

鄂尔多斯盆地马泉地区延长组湖底扇 朵叶体内部构型特征^{*}

吴红丽^{1,2} 吴胜和^{1,2} 徐振华^{1,2} 刘明成^{1,2} 杨 博^{1,2}
谢子实^{1,2} 唐 雨^{1,2} 周新平³

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

摘 要 鄂尔多斯盆地三叠系延长组广泛发育夹层型页岩油, 其重要储集场所是湖相重力流朵叶体“夹层”, 受限于地下资料分辨率, 单一朵叶体内部构型样式尚不明确, 制约了水平井钻遇率及生产效率。因此, 亟需明确朵叶体内部构型特征, 为提高水平井钻遇率和生产效率提供理论依据。以鄂尔多斯盆地马泉地区马泉剖面三叠系延长组长 7 油层组(长 7 段)为研究对象, 结合地质勘测、无人机数字建模及取样分析等技术, 开展拗陷湖盆湖底扇重力流朵叶体内部构型精细研究。研究表明: (1) 马泉剖面主要发育朵叶体、深湖泥岩和滑塌体 3 种沉积微相, 内部发育块状细砂岩相(Sm)、正粒序层理粉砂岩相(Sg)、块状泥质粉砂岩相(Mp)、包卷层理粉砂岩相(Ssd)、块状泥岩相(Mm)、水平层理页岩相(Sh)和凝灰岩相(Tb)共 7 种岩石相类型; (2) 在顺源方向上, 单一朵叶体呈丘状, 由多期叠合的块状细砂岩、极细砂岩和黑色泥页岩组成; (3) 单一朵叶体内部朵叶单元之间叠置样式受洪水期强物源供给的影响, 呈前积式叠置; 朵叶单元之间前积接触样式受单期洪水规模的控制, 呈现“侵蚀型”和“披覆型”2 种差异前积叠置样式。当洪水规模较大时, 朵叶单元沉积厚度较大, 早期朵叶单元被侵蚀, 朵叶单元之间接触面参差不齐, 前积角度较大, 呈侵蚀型叠置; 当洪水规模较小时, 朵叶单元沉积厚度较小, 接触面沉积薄层泥岩, 朵叶单元之间接触面平整, 前积角度较小, 呈披覆型叠置。研究成果丰富了湖底扇朵叶体沉积构型的理论体系, 并为夹层型页岩油的水平井开发提供理论支持。

关键词 湖底扇 朵叶体 三叠系 延长组 马泉剖面 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 吴红丽, 女, 1999 年生, 博士研究生, 主要从事油藏表征与建模研究。E-mail: 2022311113@student.cup.edu.cn。

通讯作者简介 吴胜和, 男, 1963 年生, 教授、博士生导师, 主要从事沉积古地理、储集层表征与建模研究。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Architecture characteristics of sublacustrine lobes of the Yanchang Formation of Maquan area in Ordos Basin

WU Hongli^{1,2} WU Shenghe^{1,2} XU Zhenhua^{1,2} LIU Mingcheng^{1,2} YANG Bo^{1,2}

^{*} 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项目(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: 2025-04-10 改回日期: 2025-05-19

XIE Zishi^{1,2} TANG Yu^{1,2} ZHOU Xinpeng³¹ State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China² College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China³ Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract The shale oil in shale intercalated layer in the Yanchang Formation of Ordos Basin predominantly occurs in lacustrine gravity flow lobe “interlayers”, which serve as crucial reservoirs. However, the internal architecture patterns of single lobes remain unclear due to limited subsurface data resolution, constraining horizontal well drilling success rates and production efficiency. This study conducts refined architectural analysis of sublacustrine fan gravity flow lobes through integrated geological survey, UAV digital modeling, and sample analysis at the Maquan outcrop of the Triassic Chang 7 Member in Tongchuan City. Key findings include: (1) The Maquan outcrop primarily develops three sedimentary microfacies: lobes, deep-lake mudstone deposits, and slumps, containing seven lithofacies types: massive sandstone facies (Sm), normally graded siltstone facies (Sg), convolut-bedded siltstone facies (Ssd), massive muddy siltstone (Mp), massive mudstone facies (Mm), horizontal bedding shale facies (Sh), and tuff facies (Tb). (2) In direction of provenance, single lobes exhibit mound-shaped geometries composed of multi-stage stacked massive fine and very fine sandstones and black mudstone shale. (3) Single lobe stacking patterns are controlled by flood-induced sediment supply, showing progradational stacking. Erosional stacking occurs during high-magnitude floods, characterized by thick sandstone units with irregular erosional contacts and steep foreset angles. Draping stacking develops under low-magnitude floods, featuring thinner sandstone units separated by continuous mudstone layers with gentle foreset angles. These findings enhance the theoretical framework of sublacustrine fan lobe architecture and provide critical insights for optimizing horizontal well development in interlayered type shale oil.

Key words sublacustrine fan, lobe, Triassic, Yanchang Formation, Maquan outcrop, Ordos Basin

About the first author WU Hongli, born in 1999, is a Ph.D. candidate. She is mainly engaged in reservoir characterization and modelling research. E-mail: 2022311113@student.cup.edu.cn.

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

湖底扇重力流砂体是油气富集的重要场所，近年来一直是油气勘探开发的热点。目前，在鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地等大型含油气盆地已发现多个由重力流砂岩组成的油气储集层（邹才能等，2009；付金华等，2013；杨可薪等，2017；李相博等，2019）。鄂尔多斯盆地延长组广泛发育夹层型页岩油，其有效储集空间为湖相重力流朵叶体，具有物性较好、含油性高的特征。目前主要通过水平井技术开发其中的页岩油（付金华等，2021），已实现规模化开发并展现出良好的勘探前景。然而，在开发过程中，出现水平井砂体钻遇率差异大的问题，主要原因在于对朵叶体内部构

型特征认识不足。因此，厘清朵叶体的内部构型特征对于提高水平井钻遇率和优化开发方案具有重要意义。

朵叶体为重力流水道前端撒开形成的朵叶状沉积体。前人将朵叶体系划分为朵叶体复合体组合、朵叶体复合体、单一朵叶和朵叶单元等不同级次（张佳佳和吴胜和，2019）。学者们基于钻测井和地震数据对朵叶体复合体及单一朵叶体的构型特征开展研究，指出湖底扇中普遍发育水道—朵叶体转换带及朵叶体沉积，认为朵叶体通常发育在斜坡底部盆底带水道末端；朵叶体平面上通常呈舌状和朵状，剖面上呈底平顶凸或透镜状，砂体厚度较薄，

延伸长度可从几千米至数十千米(杨田等, 2021), 通常与深湖泥岩互层(吕奇奇等, 2017, 2022)。多期朵叶体补偿叠置, 可呈加积式(吕奇奇等, 2022; 庞军刚等, 2022; 惠潇等, 2024)和前积式(屈雪峰等, 2021; Liu *et al.*, 2025); 多期朵叶体的叠置样式受控于沉积物供给和基准面变化, 当沉积物供给速率较大时, 单一朵叶体间主要表现为垂向加积; 当供给速率较小, 单一朵叶体呈孤立式(Liu *et al.*, 2017)。随着基准面升高, 朵叶体叠置方式由侧向摆动型补偿叠置演变为加积型叠置(Wu *et al.*, 2023)。

针对湖底扇朵叶体构型, 国内外学者已经对其形态、规模、叠置样式及成因机制等开展了系统的研究, 建立了断陷湖盆湖底扇沉积模式。然而拗陷湖盆中也大量发育湖底扇沉积, 由于古地形坡度较缓、构造活动较平稳, 其沉积模式与断陷湖盆存在显著差异(张庆石等, 2014)。前人基于地下资料对拗陷湖盆湖底扇中朵叶体复合体和单一朵叶体的构型特征也进行了一些研究, 但受限于地下井距较大和地震分辨率不足, 单一朵叶体内部构型特征仍不明确。鄂尔多斯盆地铜川市马泉地区出露了 1 套延长组顺物源湖底扇朵叶体沉积露头, 为研究单一朵叶体及其内部构型提供了理想的场所。作者通过实地勘测、无人机数字建模和室内分析实验等手段, 对马泉露头进行精细构型解剖, 揭示单一朵叶体的内部构型特征, 并建立了拗陷湖盆湖底扇单一朵叶体的内部构型模式。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地, 面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 跨越陕西、甘肃、宁夏、山西和内蒙古 5 个省区(杨仁超等, 2017)。根据现今构造发育特征, 盆地被划分为 6 个一级构造单元: 伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊蒙隆起、渭北隆起、天环拗陷和西缘逆冲带(图 1-a)(杨俊杰等, 1992; 杨华等, 2000)。钻遇新生界、中生界和古生界, 中生界包括三叠系、侏罗系和下白垩统, 其中, 三叠系延长组是重要的含油层系, 发育大型内陆拗陷湖盆沉积(刘化清等, 2007)。根据长庆油田划分方案, 延长组归入上三叠统, 自下而上分为 $T_3Y_1 - T_3Y_5$ 共 5 段, 并进一步细分为长 1 至长 10 共 10 个油层组(武富礼等, 2004)。近年来的地震资料显

示, 延长组长 7—长 3₂ 地层向湖盆中心呈前积式叠置(惠潇等, 2024; 刘明成等, 2024), 向盆地方向的古地貌依次为浅水带、斜坡带和盆底带。其中, 盆底带近端发育重力流朵叶体沉积, 岩性组合以深湖页岩夹薄层朵叶砂岩为主。在长 7 沉积时期, 盆地处于强烈拗陷阶段, 湖盆快速扩张, 半深湖—深湖面积迅速扩大, 半深湖—深湖区位于庆阳—环县—定边—志丹—富县所包围的地区(图 1-b)。

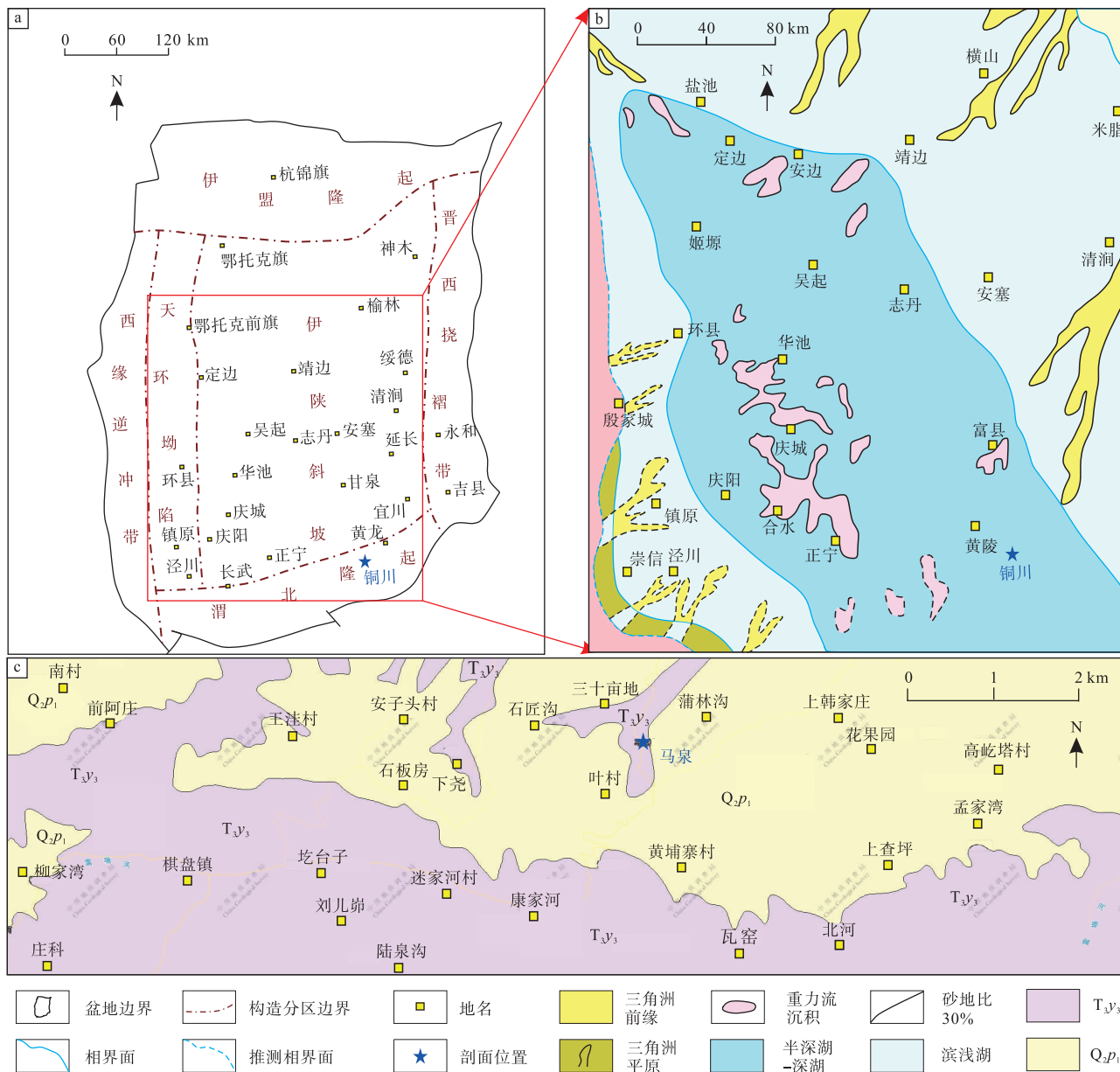
马泉露头位于陕西省铜川市马庄村村口 ($109^\circ 13' 49'' \text{E}$, $35^\circ 15' 57'' \text{N}$), 构造上位于盆地南缘的渭北隆起(图 1-b); 根据 1:20 万宜川幅地质图显示, 剖面上主要出露地层为 T_3Y_3 (图 1-c)。油页岩微量元素分析表明, 该套地层沉积时的最大水深介于 40~150 m 之间(邱欣卫等, 2009; 邓秀芹等, 2011; 孙莎莎等, 2015; 乔世海等, 2019), 属于半深湖—深湖相环境。马泉剖面宽度约为 200 m, 厚度约为 25 m, 走向 55° , 近平行于盆地北东物源方向, 岩性组合为黑色厚层深湖泥页岩夹薄层朵叶体粉砂岩及细砂岩(图 2)。结合剖面水体深度和沉积特征, 该套地层沉积时位于前人定义的盆底带, 可为拗陷湖盆湖底扇重力流单一朵叶体内部构型研究提供理想天然场所。

2 研究方法

采用野外人工实测、室内分析实验及无人机数据采集与建模相结合的方法, 开展拗陷湖盆湖底扇单一朵叶体内部的砂体构型特征的研究, 具体方法如下:

2.1 人工实测与实验室分析测试

对马泉剖面开展系统的野外人工实测, 主要观察和记录岩性、粒度韵律、沉积构造及构型特征。基于全面覆盖原则, 在剖面不同沉积位置、岩性单元及重要沉积构造区域, 选取出露良好的 6 个典型位置进行测量, 建立高精度沉积柱状图(图 2-b), 测量精度设定为 5 cm, 确保准确反映剖面内各岩性单元的垂向变化和沉积序列特征, 为后续取样点的布设提供基础依据。同时, 在已建立的柱状图基础上, 遵循代表性采样原则, 在不同岩性单元和典型沉积构造区域进行系统取样。共采集样品 94 块, 其中泥岩 8 块, 砂岩 86 块(图 2 中红色点所示), 重点覆盖细砂岩、粉砂岩和典型泥页岩, 确保样品



a—鄂尔多斯盆地构造单元分布（据邓秀芹等，2009）；b—三叠系延长组沉积相图（据邓秀芹等，2011）；c—马泉地区地质图

（图片来源于中国地质调查局 <https://geocloud.cgs.gov.cn/geological/database>）

图 1 鄂尔多斯盆地马泉地区位置及地质图

Fig. 1 Location and geological map of Maquan area in Ordos Basin

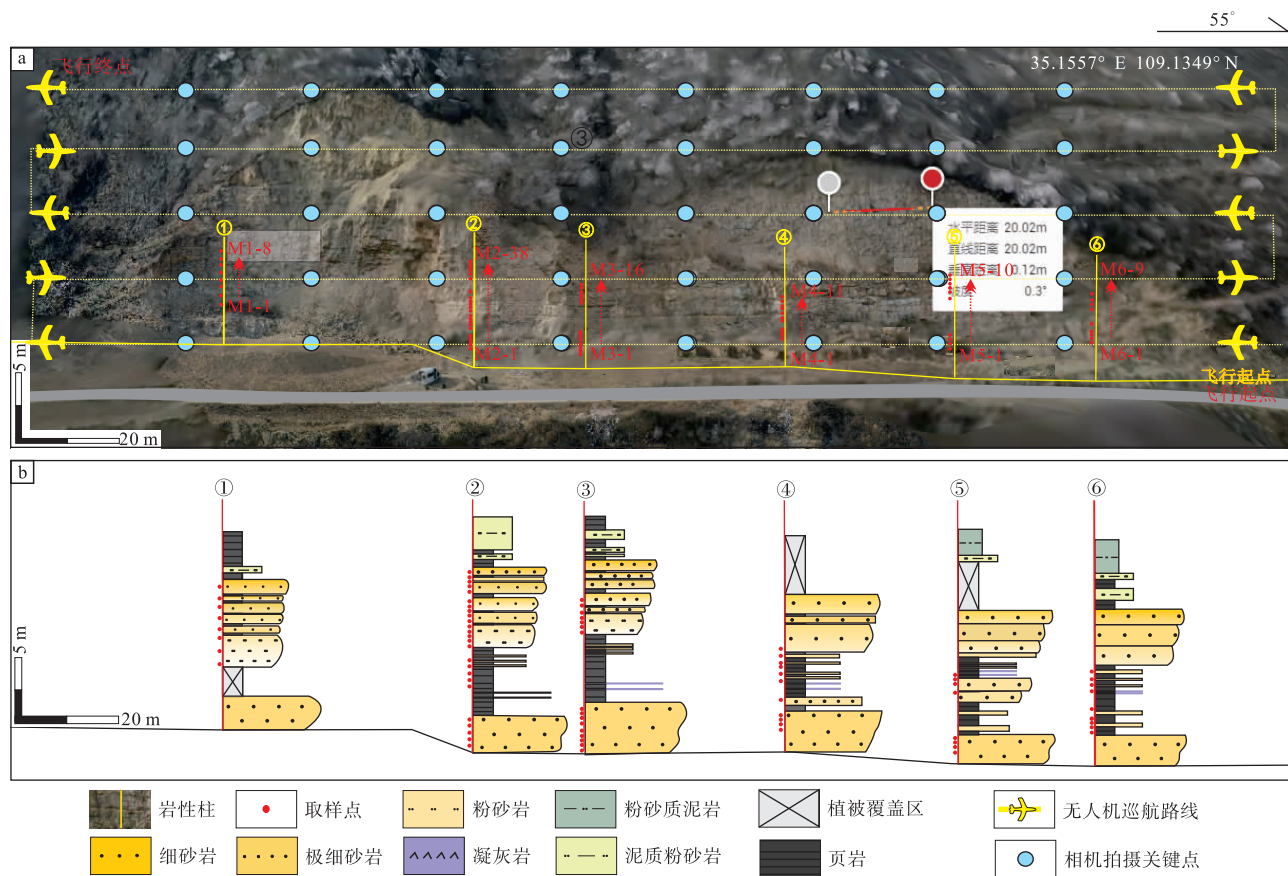
的空间代表性和完整性。此外，针对不同的岩性及典型的沉积构造进行精细拍照，拍摄高清照片超过 400 张，部分典型沉积构造照片见（图 3）。最终，基于建立的 6 个点位的柱状图，全面标定了露头其他位置的岩性特征。

为更精确地描述沉积环境特征及构型单元内部粒度参数特征，在中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室对采集的样品进行以下分析：（1）使用激光粒度仪对砂岩样品进行粒度分布

测试，明确其粒度分布特征；（2）对 8 块泥岩样品进行主量与微量元素分析，结合元素比值反映古环境条件。

2.2 无人机数据采集与建模

由于马泉剖面地势较高且近乎直立，传统的野外勘察方法难以全面开展构型研究，特别是在难以接触的区域。为了精确刻画马泉露头砂体的分布和构型特征，采用了搭载高清相机的大疆 Air-2 型无



a—无人机巡航路线及岩性柱位置；b—岩性柱状图

图 2 鄂尔多斯盆地马泉剖面无人机三维露头模型及岩性柱状图

Fig. 2 UAV-based 3D outcrop model and lithologic columnar chart of Maquan outcrop in Ordos Basin

人机对露头区进行“弓”字型巡航扫描剖面(图 2-a), 拍摄时保持 50% 照片重叠率。飞行时设定初始高度为 4.5 m, 飞行速度为 5 m/s, 为确保全面覆盖露头及数据的精确度, 对露头沿预设航线进行了多次飞行, 共拍摄了 1046 张高分辨率照片。将采集的高分辨率照片数据和空间定位数据导入建模软件 DJI Terra 中进行三维建模, 通过基于影像空间信息的三维重建原理, 利用照片间的重叠区域进行空间匹配, 提取影像的位置信息和深度信息, 形成稀疏点云数据。随后, 通过点云加密和优化处理, 生成高精度的密集点云, 并利用影像像素信息构建纹理化网格模型。最终, 建立了与实际露头几何形态相对应的三维数字化模型(分辨率为 5~10 cm)(图 2)。三维数字化模型能够准确表达露头中地质体的几何形态、规模特征和空间分布关系, 为进一步精细刻画砂体形态及其定量测量提供了高效工具。模型分辨率的提升(5~10 cm)确保了砂体宽度、厚度等参数的精确测量, 为分

析砂体构型单元的叠置样式及沉积特征提供了科学支撑。

3 沉积微相类型与特征

泥岩颜色、主微量元素含量、砂岩粒度韵律、沉积构造和岩相特征是反映沉积环境及沉积微相类型的重要依据, 通过对马泉剖面的精细勘测及样品实验数据综合分析, 明确马泉剖面沉积期处于深水环境, 砂体为湖底扇洪水驱动型重力流成因, 具有典型浊流沉积特征, 主要发育朵叶体、深湖泥岩和滑塌体 3 种沉积微相。

3.1 沉积体系论证

3.1.1 泥岩地球化学特征

泥岩特征反映鄂尔多斯盆地马泉地区沉积环境的低能和还原性质。剖面中泥岩颜色总体较深, 包括泥岩和页岩 2 类: 泥岩呈灰黑色, 发育块状构造

(图 3-a), 显示低能沉积环境的特点; 页岩呈黑色, 层理发育良好(图 3-b), 反映静水条件下的泥质沉积。显微镜下观察表明, 泥页岩主要由泥质(88%)、有机质(5%)、长英质碎屑(5%)和少量黄铁矿(约 2%)组成。碎屑以棱角状石英和少量长石为主(图 3-k), 有机质呈黑色条带状或团块状分布, 黄铁矿以细小粒状分布(图 3-l)。

泥岩元素分析可进一步解释沉积环境和水体深度(表 1)。前人研究表明, Sr/Cu 值对古气候的变化有灵敏的指示作用(邓宏文和钱凯, 1993; 范玉海等, 2012; 杨华等, 2016), 当 Sr/Cu 值小于 10 时, 指示温暖湿润气候, 大于 10 代表干燥炎热气候。本研究中, 所有样品的 Sr/Cu 值均小于 10, 介于 1.27~3.29 之间, 平均值为 2.49, 表明延长组沉积时期, 研究区整体呈现温暖湿润的气候特征。U/Th 值大于 1.25 通常指示还原环境, 小于 1.25 则指示氧化环境; V/(V+Ni) 值大于 0.77 通常代表还原环境, 小于 0.77 则代表氧化环境(Bryn and David, 1994)。本研究中所有样品的 U/Th 值均大于 1.25, 介于 1.64~3.19 之间, 平均值为 2.21; 其中 5 个样品的 V/(V+Ni) 值大于 0.77, 其余 3 个样品略小于 0.77, 样品的 V/(V+Ni) 值介于 0.69~0.94 之间, 平均为 0.8, 指示沉积环境为还原环境。周洪瑞(1999)、吴智平和周瑶琪(2000)提出利用 Co 元素含量定量计算沉积环境的最大古水深, 具体计算公式见式 1-1 至 1-3(周洪瑞, 1999; 吴智平和周瑶琪, 2000)。多位学者在科研和工作中利用此方法并取得了良好效果(张才利等, 2011; 王峰等, 2017)。通过计算得知, 样品反映的古水深介于 40.14~137.17 m 之间, 平均 77.62 m, 水体深度整体较大。

$$V_s = V_o \times \frac{N_{Co}}{S_{Co} - t \times T_{Co}} \quad (1-1)$$

$$t = \frac{S_{La}}{N_{La}} \quad (1-2)$$

$$h = \frac{C}{V_s^{\frac{3}{2}}} \quad (1-3)$$

式中: V_s 代表样品沉积时的沉积速率, m/Ma; V_o 代表正常环境的沉积速率, 湖泊—三角洲泥岩沉积速率为 $(0.2 \sim 0.3) \times 10^3$ m/Ma, 本研究计算时取 0.2×10^3 m/Ma; N_{Co} 代表正常湖泊沉积物中 Co 的平均丰度, 20 $\mu\text{g/g}$; S_{Co} 代表样品中 Co 的丰

度, $\mu\text{g/g}$; T_{Co} 代表陆源碎屑岩中 Co 的丰度, 4.68 $\mu\text{g/g}$; t 代表陆源输入的 Co 元素对样品的影响; S_{La} 代表样品中 La 的丰度, $\mu\text{g/g}$; N_{La} 代表陆源碎屑岩中 La 的平均丰度, 38.99 $\mu\text{g/g}$; C 为常数, 3.05×10^5 ; h 代表古水深, m。

3.1.2 粒度特征与沉积构造

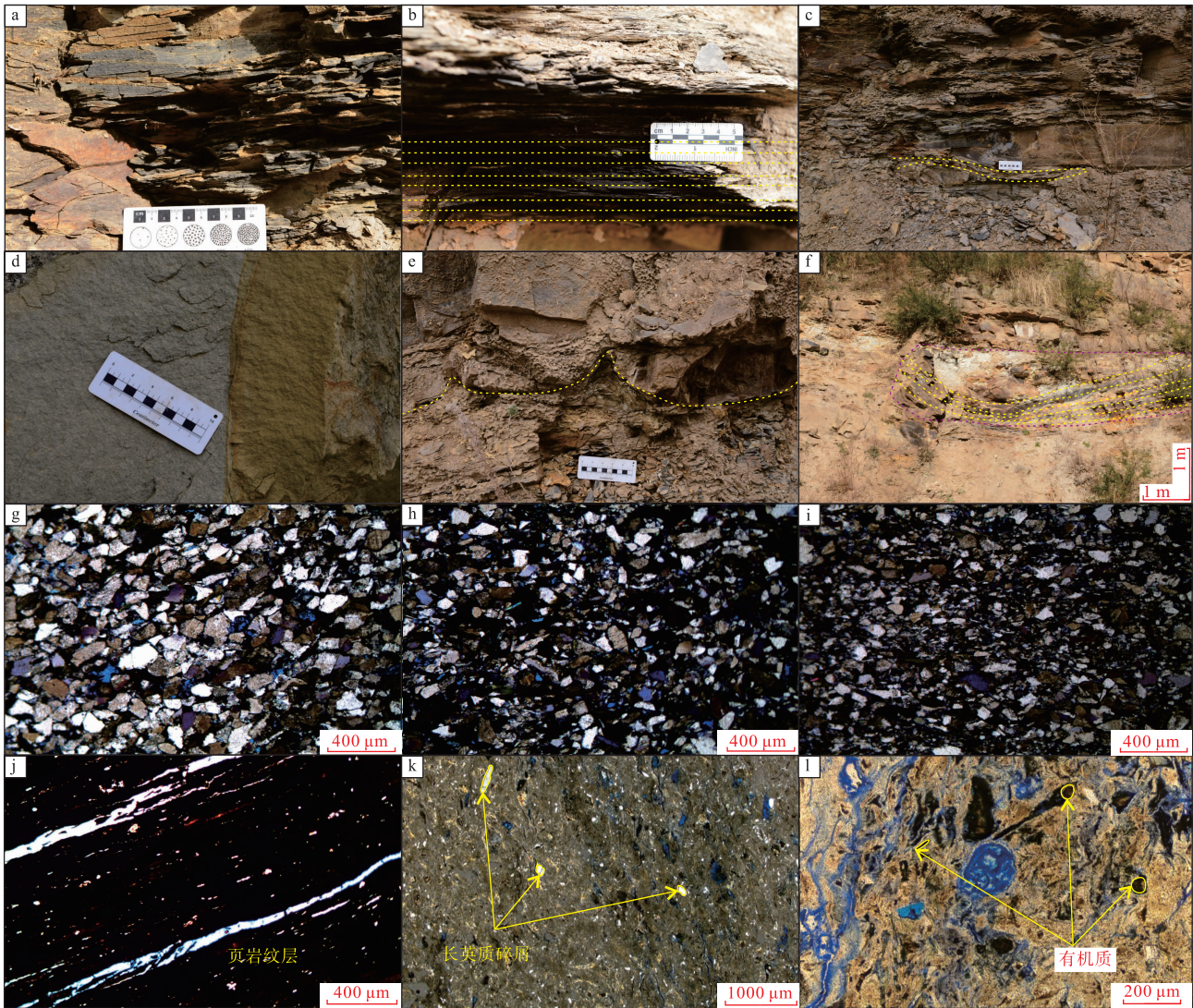
砂岩粒度和岩石结构反映了鄂尔多斯盆地马泉地区沉积机制以重力流主导。砂岩主要包括细砂岩(颗粒直径 125~205 μm)、极细砂岩(颗粒直径 63~125 μm)和粉砂岩(颗粒直径 39~63 μm)。86 个砂岩样品的粒度分布数据显示, 砂岩的平均粒径约 127 μm , 以极细砂岩和细砂岩为主。显微镜下观察表明, 砂岩矿物组成稳定, 石英含量平均为 62%, 长石含量平均为 23%, 岩屑含量平均为 15%, 岩石类型为长石岩屑石英砂岩和岩屑石英砂岩。颗粒分选中等至差, 磨圆度以次棱角状—棱角状为主(图 3-g, 3-h)。粉砂岩中石英含量稍低, 杂基含量显著增多(图 3-i)。

根据粒度分布数据绘制了砂岩粒度概率曲线和 C-M 图, 结果显示, 砂岩粒度概率曲线呈低斜率的两段式分布(图 4-a), 指示悬浮载荷与底床载荷的共同作用。C-M 图显示数据点群沿 $C=M$ 基线呈带状展布(图 4-b), 其中 C 值(分选系数)与 M 值(中值粒径)呈正相关, 符合递变悬浮搬运模式, 与浊流沉积的粒度分异规律具有良好对应性。

沉积构造进一步指示研究区为重力流主导的搬运机制。剖面上发育块状构造(图 3-d)、包卷层理(图 3-f)和火焰状构造(图 3-e)等典型的重力流沉积构造, 块状构造广泛分布于砂岩中, 反映浊流事件中碎屑物质的快速卸载与沉积; 包卷层理揭示未固结沉积物在重力失稳状态下的滑塌变形过程; 火焰状构造由砂质层快速堆积引发泥质底辟穿刺形成, 指示差异负载效应。

3.1.3 砂岩韵律特征

通过对剖面中部 2.5 m 厚块状砂岩层(图 5-a)钻取的 27 个岩石样品进行粒度测试, 结合中值粒径等参数统计分析发现: 砂岩垂向上发育 5 个向上变细半旋回与 5 个向上变粗半旋回, 共同构成 5 个自下而上呈细—粗—细结构的粒度复合旋回。其中, 倒三角形态指示段特征为颗粒变粗, 分选变好, 峰度、偏度增大, 中砂和细砂增多、粗粉砂(颗粒直径 31~45 μm)和细粉砂(颗粒直径 45~



a—灰黑色块状泥岩；b—水平层理页岩；c—泥岩变形条带；d—块状细砂岩；e—火焰状构造；f—包卷层理；g—细砂岩，正交偏光；h—极细砂岩，正交偏光；i—粉砂岩，正交偏光；j—黑色页岩，正交偏光；k—泥岩，单偏光；l—泥岩，单偏光

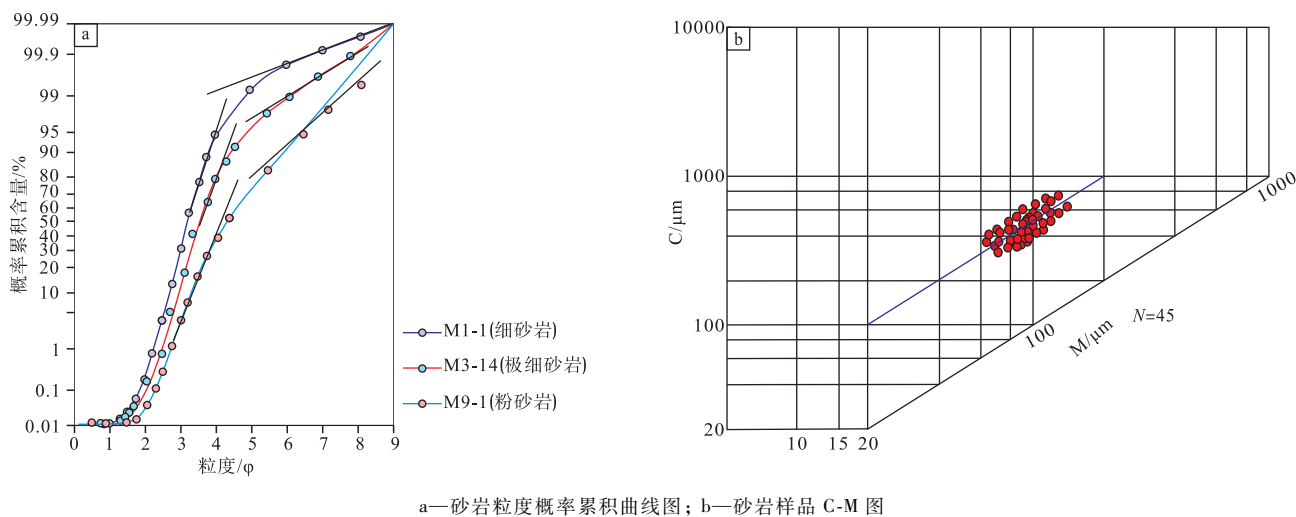
图 3 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段重力流沉积样品野外和镜下特征

Fig. 3 Field and microscopic characteristics of gravity flow sedimentary samples of the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段泥岩样品微量元素分析数据

Table 1 Trace element concentrations of mudstones from the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

样品名	V/ 10^{-6}	Co/ 10^{-6}	Ni/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	Ba/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	La/ 10^{-6}	Sr/Cu	U/Th	V/(V+Ni)	水深/m
M2-1	167.25	12.17	35.32	140.09	761.24	34.06	20.82	92.64	1.57	1.64	0.83	51.19
M2-4	127.06	10.35	29.76	125.93	830.20	34.02	19.89	81.61	2.30	1.71	0.81	40.14
M3-1	98.88	23.48	45.21	152.62	910.50	33.43	16.43	63.15	1.27	2.03	0.69	137.17
M3-3	105.40	14.31	34.99	135.98	687.52	33.71	16.37	108.39	2.53	2.06	0.75	65.26
M4-2	106.21	22.66	39.66	119.95	1134.03	33.75	15.08	75.81	3.29	2.24	0.73	130.05
M4-4	165.98	13.81	35.18	108.96	484.20	36.20	14.62	105.55	2.95	2.48	0.83	61.87
M6-1	173.52	17.74	27.19	106.71	556.80	39.48	16.88	72.22	2.73	2.34	0.86	90.08
M7-1	225.74	11.20	14.45	131.94	300.98	34.07	10.69	92.82	3.24	3.19	0.94	45.19



a—砂岩粒度概率累积曲线图；b—砂岩样品 C-M 图

图 4 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段砂岩粒度特征

Fig. 4 Grain-size characteristics of sandstones in the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

63 μm) 含量变化较小, 反映沉积能量持续增强期; 正三角形指示段特征为颗粒粒径逐渐减小、分选变差、峰度及偏度减小的特征, 粉砂和泥质含量相对增大, 判断为能量衰减期(图 5-b)。

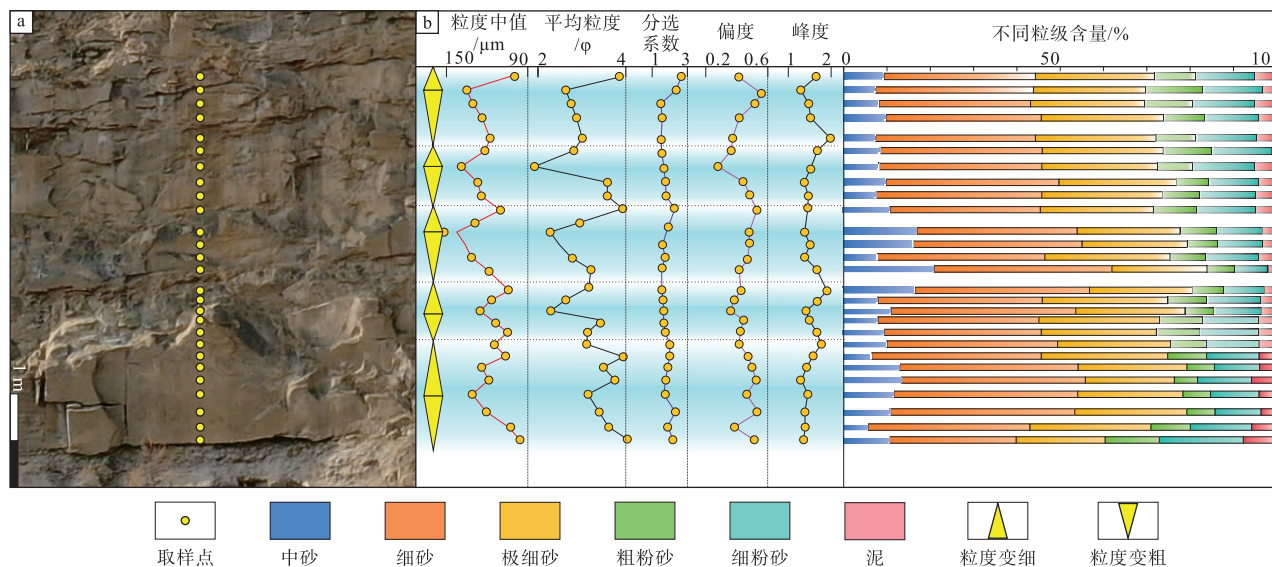
3.2 岩相类型及特征

岩相是由岩性与沉积构造共同表征的具有特定沉积环境意义的岩石单元。通过对马泉剖面的精细观测, 结合颜色、岩性、粒度韵律和沉积构造等标志, 识别出了以下 7 种岩相类型(图 6)。

块状细砂岩相 (Sm): 是研究区露头剖面中最

主要的类型, 岩性以灰色细砂岩和极细砂岩为主, 发育块状构造, 砂体厚度介于 0.5~2 m 之间, 多期砂体叠合呈粒度反旋回厚层砂体。顶界面平整且与上下岩层呈突变接触, 指示高密度浊流在运移过程中因流体内部剪切应力骤减, 导致悬浮载荷快速卸载沉积而成。

正粒序层理粉砂岩相 (Sg): 岩性为深灰色粉砂岩, 呈现典型正粒序层理, 单层厚度较小, 通常小于 0.5 m, 顶部过渡为粉砂质泥岩、泥岩, 其内可见黑色泥质团块, 对应鲍马序列 Tc 段, 为流体衰退阶段沉积物快速沉降所形成, 解释为高密度浊



a—块状砂岩取样位置照片 (照片位置见图 8); b—马泉露头块状砂岩垂向粒度参数图

图 5 鄂尔多斯盆地马泉剖面延长组砂岩粒度参数垂向变化特征及其分段

Fig. 5 Vertical grain-size characteristics of outcrop sandstone in the Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

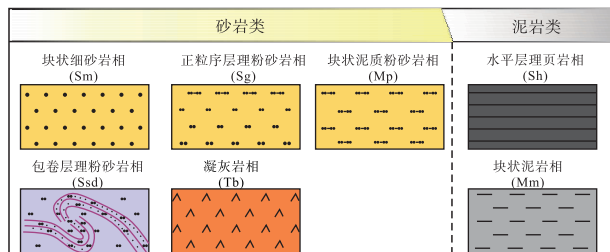


图 6 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段重力流沉积岩相类型
Fig. 6 Sedimentary lithofacies type of gravity flow in the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

流在流动衰退阶段发生递变沉降形成的产物。

包卷层理粉砂岩相 (Ssd): 是斜坡上砂体失稳发生滑动滑塌作用形成, 剖面上表现为厚度介于 0.5~2 m 的同心椭圆状包卷层理。岩性主要为粉砂岩和泥岩, 具有砂泥混杂特征。滑塌体对下伏地层有显著侵蚀和改造作用, 导致砂体底部页岩的不连续和变形, 可见页岩被侵蚀切割的现象, 为重力流滑塌沉积形成(图 3-f)。

块状泥质粉砂岩相 (Mp): 岩性主要为深灰色泥质粉砂岩, 厚度在 0.20~0.70 m 之间, 发育块状构造, 层理不发育, 顶底部常与黑色页岩接触, 指示高密度浊流快速卸载, 泥质与粉砂因流体能量骤减而混合堆积形成。

块状泥岩相 (Mm): 岩性为深灰色泥岩和粉砂质泥岩, 厚度在 0.05~0.30 m 之间, 缺乏生物扰动及层理构造, 发育块状构造(图 3-a), 常与泥

质粉砂岩以互层形式产出, 反映以悬浮状态在重力作用下发生流动方式形成, 为深水环境中的悬浮沉积形成。

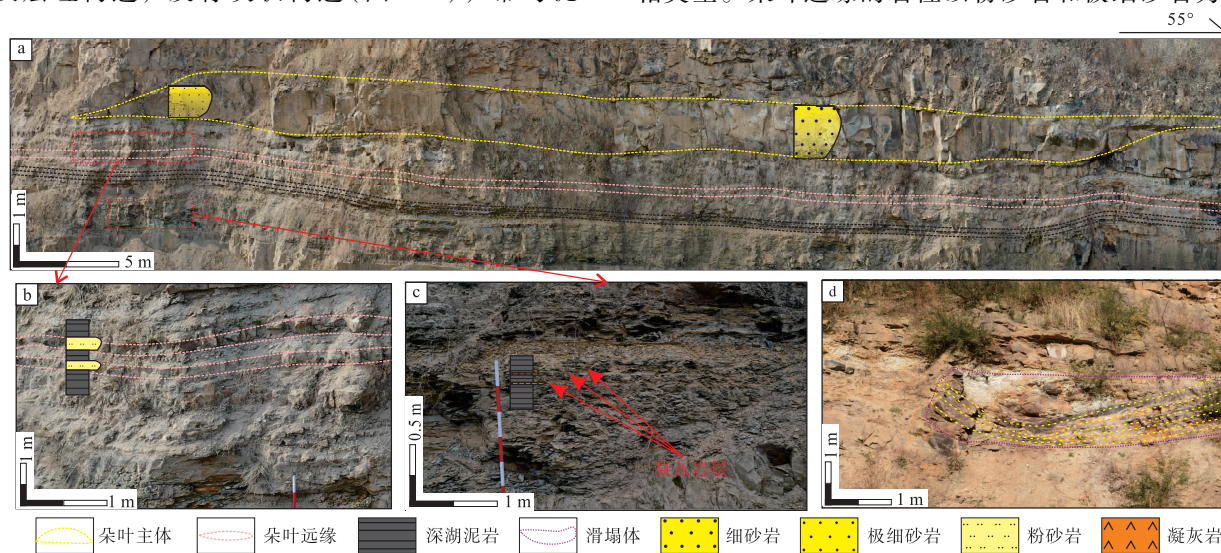
水平层理页岩相 (Sh): 岩性为灰黑色—黑色的页岩, 发育水平页理, 横向分布稳定, 单层厚度介于 0.5~2 m 之间, 上下层通常与粉砂岩、细砂岩突变接触, 主要在安静的深水环境下悬浮沉积形成, 为深水原地沉积产物(图 3-b)。

凝灰岩相 (Tb): 凝灰岩剖面上颜色为土黄色—黄褐色, 呈薄层条带状与深灰、灰黑色泥页岩互层, 沉积厚度在 0.02~0.11 m 之间。这是在火山喷发时产生的火山灰在空中通过风力搬运, 风力逐渐减弱而降落形成(空携型), 具有强等时性的特点。

3.3 沉积微相类型及特征

根据剖面岩相类型和外部几何形态, 识别出朵叶体、深湖泥岩和滑塌体 3 类沉积微相。不同沉积微相内部沉积特征存在差异。

朵叶体是重力流在水道前端发散沉积的朵叶状砂体沉积。根据岩性、砂体分布位置及厚度, 可进一步细分为朵叶主体和朵叶远缘。其中, 朵叶主体岩性以细砂岩和极细砂岩为主(图 7-a), 发育块状构造, 粒度呈现正反复合韵律特征, 砂体的顶底界面平整, 厚度通常大于 0.5 m, 与上下层黑色页岩呈突变接触关系, 是马泉剖面中最主要的沉积微相类型。朵叶远缘的岩性以粉砂岩和极细砂岩为主



a—朵叶主体; b—朵叶远缘; c—深湖泥岩; d—滑塌体

图 7 鄂尔多斯盆地马泉剖面延长组不同沉积微相特征

Fig. 7 Sedimentary microfacies characteristics of the Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

(图 7-b), 发育块状极细砂岩相, 呈现均质韵律特征, 砂体厚度通常较薄, 砂体厚度普遍小于 0.5 m, 常呈条带状夹于厚层页岩中。

深湖泥岩形成于相对安静的水体环境, 岩性以泥岩和黑色页岩为主, 发育块状构造和水平层理(图 7-c)。单套厚度通常在 0.5~3 m, 内部可见小于 0.3 m 的薄粉砂层和 0.1 m 的凝灰岩层(图 7-c), 是半深湖—深湖环境下的沉积产物。

滑塌体是斜坡上砂体失稳发生滑动滑塌作用形成, 剖面上表现为厚度介于 0.5~2 m 之间的同心椭圆状包卷层理(图 7-d)。岩性主要为粉砂岩和泥岩, 具有砂泥混杂特征。滑塌体对下伏地层有显著侵蚀和改造作用, 导致砂体底部页岩的不连续和变形, 可见页岩被侵蚀切割的现象。

4 湖底扇朵叶体构型特征

构型级次划分是构型分析的关键步骤, 参考吴胜和(2013)提出的碎屑沉积体倒序构型分级方案对露头湖底扇沉积进行分级。马泉剖面主要发育 7~9 级构型单元, 其中 7 级构型单元对应单层级别中由单一水道供源形成的朵叶复合体, 通常由多个单一朵叶侧向补偿叠置而成, 单一朵叶之间通常发育较为连续的泥岩; 8 级构型单元为由单一水道供源形成、垂向上由多期韵律相似的砂岩拼合而成的单一朵叶; 9 级构型单元对应由 1 个或多个朵叶层垂向叠合而成的朵叶单元, 对应野外露头上 1 组侧向稳定的砂体。马泉剖面主要发育由 3 期单一朵叶(L1-L3)复合而成的朵叶复合体(图 8)。

4.1 单一朵叶构型特征

单一朵叶体 L1(图 8 中 L1)位于剖面底部, 根据其出露情况, 剖面上呈板状形态, 顶底界面平直, 垂向自下而上连续发育反—正韵律块状细砂岩相(Sm-Sm), 出露厚度约 1.97 m, 与上下层呈突变接触关系。

单一朵叶体 L2(图 8 中 L2)位于剖面底部偏上位置, 呈底平顶凸的透镜状形态。在顺源方向上, 其岩相组合主要为由块状细砂岩相—块状细砂岩相(Sm-Sm)。砂体厚度由中部最厚 2.97 m 向两侧减薄至 1.47 m, 最大可追踪宽度达 170 m。

单一朵叶体 L3(图 8 中 L3)位于露头的中部, 顶底面完整出露, 呈丘状形态。在顺源方向上, 岩

相组合首先是以块状细砂岩相(Sm)连续沉积为主, 逐渐过渡为块状极细砂岩相与块状细砂岩相互层, 然后演变为块状粉砂岩相、块状极细砂岩相与块状泥质粉砂岩相, 砂体厚度逐渐变薄, 厚度范围介于 1.97~4.97 m 之间, 宽度可追踪范围为 170 m。

3 期单一朵叶间垂向上被深湖泥页岩分隔, 呈孤立式叠置。单一朵叶体 L1 和 L2 之间沉积厚度为 0.37~2.17 m 的黑色页岩, 夹有单层厚 0.17 m 的朵叶远缘砂岩; 单一朵叶体 L2 与 L3 间隔层为 1~3 m 黑色页岩, 其中夹有 0.07~0.15 m 薄层凝灰岩及 0.1~0.3 m 朵叶远缘砂岩。单一朵叶体 L3 的顶部与厚度大于 10 m 的泥质粉砂岩及黑色页岩呈突变接触。

4.2 朵叶单元构型特征

由于单一朵叶体 L1 出露范围较为局限, 未能展开进一步的构型特征分析。重点对单一朵叶体 L2 和 L3 内部进行精细构型分析, 结果表明, 单一朵叶体内部发育多期朵叶单元, 各期朵叶单元在岩相、形态与构型方面存在差异。

4.2.1 L2 内部构型特征

单一朵叶体 L2 内部由 3 期朵叶单元构成(图 8 中 L₂₁-L₂₃), 野外实测朵叶单元倾向为 50°, 与盆地北东物源方向近平行。朵叶单元 L₂₁ 位于单一朵叶体 L₂ 的底部, 发育块状细砂岩相(Sm), 砂体右边界出露完整, 呈现“底平顶凸”的形态。顺源方向上砂体厚度由 0.2 m 逐渐增厚至最大 1.47 m, 宽度超过 30 m。朵叶单元 L₂₂ 和 L₂₃ 位于朵叶单元 L₂₁ 前方, 岩相以块状细砂岩相(Sm)为主。顺源方向上, 砂体形态均呈透镜状, 宽度均大于 135 m。其中, L₂₂ 最大厚度为 1.47 m, L₂₃ 最大厚度至 1.77 m, 2 期朵叶单元厚度均呈现由薄变厚的趋势。

单一朵叶体 L2 内部各朵叶单元厚度中心沿顺源方向依次向前推进, 呈现出前积式叠置的特征。朵叶单元 L₂₂ 沿顺源方向叠置在朵叶单元 L₂₁ 前方(图 8), 2 期朵叶的叠置部位沉积泥页岩, 泥页岩在该区域发生弯曲变形, 反映出快速沉积时期泥岩被卷入砂岩之间, 泥岩厚度最大达到 0.6 m 后逐渐减薄。随着砂体的向前推进, 朵叶单元 L₂₁ 与朵叶单元 L₂₂ 逐渐融合, 形成厚层块状反旋回块状砂岩。朵叶单元 L₂₃ 同样沿顺源方向叠置在朵叶单元

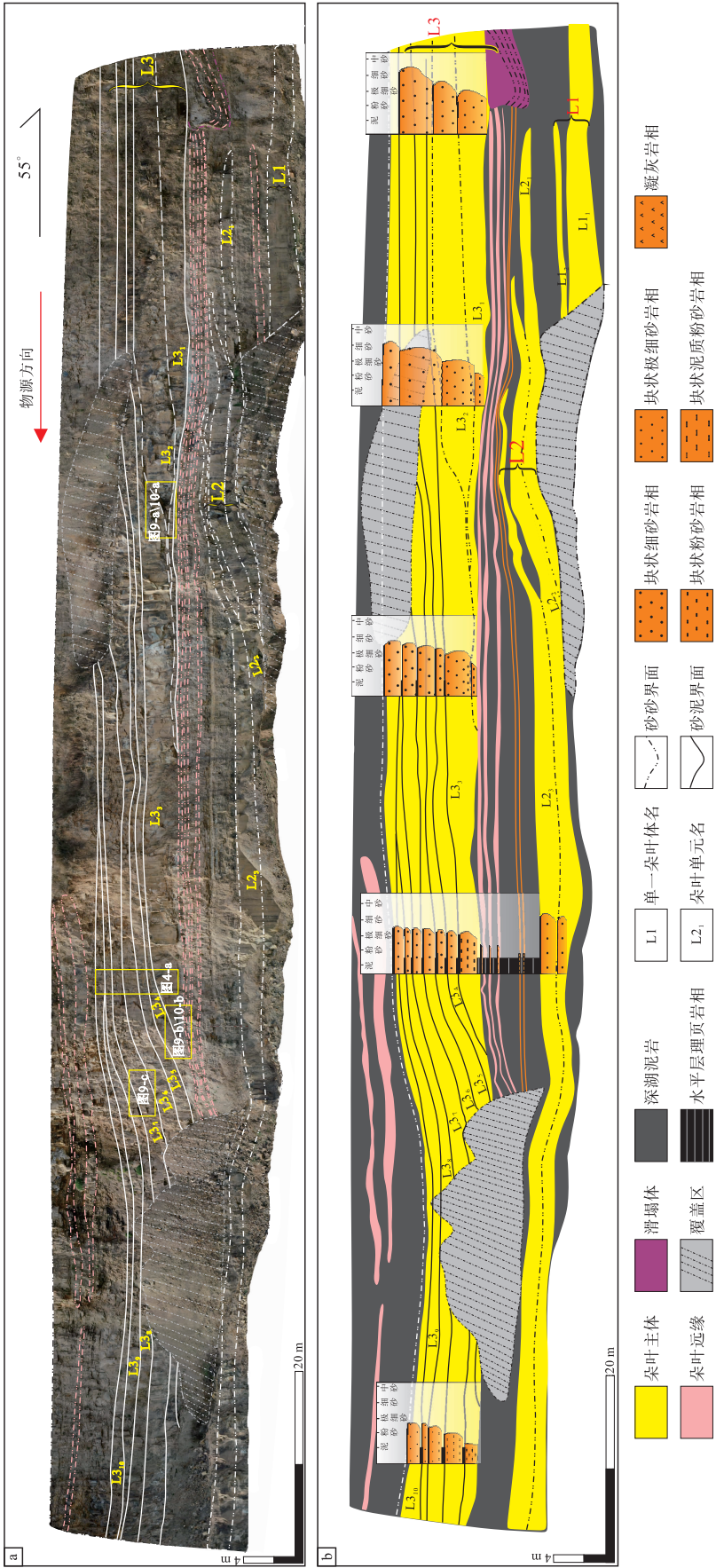


图 8 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段构型解释结果
a—露头剖面构型; b—构型解释及岩相组合

Fig. 8 Architectural interpretation of the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

L2₂ 前方(图 8), 叠置部位无泥岩沉积, 最终形成厚层反旋回块状砂岩。

4.2.2 L3 内部构型特征

单一朵叶体 L3 内部可识别出 10 期朵叶单元(图 8 中 L3₁–L3₁₀)。早期沉积的朵叶单元粒度较粗, 主要为细砂岩和极细砂岩, 厚度较大, 顺源方向上粒度逐渐变细。朵叶单元 L3₁ 和 L3₂ 呈侧向扁平的丘状形态, 主要由块状极细砂岩相构成(图 9-a), 顺源方向上砂体厚度逐渐减薄, 最大厚度分别为 1.97 m 和 1.77 m, 宽度分别为超过 50 m 和 70 m; 朵叶单元 L3₃ 剖面上呈楔状, 发育块状细砂岩相和块状极细砂岩相, 砂体厚度呈现“薄—厚—薄”变化趋势(图 8), 最大厚度 1.77 m, 宽度超过 76 m。

晚期朵叶单元粒度整体较细, 砂体厚度相对较小, 朵叶单元内部顺源方向上粒度同样呈逐渐变细的特征。朵叶单元 L3₄ 呈楔状(图 9-b), 发育块状极细砂岩相, 砂体厚度呈现薄—厚—薄变化, 最大厚度为 1.2 m; 朵叶单元 L3₅ 呈鼓丘状, 岩相以块状极细砂岩相为主, 顺源方向上岩相由极细砂岩相过渡为块状粉砂岩相, 砂体厚度由 1.27 m 逐渐减小, 厚度中心较 L3₄ 更向前推进; 朵叶单元 L3₆ 至 L3₁₀ 砂体边界呈鼓丘状(图 9-c), 岩相以块状极细砂岩相和块状泥质粉砂岩相为主, 砂体最大厚度在 0.87~1.47 m 之间(表 2)。

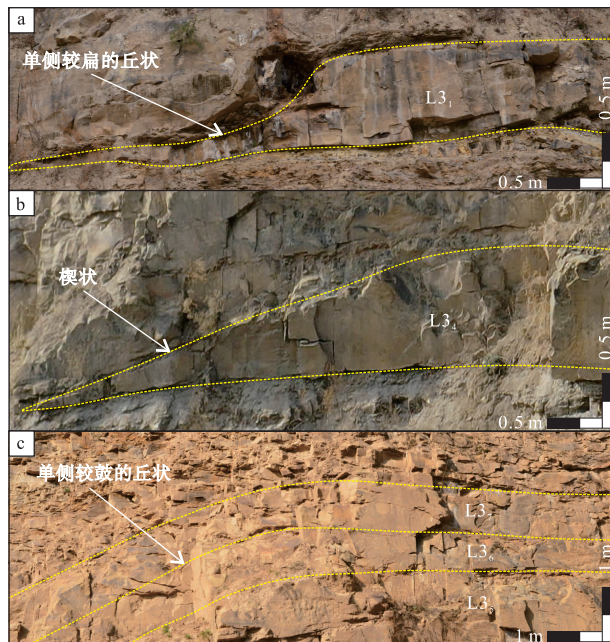
表 2 鄂尔多斯盆地马泉剖面长 7 段朵叶体规模统计

Table 2 Geometrical parameters of lobe units in the Member 7 of Yanchang Formation of Maquan outcrop in Ordos Basin

朵叶单元	最大厚度 /m	前积角 /(°)	朵叶单元	最大厚度 /m	前积角 /(°)
朵叶单元 L3 ₁	1.77	19.3	朵叶单元 L3 ₆	1.08	11.2
朵叶单元 L3 ₂	2.07	17.3	朵叶单元 L3 ₇	1.28	8.1
朵叶单元 L3 ₃	1.97	16.3	朵叶单元 L3 ₈	0.89	6.1
朵叶单元 L3 ₄	1.18	15.2	朵叶单元 L3 ₉	0.79	6.1
朵叶单元 L3 ₅	1.28	13.2	朵叶单元 L3 ₁₀	0.59	5.1

早期朵叶单元(L3₁–L3₃) 接触面几何特征表现为高角度前积结构, 以砂—砂接触为主, 接触面为侵蚀接触(图 10-a)。朵叶单元 L3₁ 与 L3₂ 之间初期为无泥岩沉积的平整接触, 后期 L3₂ 侵蚀 L3₁, 侵蚀现象随搬运距离增加逐渐增强, 接触面参差不齐, 砂岩界面出现泥页岩挤压变形, L3₁ 被侵蚀后的残余砂体厚度仅 0.17 m, 前积角为 19.3°。朵叶单元 L3₃ 与 L3₂ 之间接触面经历相似演化过程, 残余砂体厚度 0.07~0.47 m, 前积角为 17.3°。这一阶段中岩相组合由多期叠覆块状砂岩相(图 8 中组合 I) 向侵蚀改造型块状砂岩相(图 8 组合 II) 转变。

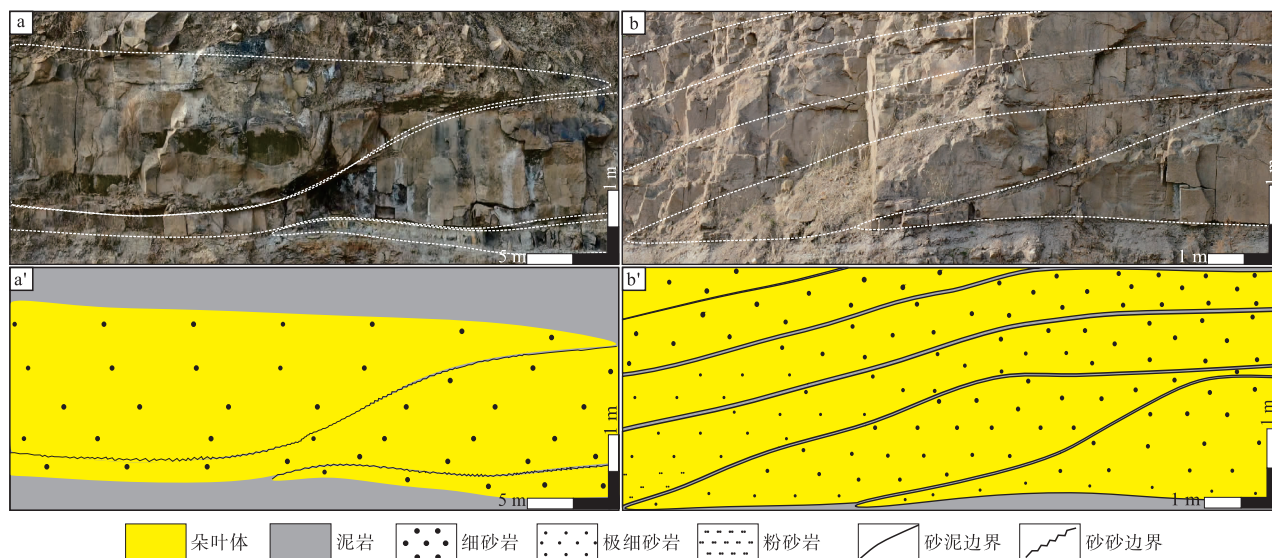
晚期沉积的朵叶单元(L3₄–L3₁₀) 前积角逐渐减小, 砂体之间没有侵蚀现象, 接触面有泥岩沉积, 以砂—泥接触为主(图 10-b)。朵叶单元 L3₄ 与朵叶单元 L3₃ 之间夹薄层泥页岩(厚度小于 0.1 m), 前积角为 16.3°; 朵叶单元 L3₅ 的前积角为 15.2°, 与朵叶单元 L3₄ 之间沉积厚度约为 0.1 m 的泥页岩。伴随着后期的朵叶单元厚度中心前移的过程中, 从朵叶单元 L3₆ 至 L3₁₀ 之间, 相邻砂体之间逐渐发育更厚的泥页岩, 泥页岩厚度从 0.10 m 增加至 0.18 m, 前积角由 15.2° 逐渐减小至 5.1°, 呈现填平补齐沉积样式。岩相组合由块状细砂岩相—块状细砂岩相逐步过渡为夹薄层泥页岩的组合, 进一步演变为块状粉砂岩相—块状细砂岩相夹稍厚泥页岩的组合, 最终形成块状泥质粉砂岩相—块状粉砂岩相与泥页岩相互层的组合。



a—朵叶单元 L3₁; b—朵叶单元 L3₄; c—朵叶单元 L3₅、L3₆、L3₇

图 9 鄂尔多斯盆地马泉剖面朵叶单元边界形态特征

Fig. 9 Lobe units boundary morphology characteristics of Maquan outcrop in Ordos Basin



a—侵蚀叠置原图；a'—侵蚀叠置解释图；b—披覆叠置原图；b'—披覆叠置解释图

图 10 鄂尔多斯盆地马泉剖面朵叶单元之间差异前积样式

Fig. 10 Differential progradation styles between lobe units of Maquan outcrop in Ordos Basin

5 讨论

鄂尔多斯盆地马泉地区湖底扇单一朵叶顺源方向上由多期朵叶单元前积叠置而成，根据朵叶单元接触界面的特征，分为“侵蚀型”（高前积角砂—砂接触）和“披覆型”（低前积角砂—泥接触）2类差异前积样式（图 10），其中，侵蚀型接触主要出现在较厚的朵叶单元之中，披覆型接触则主要出现在较薄的朵叶单元中（图 11）。针对单一朵叶内部朵叶单元的叠置样式研究，对于提高夹层型页岩油水平井开发效率具有重要意义。

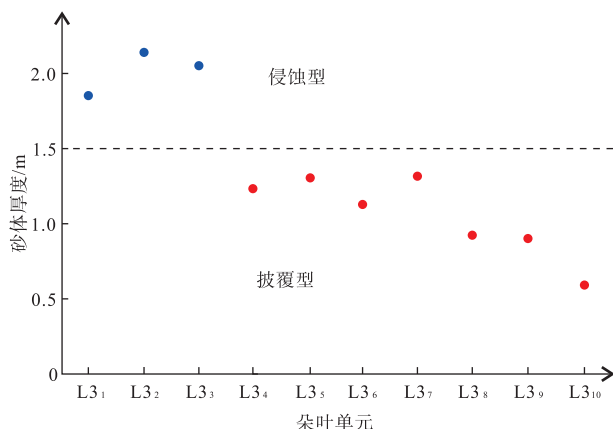


图 11 鄂尔多斯盆地马泉剖面朵叶单元厚度与接触关系耦合图

Fig. 11 Coupling diagram of lobe element thickness and contact relationships of Maquan outcrop in Ordos Basin

综合研究区气候、沉积构造与沉积特征分析，认为季节性高频次洪水事件带来的持续物源供给与朵叶单元的前积叠置密切相关。而单期洪水规模的差异性控制了朵叶单元的差异前积叠置样式。下文将对不同因素控制作用进行阐述，并提出拗陷湖盆湖底扇单一朵叶内部构型模式。

5.1 强物源供给对单一朵叶内部前积叠置样式的影响

鄂尔多斯盆地马泉地区朵叶单元间的前积叠置样式主要受控于稳定的湖盆可容空间与洪水期强物源供给的耦合作用。湖盆可容空间（A）主要受构造活动和气候变化等因素共同影响（Bryant *et al.*, 1995；鄯继华等，2009）。马泉剖面所在的鄂尔多斯盆地在晚三叠世为大型内陆淡水拗陷湖盆，晚三叠世长 8 段末期至长 7 段早期，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，至张家滩页岩沉积期湖平面上升速率达到峰值（张凤奎等，2008），之后湖平面趋于稳定，湖盆可容空间处于较为稳定的状态。同时，前人通过长 7 段孢粉组合特征（吉利明等，2006；邓秀芹等，2009）、湖平面的变化特征（李相博等，2019）、黑色页岩总有机碳含量（Zhang *et al.*, 2021）及古气候特征（张才利等，2011）等方面综合分析，认为长 7 段沉积时期正值全球拉丁—卡

尼洪泛事件期 (Chen *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022), 温暖潮湿气候诱发季节性高频洪水 (Cramer and Allan, 2014; Yao *et al.*, 2022; Fu *et al.*, 2023), 研究区的单期朵叶单元砂岩内部粒度参数垂向上呈现“细—粗—细”的变化规律(图 5), 指示单一洪水事件内部存在能量增强—峰值—衰减的 3 阶段演化特征, 与 Thierry 等 (2003) 提出的异重流“加速—稳定—减速”动力学模型高度吻合, 即洪水初期流体加速阶段携带粗粒沉积物向远端推进, 中期达到搬运能力峰值时形成分选最优的砂岩层, 末期能量衰减导致细粒物质快速沉降。

在湖盆可容空间稳定背景下, 洪水期物源供给速率的持续激增促使粗粒沉积物沿优势路径卸载形成朵叶单元。多期洪水事件叠加导致垂向序列呈现反旋回结构, 表现为后期朵叶单元厚度中心向湖盆方向迁移, 覆盖于早期朵叶单元前方, 形成前积叠置样式。这种主要由强物源供给控制的前积叠置样式成因与前人在断陷湖盆研究中提出的观点一致, 即当可容空间稳定时, 沉积物供给速率增大, 沉积物易呈前积分布 (朱筱敏等, 2003; 操应长等, 2004)。此外, 顺物源方向上, 单一朵叶内部粒度逐渐变细。洪水早期阶段, 洪水能量较强, 水体携带泥砂能力强, 粗粒沉积物首先沉积, 而泥岩则未能及时沉积, 在距离物源位置相同的沉积位置上, 早期多期能量不断增强的洪水沉积物粒度逐渐变粗, 垂向序列以反旋回块状细砂岩组合为主; 向远端方向, 后期洪水能量衰减导致悬浮沉积占比增加, 渐变为块状粉砂岩—极细砂岩组合, 反映流体搬运能力随距离递减的特征。

5.2 洪水规模控制下的朵叶单元间差异前积样式分析

朵叶单元之间的差异前积样式主要由单期洪水规模控制, 单期洪水规模大小对沉积物搬运距离及构型单元保存状态具有影响。基于野外实测和本研究所建立的野外数字露头模型。对马泉剖面朵叶体规模及前积角数据进行统计(表 2)。结果表明, 朵叶单元 ($L3_1-L3_3$) 表现出厚度较大 (1.77 ~ 2.07 m), 前积角度较陡 ($16.3^\circ \sim 19.3^\circ$) 的特征, 朵叶单元接触面为砂—砂接触, 接触面参差不齐, 表现为“侵蚀型”前积样式; 朵叶单元 ($L3_4-L3_{10}$) 厚度较小, 厚度范围在 0.59 ~ 1.28 m, 前积

角度由 15.2° 逐渐减小至 5.1° , 朵叶单元边界处披覆薄层泥岩, 接触面平整, 表现为砂—泥接触, 呈现“披覆型”前积样式。一般而言, 洪水规模越大, 沉积的厚度越大 (赵景波等, 2007; 顾静等, 2011)。结合所测得数据, 分析朵叶单元前积角度和最大厚度与前积样式的相关性(图 11), 发现厚层朵叶单元之间主要为侵蚀型前积, 薄层朵叶单元之间主要为披覆型前积。从而推测, 洪水规模是控制朵叶单元之间差异前积样式的主控因素。其中, 在朵叶单元 ($L3_1-L3_3$) 沉积时期, 沉积环境主要受高能洪水事件主导。此类事件中, 流体携带的泥砂浓度较高, 持续时间较长, 流体底部剪切应力增强, 导致底床侵蚀作用显著, 高密度流体的持续输运使早期沉积的朵叶单元不断被侵蚀, 形成高角度前积结构, 朵叶单元间接界面呈锯齿状(图 10-a), 反映流体对早期沉积体的切割改造。厚度较小的朵叶单元 ($L3_4-L3_{10}$) 则反映了洪水规模较小、持续时间较短的沉积特征, 流体携带的泥砂浓度较低, 底床摩擦较小, 此时流体以悬浮载荷为主, 沉积作用取代侵蚀作用成为主导过程, 砂体之间有薄层泥岩沉积, 砂体形态保存较好, 接触面平整, 朵叶单元之间呈平整的砂—泥接触界面(图 10-b), 形成了“披覆型”叠置。这种由于洪水规模引起的砂体沉积侵蚀特征的形成机制与前人关于洪水期间不同规模洪水沉积特征的研究一致, 即较大规模的洪水具备较强的侵蚀能力, 而较小规模的洪水则主要通过沉积作用进行沉积 (Bella *et al.*, 2021)。

5.3 拗陷湖盆湖底扇重力流单一朵叶体构型模式

基于马泉剖面朵叶体的岩相组合与砂体叠置特征综合分析, 建立了拗陷湖盆湖底扇重力流单一朵叶体内部的构型模式。垂向上, 多期单一朵叶体呈孤立式叠置, 内部发育多种岩相组合。顺源方向上, 沉积物粒度逐渐变细, 岩相由整合块状细砂岩—块状细砂岩相, 过渡为稍细的块状细砂岩—块状细砂岩相, 进一步演化为块状粉砂岩—薄层黑色页岩—块状细砂岩相, 最终转变为块状泥质粉砂岩—厚层泥页岩—块状粉砂岩相(图 11)。

受洪水期持续增强物源供给的影响, 单一朵叶体内部朵叶单元呈前积式叠置(图 12-c)。受洪水

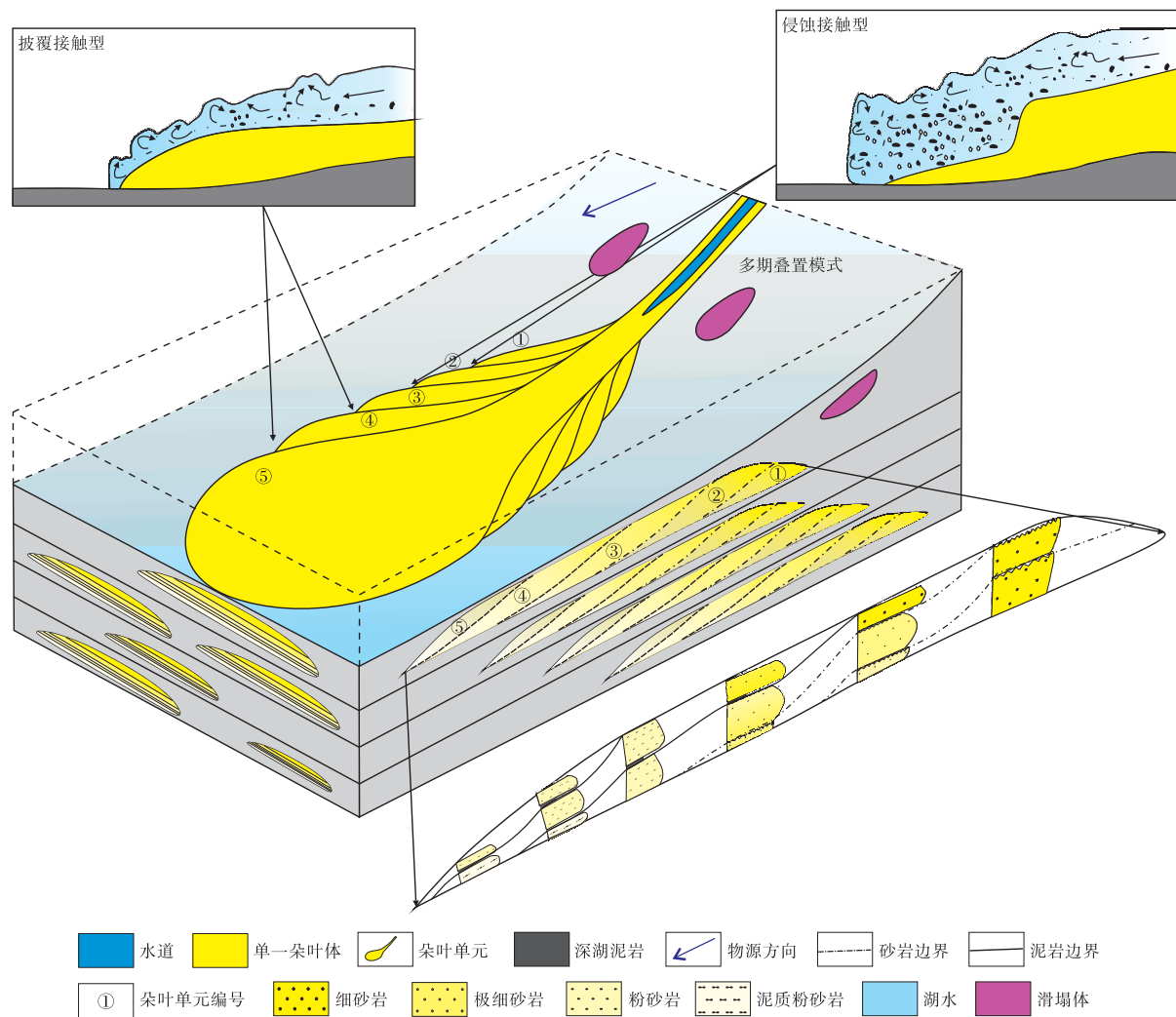


图 12 拗陷湖盆湖底扇单一朵叶体内部构型模式

Fig. 12 Internal architectural model of a single lobe in a subaqueous fan within a lacustrine depression basin

事件规模差异的影响。在规模较大的洪水事件中，由于泥砂流体浓度高、侵蚀作用强，朵叶单元间形成砂—砂接触，表现为界面参差、前积角度陡峭的“侵蚀型”叠置(图 12-b)；在规模较小的洪水事件中，流体能量减弱，泥砂流体浓度降低、侵蚀作用弱，以沉积作用为主，朵叶单元间过渡为砂—泥接触，呈现界面平整、前积角度平缓的“披覆型”叠置(图 12-a)。

本研究建立的构型模式(图 12)系统揭示了单一朵叶体内部岩相组合的顺源演化规律与垂向叠置机制，阐明了洪水事件规模对砂体前积样式及接触关系的控制作用。该成果为拗陷湖盆湖底扇重力流朵叶体沉积体系研究提供了理论支撑，对湖底扇地下井间预测具有重要指导价值。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地马泉剖面发育 1 套厚层灰黑—黑色深湖泥页岩夹薄层湖底扇朵叶砂体的岩性组合。发育 3 种沉积微相类型，分别为朵叶体、深湖泥岩和滑塌体，朵叶体以发育块状砂岩相为主，深湖泥岩主要为块状泥岩相和水平层理页岩相，滑塌体是斜坡上砂体失稳发生滑动滑塌作用形成。

2) 鄂尔多斯盆地马泉剖面单一朵叶剖面上呈丘状，顺物源方向，砂岩粒度逐渐变细，岩相组合由整合的块状细砂岩相—块状细砂岩相，逐渐变化为块状极细砂岩相—块状细砂岩相，变化为块状粉砂岩相—薄层水平层理页岩相—块状极细砂岩相，最终变化为块状泥质粉砂岩相—厚度增大的泥页岩

相一块状粉砂岩相,砂体厚度呈现由厚逐渐减薄的趋势。

3) 鄂尔多斯盆地马泉剖面受控于洪水期强物源供给控制,顺源方向上,单一朵叶内部多期朵叶单元呈前积叠置,朵叶单元形态则由扁丘状演变为楔状,最终转变为鼓丘状,厚度主要呈现薄—厚—薄的变化;受洪水规模的影响,厚层朵叶单元之间为“侵蚀型”高角度前积样式,薄层朵叶单元之间呈现“披覆型”低角度前积样式。

参考文献 (References)

- 操应长,姜在兴,夏斌,杨伟利. 2004. 陆相断陷湖盆 T-R 层序的特点及其控制因素: 以东营凹陷古近系沙河街组三段层序地层为例. 地质科学, 39(1): 111–122. [Cao Y C, Jiang Z X, Xia B, Yang W L. 2004. Characteristics and controlling factors of T-R sequences in continental rift lake basins: a case study of the third Member of the Paleogene Shahejie Formation in the Dongying Depression. Chinese Journal of Geology, 39(1): 111–122]
- 邓宏文,钱凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 95–104. [Deng H W, Qian K. 1993. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 95–104]
- 邓秀芹,付金华,姚泾利,庞锦莲,孙勃. 2011. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破. 古地志学报, 13(4): 443–455. [Deng X Q, Fu J H, Yao J L, Pang J L, Sun B. 2011. Breakthrough of sedimentary facies and oil and gas exploration of the Middle and Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 13(4): 443–455]
- 邓秀芹,李文厚,刘新社,庞锦莲,刘鑫. 2009. 鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论. 地质学报, 83(8): 1089–1096. [Deng X Q, Li W H, Liu X S, Pang J L, Liu X. 2009. Discussion on the stratigraphic boundary between Middle Triassic and Upper Triassic. Acta Geologica Sinica, 83(8): 1089–1096]
- 范玉海,屈红军,王辉,杨县超,冯杨伟. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用: 以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例. 中国地质, 39(2): 382–389. [Fan Y J, Qu H J, Wang H, Yang X C, Feng Y W. 2012. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: a case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin. Geology in China, 39(2): 382–389]
- 付金华,邓秀芹,楚美娟,张海峰,李士祥. 2013. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义. 沉积学报, 31(5): 928–938. [Fu J H, Deng X Q, Chu M J, Zhang H F, Li S X. 2013. Features of deepwater lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and its petroleum significance. Acta Sedimentologica Sinica, 31(5): 928–938]
- 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. Exploration discovery and resource potential of shale oil in the Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. China Petroleum Exploration, 26(5): 1–11]
- 顾静,周杰,赵景波,杨林海,张昌盛. 2011. 泾河泾阳段高河漫滩沉积与洪水事件. 沉积学报, 29(3): 561–571. [Gu J, Zhou J, Zhao J B, Yang L H, Zhang C S. 2011. Flood sediments in floodplain and flood events of Jingyang Reach in Jing river. Acta Sedimentologica Sinica, 29(3): 561–571]
- 惠潇,侯云超,陈修,龙盛芳,喻建,赵俊峰,刘永涛. 2024. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组层序地层再认识及地质意义. 沉积学报, 42(5): 1553–1567. [Hui X, Hou Y C, Chen X, Long S F, Yu J, Zhao J F, Liu Y T. 2024. Re-recognition of sequence stratigraphy and geological significance of the Yanchang Formation in the Longdong area of the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 42(5): 1553–1567]
- 吉利明,吴涛,李林涛. 2006. 陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征. 沉积学报, 24(3): 426–431. [Ji L M, Wu T, Li L T. 2006. Paleoclimatic characteristics during sedimentary period of main source rocks of Yanchang Formation (Triassic) in eastern Gansu. Acta Sedimentologica Sinica, 24(3): 426–431]
- 李相博,刘化清,潘树新,王菁. 2019. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来. 沉积学报, 37(5): 904–921. [Li X B, Liu H Q, Pan S X, Wang J. 2019. Past, present and future research on gravity flows of lacustrine sediments in China. Acta Sedimentologica Sinica, 37(5): 904–921]
- 刘化清,袁剑英,李相博,完颜容,廖建波. 2007. 鄂尔多斯盆地延长期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, Wan Y R, Liao J B. 2007. Evolution and genesis analysis of extended lake basin in Ordos Basin. Lithologic Oil and Gas Reservoirs, 19(1): 52–56]
- 刘明成,吴胜和,万晓龙,李桢,樊建民,陈朝晖,刘海旭. 2024. 鄂尔多斯盆地庆城油田延长组页岩层序地层与沉积相特征. 古地志学报, 26(4): 779–795. [Liu M C, Wu S H, Wan X L, Li Z, Fan J M, Chen Z H, Liu H X. 2024. Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the shale system in the Yanchang Formation of the Qingcheng Oilfield, Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(4): 779–795]
- 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. [Lü Q Q, Fu J H, Luo S S, Li S X, Zhou X P, Pu X Y, Yan H G. 2022. Sedimentary characteristics and models of gravity flow channels and lobe complexes in fault lake basins: a case study of the Chang 7 section in the Triassic Yanchang Formation of the southwestern Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 49(6): 1143–1156]
- 吕奇奇,罗顺社,付金华,向吉,牛小兵,龚辰,李士祥. 2017. 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. 地质学报, 91(3): 617–628. [Lü Q Q, Luo S S, Fu J

- H, Xiang J, Niu X B, Gong C, Li S X. 2017. Fine stratigraphic dissection of deepwater gravity flow deposits in lake basins: a case study of the Chang 7 oil reservoir in the Yaoqu section of the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 617–628]
- 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. Sedimentary model of lake-terrace channel-lobe turbidite fans in the southern Ordos Basin Yanchang Formation. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 52(1): 144–158]
- 乔世海, 李玉宏, 郭望, 张云鹏, 王勇. 2019. 陕西铜川地区延长组长 7 油页岩无机地球化学特征及古环境恢复. 石油实验地质, 41(1): 121–126. [Qiao S H, Li Y H, Guo W, Zhang Y P, Wang Y. 2019. Inorganic geochemical characteristics and paleoenvironment of Chang 7 oil shale in Yanchang Formation, Tongchuan area, Shaanxi Province. *Petroleum Geology & Experiment*, 41(1): 121–126]
- 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 毛光周, 王建强. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义. 沉积学报, 27(6): 1138–1146. [Qiu X W, Liu C Y, Li Y H, Mao G Z, Wang J Q. 2009. Distribution characteristics and geological significance of tuff intercalation in Yanchang Formation of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1138–1146]
- 屈雪峰, 王武荣, 谢启超, 岳大力, 刘建, 吴胜和, 张雪婷, 胡嘉靖. 2021. 拗陷湖盆湖底扇储层单砂体构型: 以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系长 6 油层组为例. 地球科学与环境学报, 43(5): 850–867. [Qu X F, Wang W R, Xie Q C, Yue D L, Liu J, Wu S H, Zhang X T, Hu J J. 2021. Single sandbody architecture of lacustrine fan reservoirs in fault lake basins: a case study of the Chang 6 oil reservoir in the Heshui area of the Ordos Basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(5): 850–867]
- 孙莎莎, 姚艳斌, 吝文. 2015. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区油页岩元素地球化学特征及古湖泊水体环境. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 642–645. [Sun S S, Yao Y B, Lin W. 2015. Geochemical characteristics of oil shale elements and paleo-lake water environment in Tongchuan area of southern Ordos Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 642–645]
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥, 尤靖茜. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义. 沉积学报, 35(6): 1265–1273. [Wang F, Liu X C, Deng X Q, Li Y H, Tian J C, Li S X, You J Q. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265–1273]
- 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 印森林. 2013. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨. 高校地质学报, 19(1): 12–22. [Wu S H, Ji Y L, Yue D L, Yin S L. 2013. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 12–22]
- 吴智平, 周瑶琪. 2000. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法. 沉积学报, 18(3): 395–399. [Wu Z P, Zhou Y Q. 2000. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 395–399]
- 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]
- 鄢继华, 陈世悦, 程立华, 吴中彬. 2009. 湖平面变化对扇三角洲发育影响的模拟试验. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(6): 1–10. [Yan J H, Chen S Y, Cheng L H, Wu Z B. 2009. Simulation experiment on the effect of lake level changes on fan delta development. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 33(6): 1–10]
- 杨华, 傅强, 齐亚林, 周新平, 龚宁, 黄少雄. 2016. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组古湖盆生物相带划分及地质意义. 沉积学报, 34(4): 688–693. [Yang H, Fu Q, Qi Y L, Zhou X P, Gong N, Huang S X. 2016. The paleontology phase zones and its geological significance on the Late Triassic Yanchang Stage palaeo-lacustrine Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(4): 688–693]
- 杨华, 张军, 王飞雁, 王怀厂. 2000. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征. 天然气工业, 20(6): 7–11. [Yang H, Zhang J, Wang F Y, Wang H C. 2000. Characteristics of the gas-bearing system in the Paleozoic of the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 7–11]
- 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]
- 杨可薪, 肖军, 王宇, 宁霄洋. 2017. 松辽盆地北部青山口组致密油特征及聚集模式. 沉积学报, 35(3): 600–610. [Yang K X, Xiao J, Wang Y, Ning X Y. 2017. Characteristics and accumulation patterns of tight oil in the Qingshankou Formation, northern Songliao Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3): 600–610]
- 杨仁超, 尹伟, 樊爱萍, 韩作振. 2017. 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. 古地理学报, 19(5): 791–806. [Yang R C, Yin W, Fan A P, Han Z Z. 2017. Lacustrine gravity flow sedimentary fine-grained rocks in the Triassic Yanchang Formation in the southern Ordos Basin and their significance for oil and gas geology. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5): 791–806]
- 杨田, 操应长, 田景春. 2021. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识. 沉积学报, 39(1): 88–111. [Yang T, Cao Y C, Tian J C. 2021. Some reflections on the study of deep-water gravity flow deposits in terrestrial lacustrine basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 88–111]
- 张才利, 高阿龙, 刘哲, 黄静, 杨亚娟, 张艳. 2011. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究. 天然气地球科学, 22(4): 582–587. [Zhang C L, Gao A L, Liu Z, Huang J, Yang Y J, Zhang

- Y. 2011. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang 7 oil layer in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 582–587]
- 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 understanding of sequence stratigraphy characteristics of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Journal of Stratigraphy*, 32(1): 99–105]
- 张佳佳,吴胜和. 2019. 海底扇朵叶沉积构型研究进展. *中国海上油气*, 31(5): 88–106. [Zhang J J, Wu S H. 2019. Research progress on the depositional architecture of submarine-fan lobes. *China Off-shore Oil and Gas*, 31(5): 88–106]
- 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. Sedimentary characteristics and distribution of lake bottom fan deposits during the synrift stage in the Songliao Basin: a case study of the Qingshankou Formation in the Yingtai area. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 318–325]
- 赵景波,周晓红,孙贵贞. 2007. 咸阳渭河高漫滩沉积洪水变化研究. *沉积学报*, 25(4): 597–602. [Zhao J B, Zhou X H, Sun G Z. 2007. Study on sedimentary flood variation of the Gaoman beach in Xianyang, Wei River. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 597–602]
- 周洪瑞. 1999. 华北地台南部中新元古界层系地层研究. 北京:地质出版社. [Zhou H R. 1999. *Stratigraphic Study of the Neoproterozoic-Cambrian Succession in the Southern North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House]
- 朱筱敏,康安,王贵文. 2003. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨. *沉积学报*, 21(2): 283–287. [Zhu X M, Kang A, Wang G W. 2003. Discussion on sequence stratigraphy patterns of continental depression and rift lake basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 283–287]
- 邹才能,赵政璋,杨华,付金华,朱如凯,袁选俊,王岚. 2009. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征:以鄂尔多斯盆地为例. *沉积学报*, 27(6): 1065–1075. [Zou C N, Zhao Z Z, Yang H, Fu J H, Zhu R K, Yuan X J, Wang L. 2009. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin: a case study of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1065–1075]
- Bella P, Gradziński M, Hercman H, Leszczyński S, Nemec W. 2021. Sedimentary anatomy and hydrological record of relic fluvial deposits in a karst cave conduit. *Sedimentology*, 68: 425–448.
- Bryn J, David A. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111(1–4): 111–129.
- Bryant M, Falk P, Paola C. 1995. Experimental study of avulsion frequency and rate of deposition. *Geology*, 23: 365–368.
- Chen P, Xian B Z, Li M J, Liang X W, Wu Q R, Zhang W M, Wang J H, Wang Z, Liu J P. 2021. A giant lacustrine flood-related turbidite system in the Triassic Ordos Basin, China: sedimentary processes and depositional architecture. *Sedimentology*, 68: 3279–3306.
- Cramer B L, Allan J R L. 2014. Climate and hydrodynamic controls on the sedimentary architecture of lake systems. *Earth-Science Reviews*, 129: 1–14.
- Fu C, Yu X, Li S. 2023. Multiple sediment source infill in a low-accommodation basin: implications for the late Paleozoic sediment routing system in the southeastern Ordos Basin. *Geological Magazine*, 160(9): 1649–1672.
- Liu J P, Xian B Z, Wang J H, Ji Y L, Lu Z Y, Liu S J. 2017. Sedimentary architecture of a sub-lacustrine debris fan: eocene Dongying depression, Bohai Bay Basin, east China. *Sedimentary Geology*, 362: 66–82.
- Liu M C, Wu S H, Yue D L, Xu Z H, Wan X L, Wu H L, Chen Z H, Li Z. 2025. Palaeogeomorphological control on the depositional architecture of lacustrine gravity-flow deposits in a depression lacustrine basin: a case study of the Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China. *Journal of Palaeogeography*, 14(2): 476–500.
- Thierry M, James P S, Sébastien M, Jean-Claude F, Bruno S. 2003. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. a review. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6–8): 861–882.
- Wu Q R, Xian B Z, Gao X Z, Tian R H, Zhang H Z, Liu J P, Gao Y K, Wang P Y. 2023. Diversity of depositional architecture and sandbody distribution of sublacustrine fans during forced regression: a case study of paleogene Middle Sha 3 Member in Dongying sag, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 894–908.
- Yao Q, Joshi S, Liu K-B, Rodrigues E, Yin D. 2022. A multi-decadal analysis of river discharge and suspended sediment load in three Texas coastal rivers in relation to hurricanes, seasonal rainfall, and ENSO. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1–17.
- Zou C N, Qiu Z, Zhang J Q, Li Z Y, Wei H Y, Liu B, Zhao J H, Yang T, Zhu S F, Tao H F, Zhang F Y, Wang Y M, Zhang Q, Liu W, Liu H L, Feng Z Q, Liu D, Gao J L, Liu R, Li Y F. 2022. Unconventional petroleum sedimentology: a key to understanding unconventional hydrocarbon accumulation. *Engineering*, 18: 62–78.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J, Li L. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of humid climate events in the Middle-Late Triassic (Ladinian-Carnian) of the Ordos Basin, central China. *Marine and Petroleum Geology*, 131: 105179.

(责任编辑 王绍华)