

陇东地区延长组 7_3 亚段细粒沉积岩相分布规律 及沉积模式: 基于水槽沉积模拟实验*

姜道广¹ 罗顺社¹ 陈亮² 代榕³ 蒲宇新¹
周庆安¹ 闫红果¹ 庞锦莲⁴

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 中国石油长庆油田分公司第七采油厂, 陕西西安 710200

3 长江大学物理与光电工程学院, 湖北荆州 434023

4 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 为明确鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组 7_3 亚段细粒沉积岩相分布和沉积模式, 以陇东地区长 7_3 亚段细粒沉积岩相及沉积序列特征为例, 开展了水槽模拟实验。该模拟实验总计 13 个实验轮次, 可划分为 3 个沉积期, 实验过程中借助 3D 扫描仪、4K 高清摄像仪和流速测量仪等测量手段, 完成了长 7_3 亚段细粒沉积过程的定量表征。实验结果表明: (1) 陇东地区长 7_3 亚段主要发育 4 种岩相, 分别为凝灰岩相、粉—细砂岩相、粉砂岩相和泥页岩相, 且根据沉积环境特征共识别出 9 种岩相组合类型; (2) 自物源区到深湖区, 岩相组合的粒度呈变细的趋势, 即随着向湖盆方向的推进, 水动力由高动能向低动能转化, 凝灰岩、细砂岩和粉—细砂岩沉积厚度变小, 而泥岩沉积厚度变大; (3) 受古地貌、水动力及物源控制, 陇东地区长 7_3 亚段细粒沉积岩相分布具显著规律性, 即斜坡区距离物源近、水动力多处于高动能阶段, 主要发育厚层凝灰岩夹薄层泥岩和厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩, 古脊—沟道区主要发育泥岩与凝灰岩互层、厚层粉砂岩夹薄层泥岩、粉砂岩与泥岩互层、粉—细砂岩与泥岩互层和厚层泥岩夹薄层粉—细砂岩, 深湖区典型岩相为厚层泥岩夹凝灰岩和厚层泥岩夹薄层粉砂岩。依据上述实验结果, 认为陇东地区长 7_3 亚段沉积时期, 水动力条件的变化控制着细粒沉积岩相组合发育类型, 物源供给的强弱影响着细粒沉积岩相组合发育规模, 古地貌单元类型直接影响了水体能量变化和细粒沉积物的搬运沉积, 三者共同作用, 决定了细粒沉积岩相组合的空间分布。本次水槽沉积模拟实验建立的深水细粒沉积模式, 对鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7_3 亚段页岩油气勘探与开发具有重要的指导意义。

关键词 细粒沉积 岩相分布 沉积模式 水槽实验 延长组 陇东地区 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 姜道广, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: 2821186164@qq.com。

通讯作者简介 代榕, 女, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事地球物理应用与沉积模拟实验研究。E-mail: 85552240@qq.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Distribution law and sedimentary pattern of fine-grained lithofacies in the Chang 7_3 submember of Yanchang Formation in Longdong area: based on flume depositional simulation experiments

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42102170) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42102170)]

收稿日期: 2024-05-21 改回日期: 2024-07-15

JIANG Daoguang¹ LUO Shunshu¹ CHEN Liang² DAI Rong³ PU Yuxin¹
ZHOU Qing'an¹ YAN Hongguo¹ PANG Jinlian⁴

¹ School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

² The 7th Oil Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 710200, China

³ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Hubei Jingzhou 434023, China

⁴ Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 710018, China

Abstract To investigate the spatial distribution and depositional patterns of fine-grained lithofacies in the Chang 7₃ submember of the Triassic Yanchang Formation in the Longdong area of Ordos Basin, a series of flume simulation experiments were conducted. The experimental design consisted of 13 rounds grouped into three depositional stages. Quantitative data on the fine-grained depositional processes were acquired using a 3D scanner, 4K high-resolution video capture, and flow velocity sensors. The experimental results show that: (1) Four main lithofacies were identified in the experiments: tuff, fine- to very fine-grained sandstone, siltstone, and mudstone. Based on depositional environment characteristics, nine lithofacies assemblage types were recognized; (2) From the sediment source to the deep lacustrine area, a progressive fining trend in lithofacies is observed. Hydrodynamic energy decreases basinward, leading to reduced thicknesses of tuff and sandstone deposits and increased accumulation of mudstone; (3) The paleomorphology, hydrodynamics and material source control fine-grained sedimentary lithology distribution with remarkable regularity. The typical rock phases in the deep lake area are thick mudstone interbedded with tuff and thick mudstone interbedded with thin layer of siltstone; Hydrodynamic regime governs the types of fine-grained lithofacies assemblages. The scale of their development is influenced by the strength of sediment supply. In addition, the nature of paleogeomorphic units affects water energy distribution and sediment transport pathways, ultimately determining the spatial configuration of lithofacies assemblages. The experimental results provide a conceptual model of fine-grained deposition under deep-water conditions, offering valuable guidance for shale oil and gas exploration in the Chang 7₃ submember of the Yanchang Formation in the Longdong area, Ordos Basin.

Key words fine-grained sediments, petrographic distribution, sedimentary pattern, flume experiments, Yanchang Formation, Longdong area, Ordos Basin

About the first author JIANG Daoguang, born in 2000, master's degree candidate, is mainly engaged in research on sedimentology. E-mail: 2821186164@qq.com.

About the corresponding author DAI Rong, born in 1979, Ph. D., associate professor, is mainly engaged in researches on geophysical applications and experimental research on sedimentation simulation. E-mail: 85552240@qq.com.

目前,页岩油已经成为中国油气资源结构的重要组成部分。鄂尔多斯盆地是中国最大的陆相含油气盆地之一(付金华等, 2014, 2021; 党伟等, 2022; 郭芪恒等, 2023),页岩油资源丰富,其中延长组7段(文中简称“长7段”)广泛发育细粒沉积岩,是鄂尔多斯盆地页岩油勘探的一个重要层段(张家强等, 2021; 屈童等, 2023; 王梓毅

等, 2023; 何鑫等, 2024)。细粒沉积物一般指粒度小于62.5 μm的沉积物(Krumbein, 1932),而细粒沉积岩是指粒径小于62.5 μm的颗粒占比大于50%的沉积岩(周川闽等, 2021; 朱如凯等, 2022)。近年来,随着页岩油勘探开发的深入,在前人对细粒沉积的成因(Stow and Shanmugam, 1980; 柳波等, 2015; Hovikoski, 2016)、沉积物

组构 (Mutti *et al.*, 2003; 张顺等, 2017) 以及搬运机制 (姜在兴等, 1993, 2022; Talling, 2014) 等研究的基础上, 学者们对鄂尔多斯盆地延长组长 7 段细粒沉积岩的特征 (李威和文志刚, 2017; 吕奇奇等, 2018; 李森等, 2020)、动力学 (黄军平等, 2023)、沉积模式 (张倚安等, 2021; 冯烁等, 2022; 吕奇奇等, 2023; 祝海华等, 2024) 和成因机制 (张倚安, 2021; 申静静等, 2023) 等的研究取得了较大进展。然而, 当前长 7 段细粒沉积岩的研究仍存在问题, 如对于长 7₁ 和长 7₂ 亚段都发育大段砂体但是长 7₃ 亚段只发育少量薄层砂体以及该薄层砂体为什么能够远距离搬运到深湖区的问题, 均无法简单套用以往的经验。

因此, 为探究长 7₃ 亚段细粒沉积岩相特征及其分布规律, 笔者基于以往的研究成果进行水槽沉积模拟实验, 深入分析细粒沉积的沉积过程, 以明确长 7₃ 亚段细粒沉积岩相分布规律, 探究影响细粒沉积岩分布的因素并建立相应的沉积模式。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部, 是一个整体沉降、拗陷迁移、构造简单的大型多旋回沉积盆地 (袁伟等, 2016; 李庆等, 2022; 崔德艺等, 2023; 刘翰林等, 2023) (图 1-a)。受印支运动影响, 三叠纪鄂尔多斯盆地的沉积环境出现了本质的转变, 从原来的海陆过渡环境转化为陆相环境, 且其沉积物完整记录了湖盆从形成到扩展再到消失的过程 (He *et al.*, 2019; 党伟等, 2022)。其中长 7 段沉积时期, 强烈的拗陷作用造成大规模湖泛, 湖盆范围持续扩展。

研究区位于鄂尔多斯盆地陇东地区, 横跨西缘冲断带南部、天环拗陷南部和伊陕斜坡西南部。长 7₃ 沉积期, 该地区共有高地、坡折带、湖底平原、湖底深洼、古沟道、湖底古脊和湖底古隆起 7 个微古地貌单元, 主要物源方向为西南和南部 (图 2) (吕奇奇等, 2022; 杨哲翰等, 2023)。该时期湖盆面积最大、水体最深且构造

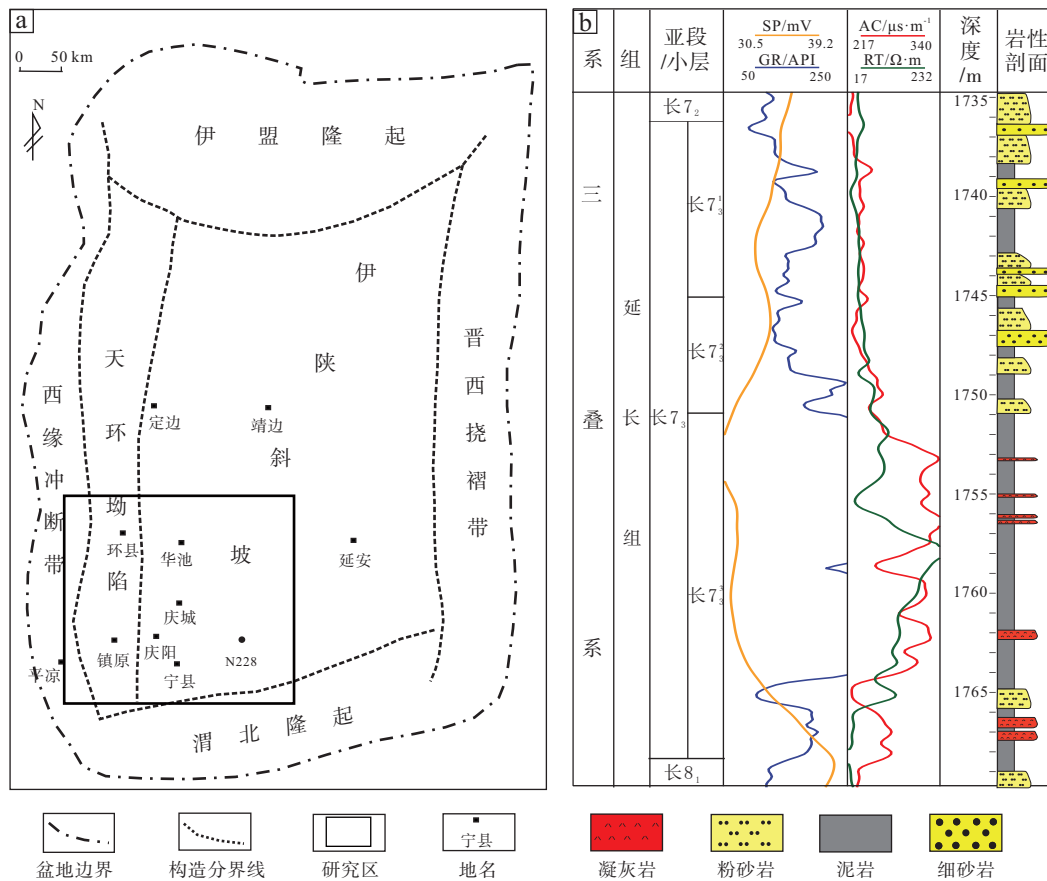
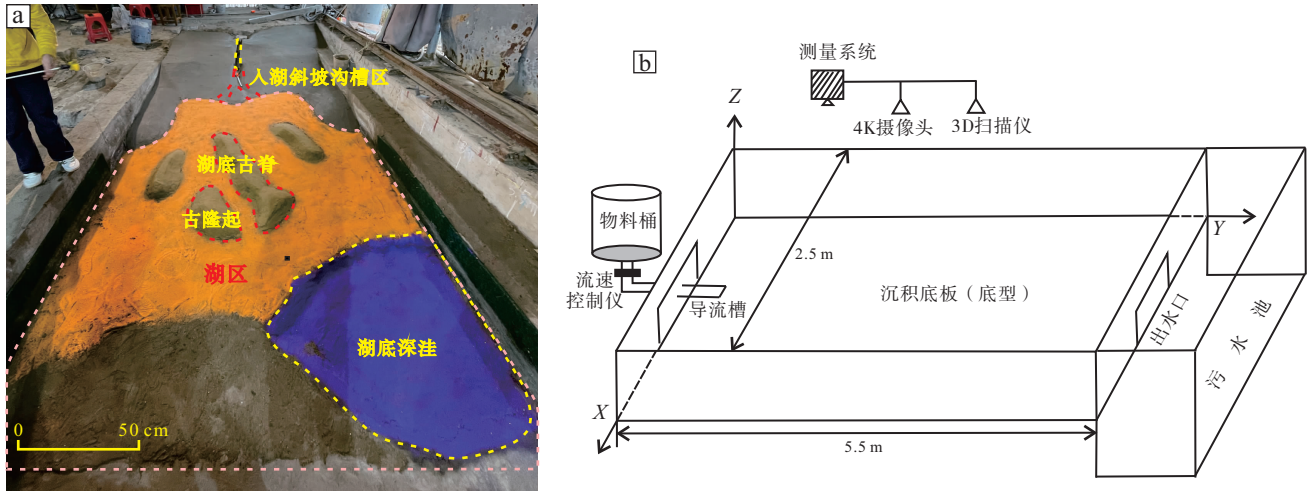


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元 (据吕奇奇等, 2023) 及 N228 井长 7₃ 亚段地层柱状图

Fig. 1 Tectonic units in Ordos Basin (after Lü *et al.*, 2023) and stratigraphic histogram of the Chang 7₃ submember in Well N228



a—水槽实验古地貌底型；b—水槽模拟实验装置

图 3 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₃ 亚段水槽模拟实验装置及实验古地貌底形

Fig. 3 Flume simulation experimental equipment and paleogeomorphic bottom geometry of the Chang 7₃ submember in Longdong area, Ordos Basin

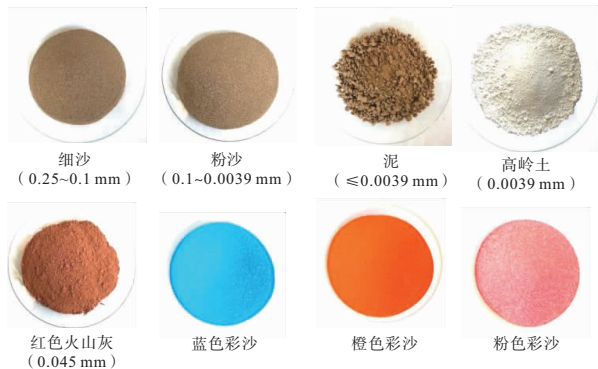


图 4 水槽模拟实验材料样品照片

Fig. 4 Photographs of experimental material samples used in flume simulation experiment

粉砂岩—细砂岩段，且砂质逐轮增加（实验轮次 11~13）。研究区长 7 段沉积时期湖盆水体最深达到 50~120 m（张才利等，2011），长 7₃ 沉积时期湖盆面积达到最大、水体最深，且该时期是一个水体逐渐变浅的过程（王岚等，2023）。考虑到实际模拟为深水条件下的细粒沉积，因此为确保在水深持续下降、沉积物厚度不断增加的情况下仍保持深水条件，设置水位为水槽最大深度 86 cm，且水位逐期下降。在设计每一轮次时长时，考虑到泥岩沉积期湖平面较为稳定或者下降速率较慢，依据物源中泥岩比例增大，相应地将沉积时间也加长。实验基本参数见表 1。

表 1 水槽模拟实验参数设计

Table 1 Parametric design of flume simulation experiment

沉积期次	实验轮次	时长 / h	水位 / cm	初始流速 / m·s ⁻¹	沉积物组成
第 1 期	1	6	86.0~83.0	0.2	3:1(凝灰质:泥)
	2	12	83.0~80.0	0.2	纯泥质
	3	9	80.0~77.0	0.2	1:1(凝灰质:泥)
	4	12	77.0~74.0	0.2	纯泥质(夹少量粉沙)
	5	12	74.0~71.0	0.2	纯泥质(夹少量粉沙)
	6	10	71.0~68.0	0.2	1:5(凝灰质:泥)
	7	12	68.0~65.0	0.2	纯泥质
第 2 期	8	7	65.0~62.0	0.2	1:2(粉沙:泥)
	9	9	62.0~59.0	0.2	1:1(粉沙:泥)
	10	7	59.0~56.0	0.2	2:1(粉沙:泥)
第 3 期	11	7	56.0~53.0	0.2	1:1:4(细沙:粉沙:泥)
	12	9	53.0~50.0	0.2	1:1:2(细沙:粉沙:泥)
	13	6	50.0~47.0	0.2	2:1:1(细沙:粉沙:泥)

3 实验过程

3.1 长 7₃ 小层：第 1 沉积期

实验初期，携带以泥级沉积物为主的水流沿固定河道顺着坡折带缓慢地在湖区中沉积。在水流入湖后，由于古脊和沟道的分流作用(图 5-a)，水流形态逐渐从近物源的扇状转变为远物源处的树枝状(图 5-b)，沉积物则集中分布在沟道中，在古脊上方仅留有少量沉积物（大部分是悬浮沉积），

在古脊迎流面的沉积物厚度大于背流面，坡脚的沉积厚度大于古脊顶峰(图 5-c, 5-d)。

由于沉积物源供给充分，沉积物在斜坡至坡脚处大量沉降(图 5-d, 5-e)。深湖区为良好的沉积场所，此处由于长距离搬运流体速度变慢，大量泥质沉积(图 5-e)。至该期次结束，待沉积物完全沉积后，将水槽装置中的水全部放尽，然后铺上粉色彩沙作为期次间的间隔。

该沉积期湖水位整体由最高处缓慢降低，但由于处于实验初期，此时可容纳空间大，沉积物发育速度快，沉积范围广。物源以泥级沉积物为主，夹部分粉砂岩。沉积物在 Y 轴方向 0~2.5 m 处的沉积厚度最大(图 6-a)，而且有少量粉沙被携带至深湖区，呈分散状展布。

3.2 长 7_3^2 小层：第 2 沉积期

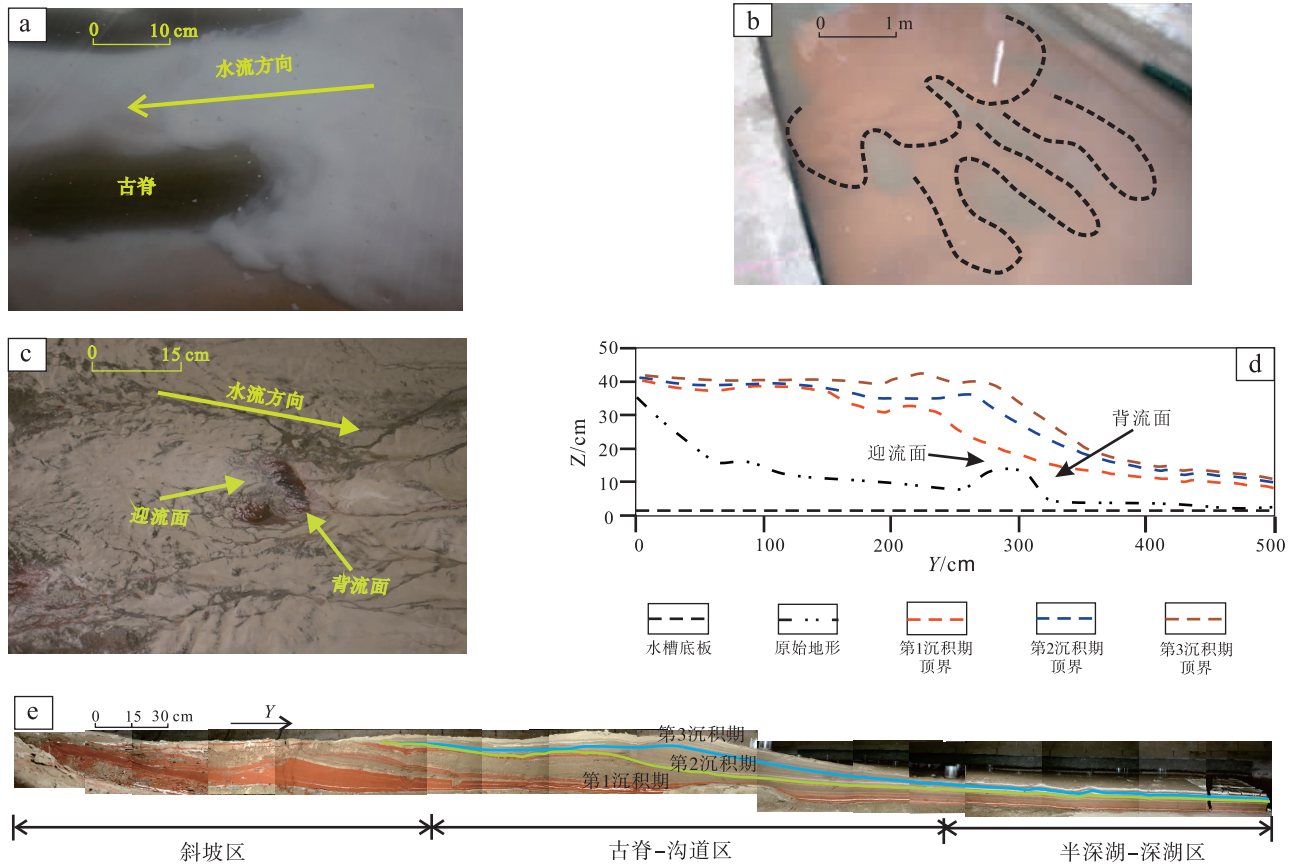
在经过第 1 沉积期实验后，原始古地貌基本被填平，无法对后续沉积期沉积物沉降及水流形态造

成影响。当湖水位继续缓慢下降、流速保持不变、沉积物源处供给粉砂占比持续增大时，可见在斜坡至坡脚处的细粒沉积逐渐变厚。由于近物源处的流速较大，因而在斜坡处泥质沉积少见，其大部分在水动力很弱的半深湖—深湖区缓慢沉降(图 5-e)。

在该期次实验初期，细粒沉积物在水流及重力的双重作用下开始运动，速度较快，为整体运动；实验中期，水动力逐渐减小，沉积物随着水流的前进逐步沉降；实验末期，水流到达半深湖—深湖区，此时水动力极弱，呈云雾状搬运。该期次沉积厚度最大处位于 Y 轴方向 2.5 m 附近(图 6-b)。

3.3 长 7_3^1 小层：第 3 沉积期

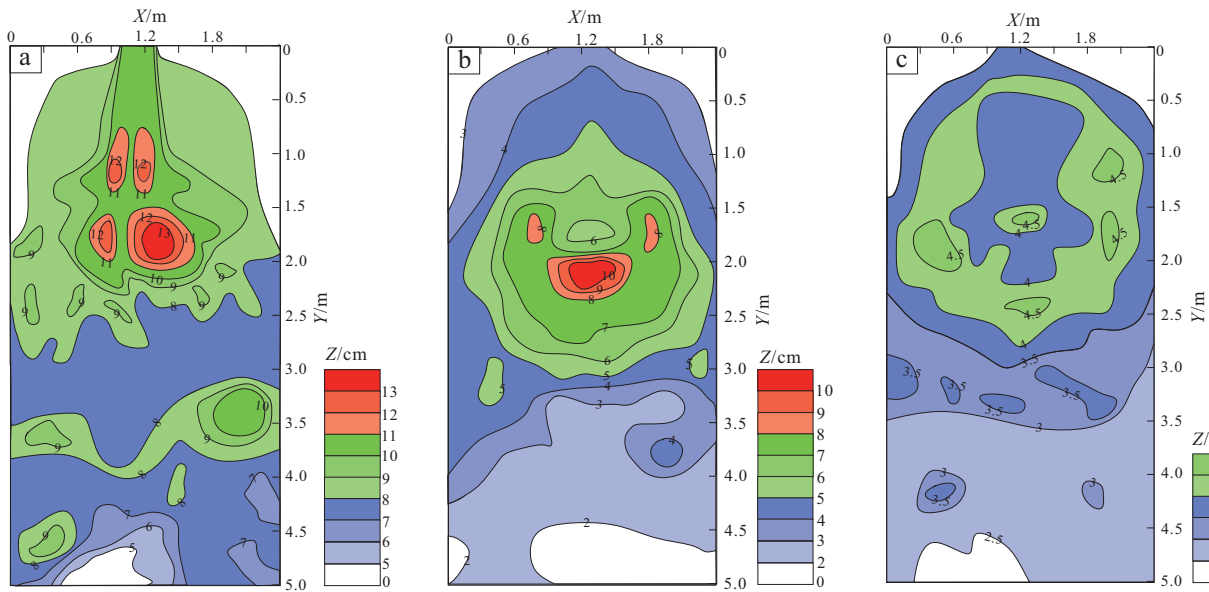
在前 2 期实验结束后，由于沉积物沉降以及湖盆水平面的持续降低，沉积物可容纳空间进一步变小，但物源流速不变，此时水流携带的细粒沉积物在斜坡处不仅快速向前推进，而且也向两侧快速填充，从而有利于细粒沉积物在整个实验区域内大面



a—古脊分流；b—近—远物源水流形态；c—古脊处迎流面和背流面沉积图；d—沉积剖面厚度素描(X=1.2 m)；e—中央纵剖面(X=1.2 m)

图 5 水槽模拟实验沉积现象及剖面图

Fig. 5 Sedimentation phenomena and profiles of flume simulation experiment



a—第 1 沉积期沉积增量; b—第 2 沉积期沉积增量; c—第 3 沉积期沉积增量

图 6 水槽模拟实验过程中 3 个沉积期的沉积增量

Fig. 6 Sedimentary increment maps for three depositional periods of flume simulation experiment

积发育。斜坡上发生持续沉积, 并继续向前方和两侧推进, 整体能够展布至深湖区, 呈均匀薄层状 (图 6-c)。

4 细粒沉积岩相分布特征

为探究长 7_3 亚段细粒沉积岩相分布特征, 对实验后的沉积体进行切片分析 (图 7)。总计获得 23 条沉积体剖面, 其中横向剖面 16 条 (间隔 30 cm), 纵向剖面 7 条 (间隔 30 cm)。

4.1 岩相类型及特征

基于长 7_3 亚段地层特征, 并结合剖面切片精细刻画分析, 识别出本次实验主要发育 4 种岩相, 分别是凝灰岩相 (图 8-a)、粉砂岩相 (图 8-b)、粉—细砂岩相 (图 8-c) 和泥页岩相 (图 8-d)。

在岩相分类基础上, 根据各岩相的垂向组合特征, 总结出该次实验共发育 3 大类 9 种岩相组合。

1) 凝灰岩与泥岩组合。该组合由凝灰岩与泥岩叠置而形成, 为火山碎屑沉积与半深湖—深湖沉积交互形成。在本次模拟实验中, 主要发育 3 种组合: 组合 I 为厚层凝灰岩夹薄层泥岩, 组合 II 为泥岩与凝灰岩互层, 组合 III 为厚层泥岩夹薄层凝灰岩 (图 9-a, 9-b, 9-c)。

2) 粉砂岩与泥岩组合。该组合由粉砂岩相和

泥岩相相互叠置而形成, 为浊流沉积与半深湖—深湖沉积交互沉积的产物。在本次模拟实验中, 主要发育 3 种组合: 组合 IV 为厚层泥岩夹薄层粉砂岩, 组合 V 为粉砂岩与泥岩互层, 组合 VI 为厚层粉砂岩夹薄层泥岩 (图 9-d, 9-e, 9-f)。

3) 粉—细砂岩与泥岩组合。该组合由下至上发育粉—细砂岩相和泥岩相, 垂向上呈粒度向上变细的正韵律, 为浊流—深水原地沉积。在本次模拟实验中, 主要发育 3 种组合: 组合 VII 为厚层泥岩夹薄层粉—细砂岩, 组合 VIII 为粉—细砂岩与泥岩互层, 组合 IX 为厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩 (图 9-g, 9-h, 9-i)。

4.2 剖面特征

基于实验结果的剖面刻画分析, 探究细粒沉积的岩相展布规律。切片后各剖面岩相分布存在差异: 在 Y 轴方向 0~1 m 处的优势岩相组合为凝灰岩与泥岩组合; 随着坡折的变缓, 在 1~3 m 处发育砂岩与泥岩组合; 3 m 之后基本为湖盆中心, 砂岩和凝灰岩发育较差, 以泥岩为主。

在 $X = 1.2$ m (图 10-a) 处的中央纵剖面上, 第 1 沉积期以泥岩和凝灰岩的岩相组合为主, 偶夹粉砂岩。组合内部各岩相厚度有变化: 在近物源处细粒沉积物卸载较快, 沉积厚度出现先增大后减小的现象, 说明在斜坡处沉积能量有所加强, 之后逐

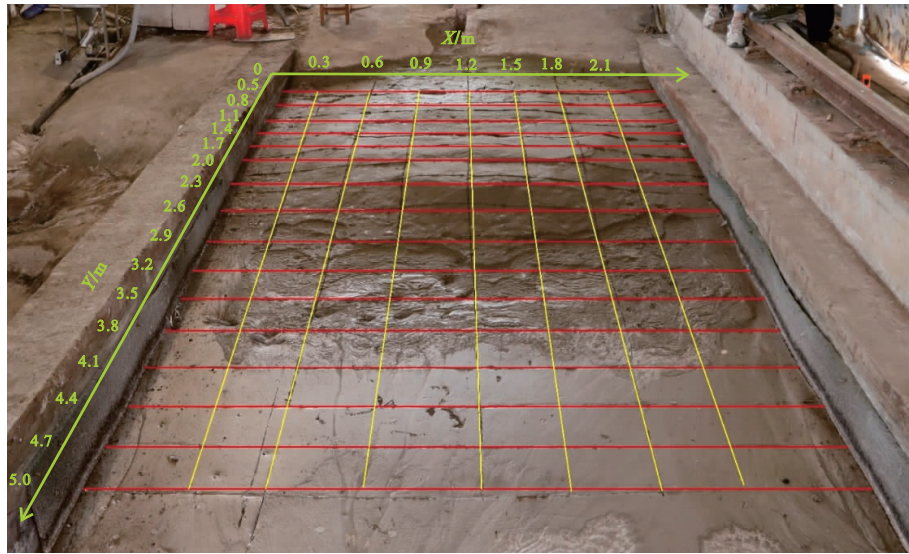
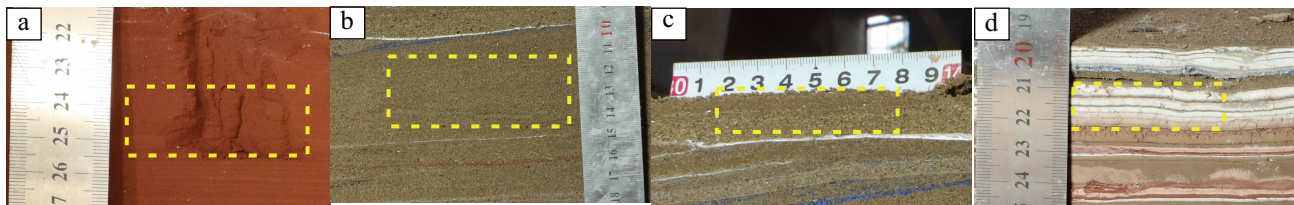


图 7 水槽模拟实验结果的切片位置平面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of slicing position of flume simulation experimental result



a—凝灰岩相 ($Y=1\text{ m}$ 横剖面, $X=1.2\sim 1.5\text{ m}$ 处); b—粉砂岩相 ($Y=2.6\text{ m}$ 横剖面, $X=0.9\sim 1.2\text{ m}$ 处);
c—粉—细砂岩相 ($Y=2.6\text{ m}$ 横剖面, $X=0.6\sim 0.9\text{ m}$ 处); d—泥岩相 ($Y=2.7\text{ m}$ 横剖面, $X=1.2\sim 1.5\text{ m}$ 处)

图 8 水槽模拟实验中发育的 4 种岩相

Fig. 8 Four lithofacies developed in flume simulation experiment

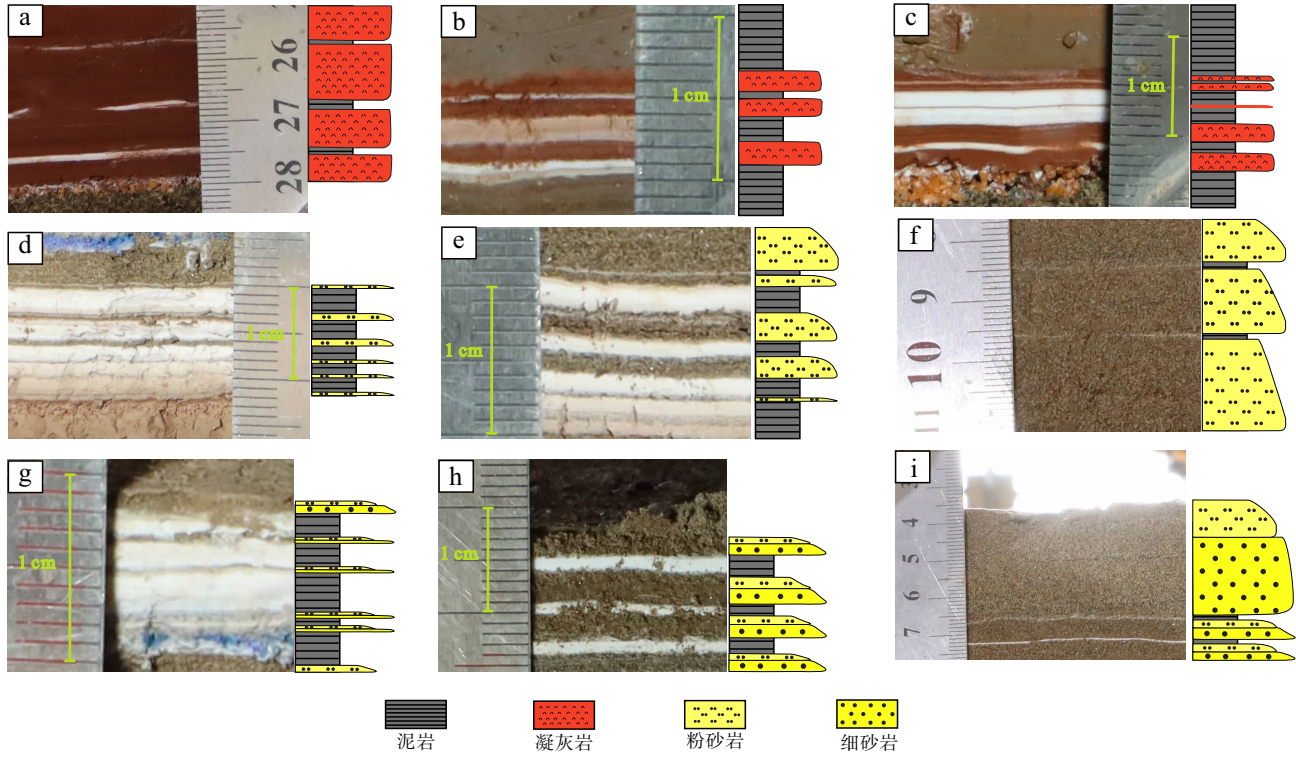
渐减弱;随着搬运距离的增加,细粒沉积物持续卸载沉积,逐渐由组合 I、组合 II 过渡到组合 III,偶夹组合 IV,剖面上呈现出火山碎屑流逐渐减少,深水原地沉积变多的特征。第 2 沉积期以粉砂岩和泥岩组合为主,组合内部各岩相厚度亦有变化,随着搬运距离增加在组合内部可见细砂岩占比逐渐小于粉砂岩,自近物源至远物源处岩相由组合 VI、组合 V 过渡到组合 IV,剖面上浊流沉积逐渐变少,深水沉积变多。第 3 沉积期为粉—细砂岩和泥岩组合,组合内部各岩相厚度发生变化,自近物源至远物源处岩相由组合 IX、组合 VIII 过渡到组合 VII,在剖面上浊流沉积逐步减少、深水原地沉积逐步变多。

在 $Y=3.5\text{ m}$ (图 10-b) 处的横剖面上,岩相呈平直的纹层状展布,古隆起处第 1 沉积期沉积厚度较小,其余区域沉积厚度发育稳定。横向上岩相组合变化不大,垂向上(由下至上)剖面中央发育组合 II、组合 V、组合 VI 和组合 VIII,呈现火山碎

屑流与深水原地沉积交互沉积、浊流沉积与深水原地沉积交互沉积。

4.3 平面展布特征

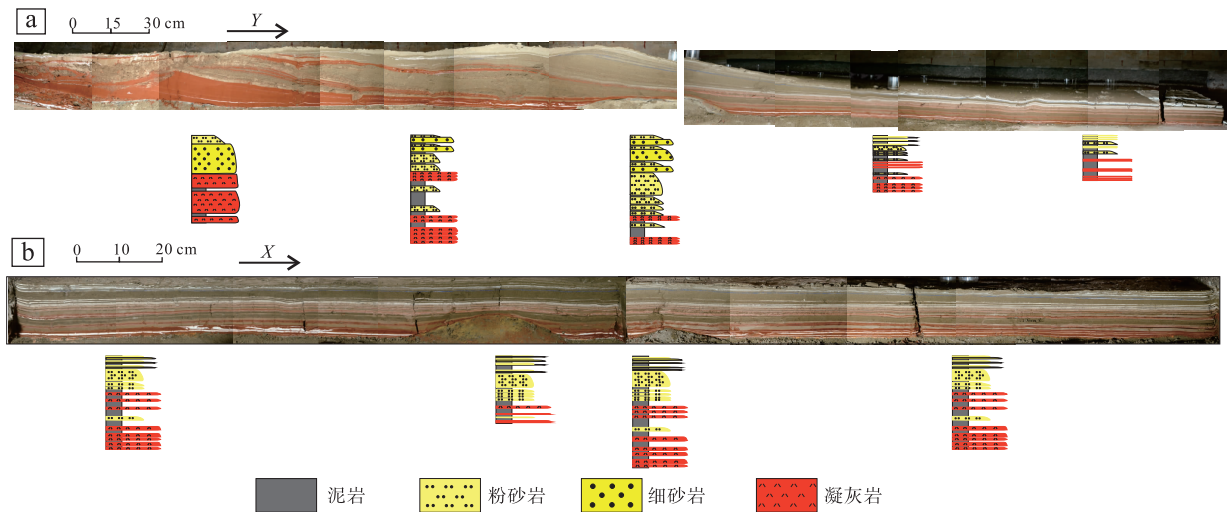
从水槽实验结果的平面图看,从物源至湖盆沉积中心,随着砂质碎屑流向湖盆方向行进,其流速随之下降,携带的沉积物逐步沉降,砂质碎屑流浓度逐渐减小,这导致砂质碎屑流流体性质发生变化,逐步向浊流转变,直至变为以浊流沉积为主。随着进一步向湖盆中心处运移,流体流速持续降低,深水原地沉积开始大量发育。因此,岩相组合在平面上(图 11)表现为:长 7_3^3 亚段泥岩与凝灰岩组合中凝灰岩厚度呈从物源向深湖区减小的趋势,由岩相组合 I 过渡为岩相组合 III;长 7_3^2 亚段粉砂岩与泥岩组合在不断向深湖区推进过程中,粉砂岩占比越来越小,由岩相组合 VI 转变为岩相组合 IV;长 7_3^1 亚段粉—细砂岩与泥岩组合在不断向前



a—厚层凝灰岩夹薄层泥岩 (Y=1.1 m 横剖面, X=0.6~0.9 m 处); b—泥岩与凝灰岩互层 (Y=3.5 m 横剖面, X=0.9~1.2 m 处); c—厚层泥岩夹薄层凝灰岩 (Y=4.7 m 横剖面, X=0.6~0.9 m 处); d—厚层泥岩夹薄层粉砂岩 (Y=4.5 m 横剖面, X=1.5~1.8 m 处); e—粉砂岩与泥岩互层 (Y=3.8 m 横剖面, X=0.6~0.9 m 处); f—厚层粉砂岩夹薄层泥岩 (Y=2.9 m 横剖面, X=1.2~1.5 m 处); g—厚层泥岩夹薄层粉—细砂岩 (Y=4.1 m 横剖面, X=1.5~1.8 m 处); h—粉—细砂岩与泥岩互层 (Y=3.5 m 横剖面, X=0.6~0.9 m 处); i—厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩 (Y=2.0 m 横剖面, X=1.2~1.5 m 处)

图 9 水槽模拟实验中的岩相组合剖面特征

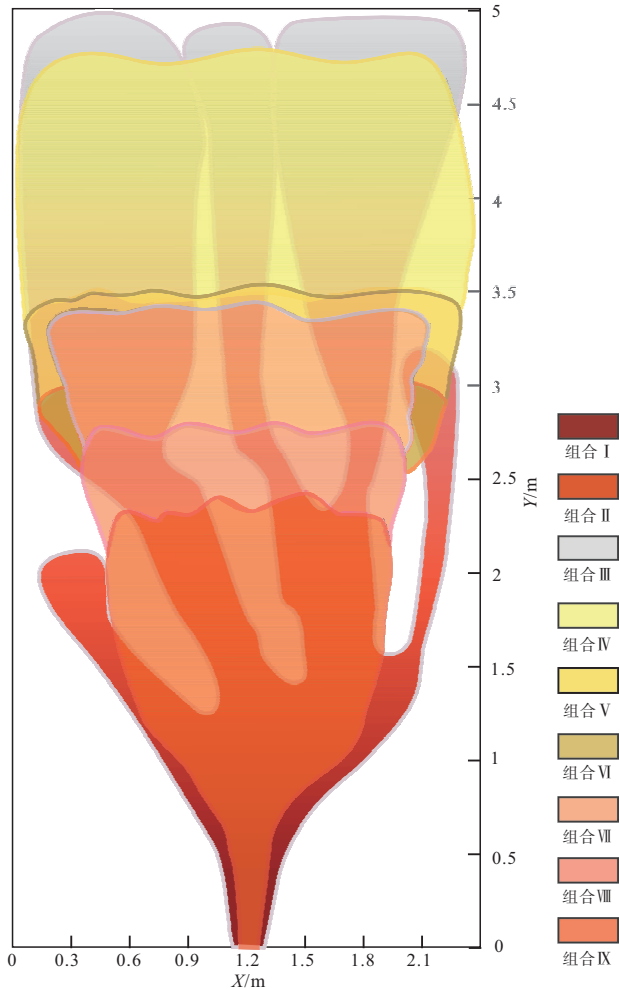
Fig. 9 Characteristics of developed lithologic assemblage profile in flume simulation experiment



a—X=1.2 m 纵剖面; b—Y=3.5 m 横剖面

图 10 水槽模拟实验的岩相分布横纵剖面特征

Fig. 10 Cross and longitudinal sections of lithologic distribution of flume simulation experiment



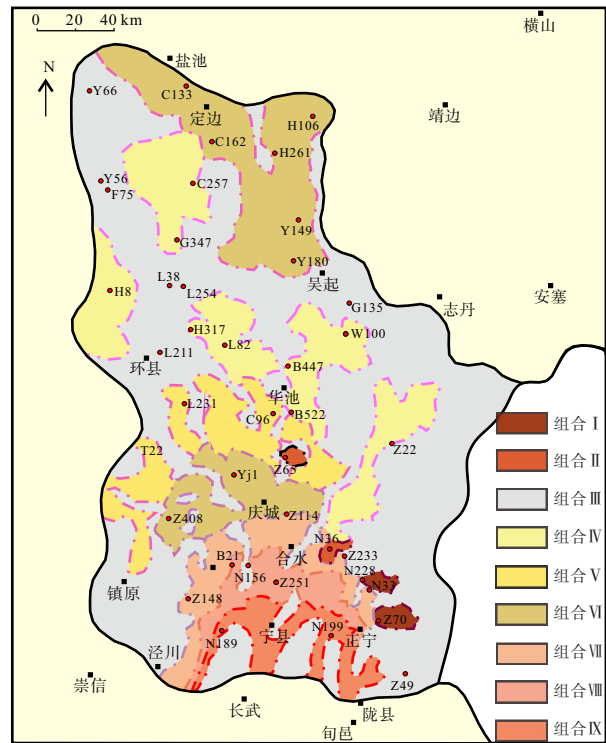
组合 I：厚层凝灰岩夹薄层泥岩；组合 II：泥岩与凝灰岩互层；组合 III：厚层泥岩夹薄层凝灰岩；组合 IV：厚层泥岩夹薄层粉砂岩；组合 V：粉砂岩与泥岩互层；组合 VI：厚层粉砂岩夹薄层泥岩；组合 VII：厚层泥岩夹薄层粉—细砂岩；组合 VIII：粉—细砂岩与泥岩互层；组合 IX：厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩

图 11 水槽模拟实验岩相组合分布平面图

Fig. 11 Plan view of lithologic assemblages distribution in flume simulation experiment

推进过程中，粉—细砂岩相内部细砂岩比例下降，整体由岩相组合 IX 转变为岩相组合 VII。

陇东地区长 7₃ 沉积期是长 7 段沉积时期湖盆面积最大、水体最深的阶段，湖盆中心以泥岩为主。从研究区岩相组合分布图(图 12)可以看出，组合 I 和组合 II 零散展布于正宁及合水周围，即 Z70、N228、N26 和 Z65 井附近，组合 III 分布极广，在研究区大面积发育，组合 I—II—III 中凝灰岩呈现出厚度自西南部向东北部减小的趋势。组合 IV 主要分布在接近湖盆中心位置，即 C257、L82、W100 和 Z22 井附近；组合 V 和组合



组合 I：厚层凝灰岩夹薄层泥岩；组合 II：泥岩与凝灰岩互层；组合 III：厚层泥岩夹薄层凝灰岩；组合 IV：厚层泥岩夹薄层粉砂岩；组合 V：粉砂岩与泥岩互层；组合 VI：厚层粉砂岩夹薄层泥岩；组合 VII：厚层泥岩夹薄层粉—细砂岩；组合 VIII：粉—细砂岩与泥岩互层；组合 IX：厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩

图 12 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7₃ 亚段岩相组合分布平面图

Fig. 12 Plan view of lithologic assemblages distribution of the Chang 7₃ submember in Longdong area, Ordos Basin

VI 在庆城、镇原、华池一带呈带状分布；组合 VII、组合 VIII 和组合 IX 位于鄂尔多斯盆地南部近物源处，从泾川—陇县一带至庆城—合水—正宁一带呈带状向湖盆展布。可以看出，模拟实验还原的陇东地区长 7₃ 亚段细粒沉积岩相分布规律与实际研究区岩相展布规律相似度很高。

5 岩相分布主控因素讨论

5.1 古地貌

斜坡、古脊和深洼等古地貌单元控制了细粒沉积岩相组合及沉积类型的展布，在沉积早期的控制作用尤为明显，不同类型古地貌的控制作用各不相同。

沉积物流体进入湖泊水体后，当湖盆底部出现不平坦时，流体在此处受重力作用影响向两侧分流

前进, 部分流体会翻越不平坦部位, 留下少量沉积, 沉积厚度不均匀。当流体在开阔平坦的底面上流动时, 受到的阻挡影响较小, 细粒沉积的厚度均匀且沉积面积比不平坦部位大。

斜坡区对细粒沉积的岩相分布的控制最为明显。由于地形坡度的作用, 沉积物沿此地貌开始滑动, 砂体在坡脚处大量沉积。随着流体继续推进, 水动力逐渐减弱, 地形坡度变缓, 细粒沉积砂体以粉砂岩、粉—细砂岩为主(图 13-a)。

古脊对细粒沉积岩相横向分布的控制作用较为明显。此地貌处沉积厚度较小, 横向上细粒沉积体连通性差。大量沉积物流动到古脊处时由于古脊的遮挡作用, 流体向两侧分流前进(图 5-a)。尽管流体可以越过古脊等正地貌, 但由于流体受到阻碍, 翻越时水动力持续减弱, 携带的沉积物减少, 最终沉积在古脊迎流面与上方的细粒沉积物减少(图 13-b), 其主要沉积在坡脚处以及背流面(图 5-d)。当古脊两侧沟道被填平后, 古脊对沉积物的分布无控制作用(图 13-b)。

湖底深洼位于湖盆中心, 砂体沉积规模小。由于距离物源太远且流体能量持续减弱, 流体无法继续携带大量砂体向此处搬运, 造成只有少量孤立砂

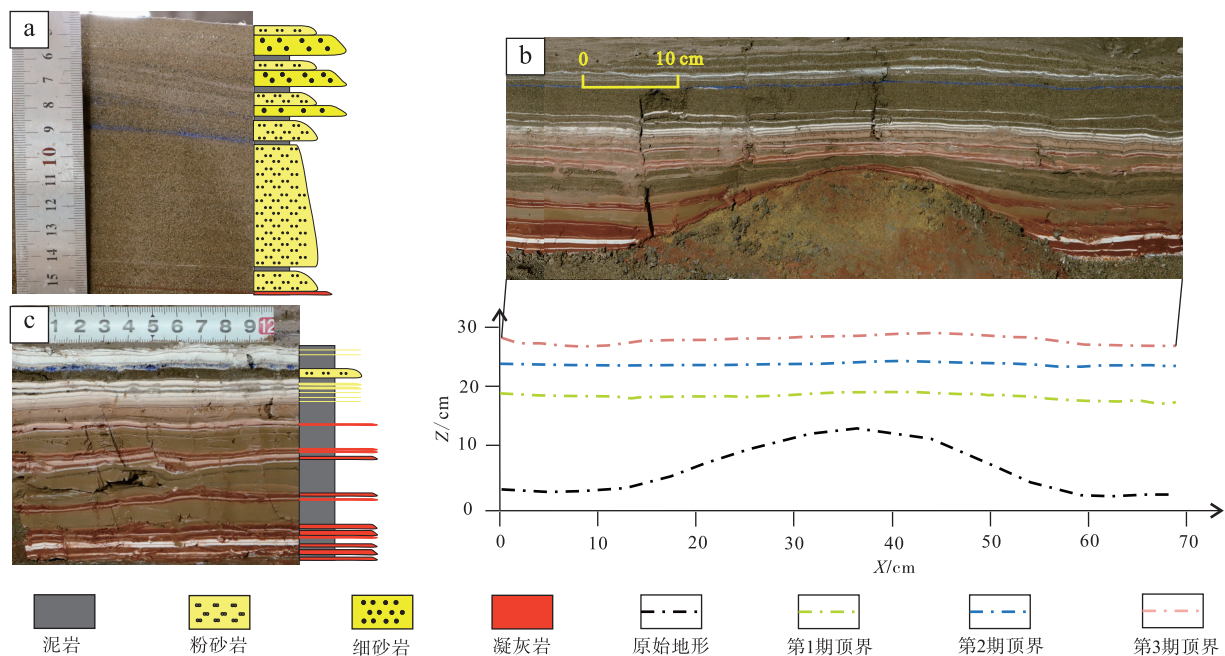
体在深洼处沉积。此处凝灰岩与泥岩组合为绝对优势, 表明深洼是泥级沉积物良好的卸载位置(图 13-c)。

5.2 水动力

水动力是细粒沉积发育的重要动能条件。在河流体系中当流速和流量均明显增强时, 搬运时所具有的能量就会增大。而流体与环境水的混合作用越强烈, 其紊流强度越强, 随之携带泥砂的能力越强, 使沉积物在湖盆中能够搬运的距离也越远。

从实验结果来看, 从近物源至远物源端, 由于水动力逐渐减弱, 不同位置沉积物的搬运方式由以底床载荷为主转化为以悬浮载荷为主; 而随着搬运距离的增加, 水流的携带能力持续下降, 沉积物持续沉降, 沉积厚度呈现逐渐减小的趋势, 由近物源端的块状沉积逐渐过渡为远端的薄层状沉积。通过对流体流动过程的观察, 结合沉积物的3种搬运方式, 可将流体的流动过程分为高动能段、中动能段以及低动能段3个阶段(图 14)。

1) 高动能段: 该阶段沉积物刚刚进入水体, 由于初始流速大及重力作用, 流体受到上部紊流的剪切力拖拽向前搬运。此时沉积能量大, 沉积物的纵向搬运距离远, 细粒沉积发育规模大, 多为砂质



a—坡脚处砂体剖面 ($X=0.9$ m 横剖面, $Y=1.3\sim 1.8$ m 处); b—古脊处剖面及厚度素描图 ($Y=3.5$ m 横剖面);

c—深洼处沉积体剖面 ($Y=4.7$ m 横剖面)

图 13 水槽模拟实验各古地貌单元沉积特征

Fig. 13 Sedimentary characteristics of each palaeogeographic unit in flume simulation experiment

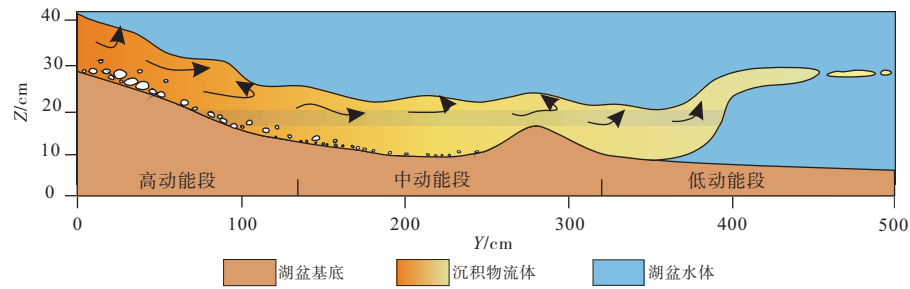
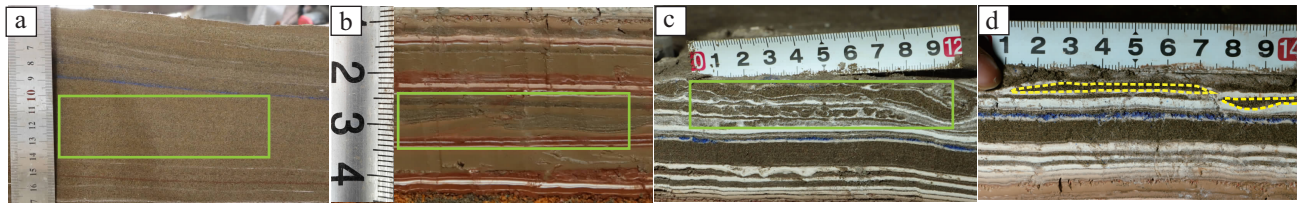


图 14 水槽模拟实验的中央纵剖面 ($X=1.2\text{ m}$) 水动力阶段模式

Fig. 14 Hydrodynamic stage pattern of central longitudinal section ($X=1.2\text{ m}$) in flume simulation experiment



a—块状层理, $Y=1.3\sim 1.8\text{ m}$; b—低角度斜层理, $Y=4.25\sim 4.75\text{ m}$; c—火焰状构造, $Y=4.125\sim 4.25\text{ m}$; d—透镜状砂体, $Y=4.7\sim 5.0\text{ m}$

图 15 水槽模拟实验沉积剖面上发育的沉积构造

Fig. 15 Sedimentary structures developed on vertical profile in flume simulation experiment

沉积, 常发育块状层理(图 15-a)。

2) 中动能段: 该阶段流体由最初的强水动力、高浓度、由层流及紊流共同作用的状态转变成较弱水动力、浓度低、通常受紊流支撑、以悬浮的方式进行搬运。此阶段沉积物粒度较上一阶段细, 流体流速开始缓慢地降低, 低角度斜层理底部呈低角度互层, 向上逐渐演变为平行互层(图 15-b)。此段多发育岩相组合 II、组合 V 和组合 VIII。

3) 低动能段: 该阶段由于流体头部水动力极弱, 携带沉积物的浓度小, 导致局部密度低于周围水体密度, 此时出现了浮力反转, 形成上浮相。随着流体不断被周围水体稀释变薄, 流体头部浓度逐渐减小, 细粒沉积物大幅度减少, 以泥质沉积为主。由于反密度梯度和重力作用, 上覆砂质沉积物与下伏泥质沉积物存在较大密度差(沉积物密度倒置), 导致下覆饱和水的泥质沉积侵入上覆低密度的砂质沉积, 形成火焰状构造(图 15-c)。

5.3 物源

物源供给是形成细粒沉积的必要物质条件, 是控制细粒沉积岩相类型及厚度变化的重要因素。从物源至深湖区, 沉积厚度呈现逐渐变小的趋势(表 2)。

第 1 沉积期物源供给量大, 组分是大量泥岩和

表 2 水槽模拟实验 3 个沉积期沉积厚度统计

Table 2 Sediment thickness in three sedimentary periods of flume simulation experiment

沉积期次	距离物源垂直距离 / m	侧翼平均厚度 / cm	中部平均厚度 / cm
第 1 期	1.0	8.5	9.8
	2.0	7.6	10.9
	3.0	7.0	7.0
	4.0	6.9	7.1
	4.5	7.5	6.1
第 2 期	1.0	4.9	5.8
	2.0	6.9	9.3
	3.0	4.8	5.4
	4.0	2.7	2.6
	4.5	2.0	1.9
第 3 期	1.0	4.3	3.8
	2.0	4.4	3.9
	3.0	3.3	3.4
	4.0	2.8	2.8
	4.5	2.7	2.6

凝灰岩以及少量的粉砂岩, 由于初次沉积且粉砂岩供给较弱, 因此沉积厚度大(表 2), 泥岩与凝灰岩大面积发育, 仅有少量砂体呈散点状展布(图 6-c)。另外, 虽然砂岩含量较少, 但其能够搬运极远至湖盆中心, 而这是由于高含量的黏土物

质可以作为流体运动“骨架”，将较粗颗粒裹挟搬运至较远处。第 2 沉积期物源组分主要是粉砂岩和泥岩，粉砂含量较第 1 沉积期大幅增加，泥岩含量略有减少，细粒沉积横纵向发育速度变快，砂体全方位发育，由散点状分布演变为片状分布(图 6-b)，主要发育组合 VI、组合 V 和组合 IV。第 3 沉积期砂泥比例与第 2 沉积期基本保持一致，但由于粉砂岩含量减少、细砂岩含量增加以及可容纳空间的减少，砂体向两侧展布，在半深湖区大量沉积，少量运移至深湖区沉积(图 6-a)，主要发育组合 IX、组合 VIII 和组合 VII。第 2 沉积期和第 3 沉积期细粒沉积广泛发育，砂岩在斜坡—半深湖区大量沉积，但在湖盆中心砂体分布较局限，以透镜状分布于泥岩中(图 15-d)。

5.4 细粒沉积模式

通过细粒沉积模拟实验的开展，笔者总结了古地貌、水动力和物源控制下的岩相组合分布差异，建立了陇东地区长 7₃ 亚段细粒沉积体系的沉积模式(图 16)。不同沉积类型的岩相组合在垂向展布上表现出一定的分布规律：自物源至深湖区，细粒沉积岩相以粉—细砂岩为主，随着运移距离的增

加，水动力减弱，粒度逐渐变细，单层沉积厚度逐渐变小。在近物源斜坡处的流体密度高、水动力强，发育厚层凝灰岩夹薄层泥岩组合和厚层细—粉砂岩夹薄层泥岩组合；从斜坡到古脊—沟道区经过古脊分流后，流体密度持续减小，水动力缓慢减弱，沉积物粒度相对较细，受紊流支撑，以悬浮的方式进行搬运，流态稳定，形成以泥岩与粉砂岩互层为主的岩相组合；在深湖区流体头部随着较远距离的搬运、沉积，在远端呈现出薄层砂体叠置或分散型砂体的特征，表现为泥岩夹薄层粉砂岩的岩相组合。

6 结论

1) 在鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组 7₃ 亚段沉积模拟实验中，主要发育 4 种岩相类型和 9 种岩相组合。4 种岩相类型为泥岩相、粉—细砂岩相、凝灰岩相、粉砂岩相。9 种岩相组合为：组合 I 厚层凝灰岩相夹薄层泥岩、组合 II 泥岩与凝灰岩互层、组合 III 厚层泥岩夹薄层凝灰岩、组合 IV 厚层泥岩夹薄层粉砂岩、组合 V 粉砂岩与泥岩互层、组合 VI 厚层粉砂岩夹薄层泥岩、组合 VII 厚层

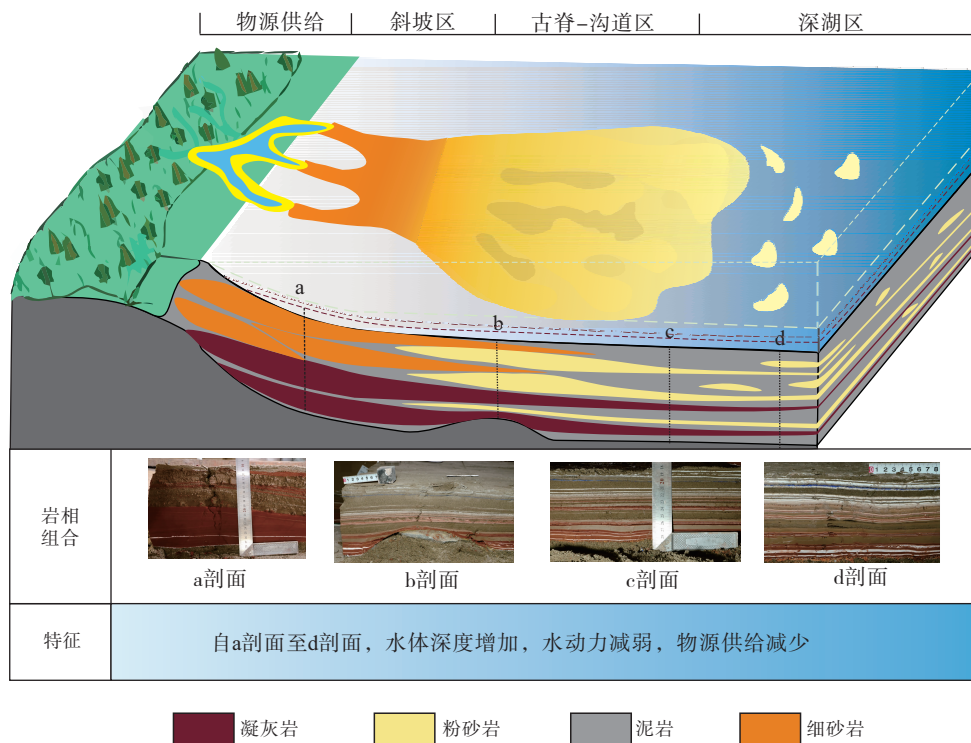


图 16 鄂尔多斯盆地长 7₃ 亚段细粒沉积体系模式

Fig. 16 Depositional model of fine-grained sedimentary system of the Chang 7₃ submember in Ordos Basin

泥岩夹薄层粉—细砂岩、组合Ⅷ粉—细砂岩与泥岩互层、组合Ⅸ厚层粉—细砂岩夹薄层泥岩。从物源至湖盆中心，泥岩与凝灰岩组合呈现组合Ⅰ—组合Ⅱ—组合Ⅲ的展布特征，粉砂岩与泥岩组合呈现组合Ⅵ—组合Ⅴ—组合Ⅳ的展布特征，粉—细砂岩组合呈现组合Ⅸ—组合Ⅷ—组合Ⅶ的展布特征。

2) 在水槽沉积模拟实验的基础上，结合岩相剖面以及平面分布特征，建立了陇东地区延长组 7_3 亚段细粒沉积模式，并认为细粒沉积岩相分布受古地貌、水动力以及物源的控制，其中古地貌限制了岩相展布，而随着搬运距离的增加，水动力的变化控制了细粒沉积物的搬运距离与沉积位置，另外物源组分决定了细粒沉积的岩相类型。

参考文献 (References)

- 崔德艺, 辛红刚, 张亚东, 淡卫东, 陈俊霖, 张珊, 李家程, 李树同. 2023. 鄂尔多斯盆地宁县地区 7_3 亚段泥页岩地球化学特征及页岩油意义. 天然气地球科学, 34(2): 210-225. [Cui D Y, Xin H G, Zhang Y D, Dan W D, Chen J L, Zhang S, Li J C, Li S T. 2023. Geochemical characteristics and shale oil significance of Chang 7₃ sub-member mud shale in Ningxian area, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 34(2): 210-225]
- 党伟, 张金川, 聂海宽, 王凤琴, 唐玄, 蒋恕, 魏晓亮, 刘秋波, 李沛, 李菲, 孙江涛. 2022. 页岩油微观赋存特征及其主控因素: 以鄂尔多斯盆地延安地区延长组7段3亚段陆相页岩为例. 石油学报, 43(4): 507-523. [Dang W, Zhang J C, Nie H K, Wang F Q, Tang X, Jiang S, Wei X L, Liu Q B, Li P, Li F, Sun J T. 2022. Microscopic occurrence characteristics of shale oil and their main controlling factors: a case study of the 3rd submember continental shale of Member 7 of Yanchang Formation in Yan'an area, Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 43(4): 507-523]
- 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, 罗安湘, 张妮妮, 邓秀芹, 吕剑文, 吴康军, 王克, 刘洛夫. 2014. 鄂尔多斯盆地长7油层组有效储层物性下限的确定. 中国石油勘探, 19(6): 82-88. [Fu J H, Luo A X, Zhang N N, Deng X Q, Lü J W, Wu K J, Wang K, Liu L F. 2014. Determine lower limits of physical properties of effective reservoirs in Chang 7 Oil Formation in Ordos Basin. China Petroleum Exploration, 19(6): 82-88]
- 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]
- 郭茂恒, 李士祥, 金振奎, 周新平, 刘成林. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组长 7_3 亚段页岩油特征及勘探方向. 石油勘探与开发, 50(4): 767-781. [Guo Q H, Li S X, Jin Z K, Zhou X P, Liu C L. 2023. Characteristics and exploration targets of Chang 7 shale oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 50(4): 767-781]
- 何鑫, 陈世加, 胡琮, 张海峰, 牟蜚声, 陆奕帆, 代林锋, 付晓燕, 韩玫梅. 2024. 陆相页岩层系岩性组合模式及其对原油差异性富集的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例. 现代地质, 38(5): 1325-1337. [He X, Chen S J, Hu C, Zhang H F, Mou F S, Lu Y F, Dai L F, Fu X Y, Han M M. 2024. Lithological combination model of continental shale series and its controls on differential crude oil enrichment: a case study of the Chang 7 member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. Geoscience, 38(5): 1325-1337]
- 黄军平, 杨田, 张艳, 李相博, 董岐石, 杨占龙, Guilherme Bozetti, 郑泽宇. 2023. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式: 以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长7油层组露头为例. 沉积学报, 41(4): 1227-1239. [Huang J P, Yang T, Zhang Y, Li X B, Dong Q S, Yang Z L, Bozetti G, Zheng Z Y. 2023. Sedimentary dynamics and deposition model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: a case study of the Chang 7 oil member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan area. Acta Sedimentologica Sinica, 41(4): 1227-1239]
- 姜在兴, 王留奇, 林承焰, 马在平, 周丽清. 1993. 黄河三角洲细粒物质搬运和沉积动力学研究. 石油大学学报(自然科学版), 17(6): 6-11. [Jiang Z X, Wang L Q, Lin C Y, Ma Z P, Zhou L Q. 1993. Transport and deposition of the fine-grained sediments in the Yellow River Delta. Journal of the University of Petroleum, China, 17(6): 6-11]
- 姜在兴, 王运增, 王力, 孔祥鑫, 杨叶芄, 张建国, 薛欣宇. 2022. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运—沉积机制及多源油气甜点. 石油与天然气地质, 43(5): 1039-1048. [Jiang Z X, Wang Y Z, Wang L, Kong X X, Yang Y P, Zhang J G, Xue X Y. 2022. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks. Oil & Gas Geology, 43(5): 1039-1048]
- 李森, 朱如凯, 崔景伟, 罗忠, 焦航, 柳涵. 2020. 鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩特征与古环境: 以铜川地区瑶页1井为例. 沉积学报, 38(3): 554-570. [Li S, Zhu R K, Cui J W, Luo Z, Jiao H, Liu H. 2020. Sedimentary characteristics of fine-grained sedimentary rock and paleo-environment of Chang 7 Member in the Ordos Basin: a case study from Well Yaoye 1 in Tongchuan. Acta Sedimentologica Sinica, 38(3): 554-570]
- 李庆, 李江山, 卢浩, 齐奉强, 何羽, 安可钦, 李隆禹, 张厚民, 伍岳. 2022. 鄂尔多斯盆地南部长 7_3 页岩层系储层特征及主控因素.

- 现代地质, 36(5): 1254-1270. [Li Q, Li J S, Lu H, Qi F Q, He Y, An K Q, Li L Y, Zhang H M, Wu Y. 2022. Characteristics and control factors of the Chang 7₃ shale reservoirs in the southern Ordos Basin. *Geoscience*, 36(5): 1254-1270]
- 李威, 文志刚. 2017. 鄂尔多斯盆地西南地区延长组长7段细粒沉积物特征研究. *地质学报*, 91(5): 1120-1129. [Li W, Wen Z G. 2017. Characteristics of fine grained sediments from the 7th Member of the Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1120-1129]
- 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]
- 柳波, 吕延防, 孟元林, 李新宁, 郭小波, 马强, 赵万春. 2015. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义: 以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例. *石油勘探与开发*, 42(5): 598-607. [Liu B, Lü Y F, Meng Y L, Li X N, Guo X B, Ma Q, Zhao W C. 2015. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 598-607]
- 吕奇奇, 罗顺社, 付金华, 牛小兵, 徐黎明, 冯胜斌, 李士祥. 2018. 湖泊细粒沉积特征精细研究: 以鄂尔多斯盆地延河剖面长7油层组为例. *现代地质*, 32(2): 364-373. [Lü Q Q, Luo S S, Fu J H, Niu X B, Xu L M, Feng S B, Li S X. 2018. Detailed study of lake fine grained deposition characteristics: a case study from Chang 7 of Yanhe section, Ordos Basin. *Geoscience*, 32(2): 364-373]
- 吕奇奇, 付金华, 罗顺社, 李士祥, 周新平, 蒲宇新, 闫红果. 2022. 拗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 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]
- 吕奇奇, 辛红刚, 王林, 罗顺社, 淡卫东, 冯胜斌. 2023. 鄂尔多斯盆地宁县地区三叠系延长组7段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式. *古地理学报*, 25(4): 823-840. [Lü Q Q, Xin H G, Wang L, Luo S S, Dan W D, Feng S B. 2023. Sedimentary types, characteristics and model of lacustrine fine-grained gravity flow in the Member 7 of Triassic Yanchang Formation in Ningxian area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 823-840]
- 屈童, 高岗, 梁晓伟, 孙明亮, 尤源, 李涛涛, 冯顺彦, 刘艳妮, 费国勇. 2023. 鄂尔多斯盆地庆城地区延长组7段致密油特征及油源分析. *地质论评*, 69(4): 1313-1328. [Qu T, Gao G, Liang X W, Sun M L, You Y, Li T T, Feng S Y, Liu Y N, Fei G Y. 2023. Tight oil characteristics and source analysis of the 7th Member of the Triassic Yanchang Formation in Qingcheng area, Ordos Basin. *Geological Review*, 69(4): 1313-1328]
- 申静静, 张建国, 葛云锦, 杜克锋, 姜在兴, 王力. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组7-8段深水沉积特征及演化规律. *科学技术与工程*, 23(10): 4135-4148. [Shen J J, Zhang J G, Ge Y J, Du K F, Jiang Z X, Wang L. 2023. Deepwater sedimentary characteristics and evolution of Members 7-8 of Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Science Technology and Engineering*, 23(10): 4135-4148]
- 王岚, 李文厚, 刘群, 王大兴, 张盟勃, 白斌. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组长7黑色页岩岩相分类与沉积环境恢复. *古地理学报*, 25(3): 598-613. [Wang L, Li W H, Liu Q, Wang D X, Zhang M B, Bai B. 2023. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Chang 7 black shale in the Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 598-613]
- 王梓毅, 付金华, 刘显阳, 李士祥, 张昌虎, 梁新平, 董琳. 2023. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段埋藏期热液活动对页岩油储层的影响. *石油与天然气地质*, 44(4): 899-909. [Wang Z Y, Fu J H, Liu X Y, Li S X, Zhang C H, Liang X P, Dong L. 2023. The influence of hydrothermal activities on shale oil reservoirs during the burial period of the Upper Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 899-909]
- 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, Lü 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]
- 袁伟, 柳广弟, 罗文斌. 2016. 鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积速率及其对烃源岩有机质丰度的影响. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 31(5): 20-26. [Yuan W, Liu G D, Luo W B. 2016. Deposition rate of the Seventh Member of Yanchang Formation, Ordos Basin and its impact on organic matter abundance of hydrocarbon source rock. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 31(5): 20-26]
- 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 Chang7 oil layer in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 582-587]
- 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 deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin; a case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region. *Acta Petrolei Sinica*, 42(5): 570-587]
- 张顺, 刘惠民, 陈世悦, 王永诗, 蒲秀刚, 张奎华, 韩文中. 2017. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨: 以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例. *地质学报*, 91(5): 1108-1119. [Zhang S, Liu H M, Chen S Y, Wang Y S, Pu X G, Zhang K H, Han W Z. 2017. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1108-1119]
- 张倚安. 2021. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7₃ 亚段细粒沉积特征及成因机制研究. 成都理工大学硕士论文. [Zhang Y A. 2021. The characteristics and genetic mechanisms of fine-grained sediments of Chang 7₃ sub-member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 张倚安, 李士祥, 田景春, 周新平, 杨田. 2021. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7 段深水重力流沉积类型. *沉积学报*, 39(2): 297-309. [Zhang Y A, Li S X, Tian J C, Zhou X P, Yang T. 2021. Sedimentation types of deep-water gravity flow, Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(2): 297-309]
- 周川闽, 张志杰, 邱振, 成大伟, 袁选俊, 刘银河, 黄秀. 2021. 细粒沉积物物理模拟研究进展与展望. *沉积学报*, 39(1): 253-267. [Zhou C M, Zhang Z J, Qiu Z, Cheng D W, Yuan X J, Liu Y H, Huang X. 2021. Laboratory experiments on sedimentation of fine-grained sediment: a prospect review. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 253-267]
- 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 张素荣, 蔡毅, 曹琰, 康缘. 2022. 细粒沉积学研究进展与发展方向. *石油与天然气地质*, 43(2): 251-264. [Zhu R K, Li M Y, Yang J R, Zhang S R, Cai Y, Cao Y, Kang Y. 2022. Advances and trends of fine-grained sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251-264]
- 祝海华, 张秋霞, 董国栋, 商斐, 张釜源, 赵晓明, 张喜. 2024. 鄂尔多斯盆地长 7 段重力流砂岩长石溶蚀特征及控制因素. *石油勘探与开发*, 51(1): 102-113. [Zhu H H, Zhang Q X, Dong G D, Shang F, Zhang F Y, Zhao X M, Zhang X. 2024. Characteristics and control factors of feldspar dissolution in gravity flow sandstone of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 102-113]
- He C, Ji L M, Su A, Wu Y D, Zhang M Z, Zhou S X, Li J, Hao L W, Ma Y. 2019. Source-rock evaluation and depositional environment of black shales in the Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, north-central China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173: 899-911.
- Hovikoski J, Therkelsen J, Nielsen L H, Bojesen-Koefoed J A, Nytoft H P, Petersen H I, Abatzis I, Tuan H A, Phuong T N, Dao C V, Fyhn M B. 2016. Density-flow deposition in a fresh-water lacustrine rift basin, Paleogene Bach Long Vi Graben, Vietnam. *Journal of Sedimentary Research*, 86(8): 982-1007.
- Krumbein W C. 1932. The mechanical analysis of fine-grained sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 2(3): 140-149.
- Mutti E, Tinterrì R, Benevelli G, Biase D, Cavanna G. 2003. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6-8): 733-755.
- Stow D A V, Shanmugam G. 1980. Sequence of structures in fine-grained turbidites: comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments. *Sedimentary Geology*, 25: 23-42.
- Sun Y W, Li X, Liu Q Y, Zhang M D, Li P, Zhang R, Shi X. 2020. In search of the inland carnian pluvial event: middle-upper Triassic transition profile and U-Pb isotopic dating in the Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Geological Journal*, 55(7): 4905-4919.
- Talling P J. 2014. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings. *Marine Geology*, 352: 155-182.
- Yuan W, Liu G D, Zhou X X, Xu L M, Li C Z. 2020. Palaeoproductivity and organic matter accumulation during the deposition of the Chang 7 organic-rich shale of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Geological Journal*, 55(4): 3139-3156.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 龚承林)