

文章编号: 1671-1505(2025)03-0611-14 DOI:10.7605/gdxb.2025.022

高精度层序格架下湖底扇沉积特征及演化： 以鄂尔多斯盆地庆北长 7 段为例*

叶定蓬¹ 何云龙¹ 侯秀林² 周 波² 王磊飞³ 张先平⁴
李国顺¹ 刘佳钰¹ 向常龙¹ 张 涵⁴ 吕德杰⁵

1 海洋地质资源湖北省重点实验室(中国地质大学(武汉)), 湖北武汉 430074

2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3 长庆油田陇东油气开发分公司, 甘肃庆阳 745000

4 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074

5 内蒙古自治区自然资源厅综合保障中心, 内蒙古呼和浩特 010041

摘要 湖底扇是近年来鄂尔多斯盆地油气勘探的热点目标之一, 具有重要的油气勘探价值。湖底扇发育受到多种因素的影响, 不同地质背景下的湖底扇沉积演化特征差异性明显。本次研究以鄂尔多斯盆地延长组 7 段湖底扇为研究对象, 综合利用岩心、测井及地震等资料, 在高精度层序格架内对庆北地区长 7₁ 层序单元的湖底扇展开沉积演化分析。研究表明, 依据四级层序长 7₁ 内部岩性突变面, 长 7₁ 层序单元可划分出 5 个五级层序单元, 重点五级层序单元 7₁-5 及 7₁-4 可进一步划分出 10 个六级层序单元。本次研究识别出重力流水道、水道天然堤复合体、天然堤、朵体和朵体边缘等不同的湖底扇沉积单元。研究表明, 研究区湖底扇主要由辫状河三角洲前缘供源, 在湖平面持续下降及温暖潮湿的气候背景下, 陆源碎屑输入量高, 辫状河三角洲前缘物源供给增强, 湖盆可容纳空间下降, 湖底扇向东北方向进积, 朵体范围变大, 具有横向连片、纵向叠置的沉积特征。

关键词 长 7 段 重力流 湖底扇 沉积特征 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 叶定蓬, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为含油气盆地沉积体系分析。E-mail: 15623189702@163.com。

通讯作者简介 何云龙, 男, 1983 年生, 博士后, 副教授, 长期从事沉积物重力流沉积及其资源环境效应研究。E-mail: ylhe@cug.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Sedimentary characteristics and evolution of sublacustrine fan in high-resolution sequence stratigraphic framework: a case study of the Chang 7 Member in Qingbei area, Ordos Basin, China

YE Dingpeng¹ HE Yunlong¹ HOU Xiulin² ZHOU Bo² WANG Leifei³ ZHANG Xianping⁴
LI Guoshun¹ LIU Jiayu¹ XIANG Changlong¹ ZHANG Han⁴ LÜ Dejie⁵

1 Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

* 国家自然科学基金项目(编号: 41502102, 42072137)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41502102, 42072137)]

收稿日期: 2024-01-31 改回日期: 2024-07-16

2 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

3 Longdong Oil and Gas Development Company of Changqing Oil Field, Gansu Qingyang 745000, China

4 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

5 Comprehensive Security Center of Inner Mongolia Autonomous Region Department of Natural Resources, Hohhot 010041, China

Abstract In recent years, sublacustrine fans have emerged as a prime focus for oil and gas exploration in the Ordos Basin due to their immense potential. However, their development is influenced by multiple factors, leading to distinct sedimentary evolution patterns under varying geological settings. This study focuses on the sublacustrine fan in the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin. By integrating core, well logs, and seismic data, a detailed analysis of the sedimentary evolution of the Chang 7₁ sequence unit's sublacustrine fan in the Qingbei area was conducted within a high-resolution sequence framework. The results show that the Chang 7₁ sequence unit can be systematically divided into five distinct fifth-order sequence units, based on lithological discontinuity surfaces within the fourth-order sequence. Notably, the crucial fifth-order sequence units, 7₁-5 and 7₁-4, can be further subdivided into 10 sixth-order sequences. The present study successfully distinguished various sedimentary units within the sublacustrine fan, including gravity flow channel, channel-levee complex, levee, lobe, and lobe edge. Given the sedimentary background, the sublacustrine fan in the study area is interpreted to be mainly sourced from the braided river delta front. The results indicate that during periods of lake-level fall under warm and humid climatic conditions, increased terrigenous clastic input enhanced sediment supply from the braided river delta front, and the accommodation space of the lake basin decreased, facilitating northeastward progradation of the sublacustrine fan, with expanding depositional lobes showing distinct lateral migration patterns.

Key words Chang 7 Member, gravity flow, sublacustrine fan, sedimentary characteristics, Ordos Basin

About the first author YE Dingpeng, born in 1999, is a master degree candidate. His research direction is sedimentary system analysis of petroleum basin. E-mail: 15623189702@163.com.

About the corresponding author HE Yunlong, born in 1983, postdoctor, associate professor, has long been engaged in research on sediment gravity flow deposition and its resource and environmental effects. E-mail: ylhe@cug.edu.cn.

随着国内油气勘探逐渐向更复杂领域探索, 中国陆相湖盆深水重力流沉积储集层也引起人们的重视 (邹才能等, 2022; 谢晓军等, 2024)。湖底扇借鉴了经典海底扇模式, 认为其形成大多为三角洲前缘砂体在一定的触发机制下, 以沉积物重力流的搬运方式进入湖泊深水区而形成的扇形碎屑沉积 (王颖等, 2009)。近年来, 众多研究人员在湖底扇岩性特征、内部沉积单元构成、形成演化及沉积模式方面取得了丰富的研究成果 (王颖等, 2009; 龚承林等, 2023; 官大勇等, 2023; 王启明等, 2023; 游富粮等, 2023; 刘明成等, 2024), 指导了国内松辽盆地、渤海湾盆地、二连盆地、北部湾盆地、鄂尔多斯盆地等湖底扇的勘探开发 (Zou

et al., 2012; 张庆石等, 2014; Ma *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018; 宫立园等, 2022; 邹才能等, 2022; 刘显阳等, 2023)。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组 7 段 (简称长 7 段) 沉积时期为强烈拗陷期, 水体较深, 前人研究表明鄂尔多斯盆地长 7 段发育大规模湖底扇砂体, 但受地震数据精度、层序格架精度不够高等因素的制约, 对该区湖底扇沉积特征及演化规律的认识尚浅, 严重制约了下一步的勘探进程 (刘显阳等, 2023)。前人对鄂尔多斯盆地层序格架研究主要集中在三级和四级层序单元 (陈洪德和倪新锋, 2006; 冯烁等, 2022; 游富粮等, 2023), 而对更高精度层序格架内湖底扇的演化特征研究不足。伴

随着研究区勘探工作进一步推进，此前的层序格架精度已经不能满足当前油气开发要求。因此，本次研究在前人的三、四级层序格架基础之上，依据研究区广泛的钻井资料，划分更高精度的层序格架单元，在高精度层序格架内，精细刻画湖底扇砂体时空展布范围，查明其沉积演化过程，为下一步油气勘探提供依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地，面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大地构造位置位于秦岭北侧、华北地台西部，是在中生代华北稳定克拉通上发育起来的多期次、多旋回大型叠合盆地。盆地边缘构造作用较强，盆地主体构造较简单，主体呈现为向西倾的平缓大单斜（李相博等，2010）。依据现今的构造形态特征和基底性质，可把鄂尔多斯盆地的二级

构造单元划分为伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带、天环拗陷及西缘冲断带 6 个构造单元（图 1-A），其中伊陕斜坡面积最大，是近年来盆地开发的主要位置。盆地内部主要发育小型鼻状褶曲三级构造类型。本次研究区位于伊陕斜坡内的庆北地区，面积约为 1070 km^2 。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组发育了一套 1000 多米厚的湖相碎屑岩系，在此过程中盆地经历了初始拗陷、强烈拗陷、回返抬升、萎缩消亡 4 个完整的沉积阶段（付金华等，2013；姚泾利等，2018）。延长组自下而上可划分为长 10 至长 1 共 10 个段（图 1-B）。其中，受印支运动影响，长 7 段沉积时期处于湖盆强烈拗陷阶段，为整个延长组沉积期的最大湖泛期，水深最大，湖盆面积也达到最大（武富礼等，2004；杨华等，2010）。在西南和东北两大物源体系的影响下，湖盆内半深湖—深湖环境下发育了大规模湖底扇沉积。

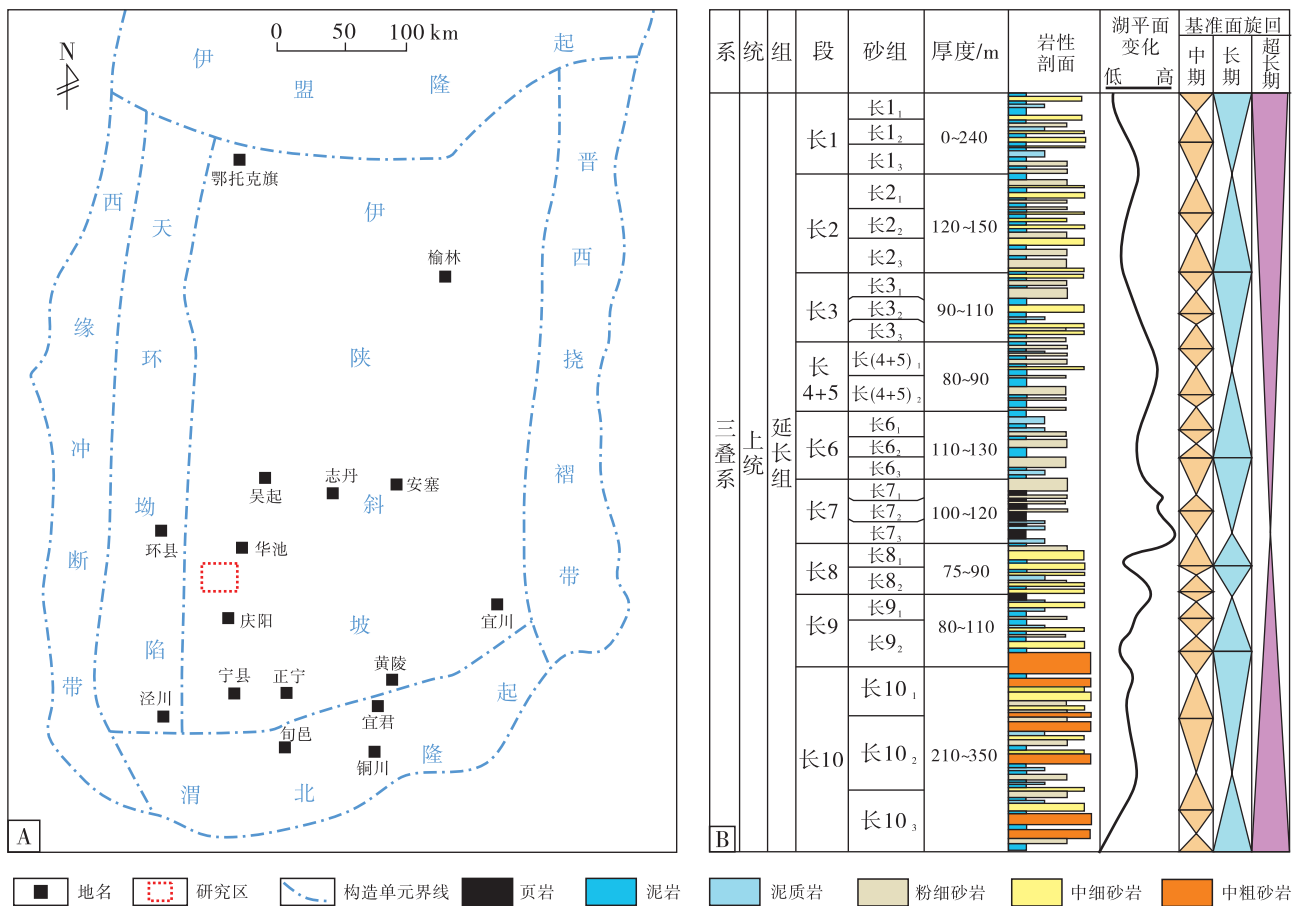


图 1 鄂尔多斯盆地庆北地区位置 (A) (据刘芬等, 2015, 修改) 和延长组地层特征 (B) (据姚泾利等, 2018, 修改)

Fig. 1 Location of Qingbei area, Ordos Basin (A) (modified from Liu *et al.*, 2015) and stratigraphic characteristics of the Yanchang Formation (B) (modified from Yao *et al.*, 2018)

2 层序地层格架

等时层序地层格架能有效揭示格架内沉积充填过程、时空分布特征及成因机制，基于层序地层学的高精度层序地层学分析方法可以有效应用于油气勘探（解习农等，2017；朱筱敏等，2023）。四级层序是高精度层序地层格架的基本单元，是三级层序内相对容易识别的次一级沉积基准面变化形成的沉积旋回，与高频的海或湖平面变化、物源供给和构造沉降的叠加相关（赵建华等，2014）。同时，有研究表明，层序级别越低、精度越高的界面，构造作用对层序界面的直接影响越低，沉积作用对层序界面的影响更加明显（夏景生等，2017）。

为了更精细地刻画湖底扇的沉积演化过程，本次研究建立了研究区内的高精度层序地层格架。结果表明，鄂尔多斯盆地长7段共发育3个四级层序单元，从下至上为长7₃、长7₂和长7₁。在 seismic 上可以清楚追踪识别出四级层序界面，长7₃层序顶界面表现为强振幅、连续性较好；长7₂层序顶界

面为中强振幅、连续性较好(图2)。在庆北地区长7₁层序发现有大套砂岩，是页岩油有利储集层的发育层系。因此，本次研究将长7₁层序作为研究区的重点研究层段。

在长7₁四级层序中，划分出5个五级层序，从下往上为7₁-5至7₁-1五级层序。依据测井曲线及岩心特征，主要以泥岩为五级层序界面标志(表1)。在7₁-5至7₁-1这5个五级层序中，7₁-5和7₁-4层序单元相比于其他3个层序单元发育大规模厚层重力流砂体。为了在更高的层序格架精度下研究湖底扇沉积特征，对于7₁-5和7₁-4重点层序单元，依据岩心观察和测井曲线特征，识别更精细的岩性测井特征突变面，将7₁-5和7₁-4层序分别划分出5个六级层序单元，从下往上为7₁-5-5至7₁-4-1共10个六级层序单元(图3)。

3 湖底扇沉积特征

3.1 沉积构造特征

对鄂尔多斯盆地长7段14口单井岩心观察发

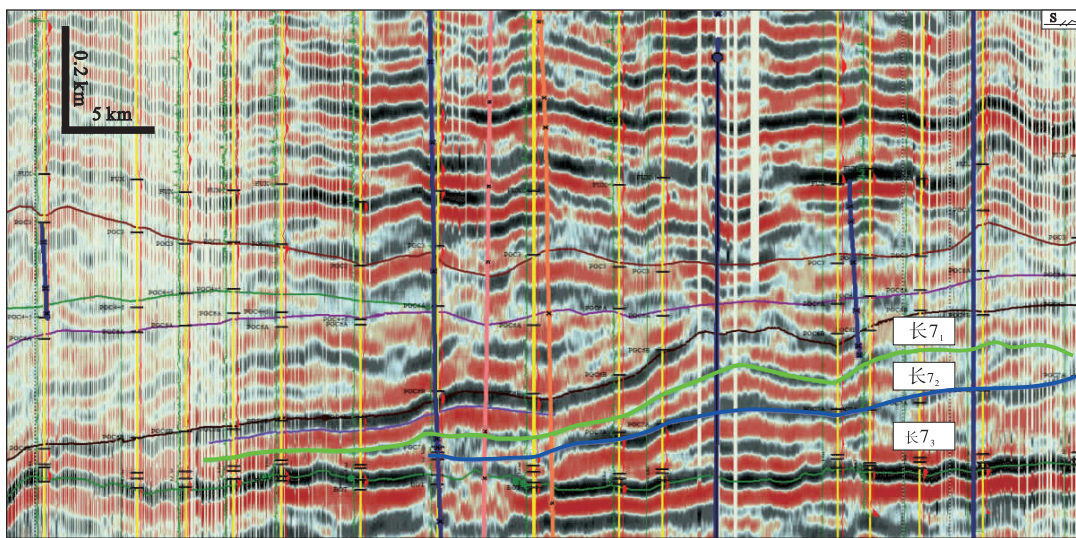


图2 鄂尔多斯盆地庆北地区延长组典型地震剖面

Fig. 2 Typical seismic profile of the Yanchang Formation, Qingbei area, Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地庆北地区长7段五级层序格架特征、识别标志

Table 1 Characteristics and identification marks of the fifth-level sequence framework of the Chang 7 Member in Qingbei area, Ordos Basin

五级层序界面	特征、识别标志
7 ₁ -5 顶界面	界面下为中高 GR 值薄层泥岩；界面上为中 GR 值箱形泥岩
7 ₁ -4 顶界面	界面下为中低 GR 值砂岩；界面上为中高 GR 值泥岩
7 ₁ -3 顶界面	界面下为中高 GR 值薄层泥岩；界面上为中 GR 值箱形泥岩
7 ₁ -2 顶界面	界面下为中高 GR 值箱形泥岩；界面上为中高 GR 值砂岩

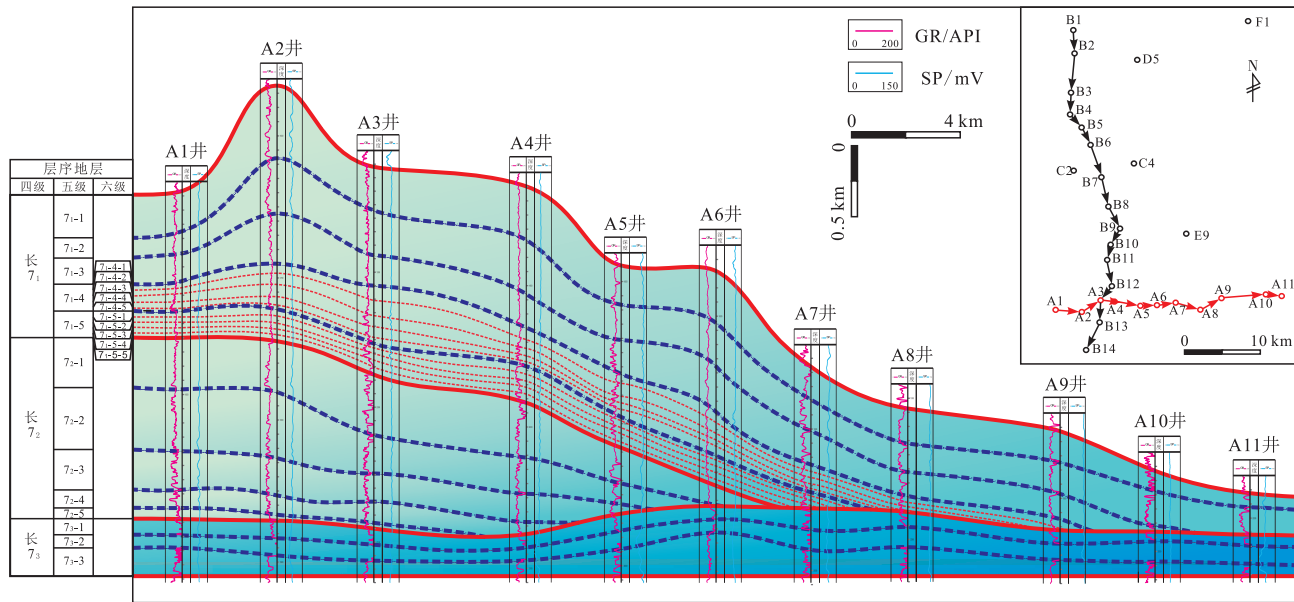


图 3 鄂尔多斯盆地庆北地区长 7 段连井层序格架

Fig. 3 Sequence framework of connecting wells of the Chang 7 Member in Qingbei area, Ordos Basin

现，研究区湖底扇砂岩有不同的流体类型，主要有高密度浊流、低密度浊流及碎屑流 3 种类型，不同类型砂岩之间沉积构造表现出明显的差异（张自力等，2023）。

高密度浊流沉积物整体显示微弱正粒序，粗粒块状沉积物中可见砾石呈叠瓦状定向排列或牵引毯作用形成的分层构造，指示流体分层搬运和垂向叠置的卸载特征（鲜本忠等，2016）。高密度浊流在研究区主要表现为典型的内部均一、无明显沉积构造、无显著粒序变化的砂岩，或块状构造夹少量泥质撕裂碎片的砂岩（图 4-A，4-B）；低密度浊流少见完整的鲍马序列，研究区可见典型的交错层理、沟模及不完整的鲍马序列（图 4-C 至 4-E）；碎屑流可分为砂质碎屑流和泥质碎屑流（Pickering *et al.*, 2015; McHargue *et al.*, 2021），在鄂尔多斯盆地广泛发育砂质碎屑流沉积，岩性以细砂岩、粉砂岩为主，整体呈块状，无层理，单层砂体厚度大，一般大于 0.5 m，可见变形构造、包卷构造或含有较多砾石的含砾构造等典型碎屑流沉积构造（图 4-F 至 4-L）。

3.2 沉积相类型及特征

系统的湖底扇沉积特征分析表明，研究区长 7 段主要发育朵体根部有重力流水道的非水道化型浊积朵体叠置而成的湖底扇系统（杨仁超等，2014；

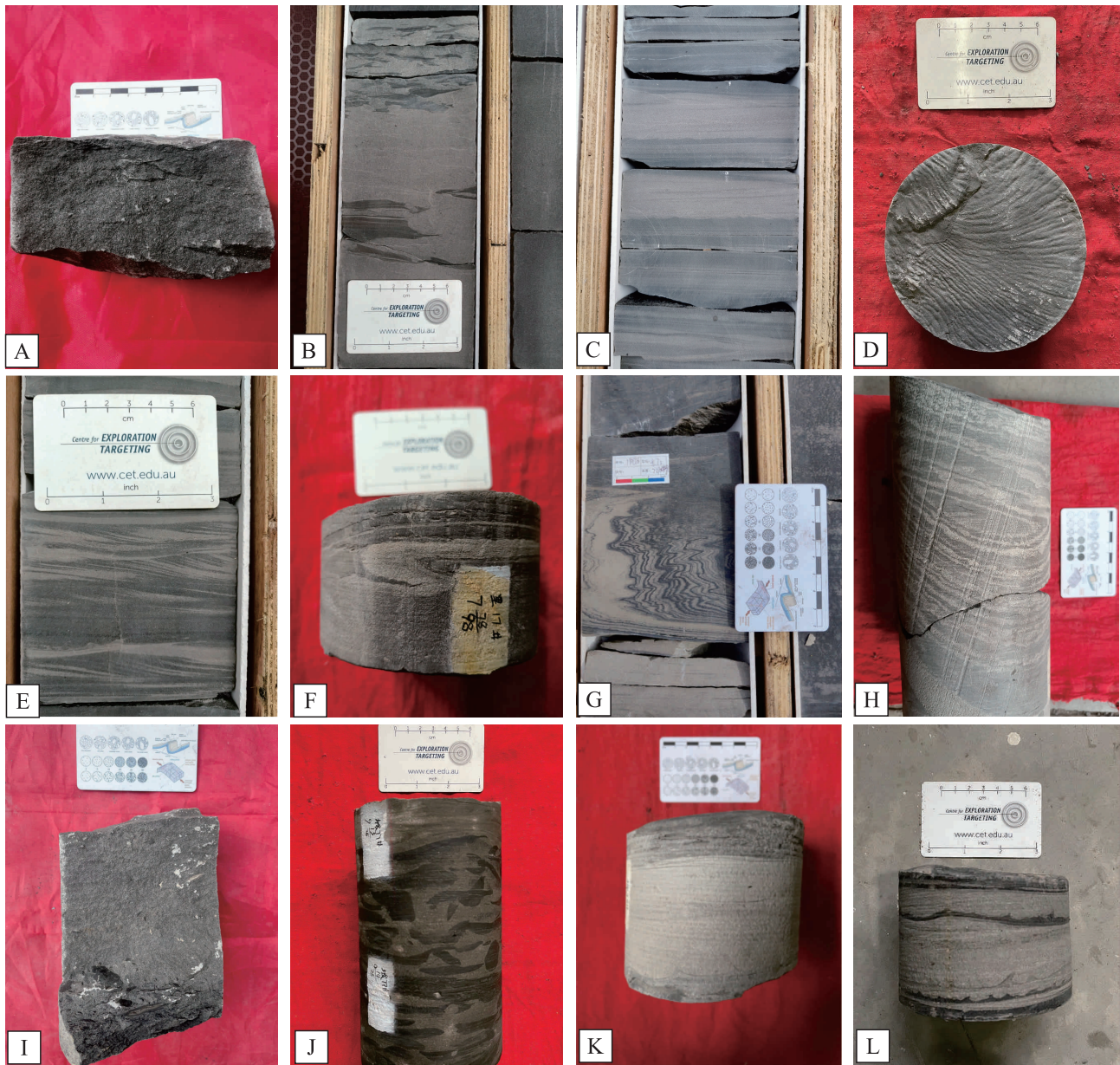
谈明轩等，2016）。根据经典的海底扇模型结合重力流沉积单元划分方案，本研究认为在庆北长 7 段湖底扇中，重力流成因的补给水道与湖底扇朵叶体为湖底扇沉积体基本构成单元。整体而言，与湖底扇水道—天然堤沉积类似，湖底扇扇体沉积也包含不同级次的朵叶构型单元。湖底扇朵叶体系细分为内扇、中扇及外扇；在内扇、中扇及外扇中，还细分不同沉积特征的沉积单元，内扇有重力流水道沉积单元，中扇有水道—天然堤复合体、天然堤、朵体沉积单元，外扇为朵体边缘沉积单元。

3.2.1 内扇亚相

重力流水道发育于湖底扇根部，以重力碎屑流沉积为主，自然伽马曲线表现为低自然伽马值（<70 API）、宽幅箱型（图 5-A），岩性以厚—中层块状细砂岩和含砾细砂岩为主，内部无显著粒序变化，颗粒支撑，分选较差，磨圆度一般，体现出沉积物快速沉积的特点，发育砂岩侵蚀砂岩构造，部分含有少量泥质撕裂碎片，偶见砂岩侵蚀泥岩。

3.2.2 中扇亚相

水道—天然堤复合体沉积物粒度较重力流水道细，以块状细砂岩夹粉砂岩或少量泥岩薄层为主，分选一般，自然伽马曲线表现为中低值（70~110 API）、低幅齿化箱型+钟型（图 5-B），发育砂岩侵蚀泥岩构造，偶见砂岩侵蚀砂岩。



A—D5 井, 2232.04~2229.5 m, 灰黑色块状细砂岩, 层面云母碎片含量 5%~10%, 中部夹薄层泥岩, 厚度不超过 3 cm, 局部含炭屑;
 B—F1 井, 2002.11~2001.84 m, 灰色块状细砂岩, 中部发育泥质撕裂条带, 条带中发育水平层理; C—F1 井, 1997.18~1996.95 m, 可见
 鲍马序列 B、C、E 段, 发育火焰构造; D—E9 井, 2044.99~2043.26 m, 灰色块状细砂岩夹泥岩纹层, 发育波痕构造、印模, 偶见炭屑;
 E—F1 井, 1999.81~1999.46 m, 黑色粉砂质泥岩夹灰黑色粉砂岩, 发育交错层理; F—C4 井, 1836.82~1836.67 m, 黑色薄层泥岩夹灰色
 粉砂岩, 顶部可见滑塌构造; G—F1 井, 2079.83~2079.63 m, 灰色块状细砂岩, 发育变形构造; H—G1 井, 2048.55~2048.08 m, 灰色块
 状细砂岩, 发育包卷构造; I—H1 井, 1885.43~1885 m, 灰色块状细砂岩夹黑色泥岩纹层, 可见泥砾和炭屑; J—G2 井, 1915.4~
 1914.43 m, 灰色含砾细砂岩, 角砾成分以泥岩为主, 呈棱角状、次圆状, 局部呈条带状; K—G1 井, 2016.8~2015.34 m, 灰色细砂岩,
 底部发育火焰构造; L—G2 井, 1938.8~1938.4 m, 灰色块状细砂岩, 发育火焰构造, 含泥质条带

图 4 鄂尔多斯盆地庆北地区长 7 段湖底扇沉积构造特征

Fig. 4 Sedimentary structure characteristics of sublacustrine fan in the Chang 7 Member, Qingbei area, Ordos Basin

天然堤岩性组合表现为以粉砂岩夹泥岩为主, 分选好, 自然伽马曲线表现为中低值 (110~150 API)、低幅齿化钟型 (图 5-C), 发育平行层

理、交错层理。

朵体岩性组合表现为纯粉砂岩或夹少量泥岩, 分选、磨圆度较好, 自然伽马曲线表现为中值

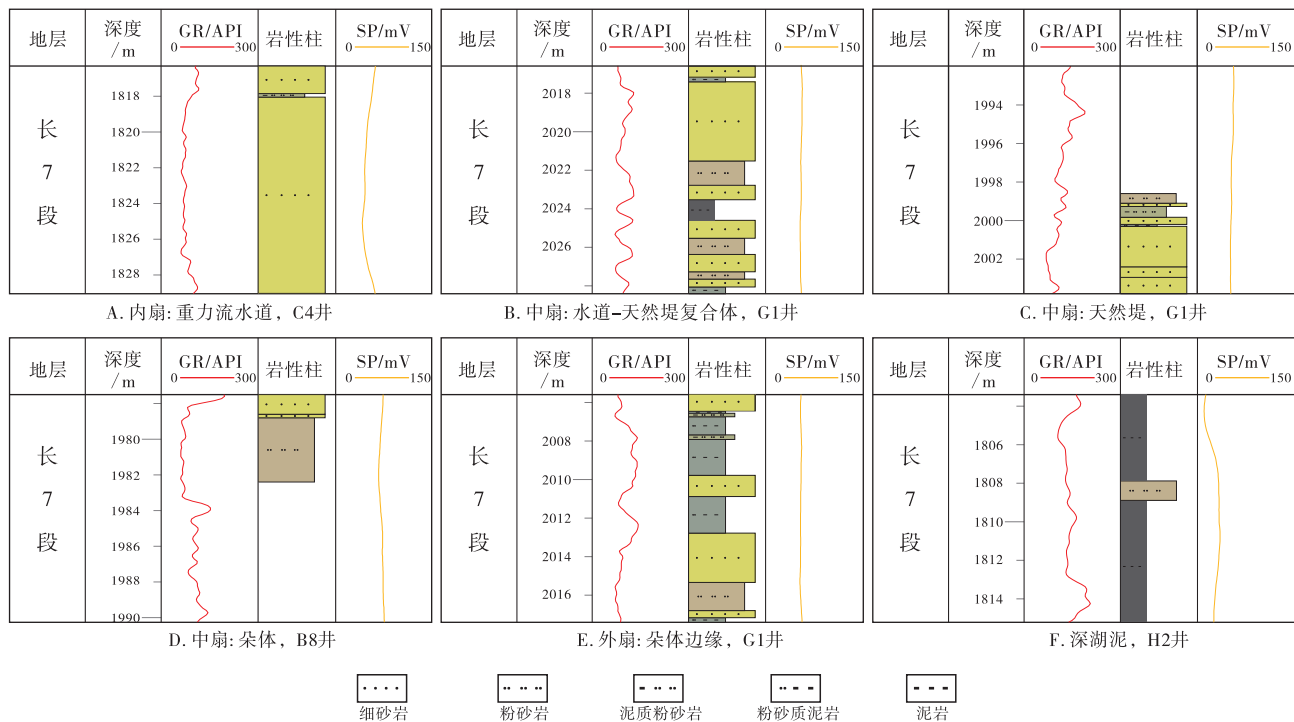


图 5 鄂尔多斯盆地庆北地区典型湖底扇岩性测井综合响应特征

Fig. 5 Lithology-logging comprehensive response characteristics of typical sublacustrine fan in Qingbei area, Ordos Basin

(120~160 API)、低幅齿化窄幅箱型+钟型 (图 5-D), 可见平行层理、交错层理。

3.2.3 外扇亚相

朵体边缘发育于湖底扇最前端, 向盆地方向过渡为半深湖—深湖泥岩沉积, 水动力较弱, 多为细粒沉积。岩性组合表现为以泥质粉砂岩与粉砂质泥岩为主, 自然伽马曲线表现为中高值 (>150 API)、低幅齿化弓型 (图 5-E), 常见炭屑, 发育水平纹理, 偶见小型变形构造。

研究区还发育深湖泥岩沉积, 岩性组合表现为以黑色泥岩为主, 自然伽马曲线表现为高值 (>150 API)、低幅齿化箱型 (图 5-F)。

不同的沉积体系类型在测井及岩性上有不同的特征, 因此可以通过对钻井岩心和测井资料的研究, 建立相应的岩—电沉积相识别模板, 并据此对未取心段沉积体系展开研究 (图 6)。

4 湖底扇演化特征

在高精度层序地层格架内, 本次研究发现不同时空位置上, 湖底扇内部砂体表现出不同的特征。本次研究从侧向对比和垂向演化 2 个维度上, 详细

研究了研究区内湖底扇的沉积演化特征。

4.1 横向特征对比

连井沉积断面图对于了解沉积相空间发育特征具有重要意义。以贯穿研究区南北向连井剖面为例 (图 7), 在南北向剖面上, 长 7₁ 层序地层南部厚, 向北逐渐减薄, 呈现进积超覆趋势。长 7₁ 沉积时期砂体集中在 7₁-5 和 7₁-4 层序单元内发育, 7₁-3 至 7₁-1 层序主要沉积大套泥岩和少量薄层砂岩。7₁-5 层序地层向北超覆, 在 B6 井处尖灭, 其内部砂体南部较北部厚, 侧向上延伸稳定、连片展布、连通性较好。7₁-4 层序沉积期, 地层向北超覆较 7₁-5 层序沉积时期更远, 在 B2 井处尖灭, 其内部砂体在偏南部较薄, 在偏北部地区发育有厚层砂体, 侧向上砂体由南向北延伸进积, 连通性好。7₁-5 层序沉积时期南部砂体较厚, 7₁-4 层序沉积时期北部砂体较厚, 7₁-5 至 7₁-4 层序沉积时期重力水道向北逐渐迁移, 反映了此时沉积中心向北移动。

4.2 垂向演化特征

庆北地区湖底扇整体砂体相对较薄, 主要分布在研究区西南部。根据图 8-A 至 8-C 砂体厚度图

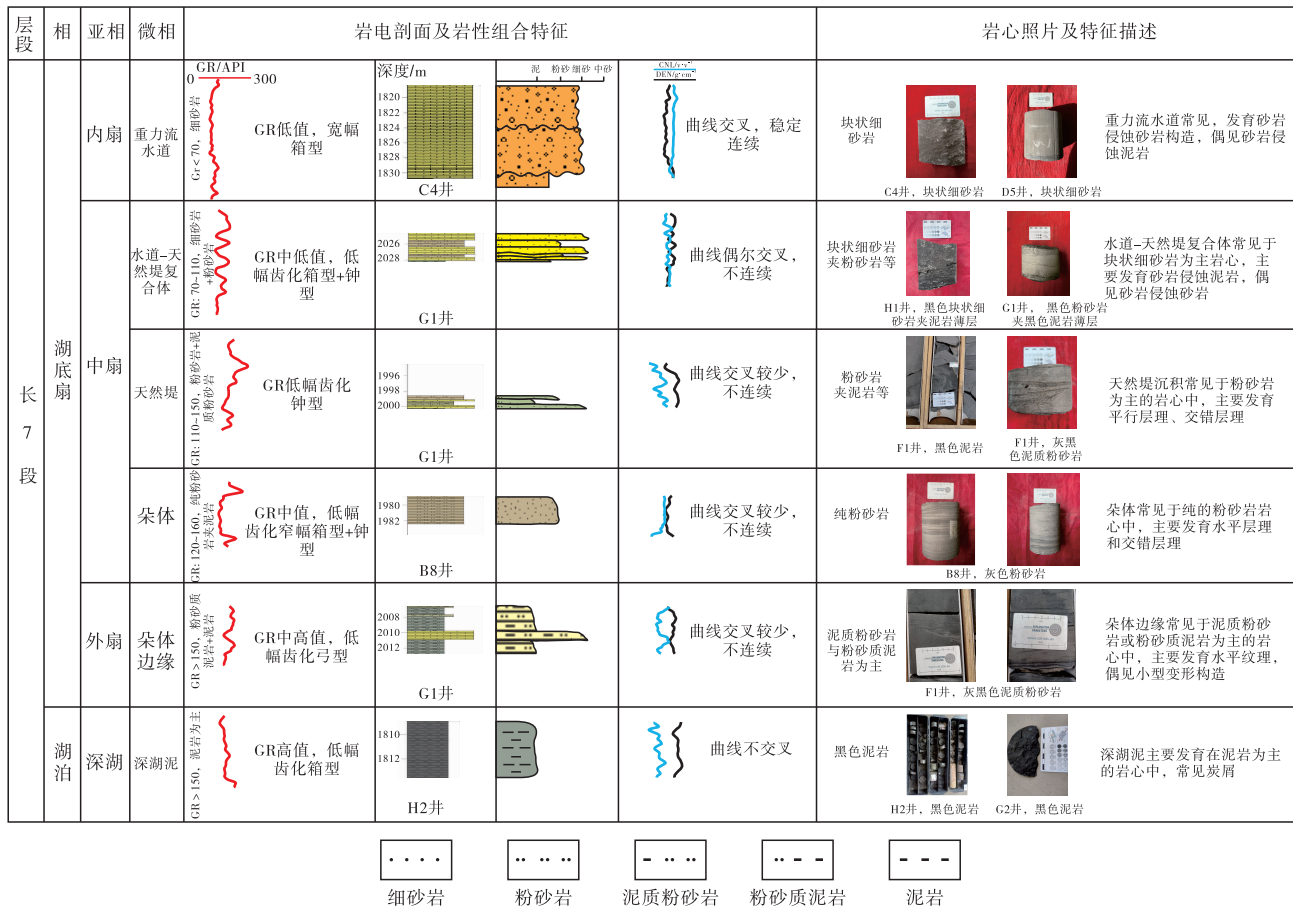


图 6 鄂尔多斯盆地庆北地区典型湖底扇沉积微相识别图版

Fig. 6 Microfacies identification marks of typical sublacustrine fan in Qingbei area, Ordos Basin

可知, 在 7₁-5 层序沉积时期有 2 个沉积中心, 均表现为向东北向延伸。其中北侧沉积规模相对较大, 向湖盆中央延伸, 最长可达 20 km, 单层砂岩厚度最大可达 6 m 左右。由图 8-D 至 8-F 砂体厚度图可知, 7₁-4 层序沉积时期明显发育有 3 个沉积中心, 均位于研究区西南方向, 沉积展布方向也为北东向。此时期砂体展布范围与 7₁-5 层序沉积时期相比扩大很多, 砂体向东北方向进积到了湖盆中央, 单层砂体厚度最大可达 7 m 左右, 砂体厚度向边缘逐渐减小。

依据研究区砂体厚度和沉积相展布特征, 湖底扇物源主要来自西南部地区, 7₁-5 层序沉积时期为双物源沉积供应(图 9-A 至 9-C), 7₁-4 层序沉积时期则是三物源沉积供应, 不同物源供给强弱期次并不一致(图 9-D 至 9-F); 湖底扇自西南部逐渐向东北方向进积, 在 7₁-5 层序双物源供给时期, 西部偏北物源与偏南物源分期次增强与减弱, 偏北物源先增强, 砂体加厚并不断进积, 且进积速

度随着物源供给减弱而变慢, 偏南物源持续增强, 砂体持续扩大进积至与偏北砂体连通, 剖面上(图 7)砂体呈多期叠置关系。7₁-4 层序三物源供给时期, 偏北与中部物源持续加强, 砂体不断进积扩大且砂体逐渐变厚, 而偏南物源供给先减弱后增强, 砂体展布范围逐渐扩大, 砂体堆积厚度加大。从 7₁-5-4 层序沉积时期至 7₁-4-1 层序沉积时期, 湖底扇展布范围逐渐变大(图 9), 从 7₁-5-4 层序初期(图 9-A)的 2 个独立湖底扇朵体变成 7₁-4-1 层序晚期(图 9-F)横向相互连通的大规模湖底扇。

4.3 湖底扇发育的控制因素

湖底扇作为一种事件性沉积, 受到物源供给体系、湖平面变化、古地貌格局等因素控制。在庆北地区, 湖底扇发育主要受控于物源供给、湖平面变化及气候波动, 但物源的控制作用更加明显。作为湖底扇主要物源之一的三角洲的沉积过程对其形成

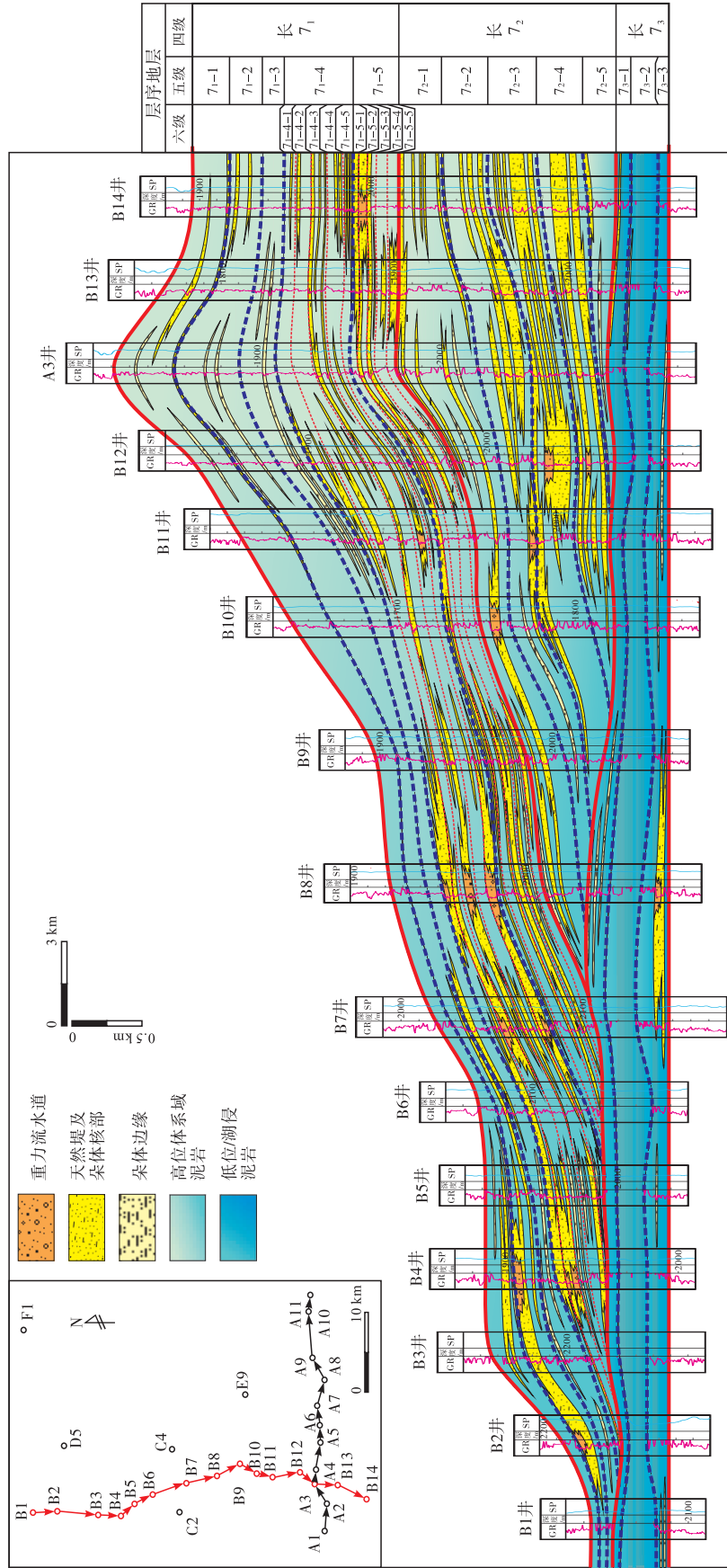
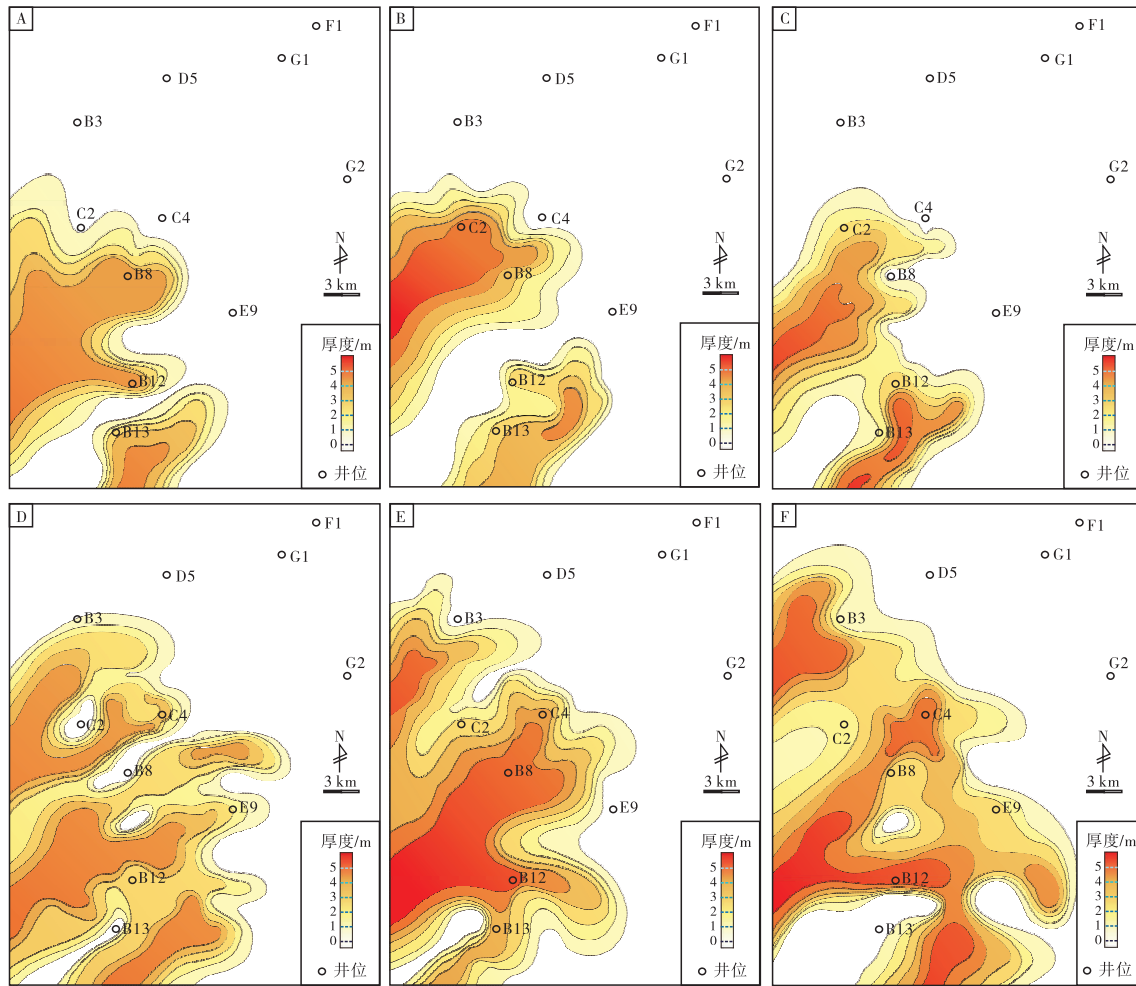


图 7 鄂尔多斯盆地庆北地区区长 7 段典型连井沉积剖面
Fig. 7 Typical connecting well sedimentary profile of the Chang 7 Member in Qingbei area, Ordos Basin



A— 7_1-5-4 层序沉积时期砂厚图；B— 7_1-5-3 层序沉积时期砂厚图；C— 7_1-5-2 层序沉积时期砂厚图；D— 7_1-4-4 层序沉积时期砂厚图；E— 7_1-4-3 层序沉积时期砂厚图；F— 7_1-4-1 层序沉积时期砂厚图

图 8 鄂尔多斯盆地庆北地区长 7_1 层序单元内 7_1-5 及 7_1-4 层序沉积时期砂体厚度图

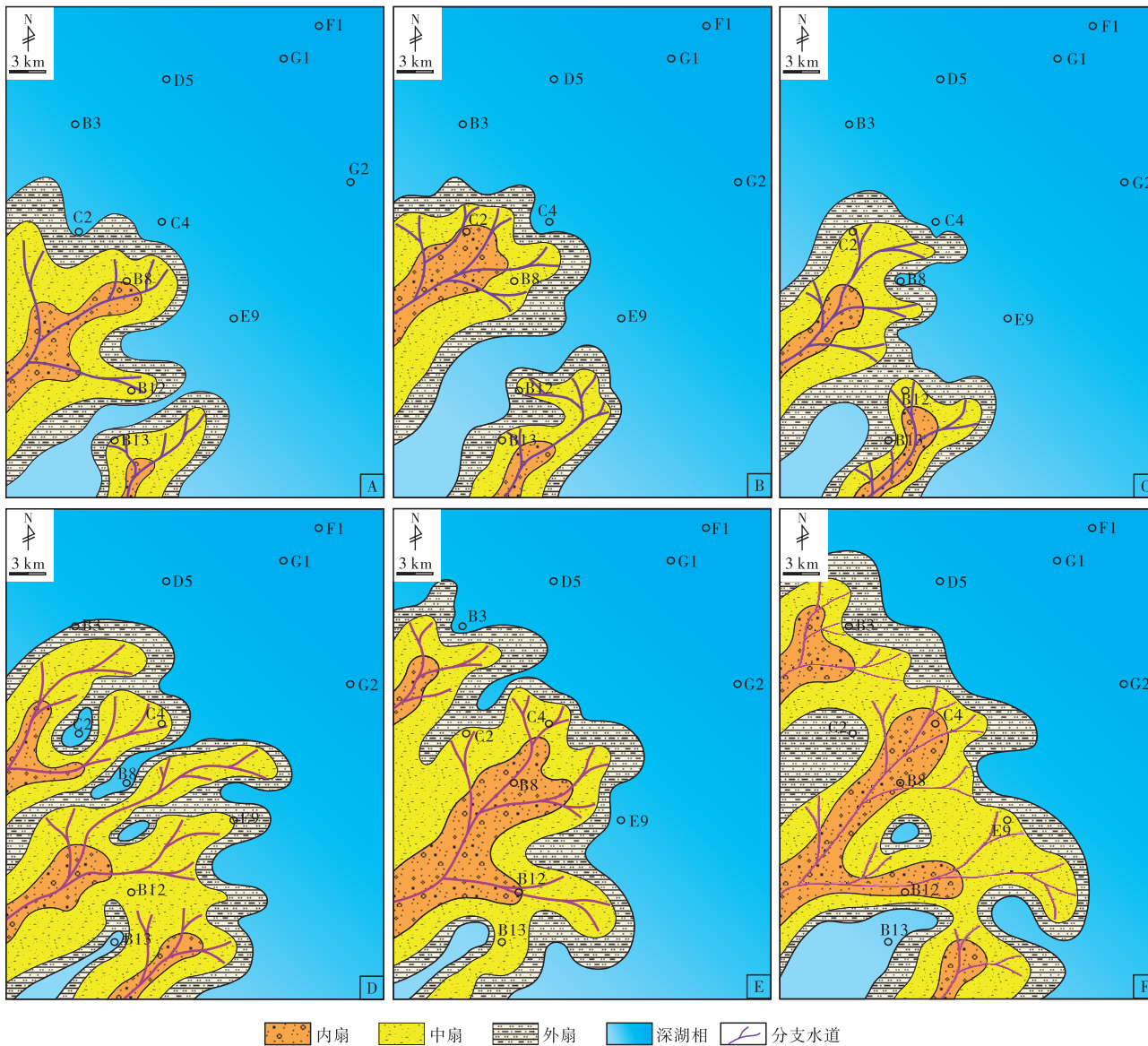
Fig. 8 Thickness maps of sand bodies during the 7_1-5 and 7_1-4 depositional periods of Chang 7_1 sequence unit in Qingbei area, Ordos Basin

演化具有很重要的控制作用 (王颖等, 2009; Zou *et al.*, 2012; 杨仁超等, 2014; 邹才能等, 2022)。鄂尔多斯盆地西南部长 7 段发育的大规模辫状河三角洲沉积为庆北地区湖底扇提供物源, 其具有“小平原、大前缘”沉积特征 (朱筱敏等, 2013)。供源三角洲的规律性摆动控制了湖底扇各期扇体的摆动, 三角洲和湖底扇整体都表现为由南向北摆动。同时供源三角洲的物源通道对湖底扇朵体个数和展布范围具有控制作用, 7_1-5 层序沉积期发育有 2 个物源通道, 在湖盆中形成 2 个湖底扇朵体 (图 10-A); 7_1-4 层序沉积期三角洲前缘物源供给充足, 沉积物不断在三角洲前缘斜坡处堆积, 在一定的触发机制下发生重力失稳, 形成第 3 个物源

通道, 在湖盆中发育 3 个朵体, 湖底扇展布范围向北扩大 (图 10-B)。

研究区 7_1-5 和 7_1-4 层序沉积期湖底扇处于湖平面下降早期, 湖平面下降导致湖盆范围缩小, 可容纳空间减小, 三角洲前缘砂体可以向坡折带方向进积更远, 为湖底扇提供物源基础; 同时湖平面下降造成湖底扇在垂向上向湖盆方向迁移, 具有多期叠加的发育特征。

陆源碎屑输入量受气候影响, 在温暖潮湿的气候背景下, 风化作用强度大, 河流作用更明显, 导致大量陆源碎屑向湖盆输入。鄂尔多斯盆地延长组 7 段处于卡尼期 Julian 1-Julian 2 亚期, 是典型的温暖潮湿气候 (李相博等, 2023)。在长 7_1 砂组沉



A— 7_1-5-4 层序沉积时期沉积相图；B— 7_1-5-3 层序沉积时期沉积相图；C— 7_1-5-2 层序沉积时期沉积相图；D— 7_1-4-4 层序沉积时期沉积相图；E— 7_1-4-3 层序沉积时期沉积相图；F— 7_1-4-1 层序沉积时期沉积相图

图 9 鄂尔多斯盆地庆北地区长 7_1 层序单元内 7_1-5 及 7_1-4 层序沉积时期湖底扇演化

Fig. 9 Evolution of sublacustrine fan during the 7_1-5 and 7_1-4 depositional periods of Chang 7_1 sequence unit in Qingbei area, Ordos Basin

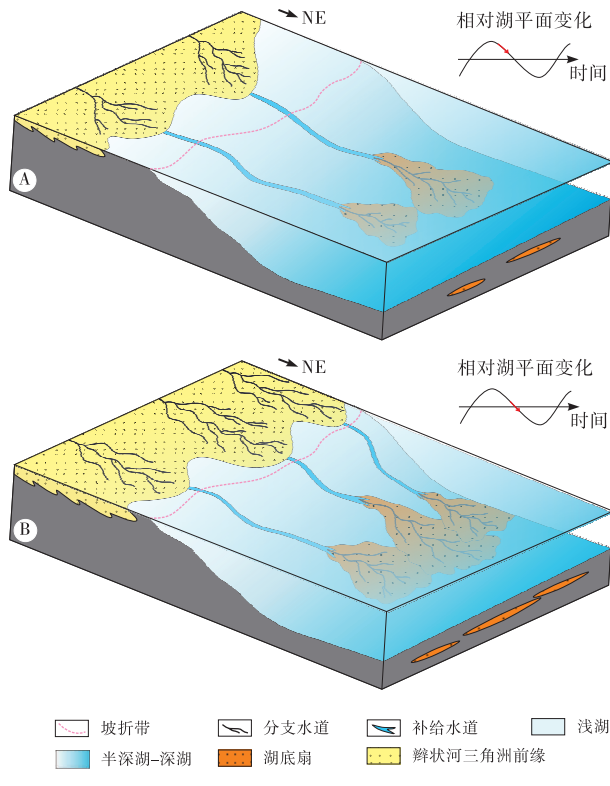
积期，温度和湿度逐渐升高（刘翰林等，2023）， 7_1-4 层序沉积期的气候环境相比于 7_1-5 更温暖潮湿，河流作用强、径流量大，致使更多的陆源碎屑物质向西南部辫状河三角洲前缘输入，湖盆发育更大规模的湖底扇。

5 结论

1) 通过对岩心、测井资料及地震剖面综合分

析，建立了庆北地区湖底扇发育区高精度层序地层格架，在长 7 段识别出 3 个四级层序，重点层段长 7_1 层序中划分出 5 个五级层序，其中 7_1-5 和 7_1-4 重点五级层序进一步划分出 10 个六级层序。

2) 根据沉积构造、岩性组合和测井资料特征，建立了庆北地区湖底扇不同沉积单元识别图版。研究区湖底扇扇体沉积包含不同级次的朵叶构型单元，湖底扇朵叶体系细分为内扇、中扇及外



A—7₁-5 层序沉积时期湖底扇沉积模式图；B—7₁-4 层序沉积时期湖底扇沉积模式

图 10 鄂尔多斯盆地庆北地区长 7₁ 层序单元内 7₁-5 及 7₁-4 层序沉积时期湖底扇沉积模式

Fig. 10 Lacustrine fan sedimentary model of the 7₁-5 and 7₁-4 depositional periods in Chang 7₁ sequence unit in Qingbei area, Ordos Basin

扇；依据不同沉积特征，内扇细分出重力流水道沉积单元，中扇为水道-天然堤复合体、天然堤及朵体，外扇则为朵体边缘。

3) 庆北地区 7₁-5 层序沉积时期和 7₁-4 层序沉积时期湖底扇表现出明显的差异性特征，7₁-5 层序沉积时期为双物源供给，其范围相对较小，7₁-4 层序沉积时期则是三物源供给，湖底扇发育范围相对较大，其砂体横向上连通性好，是更有利的储集层。湖底扇的演化受到辫状河三角洲物源、湖平面变化及气候波动的影响；从 7₁-5 到 7₁-4 层序沉积期温暖潮湿的气候提高陆源碎屑输入量，辫状河三角洲物源供给增强，湖平面下降导致湖盆可容纳空间减小，使湖底扇向湖盆进积，具有砂体横向连片展布、纵向多期砂体叠置的特征。

参考文献 (References)

陈洪德,倪新锋. 2006. 陇东地区三叠系延长组沉积层序及充填响应特征. 石油与天然气地质, 27(2): 143-151. [Chen H D, Ni X F. 2006. Depositional sequence and filling response characteristics of Triassic Yanchang Formation in Longdong area. Oil & Gas Geology, 27(2): 143-151]

冯烁,李胜利,于兴河,何发岐,李顺利,齐荣. 2022. 四级层序格架内浊流沉积特征及演化模式:以鄂尔多斯盆地镇泾地区三叠系延长组 7 段为例. 石油与天然气地质, 43(4): 859-876. [Feng S, Li S L, Yu X H, He F Q, Li S L, Qi R. 2022. Sedimentary characteristics and evolution model of turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework: a case study of the Triassic Chang 7 Member in Zhenjing area, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 43(4): 859-876]

付金华,邓秀芹,张晓磊,罗安湘,南珺祥. 2013. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系. 古地理学报, 15(5): 624-634. [Fu J H, Deng X Q, Zhang X L, Luo A X, Nan J X. 2013. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 15(5): 624-634]

官立园,胡德胜,满晓,张璐,赵晔. 2022. 涪西南凹陷流一段高位域早期湖底扇沉积特征及有利储层预测. 中国海上油气, 34(6): 54-64. [Gong L Y, Hu D S, Man X, Zhang L, Zhao Y. 2022. Sedimentary characteristics and favorable reservoir prediction of sublacustrine fan of early highstand system tract in the first member of Liushagang Formation in the Weixinan sag. China Offshore Oil and Gas, 34(6): 54-64]

龚承林,徐长贵,官大勇,王启明,李东伟. 2023. 渤中凹陷断拗转换期湖扩—湖退型层序及其对规模湖底扇发育展布的控制. 古地理学报, 25(5): 992-1010. [Gong C L, Xu C G, Guan D Y, Wang Q M, Li D W. 2023. Sequence stratigraphic model of Bozhong subbasin during a syn-rift to post-rift transition and its controls on regionally extensive sublacustrine fans. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 992-1010]

官大勇,杜晓峰,王启明,王志萍. 2023. 渤海海城莱州湾凹陷沙三段水道型湖底扇发育特征与沉积模式. 地球科学, 48(2): 503-516. [Guan D Y, Du X F, Wang Q M, Wang Z P. 2023. Development characteristics and sedimentary model of sublacustrine fan of channel type in the Third Member of Shahejie Formation in the northern Laizhou Bay Depression, Bohai Sea Area. Earth Science, 48(2): 503-516]

李相博,刘化清,陈启林,完颜容,魏立花,冯明,廖建波,马玉虎. 2010. 大型坳陷湖盆沉积坡折带特征及其对砂体与油气的控制作用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例. 沉积学报, 28(4): 717-729. [Li X B, Liu H Q, Chen Q L, Wanyan R, Wei L H, Feng M, Liao J B, Ma Y H. 2010. Characteristics of slope break belt in large depression lacustrine basin and its controlling effect on sandbody and petroleum; taking the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 28(4):

- 717-729]
- 李相博,刘化清,杨伟伟,张艳,Carlos Z,吉利民,杨占龙,郝彬,黄军平,王菁. 2023. 一个由干湿交替极端气候事件主导的内陆湖盆:来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组露头剖面的沉积学证据. *地球科学*,48(1): 293-316. [Li X B, Liu H Q, Yang W W, Zhang Y, Carlos Z, Ji L M, Yang Z L, Hao B, Huang J P, Wang J. 2023. A lacustrine basin driven by extreme events of alternate dry-wet climatic cycles; evidence from outcrops of Yanchang Formation in Upper Triassic, Ordos Basin. *Earth Science*,48(1): 293-316]
- 刘芬,朱筱敏,李洋,徐黎明,朱世发,薛梦戈. 2015. 鄂尔多斯湖盆西南部晚三叠世深水坡折特征及其对砂体的控制. *高校地质学报*,21(4): 674-684. [Liu F, Zhu X M, Li Y, Xu L M, Zhu S F, Xue M G. 2015. Characteristics of the Late Triassic deep-water slope break belt in southwestern ordos basin and its control on sandbodies. *Geological Journal of China Universities*,21(4): 674-684]
- 刘翰林,邹才能,邱振,尹帅,杨智,吴松涛,张国生,陈艳鹏,马锋,李士祥,张岩. 2023. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制:以鄂尔多斯盆地长7段为例. *沉积学报*,41(6): 1810-1829. [Liu H L, Zou C N, Qiu Z, Yin S, Yang Z, Wu S T, Zhang G S, Chen Y P, Ma F, Li S X, Zhang Y. 2023. Sedimentary depositional environment and Organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: a case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*,41(6): 1810-1829]
- 刘明成,吴胜和,万晓龙,李楨,樊建民,陈朝晖,王梓沣,刘海旭. 2024. 鄂尔多斯盆地庆城油田延长组页岩层系序地层与沉积相特征. *古地理学报*,26(4): 779-795. [Liu M C, Wu S H, Wan X L, Li Z, Fan J M, Chen C H, Wang Z F, Liu H X. 2024. Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the shale strata of Yanchang Formation in Qingcheng Oilfield, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(4): 779-795]
- 刘显阳,郭雯,刘江艳,李士祥. 2023. 鄂尔多斯盆地湖盆中部长7_3亚段深水砂质沉积特征及勘探前景. *地球科学*,48(1): 279-292. [Liu X Y, Guo W, Liu J Y, Li S X. 2023. Characteristics and exploration prospects of deep-water sandstone reservoir of Chang 7_3 Sub-Member, Ordos Basin. *Earth Science*,48(1): 279-292]
- 谈明轩,朱筱敏,耿名扬,刘常妮. 2016. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层. *沉积学报*,34(6): 1108-1119. [Tan M X, Zhu X M, Geng M Y, Liu C N. 2016. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed. *Acta Sedimentologica Sinica*,34(6): 1108-1119]
- 王启明,杜晓峰,官大勇,张宏国,付鑫. 2023. 辽中凹陷中南部西斜坡东三段湖底扇沉积特征与发育模式. *地球科学*,48(8): 2979-2992. [Wang Q M, Du X F, Guan D Y, Zhang H G, Fu X. 2023. Sedimentary characteristics and development pattern of sublacustrine fan in the Third Member of Dongying Formation in the south-central western slope of Liaozhong Sag. *Earth Science*, 48(8): 2979-2992]
- 王颖,王晓州,王英民,辛仁臣,赵志魁. 2009. 大型坳陷湖盆坡折带背景下的重力流沉积模式. *沉积学报*,27(6): 1076-1083. [Wang Y, Wang X Z, Wang Y M, Xin R C, Zhao Z K. 2009. Depositional model of gravity flow of slope in large down warped lake basins. *Acta Sedimentologica Sinica*,27(6): 1076-1083]
- 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]
- 夏景生,刘晓,李文华,张博明,文雯,李赫,樊蓉,薛林. 2017. 南堡凹陷西斜坡中深层高精度层序地层及沉积体系研究. *中国石油勘探*,22(5): 72-81. [Xia J S, Liu X, Li W H, Zhang B M, Wen W, Li H, Fan R, Xue L. 2017. Study on high-resolution sequence stratigraphy and sedimentary system of middle-deepbeds on western slope, Nanpu sag. *China Petroleum Exploration*,22(5): 72-81]
- 鲜本忠,王璐,刘建平,路智勇,李宇志,牛栓文,朱永飞,洪方浩. 2016. 东营凹陷东部始新世三角洲供给型重力流沉积特征与模式. *中国石油大学学报(自然科学版)*,40(5): 10-21. [Xian B Z, Wang L, Liu J P, Lu Z Y, Li Y Z, Niu S W, Zhu Y F, Hong F H. 2016. Sedimentary characteristics and model of delta-fed turbidites in Eocene eastern Dongying Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*,40(5): 10-21]
- 谢晓军,刘丽芳,唐武,沈朴,张锦伟. 2024. 中国湖底扇研究现状与建议. *中国海上油气*,36(1): 71-83. [Xie X J, Liu L F, Tang W, Shen P, Zhang J W. 2024. Current research status and suggestions on the sublacustrine fans in China. *China Offshore Oil and Gas*,36(1): 71-83]
- 解习农,林畅松,李忠,任建业,姜涛,姜在兴,雷超. 2017. 中国盆地动力学研究现状及展望. *沉积学报*,35(5): 877-887. [Xie X N, Lin C S, Li Z, Ren J Y, Jiang T, Jiang Z X, Lei C. 2017. Research reviews and prospects of sedimentary basin geodynamics in China. *Acta Sedimentologica Sinica*,35(5): 877-887]
- 杨华,窦伟坦,刘显阳,张才利. 2010. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析. *沉积学报*,28(2): 254-263. [Yang H, Dou W T, Liu X Y, Zhang C L. 2010. Analysis on sedimentary facies of Member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*,28(2): 254-263]
- 杨仁超,何治亮,邱桂强,金之钧,孙冬胜,金晓辉. 2014. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系. *石油勘探与开发*,41(6): 661-670. [Yang R C, He Z L, Qiu G Q, Jin Z J, Sun D S, Jin X H. 2014. Late Triassic gravity flow depositional systems in the southern Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*,41(6): 661-670]
- 姚泾利,赵彦德,刘广林,齐亚林,李元昊,罗安湘,张晓磊. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系长9段多源成藏模式. *石油勘探与开发*,45(3): 373-384. [Yao J L, Zhao Y D, Liu G L, Qi Y L, Li Y H, Luo A X, Zhang X L. 2018. Formation patterns of Chang 9 oil reservoir in Triassic Yanchang Formation Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*,45(3): 373-384]
- 游富粮,柳广弟,孙明亮,李超正,刘祥柏,安成,王子昕,李亿殊. 2023. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段高伽马砂岩测井识别及其展布特征. *石油实验地质*,45(1): 99-108. [You F L, Liu G

- D, Sun M L, Li C Z, Liu X B, An C, Wang Z X, Li Y S. 2023. Logging identification and distribution characteristics of high-gamma sandstones in the 7th member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(1): 99-108]
- 张庆石, 张革, 陈彬滔, 王革, 梁苏娟, 刘彩燕. 2014. 松辽盆地坳陷期湖底扇沉积特征与分布规律: 以英台地区青山口组为例. *天然气地球科学*, 25(3): 318-325. [Zhang Q S, Zhang G, Chen B T, Wang G, Liang S J, Liu C Y. 2014. Deposition characteristics and distribution pattern of sublauustrine fan in Qingshankou Formation, Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 318-325]
- 张自力, 李琦, 朱筱敏, 谈明轩, 张锐锋, 曹兰柱, 李凤勋, 单帅强. 2023. 陆相断陷湖盆重力流湖底扇沉积与地震响应特征分析: 以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组为例. *古地理学报*, 25(5): 1049-1068. [Zhang Z L, Li Q, Zhu X M, Tan M X, Zhang R F, Cao L Z, Li F X, Shan S Q. 2023. Sedimentary and seismic responses characteristics of gravity flow sublauustrine fans in lacustrine rift basin: case study on the Paleogene Shahejie Formation in Baxian sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1049-1068]
- 赵建华, 林畅松, 刘永福, 刘景彦, 范秋海, 范倩倩. 2014. 塔北隆起中部东河塘组高精度层序地层及沉积体系研究. *天然气地球科学*, 25(3): 351-359. [Zhao J H, Lin C S, Liu Y F, Liu J Y, Fan Q H, Fan Q Q. 2014. Study on the high-resolution sequence stratigraphy and depositional systems of the Donghetang Formation in the Central Tabei Uplift. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 351-359]
- 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 delta in large-scale lacustrine: an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 19-28]
- 朱筱敏, 王华, 朱红涛, 邵龙义, 纪友亮. 2023. 陆相层序地层学研究进展及发展关注. *石油学报*, 44(8): 1382-1398. [Zhu X M, Wang H, Zhu H T, Shao L Y, Ji Y L. 2023. Research progress and development focuses of continental sequence stratigraphy. *Acta Petrolei Sinica*, 44(8): 1382-1398]
- 邹才能, 冯有良, 杨智, 蒋文琦, 潘松圻, 张天舒, 王小妮, 朱吉昌, 李嘉蕊. 2022. 湖盆细粒重力流沉积作用过程及甜点层发育机制是什么? *地球科学*, 47(10): 3864-3866. [Zou C N, Feng Y L, Yang Z, Jiang W Q, Pan S Q, Zhang T S, Wang X N, Zhu J C, Li J R. 2022. What are the lacustrine fine-grained gravity flow sedimentation process and the genetic mechanism of sweet sections for shale oil? *Earth Science*, 47(10): 3864-3866]
- Ma B B, Cao Y C, Eriksson K A, Jia Y C, Gill B C. 2017. Depositional and diagenetic controls on deeply-buried Eocene sublauustrine fan reservoirs in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 82: 297-317.
- Mchargue T R, Hodgson D M, Shelef E. 2021. Architectural diversity of submarine lobate deposits. *Frontiers in Earth Science*, 9: 632.
- Pickering K T, Corregidor J, Clark J D. 2015. Architecture and stacking patterns of lower-slope and proximal basin-floor channelised submarine fans, Middle Eocene Ainsa System, Spanish Pyrenees: an integrated outcrop-subsurface study. *Earth-Science Reviews*, 144: 47-81.
- Yang T, Cao Y C, Friis H, Liu K Y, Wang Y Z, Zhou L L, Zhang S M, Zhang H N. 2018. Genesis and distribution pattern of carbonate cements in lacustrine deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 92: 547-564.
- Zou C N, Wang L, Li Y, Tao S Z, Hou L H. 2012. Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, Central China. *Sedimentary Geology*, 265-266: 143-155.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)