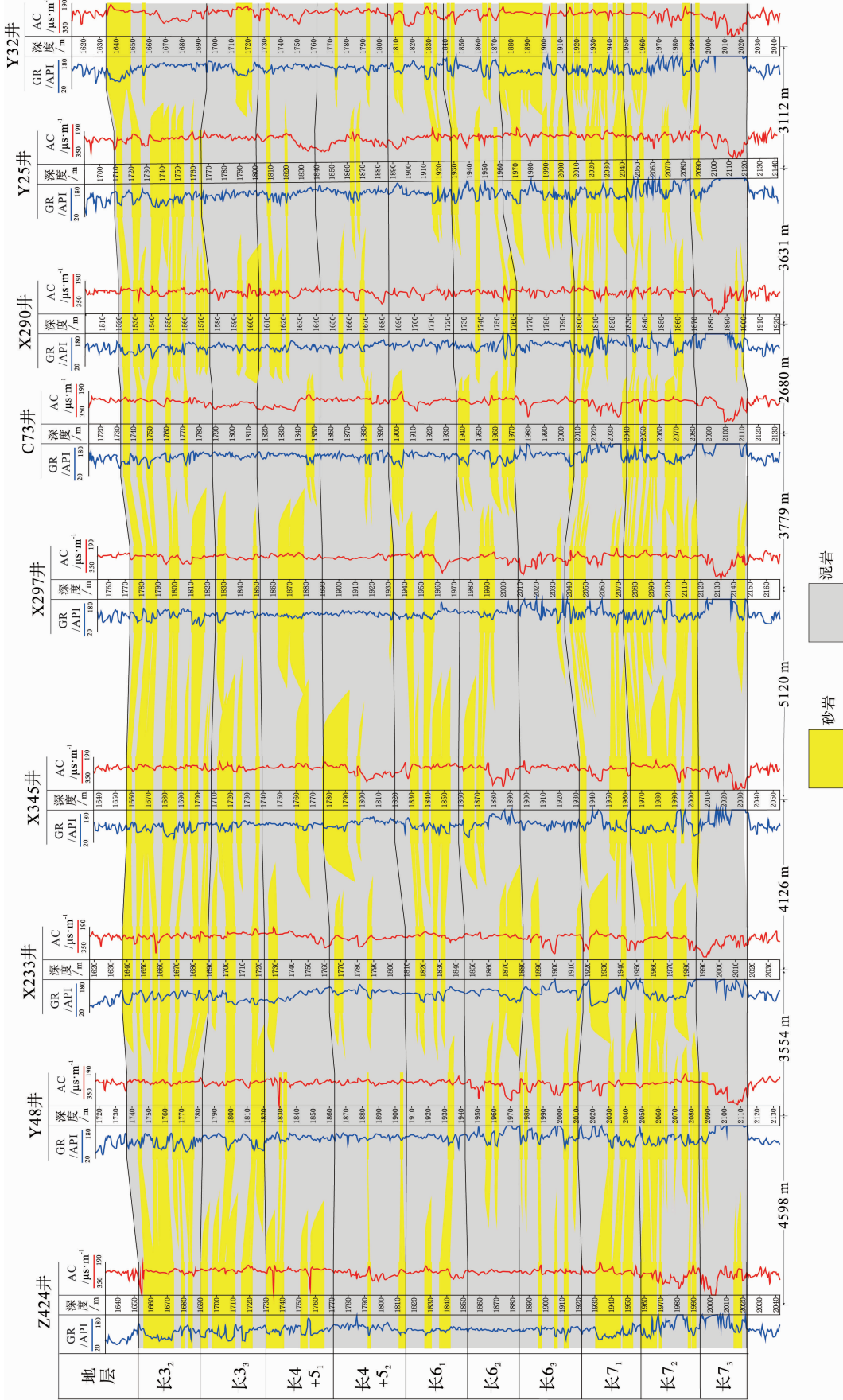


图 5 鄂尔多斯盆地延长组“加积”地层结构样式下的砂体分布剖面图(剖面线见图 1-b, A-A')

Fig. 5 Sand body profile distribution under the “aggradation” stratigraphic structure style (See A-A' in Fig. 1-b for the cross-sectional position)

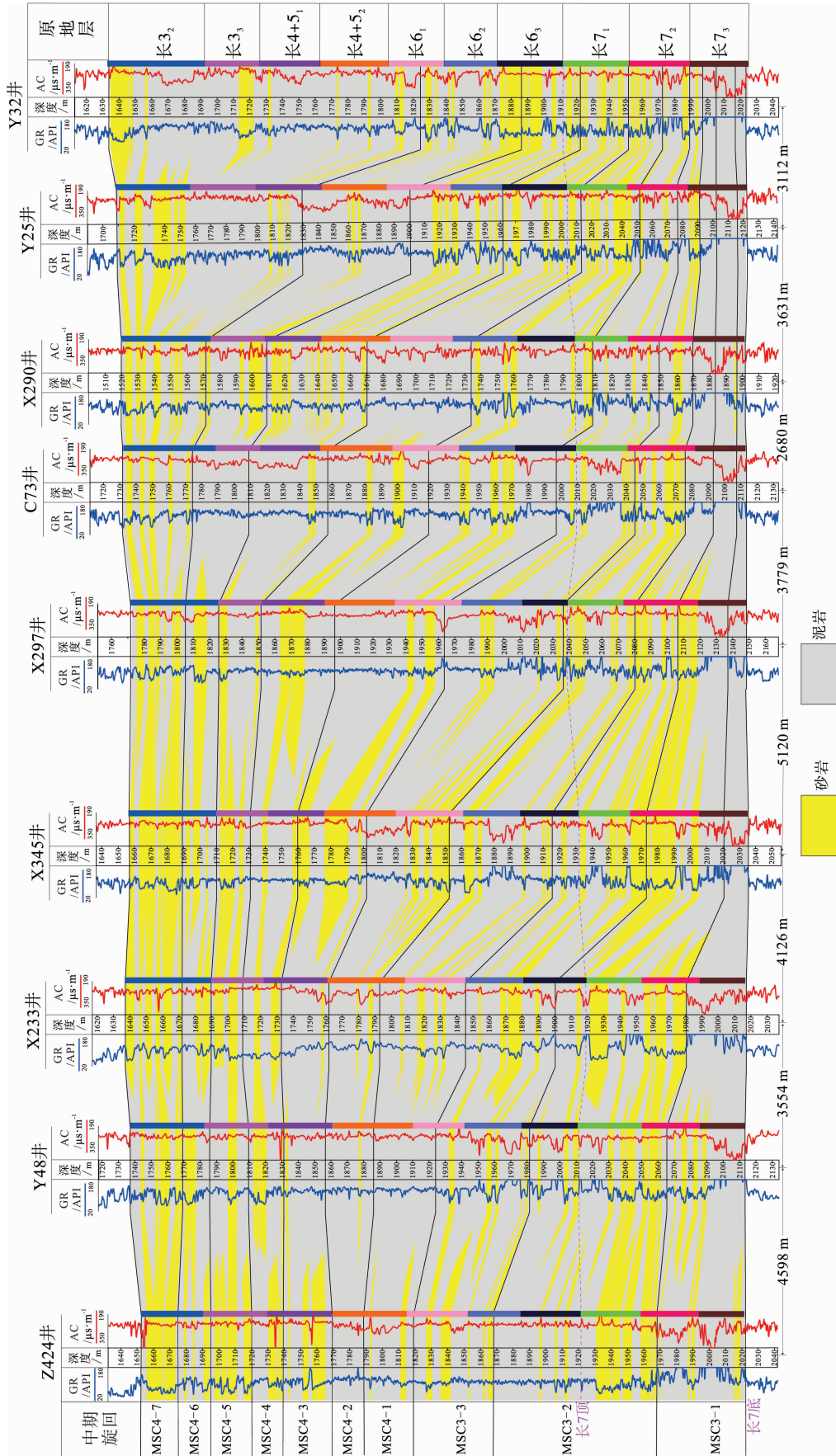


图 6 鄂尔多斯盆地延长组“进积”地层结构样式下的砂体分布剖面图(剖面线见图 1-b, A-A')

Fig. 6 Sand body profile distribution under the “progradation” stratigraphic structure style(See A-A' in Fig. 1-b for the cross-sectional position)

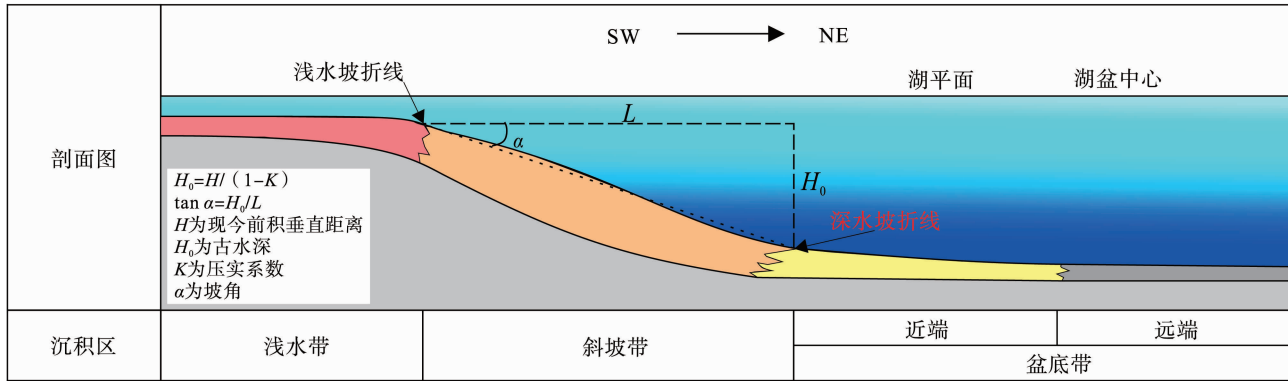


图 7 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组页岩层系沉积区划分图

Fig. 7 Sedimentary area division of shale strata of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin

外为盆底带远端。

通过对层序地层格架剖面的测量发现，研究区顶积层和底积层之间的最大垂直距离（图 7 中的 H ）约 200 m。延长组压实系数（ K ）为 0.3~0.4（崔龙涛等，2013；杨哲翰等，2023），据此可以粗略地估算出 LSC3 和 LSC4 沉积时期最大古水深（ H_0 ）大于 280 m（未考虑浅水区的深度），最大古坡度约为 1.9° 。

3.2 沉积相类型

1) 浅水带沉积相类型。针对研究区浅水带所对应的地层单元的沉积相类型，前人做过大量的研究工作。沉积相类型主要为三角洲，岩性主要为灰绿色细砂岩，发育平行层理、槽状交错层理等牵引流成因沉积构造（惠潇等，2022）。三角洲前缘砂体微相类型主要为分流河道和河口坝沉积（朱筱敏等，2013）。

分流河道垂向上呈正韵律，厚度为 1~4 m，岩性以中等厚度层状细砂岩为主要特征，自然伽马曲线和电阻率曲线呈钟型和箱型（图 8）。

河口坝为下细上粗的反韵律结构，岩性以浅灰色细砂岩和粉砂岩为主，自然伽马和自然电位曲线呈漏斗型（图 9）。

2) 斜坡带和盆底带沉积相类型。斜坡带和盆底带主要发育半深湖—深湖页岩及重力流沉积，发育火焰状构造、球枕构造、包卷层理、滑塌构造等变形构造，沟模、槽模等底模构造（图 10）且粒度分布平行于 $C=M$ 基线（图 11）。研究区重力流沉积主要发育于湖底扇中，其可进一步分为水道、水道漫溢、朵叶体和滑塌体沉积。

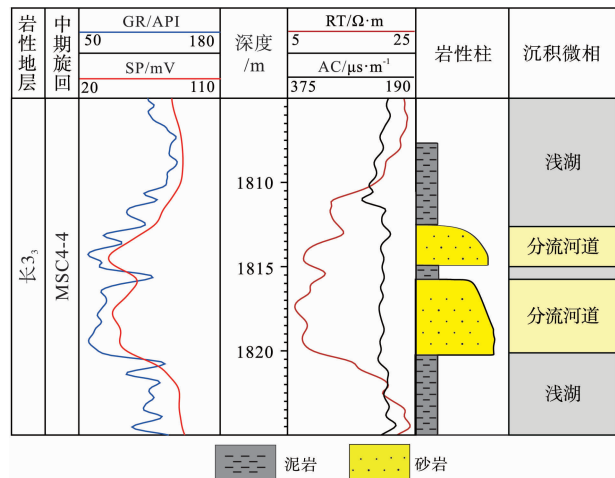


图 8 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组分流河道测井特征 (Y48 井)

Fig. 8 Logging characteristics of distributary channel of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin (Well Y48)

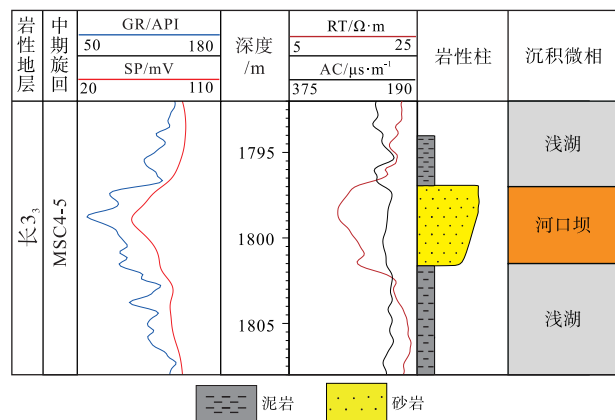
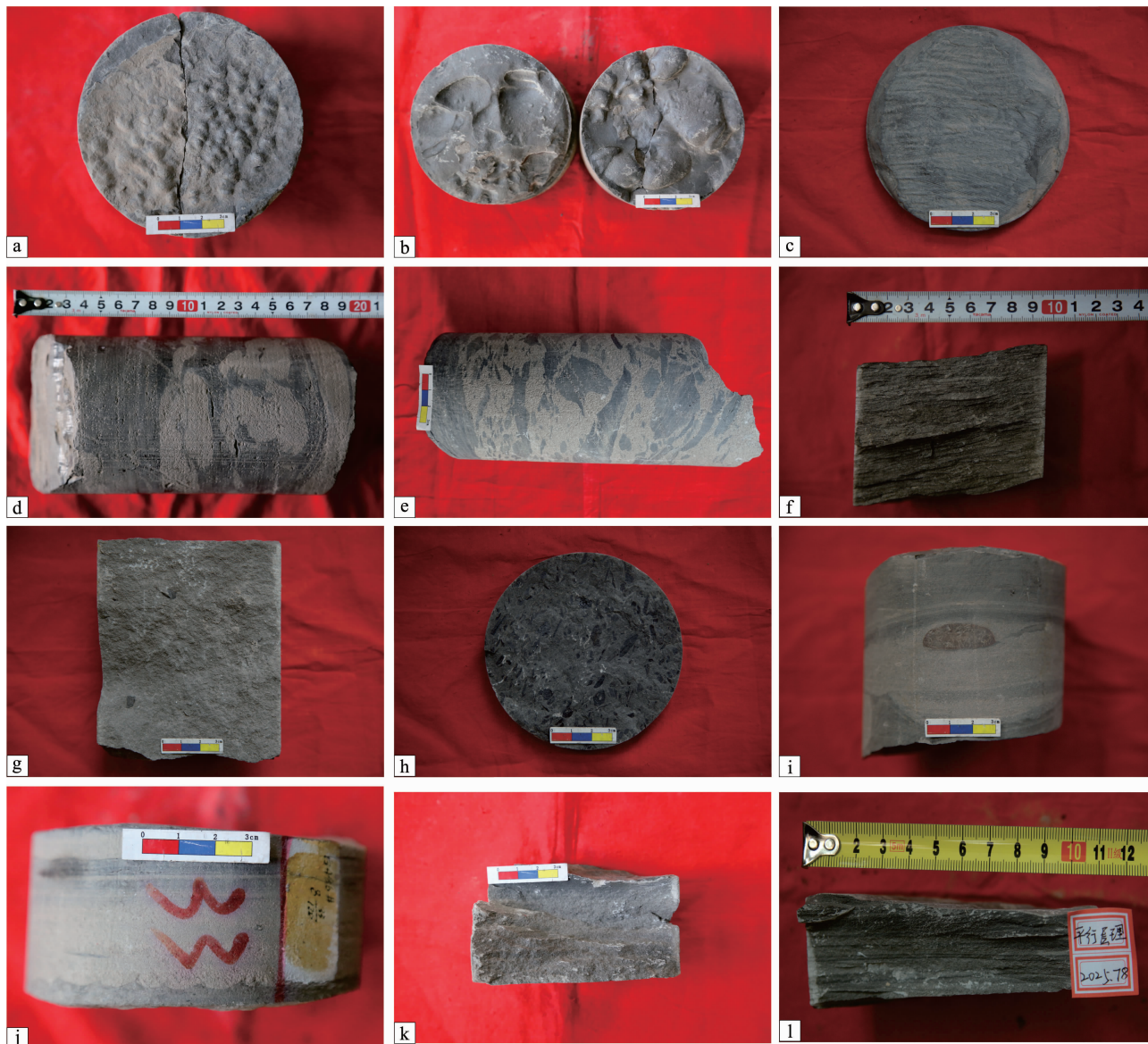


图 9 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组河口坝测井特征 (Y48 井)

Fig. 9 Logging characteristics of mouth bar of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin (Well Y48)



a—槽模, B486 井, 1982.85 m; b—重荷模, B486 井, 1984.35 m; c—沟模, X252 井, 2010.2 m; d—包卷层理, X233 井, 1950.6 m; e—泥岩撕裂屑, Z86 井, 2412.6 m; f—槽状交错层理, Z98 井, 2482.5 m; g—块状砂岩, X252 井, 1970.8 m; h—炭屑, X252 井, 2009.5 m; i—红色泥砾, X252 井, 2011.95 m; j—火焰状构造, B486 井, 1984.95 m; k—楔状层理, B486 井, 1996.2 m; l—平行层理, C98 井, 2025.78 m

图 10 庆城油田西 233 区块延长组沉积构造特征

Fig. 10 Sedimentary structure features of the Yanchang Formation of Xi 233 area in Qingcheng Oilfield

水道为湖底扇沉积物重力流的输送通道,可进一步细分为主水道和分支水道,其中主水道与浅水区的三角洲前缘相连接,是湖底区域沉积物重力流的主要运移通道。岩性以厚层块状细砂岩和粉细砂岩为主,砂体厚度一般大于 4 m, SP 曲线负异常, GR 曲线呈高幅平直箱型或钟型(图 12)。分支水道为主水道搬运过程中地形坡度突然变缓,重力流能

量衰减而分叉形成,岩性以中—薄层块状细砂岩为主,砂体厚度明显小于主水道,多为 1~4 m。SP 曲线负异常, GR 曲线以中高幅钟型为主(图 13)。

水道漫溢分布于主水道或分支水道两侧,岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,发育中—薄层递变层理、砂泥互层、波状层理和小型交错层理,常夹薄层灰黑色泥岩。砂体厚度一般为 0.1~2 m。SP 曲

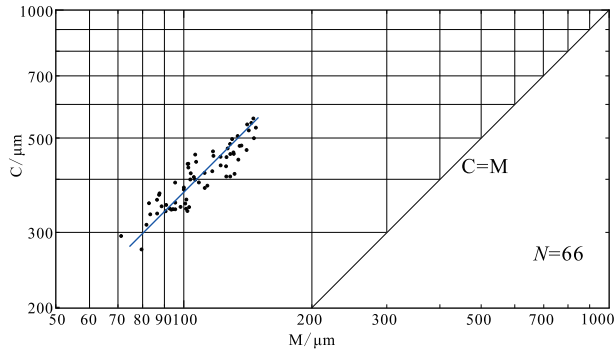


图 11 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组样品 C-M 图
Fig. 11 C-M map of samples of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin

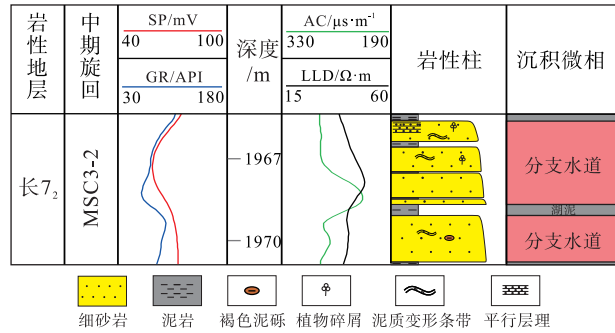


图 13 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组分支水道测井特征 (X233 井)
Fig. 13 Logging characteristics of branch channels of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin (Well X233)

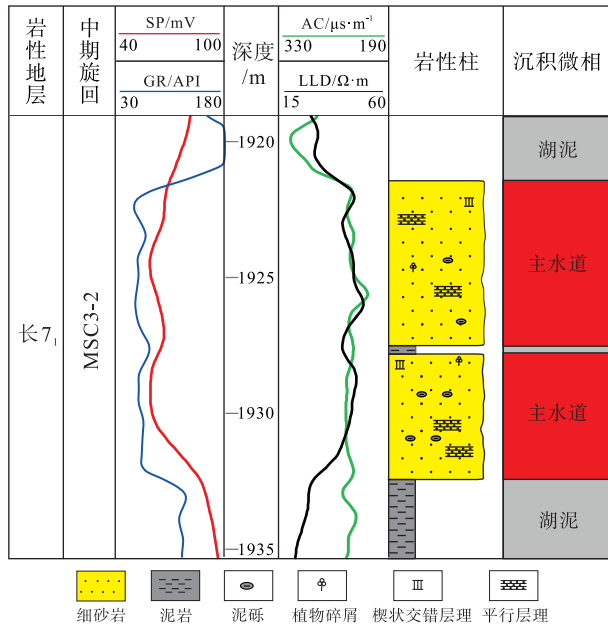


图 12 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组主水道测井特征 (X233 井)
Fig. 12 Logging characteristics of the main channel of Yanchang Formation in Xi233 area, Ordos Basin (Well X233)

线低幅负异常, GR 曲线呈中低幅齿化钟型或指状。

朵叶体为重力流水道前端撒开形成的朵叶状沉积体。根据朵叶不同位置的岩性和砂体厚度特征, 可进一步划分为朵叶主体和朵叶侧缘 2 种沉积微相。朵叶主体主要位于朵叶轴部, 岩性以细砂岩和粉砂岩为主, 主要发育块状构造, 可见交错层理。垂向上以反韵律为主要特征。砂体厚度一般大于 1.5 m, 但总体上小于主水道厚度。SP 曲线负异常, GR 曲线呈高幅漏斗型。朵叶侧缘主要位于朵

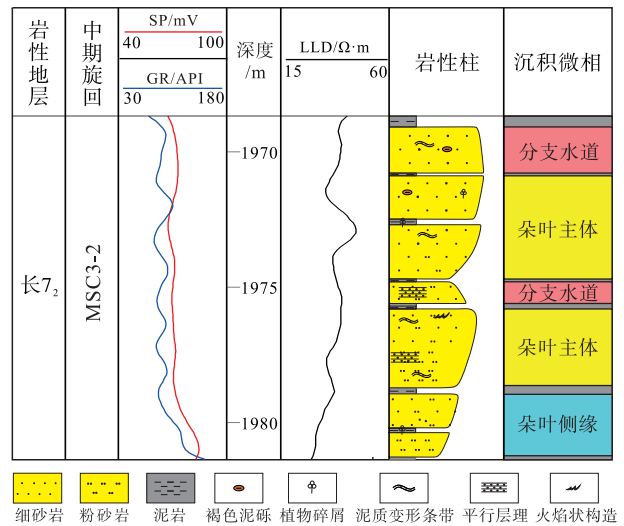


图 14 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组朵叶体测井特征 (X233 井)

Fig. 14 Logging characteristics of lobe of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin (Well X233)

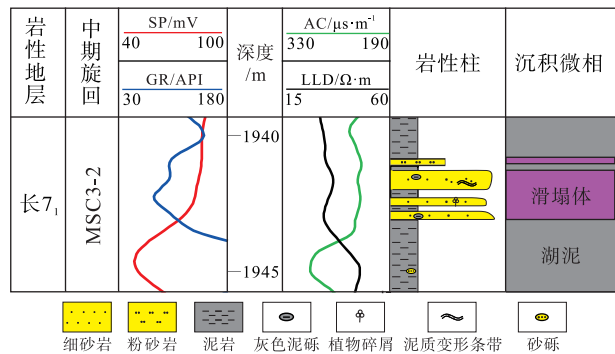
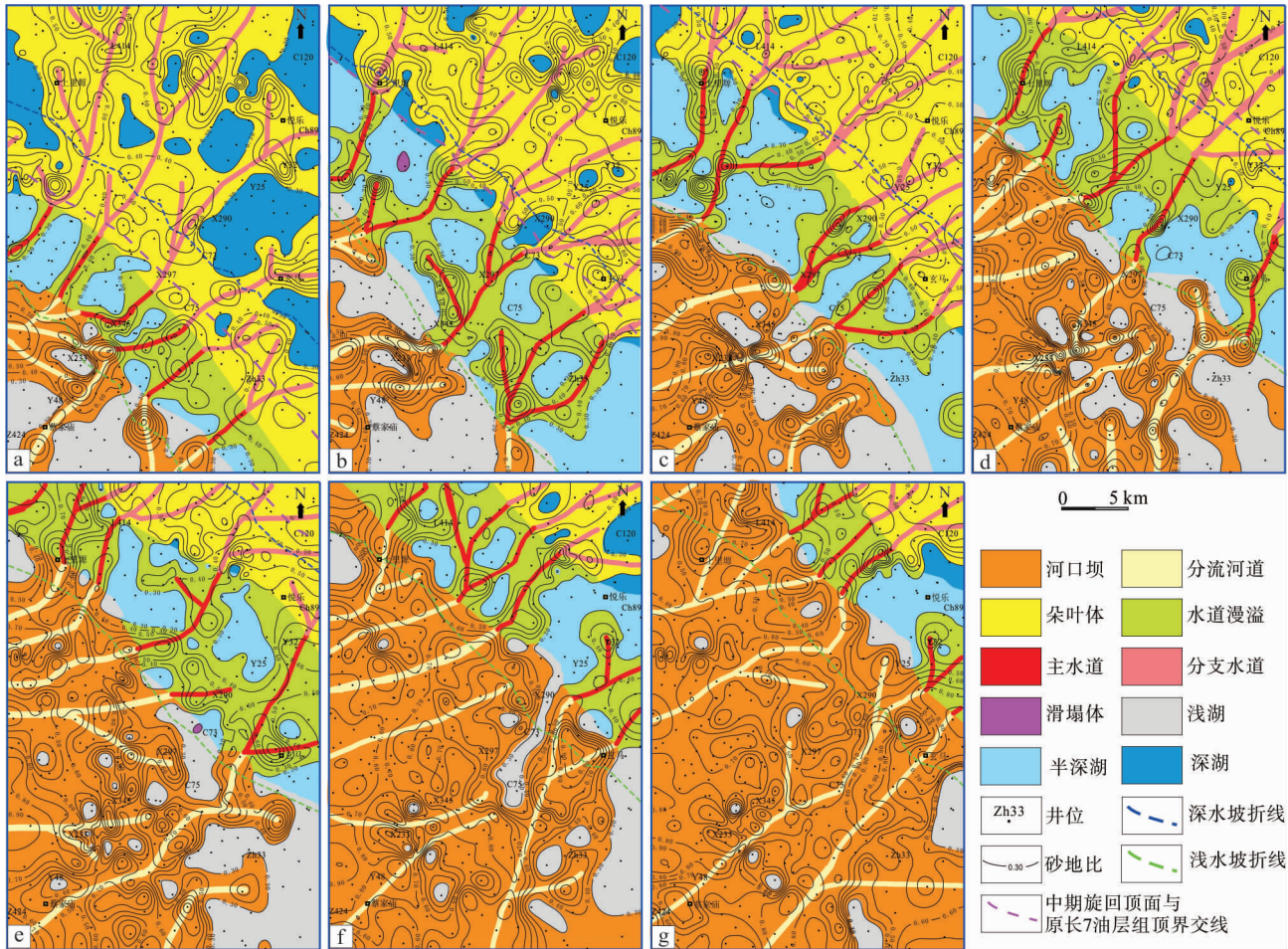


图 15 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组滑塌体测井特征 (X233 井)

Fig. 15 Logging characteristics of slump of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin (Well X233)



a—MSC4-1; b—MSC4-2; c—MSC4-3; d—MSC4-4; e—MSC4-5; f—MSC4-6; g—MSC4-7

图 17 鄂尔多斯盆地西 233 区块延长组 LSC4 内部中期旋回沉积相平面分布图

Fig. 17 Plane distribution of sedimentary facies of each mid-stage cycle in LSC4 of the Yanchang Formation in Xi 233 area, Ordos Basin

砂泥互层，单期砂体厚度一般小于 2 m。在斜坡下部和盆底带近端(图 16-b 的蓝色虚线为分界线)，发育湖底扇朵叶体(图中范围为砂地比大于 0.3 的区域)，由多期反韵律砂体组成，单期朵叶体厚度为 1.5~4 m，叠合厚度可大于 18 m，朵叶体内部可见分支水道(次级供水水道)；在盆底带远端(研究区东北部位)，以深湖泥岩夹薄层滑塌透镜体砂岩沉积为主。该中期旋回沉积大部分属于原长 7 油层组的范畴(图 16-b 中的粉色虚线的东北部分)。

在 MSC3-3 沉积时期，沉积物继续向湖推进，浅水坡折线(图 16-c 中绿虚线)和深水坡折线(图 16-c 中蓝虚线)亦向湖推进，研究区内三角洲面积增大，朵叶体的规模大于 MSC3-2。

LSC4 长期旋回包括 7 个中期旋回。从图 17 可以看出，从 MSC4-1 至 MSC4-7，沉积物持续向湖推进，研究区三角洲范围不断扩大，浅水坡折线(图 17 中绿虚线)和深水坡折线(图 17 中蓝虚线)亦不断向湖推进。沉积相在不同地貌单元的分布样式不变，即浅水区—斜坡顶部为三角洲沉积，斜坡中上部以重力流水道为主，斜坡下部—盆底带近端发育湖底扇沉积，盆底带远端以深湖泥岩夹薄层透镜体砂岩为主。

在 LSC4 长期旋回沉积中，只有部分沉积属于原长 7 油层组的范畴。MSC4-1 在研究区仅有一半的区域属于原长 7 油层组(图 17 中以粉色线为界的东北区域)，从 MSC4-2 到 MSC 4-5，原长 7 油层组范围逐渐减小，MSC4-5 旋回仅在研究区东北

角属于原长7油层组, MSC4-6和MSC4-7在研究区已不包含原长7油层组地层。

从上分析可知,在斜坡带中上部,主要发育重力流主水道和水道漫溢沉积,部分水道间发育滑塌沉积。深水坡折带附近是重力流的主要沉积区,发育分支水道和朵叶体沉积。盆底带远端以深湖泥岩沉积为主,零星发育滑塌体沉积。作为穿时的原长7油层组,其沉积底形主要为斜坡中下部至湖底(近端和远端),以湖底扇朵叶体(含分支水道)沉积和深湖页岩为主。换言之,原长7油层组由多个中期旋回沉积时期在斜坡中下部至湖底的湖底扇朵叶体和深湖页岩组成,形成了进积式叠置样式的页岩油夹层。传统的平行“原长7油层组”底面的水平井钻采方式会钻遇多期层间泥岩隔层,导致砂体钻遇率低;调整为顺着进积朵叶体倾斜方向的水平井钻采方式,将明显提高水平井砂体钻遇率,从而改善夹层型页岩油开发效果。

4 结论

1) 在鄂尔多斯湖盆中心区,延长组原长 8_1 — 8_2 砂组地层向湖盆中心呈进积叠置样式,可分为2个长期基准面旋回和10个中期基准面旋回。

2) 在每一个进积式中期旋回内,向盆地方向的古地貌依次为浅水带、斜坡带和盆底带。浅水带主要发育三角洲沉积;斜坡带中上部主要发育条带状主水道沉积,水道间局部发育滑塌沉积;斜坡下部和盆底带近端发育朵叶体沉积;盆底带远端主要为深湖页岩夹透镜状滑塌体沉积。

3) 原长7油层组页岩层系为一套穿时地层。延长组的夹层型页岩油储集层由重力流沉积砂体组成,主要为朵叶体沉积。

参考文献 (References)

陈飞,胡光义,孙立春,樊太亮,高志前,于喜通,庞正炼,李让彬. 2012. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组层序地层格架内沉积相特征与演化. 古地理学报, 14(3): 321-330. [Chen F, Hu G Y, Sun L C, Fan T L, Gao Z Q, Yu X T, Pang Z L, Li R B. 2012. Characteristics of sedimentary facies and evolution in sequence stratigraphic framework of the Upper Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 14(3): 321-330]

陈林,陆永潮,邢凤存,胡小辉,杨帅,王超. 2015. 鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层特征及充填演化模式. 中南大学学报(自然科学

学版), 46(6): 2196-2206. [Chen L, Lu Y C, Xing F C, Hu X H, Yang S, Wang C. 2015. Sequence stratigraphy characteristics and filling evolution model of Yanchang Formation in southern Ordos Basin. Journal of Central South University (Science and Technology), 46(6): 2196-2206]

崔景伟,朱如凯,徐旺林,孙远实,毛治国,白斌. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组等时地层对比方案与沉积新认识. 古地理学报, 25(1): 93-104. [Cui J W, Zhu R K, Xu W L, Sun Y S, Mao Z G, Bai B. 2023. New cognition and isochronous stratigraphic division scheme of the Yanchang Formation sedimentation in Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(1): 93-104]

崔龙涛,冯栋,秦雁群,彭轶东. 2013. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长7古地貌与砂体分布特征. 岩性油气藏, 25(5): 65-69. [Cui L T, Feng D, Qin Y Q, Peng Y D. 2013. Palaeogeomorphology reconstruction and sand body distribution of Chang 7 reservoir in Zhenbei area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs, 25(5): 65-69]

冯雪,高胜利,刘永涛,王秀珍. 2021. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组三角洲前缘前积结构特征. 岩性油气藏, 33(6): 48-58. [Feng X, Gao S L, Liu Y T, Wang X Z. 2021. Characteristics of delta front progradation structure of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs, 33(6): 48-58]

付金华,郭正权,邓秀芹. 2005. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义. 古地理学报, 7(1): 34-44. [Fu J H, Guo Z Q, Deng X Q. 2005. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 7(1): 34-44]

付金华,刘显阳,李士祥,郭茂恒,周新平,杨伟伟. 2021. 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. 中国石油勘探, 26(5): 1-11. [Fu J H, Liu X Y, Li S X, Guo Q H, Zhou X P, Yang W W. 2021. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. China Petroleum Exploration, 26(5): 1-11]

付锁堂,付金华,牛小兵,李士祥,吴志宇,周新平,刘江艳. 2020. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 41(7): 777-795. [Fu S T, Fu J H, Niu X B, Li S X, Wu Z Y, Zhou X P, Liu J Y. 2020. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng oilfield. Acta Petrolei Sinica, 41(7): 777-795]

付锁堂,金之钧,付金华,李士祥,杨伟伟. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组长7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义. 石油学报, 42(5): 561-569. [Fu S T, Jin Z J, Fu J H, Li S X, Yang W W. 2021. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development. Acta Petrolei Sinica, 42(5): 561-569]

傅强,李益. 2006. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长8-长7油层组高分辨率层序地层格架及其地质意义. 现代地质, 20(4): 579-584. [Fu Q, Li Y. 2006. The High-resolution sequence stratigraphy framework and its geological significance of Triassic Yanchang For-

- mation Ch8-Ch7, Ordos Basin. *Geoscience*, 20(4): 579-584]
- 郭彦如, 刘化清, 李相博, 完颜容, 郑希民. 2008. 大型坳陷湖盆层序地层格架的研究方法体系: 以鄂尔多斯盆地中生界延长组为例. *沉积学报*, 26(3): 384-391. [Guo Y R, Liu H Q, Li X B, Wanyan R, Zheng X M. 2008. Method system on studying sequence stratigraphic framework of large sagged lacustrine basin: a case study from Mesozoic Yanchang Fm, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(3): 384-391]
- 惠潇, 侯云超, 喻建, 龙盛芳, 郭懿莹, 刘永涛, 张杰. 2022. 大型陆相坳陷湖盆深湖区前积型地震地层特征及砂体分布规律: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中段为例. *沉积学报*, 40(3): 787-800. [Hui X, Hou Y C, Yu J, Long S F, Guo Y X, Liu Y T, Zhang J. 2022. Progradational seismic strata features and distribution of sandstone in the deep-water area of a large-scale lacustrine depression basin: a case study of the middle Yanchang Formation in Longdong, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 787-800]
- 李凤杰, 王多云, 张庆龙, 徐旭辉. 2006. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析. *沉积学报*, 24(4): 549-554. [Li F J, Wang D Y, Zhang Q L, Xu X H. 2006. Sedimentary facies characteristic and sequence stratigraphy analysis of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 549-554]
- 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 冯斌, 葛稳稳, 孙玉玺, 于星. 2022. 深水重力流水道一朵叶体系形成演化及储层分布: 以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例. *石油与天然气地质*, 43(4): 917-928. [Li H, He Y B, Tan M T, Feng B, Ge W W, Sun Y X, Yu X. 2022. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: a case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 917-928]
- 李慧琼, 蒲仁海, 王大兴, 赵玉华, 张杰, 赵德勇. 2014. 鄂尔多斯盆地延长组地震前积反射的地质意义. *石油地球物理勘探*, 49(5): 985-996, 823. [Li H Q, Pu R H, Wang D X, Zhao Y H, Zhang J, Zhao D Y. 2014. Progradational reflection from lacustrine Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Oil Geophysical Prospecting*, 49(5): 985-996, 823]
- 李慧琼. 2018. 陇东地区延长组前积层序及有利储层预测. 西北大学博士学位论文: 1-114. [Li H Q. 2018. Progradational sequence and reservoir prediction of Yanchang Formation in Longdong area. Doctoral dissertation of Northwest University: 1-114]
- 李相博, 郭彦如, 刘化清, 完颜容, 林卫东, 廖建波, 马玉虎, 程玉红. 2006. 浅谈小波分析在鄂尔多斯盆地延长组层序地层划分中的应用. *天然气地球科学*, 17(6): 779-782. [Li X B, Guo Y R, Liu H Q, Wanyan R, Lin W D, Liao J B, Ma Y H, Cheng Y H. 2006. The application of wavelet analysis in sequence stratigraphic subdivision of the Yanchang Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 17(6): 779-782]
- 刘化清, 李相博, 完颜容, 魏立花, 廖建波. 2011. 鄂尔多斯盆地长 8 油层组古地理环境与沉积特征. *沉积学报*, 29(6): 1086-1095. [Liu H Q, Li X B, Wanyan R, Wei L H, Liao J B. 2011. Palaeogeographic and sedimentological characteristics of the Triassic Chang 8, Ordos Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(6): 1086-1095]
- 刘化清, 袁剑英, 李相博, 完颜容, 廖建波. 2007. 鄂尔多斯盆地延长组湖盆演化及其成因分析. *岩性油气藏*, 19(1): 52-56. [Liu H Q, Yuan J Y, Li X B, Wanyan R, Liao J B. 2007. Lake basin evolution of Ordos Basin during Middle-Late Triassic and its origin analysis. *Lithologic Reservoirs*, 19(1): 52-56]
- 刘少峰, 杨士恭. 1997. 鄂尔多斯盆地西缘南北差异及其形成机制. *地质科学*, 32(3): 397-408. [Liu S F, Yang S G. 1997. The differences between the southwestern and the northwestern Ordos Basin and their forming mechanism. *Science Geologica Sinica*, 32(3): 397-408]
- 刘自亮, 朱筱敏, 廖纪佳, 陈杰. 2013. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组层序地层学与砂体成因研究. *地学前缘*, 20(2): 1-9. [Liu Z L, Zhu X M, Liao J J, Chen J. 2013. Sequence stratigraphy and genesis of sand bodies of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern margin of Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 1-9]
- 吕奇奇, 付金华, 罗顺社, 李士祥, 周新平, 蒲宇新, 闫红果. 2022. 坳陷湖盆重力流水道一朵叶复合体沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长 7 段为例. *石油勘探与开发*, 49(6): 1143-1156. [Lyu Q Q, Fu J H, Luo S S, Li S X, Zhou X P, Pu Y X, Yan H G. 2022. Sedimentary characteristics and model of gravity flow channel-lobe complex in a depression lake basin: a case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1143-1156]
- 倪新锋, 陈洪德, 韦东晓. 2007. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层格架与油气勘探. *中国地质*, 34(1): 73-80. [Ni X F, Chen H D, Wei D X. 2007. Sequence stratigraphic framework of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and petroleum exploration. *Geology in China*, 34(1): 73-80]
- 庞军刚, 常梁杰, 国吉安, 楚美娟, 马治国, 王梓萱, 王欣月. 2022. 鄂尔多斯盆地南部延长组湖相水道一朵状体浊积扇沉积模式. *西北大学学报(自然科学版)*, 52(1): 144-158. [Pang J G, Chang L J, Guo J A, Chu M J, Ma Z G, Wang Z X, Wang X Y. 2022. Depositional model of deep lacustrine sediment gravity flow deposits with well developed channels and lobes in Yanchang Formation, southern Ordos Basin. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 52(1): 144-158]
- 屈红军, 李文厚, 梅志超, 陈全红. 2003. 论层序地层学与含油气系统在油气勘探中的联系: 以鄂尔多斯中生代盆地为例. *地质论评*, 49(5): 495-500. [Qu H J, Li W H, Mei Z C, Chen Q H. 2003. Relationship between sequence stratigraphy and petroleum system in oil and gas exploration: an example in the Mesozoic Ordos Basin. *Geological Review*, 49(5): 495-500]
- 宋凯, 吕剑文, 杜金良, 王宏科. 2002. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系. *古地理论*, 4(3): 59-

66. [Song K, Lyu J W, Du J L, Wang H K. 2002. Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the upper Triassic in the central Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 4(3): 59-66]
- 王昌勇, 郑荣才, 李士祥, 韩永林, 王成玉, 史建南, 周祺. 2010. 鄂尔多斯盆地早期构造演化与沉积响应: 以姬塬地区长8~长6油层组为例. *中国地质*, 37(1): 134-143. [Wang C Y, Zheng R C, Li S X, Han Y L, Wang C Y, Shi J N, Zhou Q. 2010. Early tectonic evolution and sedimentary response of Ordos Basin: a case study of Interval 8~Interval 6 oil layers of Yanchang Formation in Jiyuan area. *Geology in China*, 37(1): 134-143]
- 王力, 崔攀峰. 2003. 鄂尔多斯盆地西峰油田长8沉积相研究. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 18(6): 26-30, 89-90. [Wang L, Cui P F. 2003. Study on the sedimentary facies of Chang 8 oil-bearing bed in Xifeng oilfield, Eerduosi. *Journal of Xi'an Shiyou University* (Natural Science Edition), 18(6): 26-30, 89-90]
- 武富礼, 李文厚, 李玉宏, 席胜利. 2004. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化. *古地理学报*, 6(3): 307-315. [Wu F L, Li W H, Li Y H, Xi S L. 2004. Delta sediments and evolution of the Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 6(3): 307-315]
- 熊林芳, 刘池洋, 王建强, 张东东. 2015. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积层序研究现状及问题. *地层学杂志*, 39(3): 345-350. [Xiong L F, Liu C Y, Wang J Q, Zhang D D. 2015. Depositional sequence of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Journal of Stratigraphy*, 39(3): 345-350]
- 杨俊杰, 李克勤, 张东生, 张世富, 刘世安. 1992. 中国石油地质志 卷12 长庆油田. 北京: 石油工业出版社, 47-55. [Yang J J, Li K Q, Zhang D S, Zhang S F, Liu S A. 1992. *China Petroleum Geology Volume 12 Changqing Oilfield*. Beijing: Petroleum Industry Press, 47-55]
- 杨雷, 梅志超, 熊伟. 2001. 陕北地区延长组层序地层划分与含油性. *古地理学报*, 3(3): 83-88. [Yang L, Mei Z C, Xiong W. 2001. Stratigraphic sequence and petroliferous characters of Yanchang group in north Shaanxi Province. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 3(3): 83-88]
- 杨友运, 文晓峰, 张普成, 王鹏志. 2005. 鄂尔多斯盆地延长组沉积层序识别及测井响应特征. *测井技术*, 29(4): 341-344, 388. [Yang Y Y, Wen X F, Zhang P C, Wang P Z. 2005. Sedimentary sequence identification and log responses in Yanchang Formation, Ordos Basin. *Well Logging Technology*, 29(4): 341-344, 388]
- 杨哲翰, 刘江艳, 吕奇奇, 罗顺社, 周新平, 李士祥, 张严, 张孝国. 2023. 古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例. *地质科技通报*, 42(2): 146-158. [Yang Z H, Liu J Y, Lyu Q Q, Luo S S, Zhou X P, Li S X, Zhang Y, Zhang X G. 2023. Paleogeomorphological restoration and its control on gravity flow sand bodies: a case study of the Chang 7₃ submember of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(2): 146-158]
- 张凤奎, 张忠义, 张林. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层特征新认识. *地层学杂志*, 32(1): 99-105. [Zhang F K, Zhang Z Y, Zhang L. 2008. New sequence stratigraphic observations of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Journal of Stratigraphy*, 32(1): 99-105]
- 张家强, 李士祥, 李宏伟, 周新平, 刘江艳, 郭睿良, 陈俊霖, 李树同. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探: 以城页水平井区长7₃小层为例. *石油学报*, 42(5): 570-587. [Zhang J Q, Li S X, Li H W, Zhou X P, Liu J Y, Guo R L, Chen J L, Li S T. 2021. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deep-water oil and gas exploration in Ordos Basin: a case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region. *Acta Petroleologica Sinica*, 42(5): 570-587]
- 赵红格. 2004. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化. 西北大学博士学位论文: 1-143. [Zhao H G. 2004. Structural characteristics and the evolution in western Ordos Basin. Doctoral dissertation of Northwest University: 1-143]
- 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. *沉积学报*, 19(2): 249-255. [Zheng R C, Peng J, Wu C R. 2001. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 249-255]
- 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 孙勃, 廖纪佳, 惠潇. 2013. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例. *地学前缘*, 20(2): 19-28. [Zhu X M, Deng X Q, Liu Z L, Sun B, Liao J J, Hui X. 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided deltas in large-scale lacustrine: an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 19-28]
- Cross T A. 1988. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, western interior, USA. Oslo: Sea-Level Changes: an Integrated Approach. SEPM Special Publication No. 42: 371-380.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J. 2021. Sedimentary sequence evolution and organic matter accumulation characteristics of the Chang 8-Chang 7 members in the Upper Triassic Yanchang Formation, southwest Ordos Basin, central China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107751.
- Talling P J. 2013. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models. *Geosphere*, 9: 460-488.

(责任编辑 王绍华 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)