

开发尺度重力流沉积特征与模式： 以鄂尔多斯盆地合水南地区长 7_1 亚段为例^{*}

刘 梦¹ 王喜鑫¹ 张昌民¹ 李少华¹ 何右安² 李大鹏¹

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

摘 要 重力流沉积砂体是油气开发的重要目标, 从开发尺度探究重力流沉积特征可完善重力流沉积模式, 为重力流油气储集层高效开发提供依据。利用岩心、测井等资料, 从开发尺度探究鄂尔多斯盆地合水南地区三叠系延长组 7_1 亚段 (长 7_1 亚段) 重力流沉积特征、沉积微相的划分和分布, 对比不同沉积微相储集层特征, 总结重力流沉积模式。结果表明: 长 7_1 亚段主要发育块状层理细砂岩 (Sm)、含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩 (Smm)、正粒序递变层理细砂岩 (Sn)、平行层理泥质粉砂岩 (MSp)、透镜状层理粉砂质泥岩 (MSl) 及块状泥岩 (Mm) 6 种岩相类型和 6 种岩相组合。在非限制性水道区域划分出主水道、水道侧缘、溢岸、半深湖—深湖泥原地沉积 4 种沉积微相, 其中, 主水道多由砂质碎屑流沉积形成, 物性好, 主要为 Sm-Mm(MSl)-Sm 和 Sm-Smm 岩相组合; 水道侧缘多由混合流沉积形成, 物性次之, 多发育 MSp-Sm、Sn-Sm (Smm) 岩相组合; 溢岸多由浊流沉积形成, 物性最差, 以 Sn-MSp 和 Sn-Mm (MSl) 岩相组合为主。合水南地区长 7_1 亚段重力流经历了砂质碎屑流、混合流、浊流 3 个演化阶段, 平缓的地形及复杂的流体演变使重力流沉积在垂生物源方向相变依然明显, 同期发育主水道、水道侧缘、溢岸。该研究旨在揭示小尺度重力流沉积特征及沉积模式, 为重力流油气储集层的有效动用提供理论指导。

关键词 重力流沉积 沉积特征 沉积模式 延长组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 刘梦, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学、储集层地质学等研究。E-mail: liumeng2356@163.com。

通讯作者简介 王喜鑫, 男, 1986 年生, 博士, 副教授, 主要从事储集层智能表征与建模研究。E-mail: wangxixin86@hotmail.com。

中图分类号: TE121.3 文献标志码: A

Sedimentary characteristics and models of gravity flow at development scale: a case study of the Chang 7_1 submember in Heshuinan area, Ordos Basin

LIU Meng¹ WANG Xixin¹ ZHANG Changmin¹ LI Shaohua¹ HE Youan² LI Dapeng¹

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

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

^{*} 中国石油科技创新基金项目 (编号: 2021DQ02-0106) 资助。[Financially supported by China Petroleum Science and Technology Innovation Fund Project (No. 2021DQ02-0106)]

收稿日期: 2025-04-10 改回日期: 2025-06-09

Abstract Lacustrine deep-water gravity flow sedimentary sand bodies are the crucial targets for oil and gas development. Investigating the depositional characteristics of gravity flow sand bodies at the development scale can complement gravity flow depositional models and provide a basis for efficient exploitation of gravity flow reservoir. Based on cores, well logging and other data, this study examines the depositional characteristics, microfacies classification, and distribution of the Chang 7₁ gravity flow in Heshuinan area of the Ordos Basin at the development scale. We compare the reservoir characteristics between the different microfacies and summarizes the gravity flow depositional model. The results show the presence of six lithofacies types and six lithofacies combinations of the Chang 7₁, including Massive-bedded fine sandstone (Sm), Massive-bedded fine sandstone with mud pebbles and mudstone rip-up clasts (Smm), Normally graded-bedding fine sandstone (Sn), Parallel-bedded muddy siltstone (MSp), Lenticular-bedded silty mudstone (MSl), Massive-like mudstone (Mm). This study subdivides the unconfined channel area into four sedimentary microfacies: main channel, channel margin, overflow bank, mud faice of semi-deep to deep lake mud. The main channel is predominantly formed by sandy debris flow deposits, exhibiting good reservoir properties, mainly consisting of Sm-Mm(MSl)-Sm and Sm-Smm lithofacies combinations. The channel margin is mostly formed by the hybrid flow deposits, exhibiting moderate reservoir properties, primarily developing MSp-Sm and Sn-Sm (Smm) lithofacies combinations. The overflow bank is mainly formed by the turbidity current deposits, with the poorest reservoir properties, dominated by Sn-MSp and Sn-Mm (MSl) lithofacies combinations. The Chang 7₁ gravity flow in the Heshuinan area underwent three evolutionary stages: sandy debris flow, hybrid flow, turbidity current. The gentle topography and complex fluid evolution result in significant lateral facies variations perpendicular to the sediment source direction. During the same period, three main sedimentary facies developed: main channel, channel margin, and overflow bank. Gravity flow depositional characteristics, and sedimentary patterns are investigated in small-scale in this study, providing the theoretical guidance for effective exploitation of gravity flow hydrocarbon reservoir.

Key words gravity flow deposits, sedimentary characteristics, sedimentary model, Yanchang Formation, Ordos Basin

About the first author LIU Meng, born in 1998, is a master degree candidate. She is mainly engaged in research related to sedimentology, reservoir geology and related fields. E-mail: liumeng2356@163.com.

About the corresponding author WANG Xixin, born in 1986, is an associate professor. He is mainly engaged in research on intelligent reservoir characterization and modeling. E-mail: wangxixin86@hotmail.com.

深水重力流具有强大的搬运能力, 可将大量陆源和海洋物质输送至深水区, 因此重力流沉积既是地质历史的记录者, 也是沉积学和储集层地质学的研究热点 (Zavala and Arcuri, 2016; Shanmugam, 2017; Wang *et al.*, 2021; 张自力等, 2023; 冯有良等, 2024)。截至 2017 年, 以深水浊积扇为主的全球深水区油气储量占油气发现总储量的 50% (张功成等, 2019)。中国学者相继在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、渤海湾盆地等地区发现大量重力

流沉积并取得重要勘探突破 (陈轩等, 2023; 冯有良等, 2023; 龚承林等, 2023; 官大勇等, 2023; 吴千然等, 2023)。其中, 鄂尔多斯盆地陇东地区深湖—半深湖区发现了储量规模超过数十亿吨级的 2 个大型油气田: 华庆油田与庆城油田 (朱如凯等, 2024)。

作为浅水沉积物向深水搬运的重要机制之一 (Shanmugam, 2013; 吕奇奇等, 2023), 深水重力流沉积类型多样且沉积特征明显 (李相博等,

2023; 刘显阳等, 2023; 王启明等, 2023)。重力流主要包括泥质碎屑流、砂质碎屑流、浊流及颗粒流, 其沉积物多以分选较差、杂基含量高的杂砂岩、砾岩和泥岩为主(孙国桐等, 2015)。结构上, 块状构造是反映重力流沉积物快速堆积的重要识别特征, 鲍马序列是沉积过程中浊流能量逐渐减弱的重要体现(张可等, 2022)。重力流沉积模式颇多, 可归为 Walker (1978) 提出的综合扇模式和 Shanmugam (2000) 提出的碎屑流主导的深水斜坡扇沉积模式。其中, Shanmugam (2000) 提出的碎屑流主导的深水斜坡扇沉积模式可细分为水道体系和非水道体系 2 种类型, 该类沉积模式因对深水油气勘探有着有效指导作用而被广泛应用。

鄂尔多斯盆地长 7 段沉积期发育的内陆拗陷淡水湖盆是重力流沉积发育的重要场所(Liu *et al.*, 2025)。鄂尔多斯盆地南部存在滑动—滑塌沉积、滑塌沉积、砂质碎屑流沉积、浊流沉积及泥质碎屑流沉积 5 种类型的重力流沉积物, 其中, 富县地区主要发育滑动—滑塌、砂质碎屑流和浊流沉积类型(孙宁亮等, 2017)。盆地东南部湖底扇发育重力流水道、溢流沉积、重力流分支水道、分支水道间、朵叶体等微相(尹虎等, 2024)。盆地西南部长 7 段沉积期古地貌呈“东北宽缓、西南陡窄”拗陷形态(吕奇奇等, 2022)。受多方物源、触发机制等因素共同影响, 西南部陇东地区发育湖底扇和滑塌 2 类沉积体(刘芬等, 2015), 从坡折带以下至湖盆中心, 重力流呈现砂质碎屑流、砂质碎屑流—浊流、浊流的演化特征并依次发育限制性水道、非限制性水道、前端溢岸 3 个亚相(王林等, 2025)。近年来, 诸多学者从勘探角度出发, 研究了鄂尔多斯盆地各区域的古地貌形态及其重力流触发机制、沉积特征等, 并分析了顺物源方向上沉积微相的转化及分布规律。然而, 重力流在向前推进的过程中, 由于流体复杂的转换机制、地形坡度变化大等原因, 使得湖盆中央的远端重力流沉积砂体分布不稳定, 其侧向上沉积特征变化剧烈, 岩性、岩相组合、岩电响应等差异明显。仅从勘探尺度探究重力流沉积顺水流方向的沉积特征及微相转换规律, 难以充分认识湖盆中央的远端重力流砂体展布规律。

从开发尺度储集层非均质角度出发, 以鄂尔多斯盆地合水南地区长 7_1 亚段为例, 通过岩心、测

井等资料分析研究区的沉积构造、岩相类型及特征, 精细划分该地区重力流沉积微相, 深入探讨其分布规律, 并在此基础上进一步总结沉积模式, 为评价鄂尔多斯盆地储集层非均质性及储集层质量提供依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国华北板块西部, 东抵吕梁山, 西至贺兰山, 南抵秦岭, 北至阴山, 面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 内含伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断带、天环拗陷、晋西挠折带、伊陕斜坡 6 个一级构造单元(图 1-a)(田媛等, 2015)。三叠系延长组沉积期发生的一系列构造运动使得盆地在历经河流—三角洲—湖泊相的沉积演化过程中, 发育了 1 套厚度大于 1000 m 的陆源碎屑岩地层。延长组自下而上细分为长 10—长 1 共 10 个油层组(杨华和邓秀芹, 2013)。

湖盆于延长组长 7 段沉积期达至鼎盛时期, 在盆地周边东北部、西部、南部等多方向物源供给下, 盆内大面积发育半深湖—深湖沉积。该时期中期, 由于物源供给加大, 三角洲持续进积且湖盆萎缩, 伴随触发机制的发生, 导致半深湖—深湖区广泛发育重力流沉积(张晓辉等, 2020)。根据标志层及岩性组合特征, 长 7 段细分为长 7_1 、长 7_2 、长 7_3 共 3 个亚段(王岚等, 2012; 杨仁超等, 2014)。

合水南地区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡西南部的庆城县、合水县境内, 延长组顶面构造以小型鼻状隆起为主, 整体呈东高西低的特征(肖玲等, 2023)。研究区长 7 段整体厚度约为 70~130 m, 越靠近湖盆中心, 地层沉积厚度相对较薄, 整体呈现出由西南向东北减薄的趋势。其中, 长 7_1 主要以泥岩、粉砂岩、细砂岩不等厚互层为主, 依照岩性组合、沉积旋回和油层分布等特征可将其细分为长 7_1^1 、长 7_1^2 共 2 个小层。长 7_1^1 厚度 17~38 m, 平均 28 m; 长 7_1^2 厚度 14~40 m, 平均 25 m; 合水南地区长 7 段主要发育重力流沉积, 前人将研究区重力流沉积体系划分为内扇、中扇和外扇 3 种沉积亚相, 且顺源方向依次发育近源限制性水道、远源水道、溢岸、浊积朵叶体、深湖泥 5 种沉积微相, 研究区在长 7_1 亚段沉积时期以中扇沉积为主, 发育近源水道微相, 砂体的连片性较好(常梁杰等, 2022)。

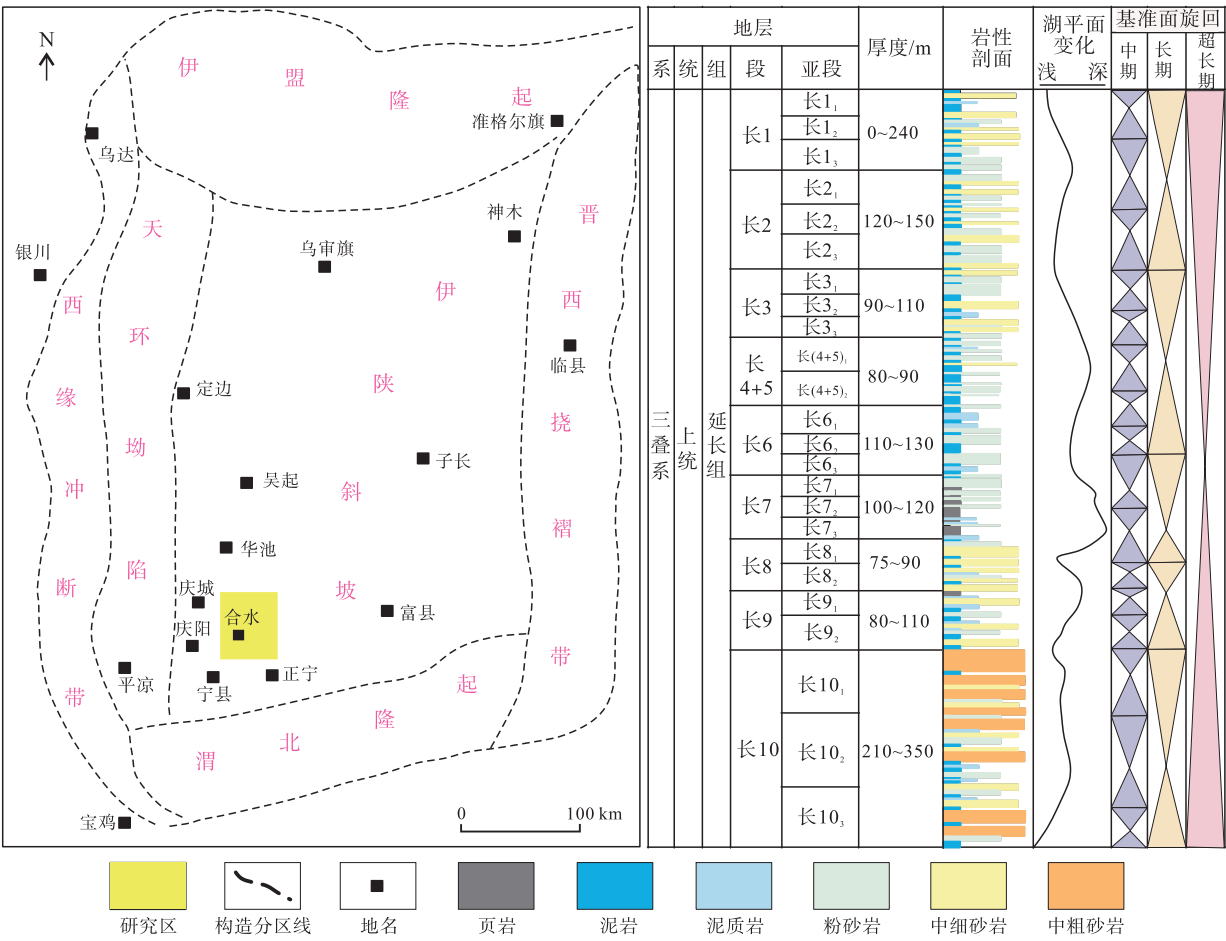


图 1 鄂尔多斯盆地合水南地区地理位置图 (a) 及延长组地层柱状图 (b) (据张家强等, 2021; 有修改)

Fig. 1 Location of Heshuinan area (a) and comprehensive stratigraphic column (b) of the Yanchang Formation in Ordos Basin (modified from Zhang *et al.*, 2021)

2 岩相类型及特征

岩相是在一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合, 既是沉积环境的重要反映, 也是还原沉积过程的重要依据。对合水南地区 80 余个样品的砂岩薄片分析表明, 该地区长 7_1 亚段储集层岩石粒度细, 主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩。岩石类型主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩, 岩屑含量一般在 6%~27.5%, 岩屑成分以变质岩和沉积岩为主, 填隙物 (16.4%) 以伊利石、铁方解石、铁白云石和绿泥石为主。岩石颗粒以次棱角为主且颗粒间分选较大, 以中等—偏好为主, 总体呈现低成分成熟度、低结构成熟度的特点。

通过观察、分析和描述岩心资料, 根据沉积构造、岩性等特征将合水南地区长 7_1 亚段重力流沉

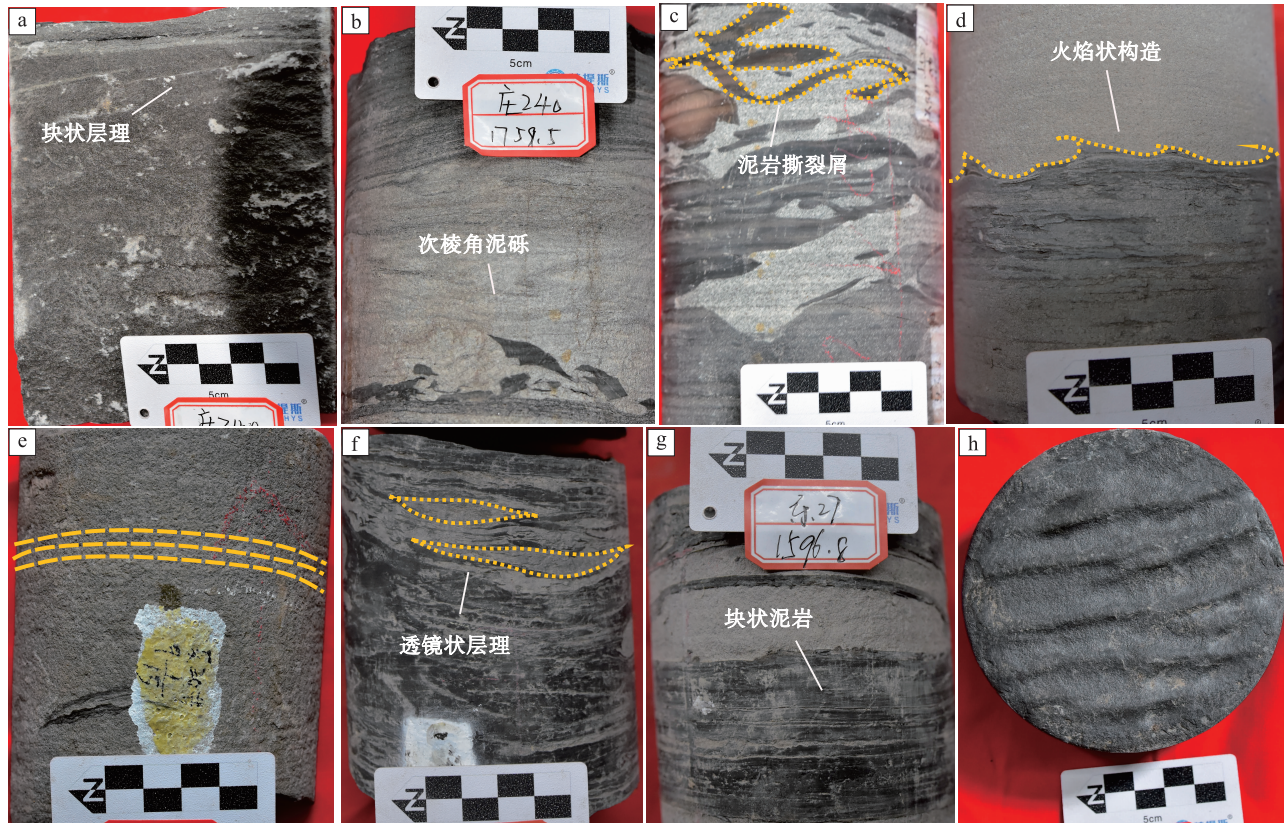
积划分为 6 种岩相类型, 并对其岩性、沉积特征、成因等进行了总结 (表 1)。

块状层理细砂岩 (Sm) 呈纯净的灰色或灰褐色, 杂质含量少, 颗粒较细, 无粒序和层理变化, 多发育块状构造, 常呈现厚层叠置的特点, 是砂质碎屑流的典型特征。块状层理细砂岩底部常见冲刷面, 反映了深水环境下重力流沉积物呈块状搬运的特点以及搬运过程对底部沉积物的剪切作用 (图 2-a)。

含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩 (Smm) 呈灰色或灰褐色, 主要为块状砂岩, 局部含次棱角泥砾或不规则状泥岩撕裂屑构造, 其分选较差且呈漂浮状散乱分布, 是砂质碎屑流的典型特征。次棱角泥砾或不规则状泥岩撕裂屑反映了深水环境下重力流流体搬运距离短的特点以及其运动过程中对下伏泥岩的侵蚀作用 (图 2-b, 2-c)。

表 1 鄂尔多斯盆地合水南地区长 7₁ 亚段深水重力流沉积岩相类型划分

Table 1 Lithofacies classification of deep-water gravity flow deposits in the Chang 7 ₁ submember of Yanchang Formation in Heshuinan area, Ordos Basin				
岩性	岩相	代码	基本特征	成因解释
细砂岩	块状层理细砂岩	Sm	灰色或灰褐色,块状,砂质较纯且含泥量低,含油性较好	沉积物以砂质碎屑颗粒为主,泥质和水作为基质填充于砂颗粒之间,以块体流动为主
	含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩	Smm	灰色或灰褐色,块状,砂岩局部含次棱角泥砾或不规则泥岩撕裂屑	
	正粒序递变层理细砂岩	Sn	灰白色或灰褐色,或见鲍马序列、火焰状构造、印模构造	
粉砂岩	平行层理泥质粉砂岩	MSp	灰黑色,常与薄层砂泥岩叠置	沉积物以细粒碎屑为主,泥质含量更高,颗粒在湍流中随涡旋悬浮并扩散,运动过程中颗粒发生分选
泥岩	透镜状层理粉砂质泥岩	MSl	暗色或黑色,可见透镜状层理	半深湖—深湖静水条件下稳定沉积
	块状泥岩	Mm	黑色,块状,有机质含量丰富	



a—Z240 井, 1789 m, 块状层理细砂岩; b—Z240 井, 1759 m, 含次棱角泥砾细砂岩; c—Z240 井, 1789 m, 含泥质撕裂屑细砂岩; d—N140 井, 1630 m, 含火焰状构造的正粒序递变层理细砂岩; e—L20 井, 1574 m, 平行层理泥质粉砂岩; f—L27 井, 1667 m, 透镜状层理粉砂质泥岩; g—N27 井, 1644 m, 块状泥岩; h—N27 井, 1568 m, 含沟模的细砂岩

图 2 鄂尔多斯盆地合水南地区长 7 段典型井沉积构造及岩心照片

Fig. 2 Sedimentary structure and core photos of typical wells in the Member 7 of Yanchang Formation in Heshuinan area, Ordos Basin

正粒序递变层理细砂岩 (Sn) 呈灰白色或灰褐色, 杂质含量高, 常见不完整鲍马序列、火焰状构造、印模构造等, 是浊流沉积的典型特征。正粒序递变层理细砂岩厚度较小但容易多期次叠置。不完整鲍马序列反映了深水环境下重力流流体呈悬浮

式搬运的特点。同时, 正粒序递变层理细砂岩底部的火焰状构造及印模构造等体现了重力流流体在紊流状态下对下伏地层的侵蚀作用(图 2-d, 2-h)。

平行层理泥质粉砂岩 (MSp) 呈灰黑色, 泥质含量高, 常见水平层理, 常夹杂于原地沉积的泥岩

中(图 2-e)。

透镜状层理粉砂质泥岩 (MSI) 多为暗色或黑色, 发育透镜状层理, 偶伴随少量植物碎屑或多样动物遗迹化石, 常与块状层理细砂岩以相互叠置的方式产出。一般形成于水动力相对较弱的半深湖—深湖区(图 2-f)。

块状泥岩 (Mm) 呈黑色, 富含大量有机质, 可见大量黄铁矿, 是深水环境下有机质—矿物集合体在深湖原地悬浮沉积的结果(图 2-g)。

3 岩相垂向组合

重力流沉积的垂向变化与组合特征不仅是不同流体间转换关系的重要反映, 也是不同时期内各流体叠置关系的主要体现。在岩心观察、测井资料及岩相类型分析的基础上, 结合该地区岩相在垂向上的叠置与沉积特征, 提出长 7₁ 亚段共发育 6 个岩相组合(图 3)。

1) 岩相组合 I : Sm-Mm (MSI) -Sm

岩相组合 I 主要由块状层理细砂岩 (Sm) 夹块状泥岩 (Mm) 或透镜状层理粉砂质泥岩 (MSI) 组成。岩性以灰色或灰褐色细砂岩、泥岩为主, 发育块状构造, 透镜状层理。岩心上常表现为多期块状层理细砂岩叠置发育, 中间夹块状泥岩或透镜状层理粉砂质泥岩, 是最常见的岩相类型之一。岩相组合 I 厚度一般在 0.1~10 m, 泥岩厚度不超过 15 cm, 块状层理发育较好, 常与块状泥岩或透镜状层理粉砂质泥岩呈突变接触, 是典型的砂质碎屑流沉积(图 3-a)。

2) 岩相组合 II : Sm-Smm

岩相组合 II 主要由上覆块状层理细砂岩 (Sm) 和下伏含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩 (Smm) 组成。岩性以灰色或灰褐色细砂岩、黑色泥岩为主, 发育块状构造, 局部含次棱角泥砾或不规则泥岩撕裂屑。岩心上常表现为块状层理细砂岩与含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩相互叠置。岩相组合 II 厚度一般在 0.1~12 m, 块状层理细砂岩厚度较大且发育较好, 是典型的砂质碎屑流沉积(图 3-b)。

3) 岩相组合 III : MSp-Sm

岩相组合 III 主要由上覆平行层理泥质粉砂岩 (MSp) 与下伏块状层理细砂岩 (Sm) 组成。岩性以灰色或灰褐色细砂岩、灰黑色粉砂岩为主, 发育

块状构造。岩相组合 III 厚度一般在 0.1~8 m。岩心上可观察到自下而上逐渐变细变薄, 是砂质碎屑流向浊流转换时发育的结果(图 3-c)。

4) 岩相组合 IV : Sn-Sm (Smm)

岩相组合 IV 主要由上覆的正粒序递变层理细砂岩 (Sn) 与下伏的块状层理细砂岩 (Sm) 或含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩 (Smm) 组成。岩性以灰白色或灰褐色细砂岩为主, 常发育火焰状构造、粒序层理、印模构造、块状构造, 含次棱角泥砾或不规则泥岩撕裂屑等。岩相组合厚度一般在 0.3~8 m。岩心体现为由上至下岩性逐渐变粗, 单砂体厚度逐渐变厚的特点, 是砂质碎屑流向浊流转换时发育的结果(图 3-d)。

5) 岩相组合 V : Sn-MSp

岩相组合 V 主要由上覆的正粒序递变层理细砂岩 (Sn) 与下伏的平行层理泥质粉砂岩 (MSp) 组成。岩性以灰白色或灰褐色细砂岩、灰黑色粉砂岩为主, 发育火焰状构造、平行层理、印模构造等。岩心上体现为薄层正粒序递变层理细砂岩与薄层泥质粉砂岩互层产出, 构成多个韵律层。岩相组合 V 厚度一般在 0.1~1 m, 厚度变化较小, 是半深湖—深湖沉积环境下浊流沉积多期次发育的结果(图 3-e)。

6) 岩相组合 VI : Sn-Mm (MSI)

岩相组合 VI 主要由上覆的正粒序递变层理细砂岩 (Sn) 和下伏的泥岩 (Mm) 或透镜状层理粉砂质泥岩 (MSI) 组成。岩性以灰白色或灰褐色细砂岩、黑色泥岩为主, 发育火焰状构造、透镜状层理、印模构造、条带状构造等。岩心上正粒序层理明显, 粒度由下至上逐渐变细, 局部杂基含量少, 常见岩性突变。岩相组合 VI 厚度一般在 0.1~3 m, 单砂体厚度小于 0.5 m, 是半深湖—深湖沉积环境下浊流沉积多期次发育的结果(图 3-f)。

4 重力流沉积特征

4.1 重力流沉积微相划分

合水南地区长 7₁ 亚段以发育砂质碎屑流砂体为主, 浊流砂体次之。砂质碎屑流成因砂体最薄仅 0.1 m 左右, 最厚可达 13 m, 浊流成因砂体多期发育但单期厚度小。在前人关于鄂尔多斯盆地西南部重力流沉积体系认识的基础上, 根据岩性、岩相组

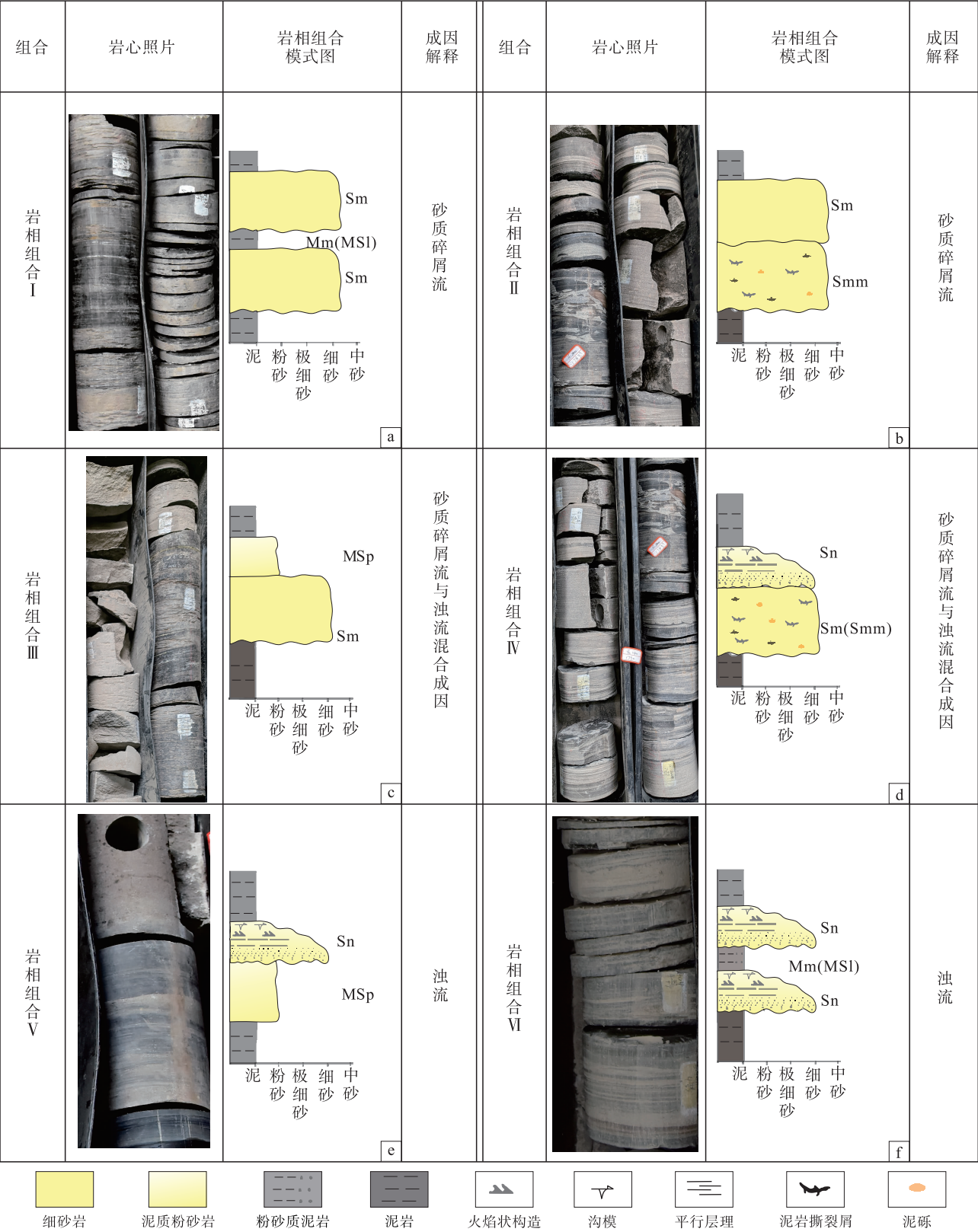


图 3 鄂尔多斯盆地合水南地区长 7 段岩相垂向组合模式

Fig. 3 Vertical assemblage pattern of lithofacies in the Member 7 of Yanchang Formation in Heshuinan area, Ordos Basin

合及测井响应,将研究区划分为主水道、水道侧缘、溢岸、半深湖—深湖泥原地沉积 4 种沉积微相。

砂质碎屑流是 1 种呈塑性流变性质的层状流 (Shanmugam, 2013)。在非限制性水道区域,砂质碎屑流呈块状搬运并卸载沉积了 1 套以块状细砂岩为主的砂体,部分块状细砂岩中可见泥砾、泥质撕裂屑,发育岩相组合 I 和组合 II,测井曲线呈中幅箱形或钟形,这套砂质碎屑流成因的块状层理细砂岩为主水道微相。块状层理细砂岩单砂体厚达 1~13 m,含泥砾、泥质撕裂屑块状层理细砂岩单砂体最厚可达 3 m,泥砾及撕裂屑形态不均一,长度一般在 1~20 cm,呈不规则状排列。

砂质碎屑流继续向前搬运至坡度更缓区域,与环境水体呈不稳定接触,砂质碎屑流前端或侧翼经水体稀释、剪切破碎、流体转化等作用后与环境水体发生混合,逐渐向牛顿流变性质的浊流转换,砂质碎屑流密度大,浊流密度小,呈上下分层现象。转换初期,砂质碎屑流沉积厚度较大,浊流沉积厚度较小。随流体转化程度的深入,上覆的浊流比例增大,其沉积的砂体厚度增加。这个过程既发育砂质碎屑流成因的块状层理细砂岩,也发育浊流成因的正粒序递变层理细砂岩及透镜状层理泥质粉砂岩,以岩相组合 III、IV 为主,测井曲线呈锯齿状箱型或钟型,这套互层砂体为水道侧缘微相。

重力流继续向前运动,流体进一步转化为浊流。浊流沉积物受重力分异作用发生卸载沉积,形成了 1 套以正粒序递变层理细砂岩、平行层理泥质粉砂岩为主的细粒沉积体。该砂体可见透镜状层理、鲍马序列的 BAE 段等,单砂体厚度可达 20 cm,常与灰黑色泥岩呈薄互层,主要发育岩相组合 V、VI,测井曲线呈低幅齿状或指形,为溢岸微相。

半深湖—深湖泥原地沉积微相发育于重力流末期或间隙期,主要表现为半深湖—深湖原地沉积,发育黑色泥岩。测井曲线呈低幅齿化基线形。

4.2 沉积微相垂向分布特征

以研究区典型取心井 L27 井长 7_1 亚段为例,通过岩心描述、岩相组合特征及与测井曲线的对应关系,探讨了重力流沉积砂体的垂向分布特征 (图 4)。L27 井长 7_1 亚段主要发育 1 套厚层灰色细砂岩夹少量灰黑色粉砂岩与黑色泥岩的细粒沉积,砂岩占比较大 (约 66.1%)。其中,主水道砂

体厚度达 20.2 m,占长 7_1 亚段厚度比例的 51.8%,水道侧缘砂体厚度达 10 m,占长 7_1 亚段厚度比例的 25.6%,溢岸砂体累计厚度可达 8.8 m,占长 7_1 亚段厚度比例的 22.6%。L27 井长 7_1 亚段砂体以岩相组合 I、II、VI 为主,垂向上主水道、水道侧缘及溢岸交替发育。

选择典型取心井及常规井,绘制平行物源及垂直物源方向的连井沉积微相剖面,总结鄂尔多斯盆地合水南地区重力流沉积剖面演化特征 (图 5)。研究区垂直物源方向主水道、水道侧缘及溢岸微相均有发育 (图 5-a),表明砂质碎屑流与浊流 2 种流体在垂直物源方向上亦存在相互转换现象。在长 7_1 期,主水道砂体厚度大,表现为多期砂质碎屑流成因砂体叠置,连续性强;水道侧缘砂体厚度较小,为砂质碎屑流与浊流成因砂体叠置而成;溢岸微相发育局限,规模最小。在顺物源方向,主水道、水道侧缘及溢岸微相依次过渡现象明显 (图 5-b),反映出砂质碎屑流向浊流转化过程中砂体的沉积过程。顺物源方向上砂体的规模逐渐减小,其中水道侧缘与溢岸微相占比增高,总体体现出重力流向前运动过程中流体变化特征及多期多类型的沉积特点。

4.3 沉积微相平面分布特征

根据岩心、单井相解释及砂岩厚度分布,明确了合水南地区长 7_1 亚段沉积微相展布特征。总体上,合水南地区长 7_1 亚段广泛发育重力流成因砂体,砂体厚度从西南至东北逐渐减薄。平面上,主水道、水道侧缘及溢岸均有发育,主水道以条带状呈西南—东北向展布,水道侧缘和溢岸呈片状或朵叶状分布于主水道两侧、前端。

长 7_1^2 期砂质碎屑流与浊流发育相当,主水道的规模最大,延伸较远且连通性好 (图 6)。水道侧缘随主水道由西南向东北方向广泛分布,而溢岸主要发育在东北部。长 7_1^2 至长 7_1^1 期砂体厚度逐渐增厚,主水道宽度明显变宽,水道侧缘与溢岸面积均明显减小。该时期砂质碎屑流发育好于浊流,主水道呈条带状聚拢展布于南部,水道侧缘与溢岸在西北部占比较高。整体上,长 7_1 时期以主水道沉积为主部,水道侧缘与溢岸发育相对较小,半深湖—深湖泥原地沉积发育最少 (图 7)。

通过铸体薄片、扫描电镜、高压压汞等实验,对比分析了不同沉积微相物性特征。主水道形成的

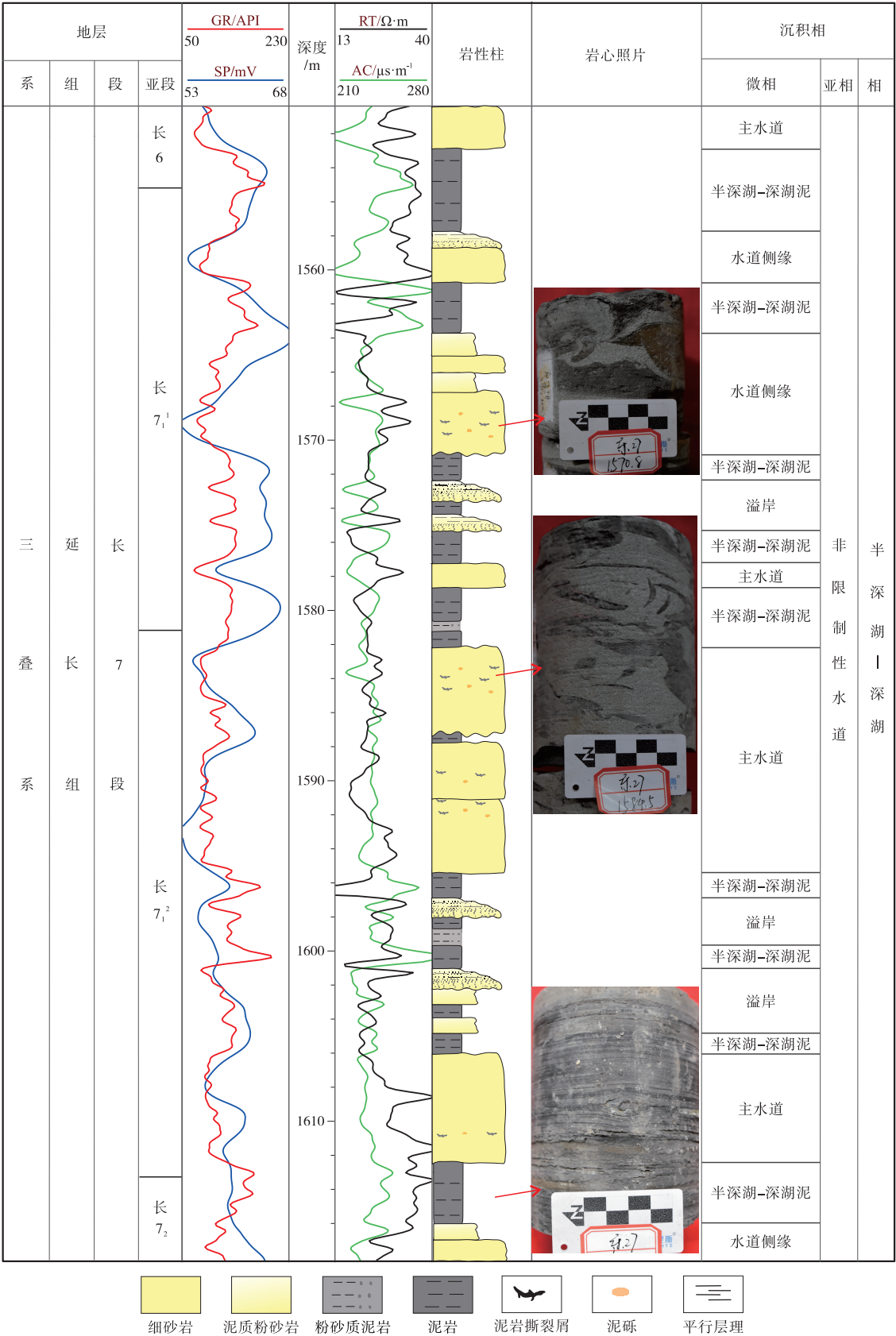
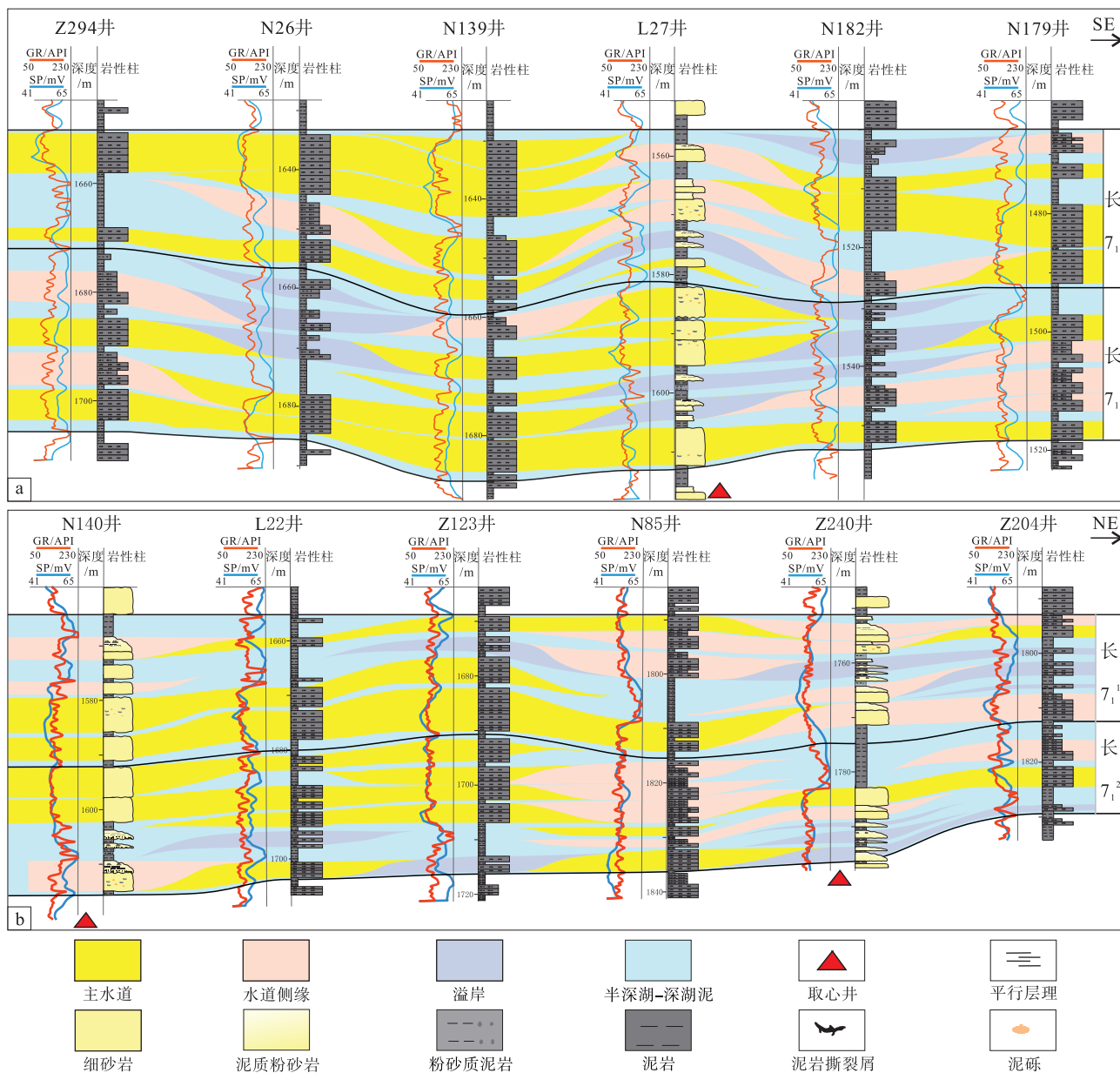


图 4 鄂尔多斯盆地合水南地区 L27 井长 7₁ 亚段沉积相

Fig. 4 Sedimentary facies in the Chang 7₁ submember of Yanchang Formation in Well L27 in Heshuinan area, Ordos Basin

图 5 鄂尔多斯盆地合水南地区长₇₁亚段沉积相连井剖面图Fig. 5 Sedimentary facies profiles in the Chang 7₁ submember of Yanchang Formation in Heshuinan area, Ordos Basin

储集层物性最好, 孔隙较为发育, 发育部分残余粒间孔及大量溶蚀孔隙, 该类储集层孔隙度主要分布在 11%~15%, 渗透率主要集中在 $(0.08 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙半径大, 进汞曲线呈低平下凹状, 最大进汞饱和度 > 70%; 水道侧缘形成的储集层物性次之, 发育少量溶蚀孔及残余粒间孔, 此类储集层孔隙度主要分布在 4%~12%, 渗透率主要集中在 $(0.04 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙半径较小, 进汞曲线微微上突, 最大进汞饱和度为 30%~70%; 溢岸形成的储集层物性最差, 以晶间微孔为主, 此类

储集层孔隙度主要分布在 1%~8%, 渗透率主要集中在 $(0.01 \sim 0.05) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙半径最小, 进汞曲线呈明显上突, 最大进汞饱和度小于 25% (表 2)。

5 开发尺度重力流沉积模式

众多学者从勘探尺度研究了鄂尔多斯盆地重力流的沉积特征, 按其成因或形态将重力流沉积砂体描述为湖底扇、浊积扇、沟道重力流沉积等 (刘

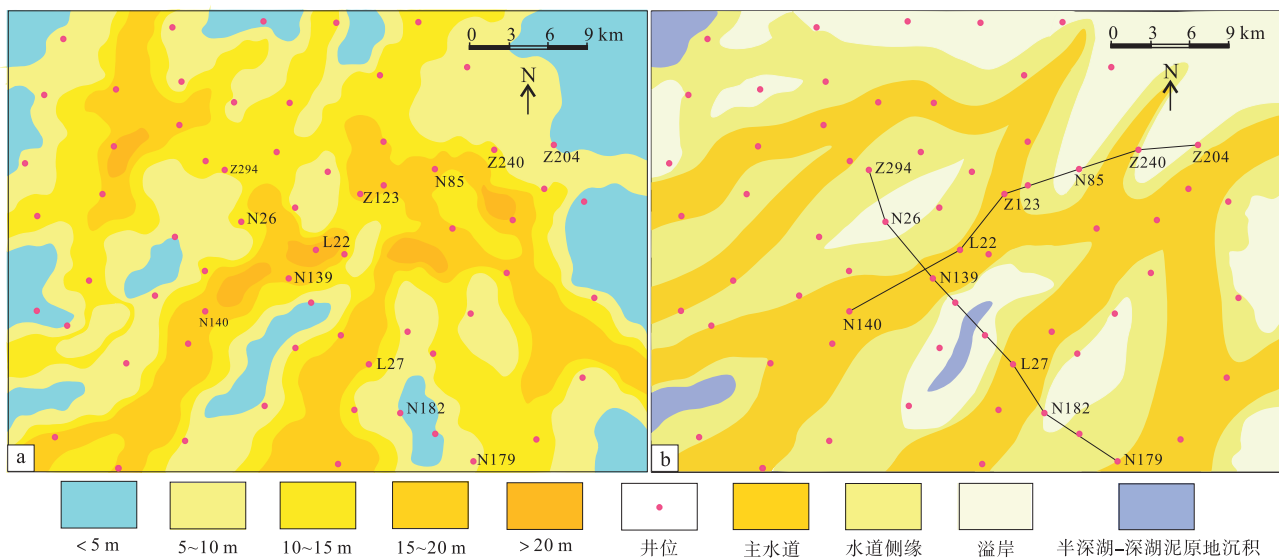


图 6 鄂尔多斯盆地合水南地区长₇₁砂体厚度分布 (a) 及沉积微相平面分布 (b)

Fig. 6 Plane of sand thickness (a) and distribution of sedimentary facies (b) of the Chang 7₁ layer in Heshuinan area, Ordos Basin

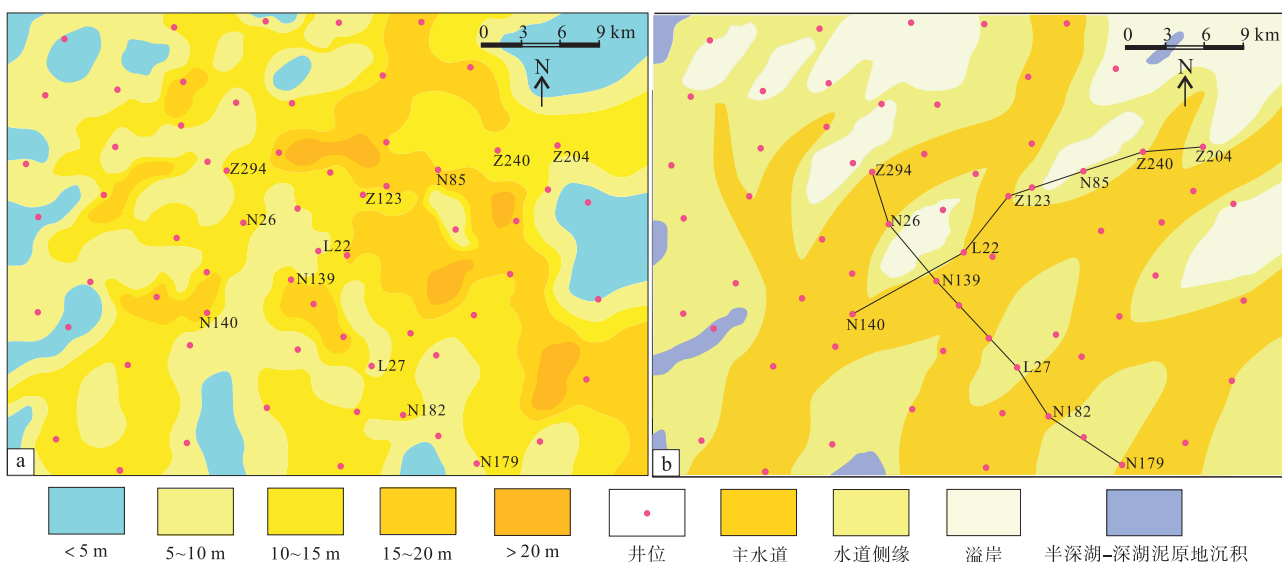


图 7 鄂尔多斯盆地合水南地区长₇₁砂体厚度分布 (a) 及沉积微相平面分布 (b)

Fig. 7 Plane of sand thickness (a) and distribution of sedimentary facies (b) of the Chang 7₁ layer in Heshuinan area, Ordos Basin

芬等, 2015; 庞军刚等, 2022; 王林等, 2025)。但重力流成因复杂、砂体形态多样, 前人仅依据成因或扇体形态阐述重力流砂体特征, 难以支撑重力流油藏精细描述。以重力流沉积构型要素特征及其组合规律为理论框架, 系统刻画湖盆斜坡非限制性水道沉积区重力流砂体的沉积响应特征与空间分布特征, 总结不同微相储集层质量特征及沉积模式。

重力流沉积的形成及分布主要受物源供应、湖盆水深、湖盆地形和触发机制的控制 (王林等, 2025)。在物源的持续供应下, 三角洲前缘沉积大量砂体。受构造运动、火山等触发因素的影响, 三角洲前缘砂体失稳滑塌后向前运动, 进而在深水区沉积 (王林等, 2025)。具体规律如下: 三角洲前缘砂体在构造运动、火山等触发机制的作用下失稳

表 2 鄂尔多斯盆地合水南地区长 7₁ 亚段不同沉积微相储集层特征对比

Table 2 Comparison of reservoir characteristics of different microfacies in the Chang 7₁ submember of Yanchang Formation in Heshuinan area, Ordos Basin

沉积微相	宽度/km	厚度/m	岩相组合	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	代表性压汞曲线	代表性孔隙分布特征	主要孔隙类型
主水道	0.5~6	2~13	I II	11~15	0.08~1			部分粒间孔 + 溶蚀孔
水道侧缘	0.5~7	1~9	III IV	4~12	0.04~0.1			少量溶蚀孔 + 晶间微孔
溢岸	2~9	0.5~4	V VI	1~8	0.01~0.05			晶间微孔

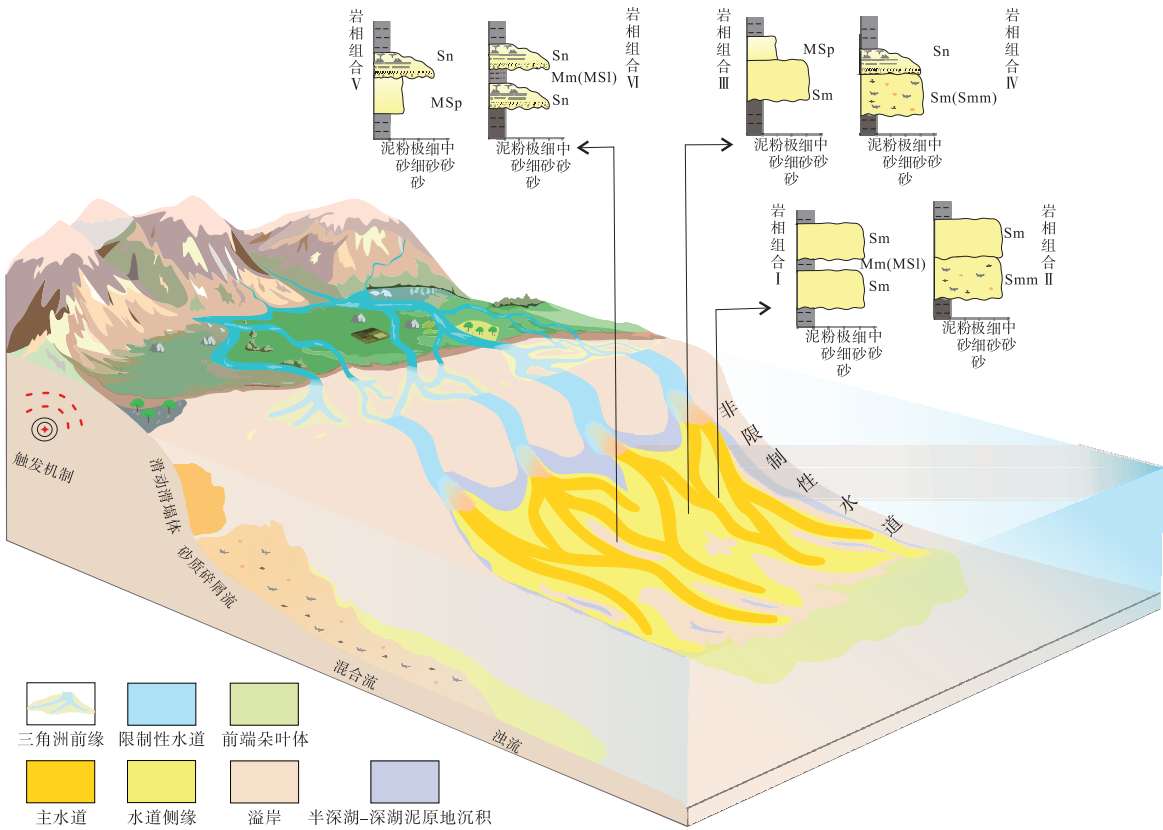


图 8 鄂尔多斯盆地合水南地区深水非限制性水道沉积区开发尺度重力流沉积模式

Fig. 8 Depositional model of deep-water gravity flow in non-restricted channel depositional areas of development-scale in Heshuinan area, Ordos Basin

成为滑动滑塌体,并沿着坡折带移动至限制性水道区域。期间,由于环境水体注入、斜坡带坡度变缓等原因,沉积物流体由块状滑动体变为砂质碎屑流。砂质碎屑流沿着限制性水道搬运至坡折带末端后开始沉积。砂质碎屑流继续运动至水体更深、地形更为宽阔的非限制性水道区域后,沿平缓的湖盆散开并因环境水体的稀释发生流体转换。在非限制性水道沉积区,砂质碎屑流流体的头部与侧翼均因环境水体的稀释作用发生流体性质改变,从而形成混合流体(Manica, 2012)。未被稀释的砂质碎屑流以岩相组合Ⅰ、Ⅱ的形式沉积进而形成主水道微相,主水道延伸较远,呈分支状展布。因水体稀释作用而形成的混合流体由砂质碎屑流和浊流组成,多存在于砂质碎屑流的表面及前方。流体运动过程中,沉积物发生卸载并以岩相组合Ⅲ、Ⅳ的形式沉积从而形成了水道侧缘微相,水道侧缘主要以片状广泛分布于主水道两侧及前端。随着搬运距离持续增加及稀释作用的持续发生,砂质碎屑流大量转化为浊流并沉积了1套以岩相组合Ⅴ、Ⅵ为主的砂泥沉积,形成了溢岸微相(图8)。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地合水南地区长₇₁亚段重力流沉积发育块状层理细砂岩、含泥砾、泥岩撕裂屑块状层理细砂岩、正粒序递变层理细砂岩、平行层理泥质粉砂岩、透镜状层理粉砂质泥岩及块状泥岩6种岩相类型及相应6个岩相组合,代表了砂质碎屑流沉积、混合流沉积、浊流沉积及半深湖—深湖原地沉积成因类型。

2) 依据岩相类型及组合特征,将非限制性水道区域细分为主水道、水道侧缘、溢岸、半深湖—深湖泥原地沉积4种沉积微相。合水南地区地处非限制性水道沉积区,顺物源及垂直物源方向上,各微相均有发育。其中,主水道发育规模最大,物性最好;水道侧缘规模中等,物性次之;溢岸规模较小,物性最差;半深湖—深湖泥原地沉积发育最少。

3) 鄂尔多斯盆地长₇₁亚段重力流依次经历了砂质碎屑流、混合流、浊流3个演化阶段,平缓的地形及复杂的流体演变致使重力流沉积在顺物源及

垂直物源方向均发育主水道、水道侧缘、溢岸及半深湖—深湖泥原地沉积,并建立了长₇₁亚段湖盆细粒重力流沉积模式。

参考文献 (References)

- 陈轩,陶鑫,覃建华,许长福,邓远,李映艳,高阳,尹太举. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘二叠系芦草沟组异重流沉积. 石油与天然气地质,44(6): 1530–1545. [Chen X, Tao X, Qin J H, Xu C F, Deng Y, Li Y Y, Gao Y, Yin T J. 2023. Hyperpycnal flow deposits of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin. Oil & Gas Geology, 44(6): 1530–1545]
- 常梁杰,庞军刚,王欣月. 2022. 合水南地区三叠系长7段重力流沉积特征分析. 重庆科技学院学报(自然科学版),24(2): 23–30. [Chang L J, Pang J G, Wang X Y. 2022. Sedimentary characteristics of gravity flow in Chang 7 Member of Triassic in Heshuinan area. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 24(2): 23–30]
- 冯有良,杨智,张洪,张天舒,李攀,侯鸣秋,蒋文琦,王小妮,朱吉昌,李嘉蕊. 2023. 咸化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义:以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. 地质学报,97(3): 839–863. [Feng Y L, Yang Z, Zhang H, Zhang T S, Li P, Hou M Q, Jiang W Q, Wang X N, Zhu J C, Li J R. 2023. Fine-grained gravity flow sedimentary features and their petroleum significance within saline lacustrine basins: a case study of the Fengcheng Formation in Mahu depression, Junggar Basin, China. Acta Geologica Sinica, 97(3): 839–863]
- 冯有良,邹才能,杨智,蒋文琦,张天舒,张洪,刘畅,王小妮. 2024. 中国断陷和拗陷湖盆高可容纳空间层序细粒重力流沉积及其页岩油意义. 古地理学报,26(4): 941–961. [Feng Y L, Zou C N, Yang Z, Jiang W Q, Zhang T S, Zhang H, Liu C, Wang X N. 2024. Fine-grained gravity flow deposits and their significance for shale oil within high-accommodation sequences in faulted and down-warped lacustrine basins of China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(4): 941–961]
- 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. 渤海海域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,杨伟伟,张艳,Carlos Zarala,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, 牛小兵, 朱世发, 梁晓伟, 薛梦戈, 贺敬聪. 2015. 鄂尔多斯盆地西南部延长组重力流沉积特征及相模式. 石油勘探与开发, 42(5): 577–588. [Liu F, Zhu X M, Li Y, Xu L M, Niu X B, Zhu S F, Liang X W, Xue M G, He J C. 2015. Sedimentary characteristics and facies model of gravity flow deposits of Late Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 577–588]
- 刘显阳, 郭雯, 刘江艳, 李士祥. 2023. 鄂尔多斯盆地湖盆中部长₇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 7₃ Sub-Member, Ordos Basin. *Earth Science*, 48(1): 279–292]
- 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—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, 冯胜斌等. 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]
- 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—朵状体浊积扇沉积模式. 西北大学学报(自然科学版), 52(1): 144–158. [Pang J G, Chang L J, Guo J A, Chu M J, Ma Z G, Wang Z X, Wang X Y. 2022. Depositional model of deep lacustrine sediment gravity flow deposits with well developed channels and lobes in Yanchang Formation, southern Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 52(1): 144–158]
- 孙国桐. 2015. 深水重力流沉积研究进展. 地质科技情报, 34(3): 30–36. [Sun G T. 2015. A review of deep-water gravity-flow deposition research. *Geological Science and Technology Information*, 34(3): 30–36]
- 孙宁亮, 钟建华, 王书宝, 刘韶光, 倪良田, 曲俊利, 郝兵, 刘闯. 2017. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组深水重力流沉积特征及其石油地质意义. 古地理学报, 19(2): 299–314. [Su N L, Zhong J H, Wang S B, Liu S G, Ni L T, Qu J L, Hao B, Liu C. 2017. Sedimentary characteristics and petroleum geologic significance of deep-water gravity flow of the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(2): 299–314]
- 田媛, 钟建华, 王书宝, 陶红胜, 刘韶光, 李勇, 孙宁亮, 邵珠福, 倪良田, 毛鑫, 葛玉柱, 陈彬, 曲俊利, 王桂林. 2015. 鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组震积岩及其地质意义. 古地理学报, 17(4): 541–552. [Tian Y, Zhong J H, Wang S B, Tao H S, Liu S G, Li Y, Sun N L, Shao Z F, Ni L T, Mao C, Ge Y Z, Chen B, Qu J L, Wang G L. 2015. Seismites and their geological significances of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian exploration area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(4): 541–552]
- 王岚, 李文厚, 林潼, 王若谷. 2012. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长6油层组储集层成岩作用及其影响因素. 古地理学报, 14(3): 311–320. [Wang L, Li W H, Lin T, Wang R G. 2012. Diagenesis and its influencing factors of the Chang 6 interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 14(3): 311–320]
- 王林, 吕奇奇, 张严, 周浩, 张蕾, 罗奥, 陈乐康. 2025. 鄂尔多斯盆地西南部长7油层组深水重力流沉积岩相特征及分布模式. 沉积学报, 43(1): 154–168. [Wang L, Lü Q Q, Zhang Y, Zhou H, Zhan L, Luo A, Chen L K. 2025. Lithofacies characteristics and distribution patterns of deep-water gravity flow sedimentation in the Chang 7 Oil Formation in the Southwest Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(1): 154–168]
- 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]
- 吴千然, 鲜本忠, 高先志, 田荣恒, 张浩哲, 刘建平, 高钰坤, 王鹏宇. 2023. 强制湖退期湖底扇沉积构型的多样性与砂体分布特征: 以渤海湾盆地东营凹陷沙三段中亚段为例. 石油勘探与开发, 50(4): 782–794. [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): 782–794]
- 肖玲, 陈曦, 雷宁, 易涛, 郭文杰. 2023. 鄂尔多斯盆地合水南地区三叠系长7段页岩油储集层特征及主控因素. 岩性油气藏, 35(2): 80–93. [Xiao L, Chen X, Lei N, Yi T, Guo W J. 2023. Characteristics and main controlling factors of shale oil reservoirs of Triassic Chang7 member in Heshui area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 35(2): 80–93]
- 杨华, 邓秀芹. 2013. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响. 石油勘探与开发, 40(5): 513–520. [Yang H, Deng X Q. 2013. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5): 513–520]
- 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]
- 尹虎, 屈红军, 孙晓晗, 杨博, 张磊岗, 朱荣幸. 2024. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系长7油层组深水沉积特征及演化规律. 岩性油气藏, 36(5): 145–155. [Yin H, Qu H J, Sun X H, Yang B, Zhang L G, Zhu R X. 2024. Characteristics of deep-water deposits and evolution law of Triassic Chang 7 reservoir in southeastern Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 36(5): 145–155]
- 张可, 吴胜和, 许允杰, 熊绮聪, 高子杰, 余季陶. 2022. 湖盆扇三角洲河口坝发育程度及粒度韵律特征: 以滦平盆地桑园剖面下白垩统西瓜园组为例. 古地理学报, 24(3): 415–432. [Zhang K, Wu S H, Xu Y J, Xiong Q C, Gao Z J, Yu J T. 2022. Sedimentary characteristics of mouth bar within lacustrine fan delta: insights from the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation of Sangyuan outcrop, Luanping Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(3): 415–432]
- 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]
- 张功成, 屈红军, 张凤廉, 陈硕, 杨海长, 赵钊, 赵冲. 2019. 全球深水油气重大新发现及启示. 石油学报, 40(1): 1–34, 55. [Zhang G C, Qu H J, Zhang F L, Chen S, Yang H C, Zhao Z, Zhao C. 2019 Major new discoveries of oil and gas in global deepwaters and enlightenment. *Acta Petrolei Sinica*, 40(1): 1–34, 55]
- 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 D Q. 2023. Analysis of sedimentary characteristics and seismic response of gravity flow sublacustrine fan in continental faulted lake basins: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Baxian Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1049–1068]
- 张晓辉, 冯顺彦, 梁晓伟, 冯胜斌, 毛振华, 任继胜, 陈韶华. 2020. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7段沉积微相及沉积演化特征. 地质学报, 94(3): 957–967. [Zhang X H, Feng S Y, Liang X W, Feng S B, Mao Z H, Ren J S, Chen S H. 2020. Sedimentary microfacies identification and inferred evolution of the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Longdong area, Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 957–967]
- 朱如凯, 孙龙德, 张天舒, 张志杰, 沈安江, 毛治国, 王兆明, 任义丽, 江航, 张素荣, 万力. 2024. 中国油气勘探开发中的沉积学研究新进展与发展方向. 沉积学报, 43(1): 1–25. [Zhu R K, Sun L, Zhang T S, Zhang Z J, Shen A J, Mao Z G, Wang Z M, Ren Y L, Jiang H, Zhang S R. 2024. Advances and Trends in Sedimentological Research in Oil and Gas Exploration and Development in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(1): 1–25]
- 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.
- Manica R. 2012. Sediment gravity flows: study based on experimental simulations. *Hydrodynamics-Natural Water Bodies*: 286.
- Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 316–324.
- Shanmugam G. 2017. Global case studies of soft-sediment deformation structures (SSDS): definitions, classifications, advances, origins, and problems. *Journal of Palaeogeography*, 6(4): 251–320.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the Turbidite Paradigm (1950s 1990s): deep-water processes and facies models: a Critical Perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285–342.
- Walker R G. 1978. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. *AAPG Bulletin*, 62(6): 932–966.
- Wang F, Chen R, Yu W, Tian J C, Liang X W, Tan X F, Gong L. 2021. Characteristics of lacustrine deepwater fine-grained lithofacies and source-reservoir combination of tight oil in the Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 202: 108429.
- Zavala C, Arcuri M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics. *Sedimentary Geology*, 337: 36–54.

(责任编辑 王绍华)