

文章编号: 1671-1505(2026)03-1055-16 DOI:10.7605/gdxb.2026.072

# 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组 重力流沉积特征及演化规律\*

郭濛濛 何幼斌 李 华 吴吉泽 何一鸣  
姜纯伟 张显坤 姚凤南 李纾羽

长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

**摘 要** 根据野外露头、岩石薄片及粒度分析等资料, 对鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组重力流沉积的类型、特征和演化规律开展了研究。结果表明: (1) 鄂尔多斯盆地西缘发育 4 种深水沉积类型, 分别为深水悬浮沉积、低密度浊流沉积、高密度浊流沉积和碎屑流沉积。深水悬浮沉积以泥岩为主, 发育水平层理; 低密度浊流沉积以细砂岩和粉砂岩为主, 发育沟模、槽模和不完整的鲍马序列; 高密度浊流沉积以含砾中砂岩和细砂岩为主, 见逆-正粒序, 发育似鲍马序列; 碎屑流沉积以砾屑灰岩为主, 发育块状层理。(2) 研究区主要发育 4 种重力流沉积微相类型, 分别为远端朵叶沉积、近端朵叶沉积、水道化朵叶沉积和水道沉积。水道沉积主要为碎屑流沉积; 水道化朵叶沉积由高密度浊流沉积相互叠置组成; 近端朵叶沉积下部为高密度浊流沉积, 上部为低密度浊流沉积; 远端朵叶沉积主要发育低密度浊流沉积。(3) 研究区樱桃沟组共分为 5 个演化阶段, 其中, 高海平面阶段主要发育低密度浊流和深水悬浮沉积, 低海平面阶段主要发育碎屑流、高密度浊流和低密度浊流沉积。(4) 研究区近端朵叶沉积平均孔隙度约 6.61%, 平均渗透率约  $6.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 优于水道化朵叶沉积和远端朵叶沉积, 储集性能好。虽然研究区樱桃沟组已抬升至地表, 但鄂尔多斯西缘可能发育多个覆盖的海底扇, 应是潜在的油气勘探开发区域。

**关键词** 重力流沉积 浊流 樱桃沟组 奥陶系 鄂尔多斯盆地西缘

**第一作者简介** 郭濛濛, 女, 2002 年生, 硕士研究生, 研究方向沉积学。E-mail: 2171516975@qq.com。

**通讯作者简介** 何幼斌, 男, 1964 年生, 教授, 从事沉积学方面的教学及科研。E-mail: heyb122@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

## Sedimentary characteristics and evolution of gravity flow in the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

GUO Mengmeng HE Youbin LI Hua WU Jize HE Yiming  
JIANG Chunwei ZHANG Xiankun YAO Fengnan LI Shuyu

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

**Abstract** Based on field outcrops, microscopic observation and grain size analysis, this study investigates the sedimentary types, characteristics and evolution of the gravity flows in the Ordovician Yingtaogou Formation at the western margin of the Ordos Basin, and establishes a corresponding

\* 国家自然科学基金项目 (编号: 42272113, 42272115) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272113, 42272115)]

收稿日期: 2025-07-16 改回日期: 2025-08-17

sedimentary model. The results show that: (1) Four deep-water sedimentary types are developed in the study area, namely debris flow deposits, high-density turbidity current deposits, low-density turbidity current deposits and deep-water autochthonous deposits. Debris flow deposits are mainly composed of calcirudite and develop massive bedding; high-density turbidity current deposits show inverse-to-normal grading sequence and develop Bouma-like sequence; low-density turbidity current deposits develop groove cast, flute mark and incomplete Bouma sequence; deep-water autochthonous deposits develop horizontal bedding. (2) Four types of gravity flow sedimentary microfacies are mainly developed in the study area, namely main channel deposits, channelized lobe deposits, sheet lobe deposits and distal lobe deposits. Main channel deposits are mainly debris flow deposits; channelized lobe deposits are composed of high-density turbidity current deposits superimposed on each other; sheet lobe deposits have high-density turbidity current deposits at the bottom and low-density turbidity current deposits at the top; distal lobe deposits mainly develop low-density turbidity current deposits. (3) The Yingtaogou Formation is divided into five evolutionary stages, from bottom to top: high sea level stage, low sea level stage, high sea level stage, low sea level stage and high sea level stage. In the high sea level stage, low-density turbidity currents and deep-water suspension deposits are mainly developed, while in the low sea level stage, debris flows, high-density turbidity currents and low-density turbidity currents are mainly developed. (4) The average porosity of sheet lobe deposits in the study area is about 6.61%, and the average permeability is about  $6.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , which is better than that of channelized lobe deposits and distal lobe deposits, and has good reservoir performance. The deep-water autochthonous deposits and sheet lobe deposits of the Yingtaogou Formation are superimposed, forming an ideal combination of source reservoir and covering rock with them. Therefore, the Ordovician gravity flow deposits at the western margin of the Ordos Basin are potential targets for the next oil and gas exploration.

**Key words** gravity flow deposit, turbidity current, Yingtaogou Formation, Ordovician, western margin of Ordos Basin

**About the first author** GUO Mengmeng, born in 2002, is a master degree candidate. She is mainly engaged in sedimentology. E-mail: 2171516975@qq.com.

**About the corresponding author** HE Youbin, born in 1964, is a professor. He is mainly engaged in teaching and research on sedimentology. E-mail: heyb122@163.com.

深水重力流作为地球上的沉积物搬运机制之一,其相关研究一直是沉积学研究的热点之一。中外学者对重力流的触发机制(Talling *et al.*, 2013; Shanmugam, 2015)、沉积过程(Amy *et al.*, 2005a; 操应长等, 2021; 杨田等, 2021)、沉积特征(Amy *et al.*, 2005b; Stow and Johansson, 2000; 裴羽等, 2015)及沉积模式(李相博等, 2013)等方面开展过大量的研究,提出了鲍马序列(Bouma, 1962)、扇模式(Walker, 1965)、高密度浊流(Lowe, 1982)、砂质碎屑流(Shanmugam, 1996)和混合事件层(Talling, 2014)等概念。其中高密度浊流被广泛应用于深水块状砂岩的成因解释中, Talling (2014) 通过对亚平宁山脉露头 and 薄

片的观察,发现大量厘米级逆-正粒序旋回,认为该地发育高密度浊流沉积。Martín-Merino 等(2014)对坎塔布连山区进行研究,发现巨型滑塌岩块上覆少量块状砂岩,认为发育碎屑流沉积和高密度浊流沉积。吕奇奇等(2022)在对鄂尔多斯盆地延长组的岩相划分中,认为发育泄水构造的块状砂岩为高密度浊流沉积。由此可见,由于深水沉积的复杂性,关于重力流特别是高密度浊流沉积特征的认识仍存在诸多不同意见,其鉴别标志仍存在争议(Lowe, 1982; Talling, 2014);且由于典型的野外露头实例相对较少,针对重力流演化过程的认识仍存在薄弱环节(李相博等, 2013; 李华等, 2022)。

野外露头研究能够更为有效的获得精度较高且直观的一手地质资料(盛辉等, 2020)。前人研究表明, 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系出露良好, 深水沉积类型丰富, 在樱桃沟组发育 1 套深水沉积背景下的陆源碎屑岩夹碳酸盐滑塌角砾岩沉积(安太痒和郑昭昌, 1990)。前人多集中研究物源分析(王振涛等, 2014)、构造背景(王振涛, 2014)和重力流与等深流的交互作用(王振涛等, 2015; 王振, 2023)等方面, 不同学者对其中发育的重力流沉积类型及特征仍存在不同认识(朱如凯等, 1994; 高振中等, 1995; 许强等, 2010)。因此, 本研究以野外实测剖面为基础, 结合室内薄片分析, 识别出了樱桃沟组深水沉积类型, 总结了其沉积特征和演化特征, 建立了沉积模式, 以期丰富重力流沉积的野外研究实例。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地为华北克拉通次级单元, 早古生代寒武纪至中奥陶世马家沟期的古构造格局为“一隆三凹”; 中奥陶世平凉期至晚奥陶世背锅山期则呈现“一隆两凹”的古构造格局(吴胜和等, 1994; 冯增昭等, 1999)。其西缘自东向西依次发育碳酸盐岩台地、碳酸盐岩斜坡和深水盆地, 斜坡呈现 SW 倾向的开放环一带状分布, 发育浊流沉积(高振中等, 1995; 王振涛等, 2015; 何一鸣等, 2025)。研究区位于鄂尔多斯盆地西缘阿拉善地块与鄂尔多斯地块之间(图 1), 从寒武纪至晚奥陶世一直处于凹陷地带, 樱桃沟组时期发育大量海相沉积。

鄂尔多斯盆地西缘上奥陶统缺失, 下奥陶统及中奥陶统保存较好, 从下到上发育下岭南沟组、前中梁子组、中梁子组和樱桃沟组。樱桃沟组与上覆石炭系羊虎沟组呈平行不整合接触, 与下伏中梁子组整合接触(图 1-c)。安太痒和郑昭昌(1990)通过对地层中牙形石和笔石的对比研究, 确定其地层时代为中奥陶世达瑞威尔期。樱桃沟组厚度及岩性横向变化大, 在樱桃沟厚仅 141 m, 下部为薄层泥晶灰岩、砾屑灰岩夹黑色板岩; 上部为青灰色板岩与砂岩互层夹少许不纯石灰岩。向西至胡基台、方家田一带, 厚度陡增至 1771 m, 变为由砂岩与泥岩不等厚互层夹砾岩、砂质灰岩及砾屑灰岩等, 整体为深水斜坡一盆地沉积(冯增昭等, 1999;

王振涛等, 2014)。内部含有丰富的生物化石, 前人在泥晶灰岩和泥岩中发现了大量的深水相化石, 如笔石和放射虫化石等(高振中等, 1995; 王振, 2023)。

## 2 沉积相及特征

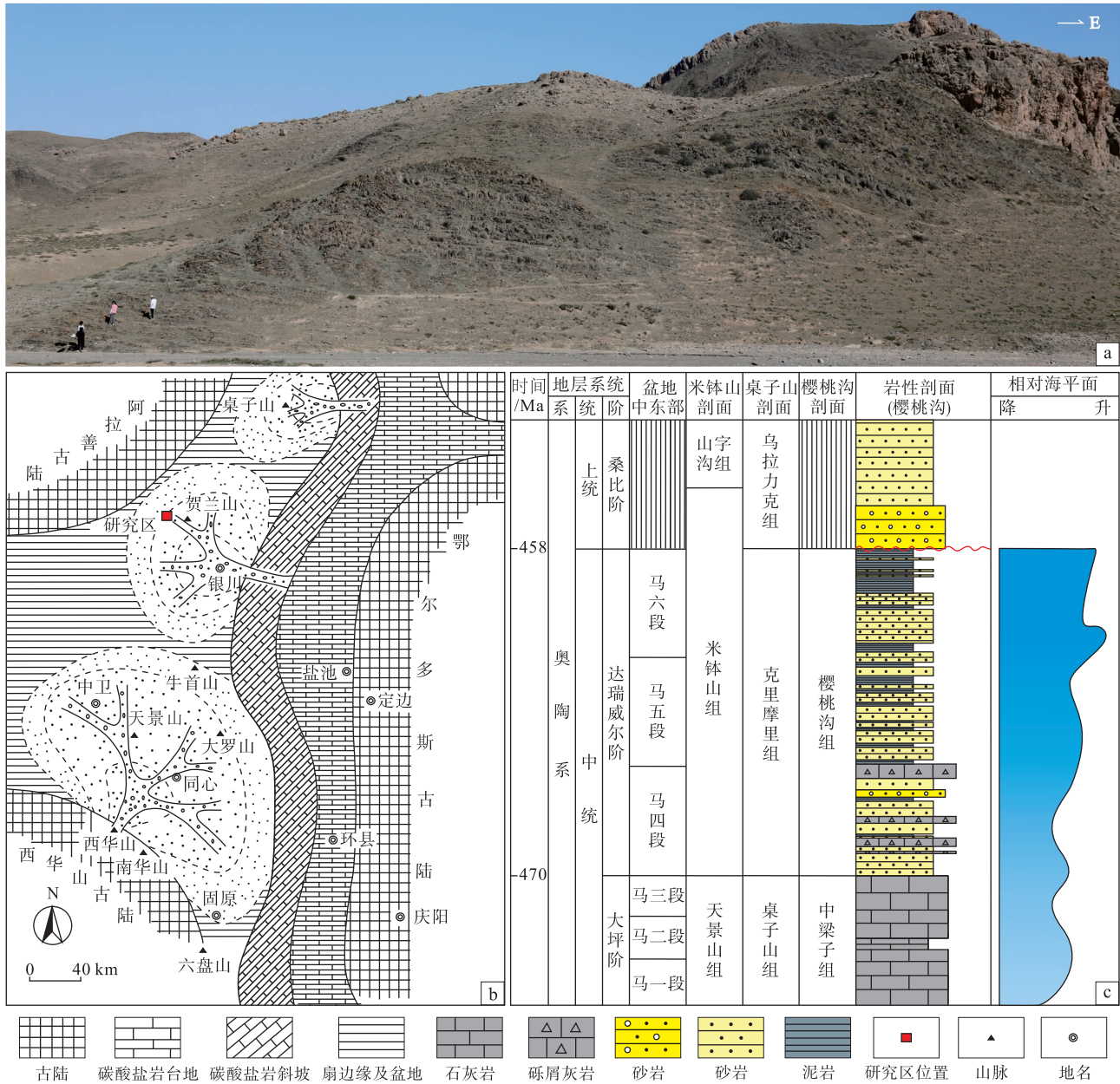
### 2.1 深水沉积类型及特征

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组测得厚度为 77.04 m, 其岩性变化不大, 根据沉积特征和沉积序列等划分为 41 层。下部(1-11 层)主要发育灰黑色泥岩、粉砂岩和细砂岩; 中上部(12-40 层)粒度明显变粗, 以灰黑色泥岩、灰绿色细砂岩和含砾中砂岩为主; 顶部(41 层)发育 1 套浅灰色砾屑灰岩(图 1-a; 图 2)。沉积构造主要发育平行层理、交错层理、波状层理、包卷层理、碟状构造、槽模和沟模等。少数粉砂质泥岩中含有笔石化石, 砾屑灰岩中含有来自浅水的腹足类化石。基于对露头的仔细观察, 将 Lowe(1982)的重力流划分方案与研究区实际情况相结合, 在樱桃沟组识别出深水悬浮沉积、低密度浊流沉积、高密度浊流沉积和碎屑流沉积共 4 种深水沉积类型(表 1)。

#### 2.1.1 深水悬浮沉积

鄂尔多斯盆地西缘发育的灰黑色泥岩和粉砂质泥岩, 常夹于砂岩之中, 实测厚度约为 13.94 m, 厚度变化较大, 最薄处仅 3 cm, 最厚可达 175 cm(图 2)。其中生物化石较为少见, 仅在部分粉砂质泥岩中发现少量笔石和放射虫化石(安太痒和郑昭昌, 1990; 王振, 2023)。沉积构造不发育, 仅在部分层见水平层理。

综合分析认为该泥岩可能为深水悬浮沉积, 主要依据如下: (1) 泥岩粒度细, 见水平层理, 表明水动力条件弱、沉积环境为静水条件, 沉积物悬浮沉降; (2) 泥岩的颜色较深, 整体为灰黑色, 推测其多沉积于还原环境; (3) 樱桃沟组泥岩中见笔石化石和放射虫化石(安太痒和郑昭昌, 1990), 反映其沉积环境为海相沉积环境, 且水体较深; (4) 宁夏—中卫地区的米钵山组对应于研究区樱桃沟组, 泥岩的  $La_N/Nd_N$  值约为 1.0, 古水深约为 400 m, 为深水斜坡一盆地沉积。樱桃沟组页岩的  $TiO_2/MnO$  值与  $Al_2O_3/MnO$  值的平均值分别为 15.2 和 331.4(黄喜峰等, 2009)。而米钵山



a—鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统樱桃沟组剖面；b—鄂尔多斯盆地西缘中奥陶世岩相古地理（据高振中等，1995；有修改）；  
c—内蒙古阿拉善地区樱桃沟组地层综合柱状图（据王振涛等，2015；有修改）

图 1 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geological map of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

组页岩的相应平均值为 17.7 和 344.3（魏泽跃，2024），均高于樱桃沟组，表明樱桃沟组沉积时期的水深略深于米钵山组，也应当为深水斜坡—盆地沉积。且研究区泥岩厚度较大，由浊流远距离搬运形成的可能性较小，应当为深水悬浮沉积。

2.1.2 低密度浊流沉积

在鄂尔多斯盆地西缘实测剖面上，灰绿色薄层

细砂岩和粉砂岩发育，实测厚度约为 38.22 m，单期砂岩厚度较薄，多为 0.1~0.3 m，但多期堆叠厚度可达 2 m（图 3-a）。砂岩底界面为突变界面，发育丰富的底模构造（图 3-b）和火焰状构造。沉积构造类型较多，主要发育正粒序、平行层理（图 3-c）、交错层理、包卷层理。其中平行层理纹层清晰，间距较小，通常小于 1 mm。砂岩中颗

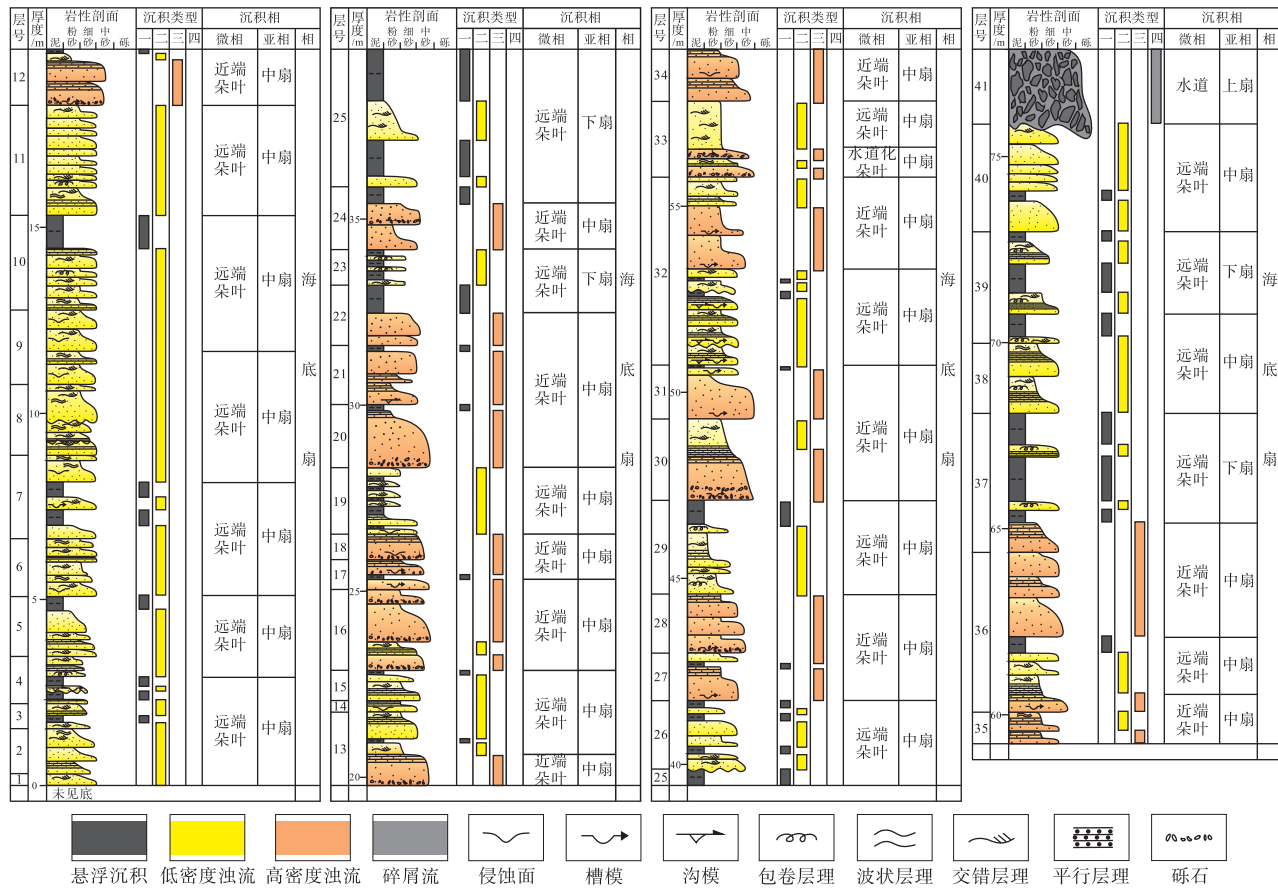


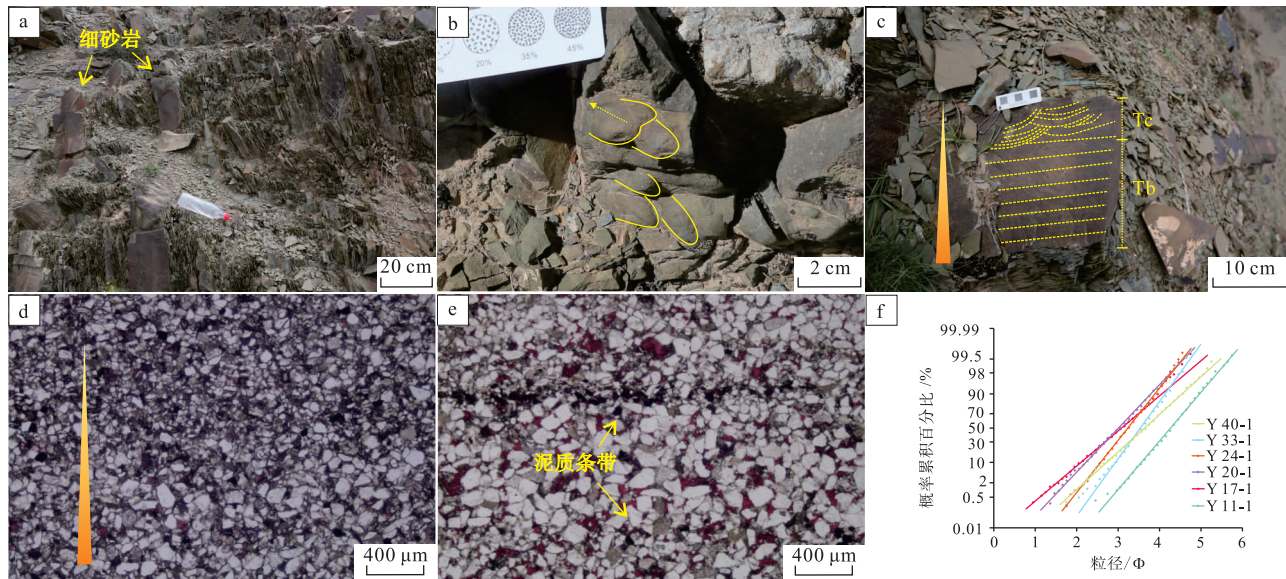
图 2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组岩性柱状图

Fig. 2 Lithological column of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组沉积类型及其特征

Table 1 Sedimentary types and characteristics of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

| 沉积类型    | 深水悬浮沉积    | 低密度浊流沉积                | 高密度浊流沉积              | 碎屑流沉积       |
|---------|-----------|------------------------|----------------------|-------------|
| 流变学     | —         | 牛顿流变                   | 底部塑性流变<br>上部牛顿流变     | 塑性流变        |
| 流动状态    | —         | 紊流                     | 底部层流上部紊流             | 层流          |
| 沉积物支撑机制 | —         | 基质强度分散压力浮力             | 紊流                   | 基质强度分散压力浮力  |
| 沉积方式    | 悬浮沉降      | 悬浮沉降                   | 底部为整体冻结<br>中上部为悬浮沉降  | 整体冻结        |
| 侵蚀能力    | 弱         | 较强                     | 较强                   | 强           |
| 顶底接触关系  | 顶底面均为突变接触 | 底面为突变界面<br>顶面为渐变界面     | 底面为突变界面<br>顶面为渐变界面   | 顶底面均为突变接触   |
| 产状      | 侧向延伸相对较好  | 侧向延伸稳定                 | 侧向延伸相对较好             | 横向延伸局限,呈透镜状 |
| 成分      | 泥岩、粉砂质泥岩  | 细砂岩、粉砂岩、泥岩             | 含砾中砂岩、细砂岩、粉砂岩        | 砾屑灰岩        |
| 单层厚度    | 3~175 cm  | 10~30 cm               | 20~200 cm            | 约 100 cm    |
| 分选性     | 中等        | 中等                     | 较差—中等                | 差           |
| 沉积构造    | 水平层理      | 槽模沟模、平行层理<br>交错层理、包卷层理 | 槽模沟模、平行层理、碟状构造       | 无           |
| 生物化石    | 笔石、放射虫    | 无                      | 无                    | 腹足类         |
| 沉积序列    | 块状        | 鲍马序列                   | 似鲍马序列(正粒序、逆粒序、逆-正粒序) | 块状          |
| 粒度曲线    | —         | 直线一段式                  | 直线一段式<br>弯曲一段式       | —           |



a—细砂岩和粉砂质泥岩互层；b—薄层细砂岩底部发育槽模，箭头所指方向为水流方向；c—平行层理砂岩，上部发育交错层理砂岩；d—细砂岩，正粒序，单偏光，样品 Y-27-1；e—细砂岩，箭头所指为颗粒间发育灰黑色泥质层，单偏光，样品 Y-19-1；f—概率累计曲线为直线一段式

图 3 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组低密度浊流沉积特征

Fig. 3 Characteristics of low-density turbidity current deposits of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

粒以石英为主，呈次棱-次圆状，分选普遍中等至较好，主要为颗粒支撑，结构成熟度相对较高，见正粒序（图 3-d），顺层发育灰褐色泥质层（图 3-e）。概率累计曲线多为直线一段式， $\Phi$  值在 1~3 之间（图 3-f）。

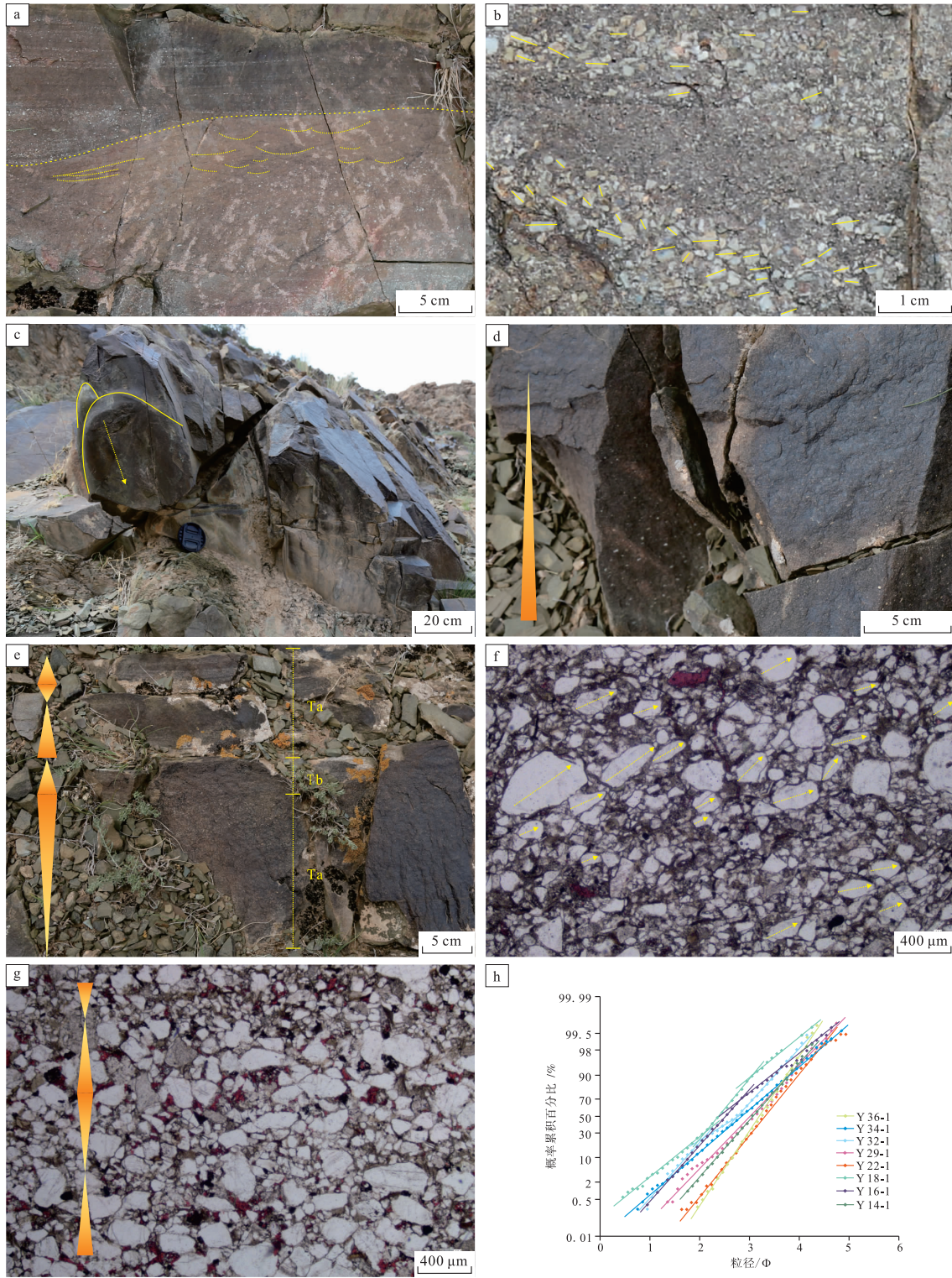
综合上述沉积特征，认为该砂岩为低密度浊流沉积。主要原因如下：（1）砂岩底面出现底模构造和火焰状构造，发育正粒序，向上见平行层理、交错层理和包卷层理等沉积构造，具不完整的鲍马序列 Tabc、Tab、Tac 及 Tabce，表明其为浊流沉积形成；（2）概率累计曲线多为直线一段式，表明该砂岩为浊流沉积；（3）相较剖面中上部发育的含砾中砂岩，该颗粒粒径更细， $\Phi$  值在 1~3 之间，单层砂岩厚度更薄，浊流能量较弱，应当为低密度浊流沉积；（4）多见弥散式正粒序，且平行层理纹层更为清晰，间距较小，说明形成该砂岩的沉积速率相对较慢，为低密度浊流沉积。

### 2.1.3 高密度浊流沉积

在鄂尔多斯盆地西缘实测剖面中上部（12~40 层），灰绿色中—厚层含砾中砂岩和细砂岩发育，实测厚度约为 22.88 m，单层厚度为 0.2~2 m，横向延伸较好，多呈层状展布，少数呈透镜状或层内

含有透镜状砂岩（图 4-a）。岩石侵蚀下伏地层，具有突变的底界面，底部发育与层面近乎平行排列、具有一定成层性的砾石层（图 4-b），粒径为 0.2~0.5 cm，多呈棱角一次棱角状，磨圆较差。层内见侵蚀面，岩石底部发育沟模及舌状槽模（图 4-c）。沉积构造主要为平行层理和碟状构造。其中平行层理的纹层间隔较大，一般为 1~2 mm，粒度较粗，由于夹有细小砾石，纹层较模糊，其间较大砾石长轴与纹层平行。沉积序列主要包括逆粒序、逆-正粒序和正粒序（图 4-d，4-e）。正粒序多为粗尾式正粒序，向上过渡为块状砂岩，与上覆泥岩渐变接触。逆粒序及逆-正粒序均较为少见，偶见逆粒序砂岩与上覆砂岩互层，形成逆-正粒序砂岩。砂岩中颗粒以石英为主，见正粒序和逆-正粒序，长条形颗粒略具定向排列特征（图 4-f，4-g），次棱-次圆状，分选差；主要为基质支撑，结构成熟度相对较低。概率累计曲线多为弯曲一段式和直线一段式， $\Phi$  值在 0.5~2 之间（图 4-h）。

通过上述沉积特征来看，认为其成因为高密度浊流沉积。主要依据如下：（1）岩性为细—中砂岩，以石英颗粒为主，其分选磨圆均一般，结构成熟度较差，显示该沉积物为短距离搬运后迅速沉积



a—中砂岩，呈透镜状，层内发育碟状构造；b—中砂岩，底部发育砾石层，黄线为砾石长轴方向；c—块状砂岩，底部发育槽模；d—含砾中砂岩，发育粗尾式正粒序；e—逆粒序砂岩，上部发育平行层理砂岩和逆-正粒序砂岩；f—中-细砂岩，棱角一次棱角状，石英颗粒略具定向性，单偏光，样品 Y-34-1；g—中-细砂岩，以石英为主，逆-正粒序，单偏光，样品 Y-35-1；h—概率累计曲线为弯曲一段式和直线一段式

图 4 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组高密度浊流沉积特征

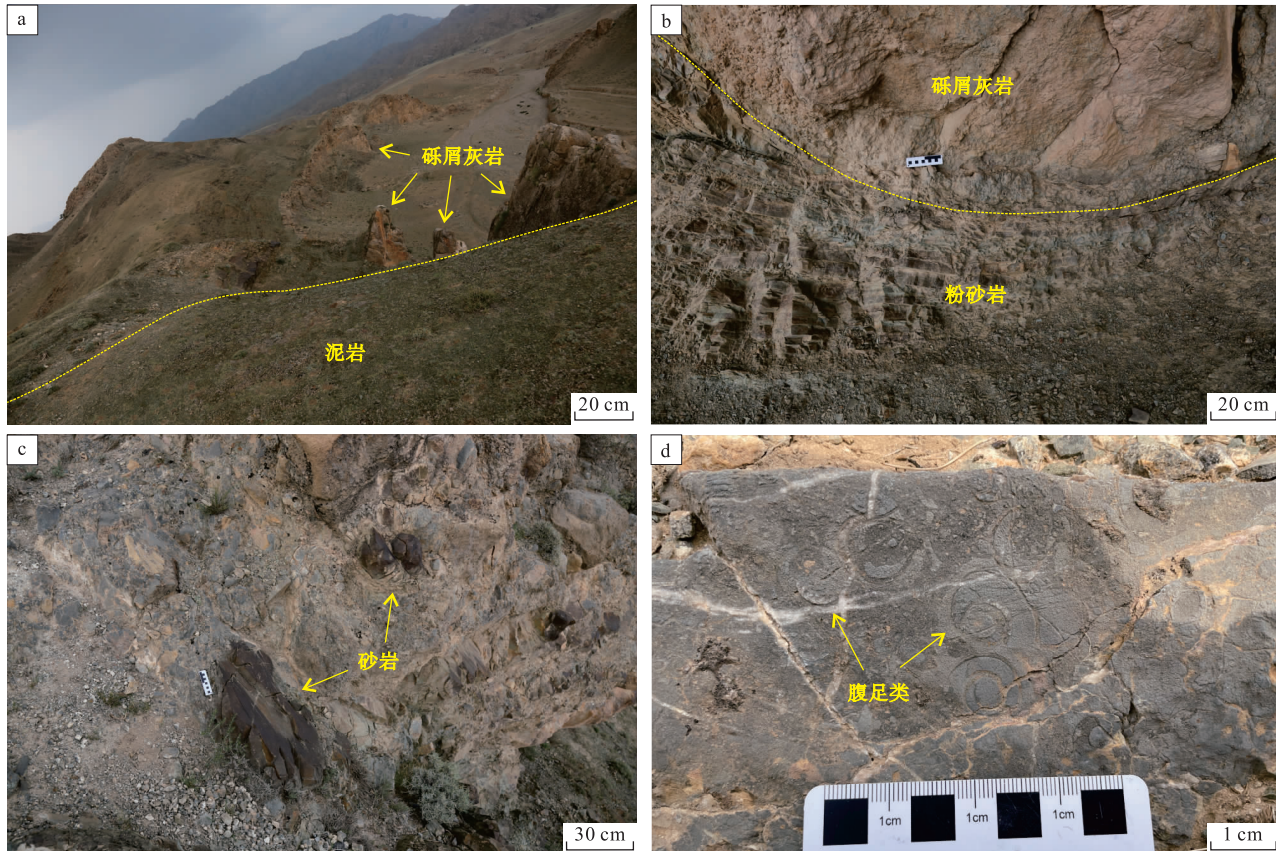
Fig. 4 Characteristics of high-density turbidity current deposits of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

而成；(2) 整体厚度大，粒度较粗，且岩石底部见沟模和槽模，表明沉积水体能量较高，侵蚀能力强，应当为浊流沉积；(3) 概率累积曲线呈一段式，粒径区间集中在 0.1~0.5 mm 之间，大于低密度浊流沉积，表明其应当为高密度浊流沉积形成；(4) 底部砾石呈层状排列，表明沉积时为层层堆叠沉积，符合高密度浊流沉积特征，而非碎屑流整体冻结沉积；(5) 发育粒序层理、平行层理和碟状构造，组成似鲍马序列。研究区块状砂岩或正粒序砂岩往往向上过渡为平行层理砂岩，顶界面为渐变界面，而砂质碎屑流沉积顶底界面均为突变面，因此该砂岩为高密度浊流沉积。粒序层理中见逆粒序但其往往与上覆砂岩组成逆-正粒序，砂质碎屑流中常见逆粒序，但未见逆-正粒序的旋回变化，且这种特征符合 Lowe (1982) 所描述的 S2 和 S3 互层沉积，因此应当为高密度浊流沉积；(6) 细砂岩和含砾中砂岩中没有发现植物碎屑，沉积构造较为单一，同时仅在少数岩层内见逆-正逆序，大

多为块状砂岩，未见典型异重流沉积鉴别标志(章诚等, 2024)。依据前人的研究，研究区为海相盆地，不易形成异重流沉积，因此该砂岩主要由高密度浊流沉积形成。

#### 2.1.4 碎屑流沉积

在鄂尔多斯盆地西缘实测剖面顶部(41层)，浅灰色砾屑灰岩发育，横向延伸较远，可达数百米，实测厚度约为 2 m，厚度变化较大，最厚处厚度可超过 14 m，最薄处厚度则不足 1 m(图 5-a)，与下伏砂岩之间发育槽形侵蚀冲刷面(图 5-b)。基质为土黄色泥灰质，含量较低，砾石成分主要为碳酸盐岩，含少量石英岩(图 5-c)。碳酸盐岩砾石粒径大小混杂，大者可达 40 cm，小者不足 1 cm，整体上表现出微弱的正粒序，分选差，排列杂乱，大砾石呈漂浮状分布在小砾石之中，磨圆较好，多呈次棱状-次圆状，其中可见浅水环境的腹足类化石(图 5-f)。砂岩砾石为灰绿色，最大可达 60 cm，磨圆较差，数量较少。



a—泥岩与砾屑灰岩宏观特征；b—砾屑灰岩与细砂岩之间发育的槽形侵蚀面；c—砾屑灰岩中的石英岩砾石；

d—碳酸盐岩砾石中含有腹足类化石

图 5 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组碎屑流沉积特征

Fig. 5 Characteristics of debris flow deposits of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

综合上述沉积特征,认为该砾屑灰岩可能为碎屑流沉积,主要依据包括:(1)砾屑灰岩厚度大,延伸远,且对下伏地层产生剧烈侵蚀,表明沉积时水动力强;(2)整体颜色较浅,且含有腹足类化石,表明其物源可能来自浅水环境;(3)砾屑灰岩顶底界面均为岩性突变界面,整体呈透镜状,表明其具有以凝结方式快速堆积的沉积特点,可能为碎屑流整体冻结沉积形成;(4)碳酸盐岩砾石排列杂乱,分选磨圆均较差,整体呈块状,未见明显的粒序层理,表明流体由基质强度支撑,整体块状搬运,应当为碎屑流沉积形成;(5)石英岩砾石颜色较深,且成分与下伏地层相近,可能为碎屑流在深水环境中一边侵蚀、一边沉积形成的。

## 2.2 重力流沉积微相类型及特征

综合鄂尔多斯盆地西缘樱桃沟组剖面露头情况,按照受限程度和重力流能量,在研究区识别出 4 种沉积微相,分别为水道沉积、水道化朵叶沉积、近端朵叶沉积和远端朵叶沉积。上扇主要发育水道沉积,中扇发育远端朵叶沉积、近端朵叶沉积和水道化朵叶沉积,下扇发育远端朵叶沉积(表 2)。

### 2.2.1 水道沉积

主要由碎屑流沉积组成,仅发育于剖面顶部(图 5),以厚层砾屑灰岩为主,整体呈透镜状,延伸距离可达数百米。砾屑灰岩底部发育互层状中一薄层细砂岩及泥岩,细砂岩中见粒序层理、平行层理、交错层理,为低密度浊流沉积(表 2);从整体上看,上部碎屑流沉积侵蚀下部低密度浊流沉积,表明碎屑流由浅水向深水搬运,能量较强,侵蚀下伏地层,开始新一轮沉积,形成重力流水道沉积。

### 2.2.2 近端朵叶沉积

主要由高密度浊流、低密度浊流和深水悬浮沉积组成,在剖面中最为常见(图 5)。其下部主要为含砾中砂岩和厚层细砂岩互层,部分具有粗尾式正粒序或逆-正粒序,发育块状层理和平行层理,底部出现槽模和沟模,为高密度浊流沉积;上部主要为薄层细、粉砂岩夹少量泥岩,发育平行层理、交错层理和变形构造,组合成低密度浊流的 T<sub>bce</sub> 段。两者为渐变接触,未见明显的粒度间断,表明近端朵叶沉积是由于浊流的能量逐渐减弱,高密度浊流转变为低密度浊流的过渡流体形成的。但是由于这

种流体不稳定,其沉积的砂岩横向上可以渐变为由高密度浊流形成的块状砂岩。有时浊流的能量较强,侵蚀下伏岩层,块状砂岩之间直接接触,形成侵蚀面。砂岩整体粒度较粗,厚度通常大于 50 cm,侧向上延伸较为稳定,主要为层状,砂体无明显的水道化现象。从整体上看,自下而上砂岩厚度变薄,粒度变细,表明浊流能量逐渐减弱,应当为规模较大的、相对稳定的近端朵叶沉积。

### 2.2.3 远端朵叶沉积

主要由低密度浊流与深水悬浮沉积组成,在剖面中也较为常见。其下部主要为中一薄层细砂岩和粉砂岩互层,夹少量泥岩,发育粒序层理、平行层理和交错层理,少数层位底部出现沟模,发育不完整的鲍马序列;上部为粉砂岩与粉砂质泥岩互层,发育水平层理,对应于鲍马序列的 T<sub>de</sub> 段。从整体上看,砂岩厚度明显薄于近端朵叶沉积,大多小于 30 cm,泥岩厚度显著增加,层数增多,逐渐变为砂泥岩薄互层,表明相对与浊流能量进一步减弱,应当为远端朵叶沉积。

### 2.2.4 水道化朵叶沉积

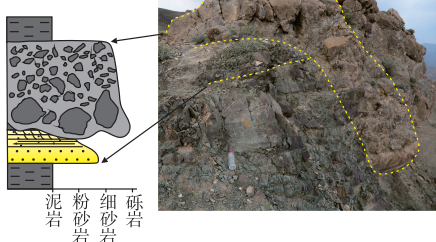
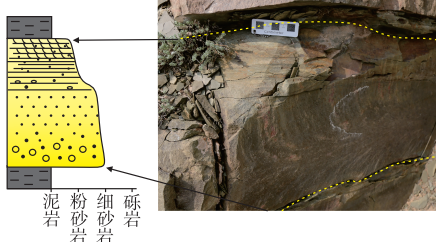
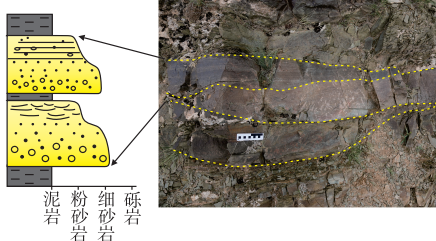
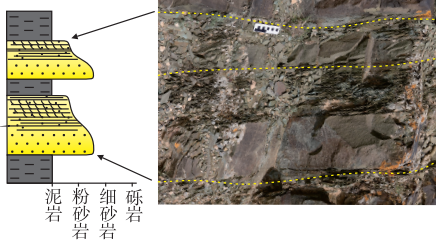
主要由高密度浊流组成,较为少见(图 4)。岩性主要为含砾中砂岩和细砂岩,底部发育砾石层,砾石顺层排布。向上粒度减小,过渡为中砂岩,层内发育碟状构造和平行层理(表 2)。整体呈透镜状,长 70~100 cm,宽 8~30 cm,底部平整,呈现出明显的水道化特征。侧向延伸较差,水道两侧与层状细砂岩相接触,表明其应当为水道化朵叶沉积,浊流能量强,沉积速度较快。

## 3 沉积演化及沉积模式

### 3.1 沉积演化

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组剖面由下至上,重力流砂体厚度、泥岩含量、平均粒径、标准偏差、C 值和 M 值整体呈现 3 个由粗至细旋回。其中 1-11 层为第 1 个旋回,12-26 层为第 2 个旋回,27-40 层为第 3 个旋回,分别体现了 3 次水体由浅至深变化过程。其中第 2 个和第 3 个旋回又可以按照砂岩厚度、泥岩含量和重力流强弱分为海平面上升阶段和海平面下降阶段。因此,在这 3 个旋回的基础上,结合砂泥比和鲍马序列等特征,依据海平面升降,认为研究区重力流由早至晚大致经历

表 2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组沉积微相类型及特征  
Table 2 Types and characteristics of sedimentary microfacies of the Ordovician  
Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

| 沉积微相  | 岩性                       | 沉积构造                             | 产状  | 重力流类型          | 水动力 | 组合类型  |
|-------|--------------------------|----------------------------------|-----|----------------|-----|---|
| 水道    | 砾屑灰岩                     | 块状层理                             | 透镜状 | 碎屑流            | 强   |    |
| 近端朵叶  | 含砾中砂岩、<br>细砂岩、粉砂岩、<br>泥岩 | 粒序层理、<br>平行层理、<br>变形构造、<br>槽模、沟模 | 层状  | 高密度浊流<br>低密度浊流 | 较强  |   |
| 水道化朵叶 | 含砾中砂岩、<br>细砂岩            | 平行层理、<br>碟状构造                    | 透镜状 | 高密度浊流          | 较强  |  |
| 远端朵叶  | 细砂岩、<br>粉砂岩、泥岩           | 粒序层理、<br>平行层理、沟模、<br>槽模水平层理      | 层状  | 低密度浊流          | 较弱  |  |

5 个演化阶段，依次为高海平面阶段、低海平面阶段、高海平面阶段、低海平面阶段和高海平面阶段（图 6）。

高海平面阶段：0~19.31 m，包含 1-11 层。砂岩单层厚度为 0.12~0.80 m，厚度较薄。岩性主要为薄层细砂岩、粉砂岩和泥岩，沉积构造丰富，见正粒序、平行层理、交错层理及波状层理，发育不完整的鲍马层序。Tc 占比为 27%，远高于 Tb、Td、Te，且层内见双向交错层理。平均粒径为 3.34~4.98  $\Phi$ ，均值为 4.12  $\Phi$ ，粒径由下至上逐渐减小。标准偏差为 0.45~0.83，均值为 0.59，分

选较好。最大搬运水动力 C 值为 79.76~267.14  $\mu\text{m}$ ，均值为 167.57  $\mu\text{m}$ ；平均搬运水动力 M 值为 31.47~99.41  $\mu\text{m}$ ，均值为 60.40  $\mu\text{m}$ ，搬运水动力明显较弱。整体上该段砂岩厚度较小、粒度较细，主要发育低密度浊流和深水悬浮沉积，远端朵叶沉积为主，因此整体为高海平面沉积阶段，重力流能量较弱。根据古水流分析证明，研究区存在等深流沉积，使得该段的 Tc 占比升高。但其中 Ta 段仍占 39%，胡萨判别指数均小于 9，并未显示牵引流特征，表明该段虽然受到了等深流的改造，仍以浊流沉积为主。

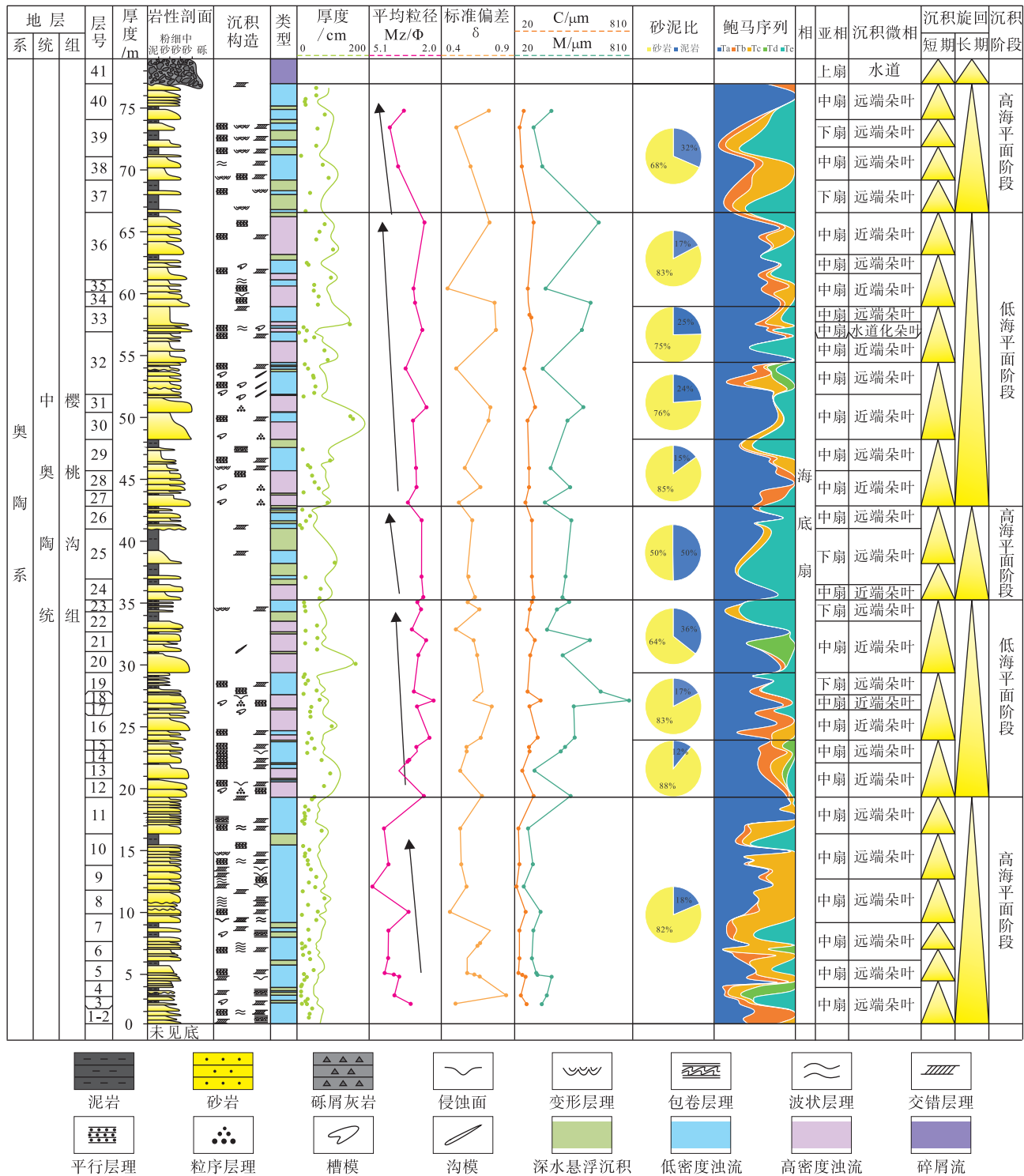


图 6 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组深水沉积垂向特征

Fig. 6 Vertical characteristics of deep-water deposits of the Ordovician Yingtaogou Formation, western margin of Ordos Basin

低海平面阶段：19.31~35.07 m，包含 12-23 层。砂岩单层厚度为 0.06~1.70 m，砂岩厚度明显增大。岩性主要为中-厚层含砾中砂岩、细砂岩和粉砂岩互层，夹少量泥岩，整体砂泥比为 6:1，泥

岩含量逐渐增大。沉积构造多为平行层理、粒序层理、交错层理、沟模和侵蚀面。平均粒径为 2.37~3.84 Φ，均值为 3.00 Φ，粒度逐渐减小，但相较于上一阶段粒度明显变粗。标准偏差为 0.49~

0.74, 均值为 0.62, 分选较好。最大搬运水动力  $C$  值为 152.96 ~ 787.83  $\mu\text{m}$ , 均值为 414.87  $\mu\text{m}$ ; 平均搬运水动力  $M$  值为 69.79 ~ 193.06  $\mu\text{m}$ , 均值为 129.35  $\mu\text{m}$ , 相较于高海平面阶段均明显增大, 水动力增强。主要发育高密度浊流和低密度浊流沉积, 近端朵叶沉积和远端朵叶沉积间互出现。按照厚度的变化可分为 3 个短期旋回, 由下至上, 鲍马序列由完整的鲍马序列过渡为 Tade 段, Td 和 Te 段占比逐渐上升, 表明浊流强度逐渐减弱, 但总体仍反映重力流能量较强, 为低海平面阶段。

高海平面阶段: 35.07 ~ 42.84 m, 包含 24 ~ 26 层。砂岩单层厚度为 0.09 ~ 1.10 m, 厚度较薄。岩性主要为泥岩夹薄—中层细砂岩和粉砂岩, 砂泥比为 1:1。沉积构造多为交错层理、包卷层理。平均粒径为 2.80 ~ 3.06  $\Phi$ , 均值为 2.90  $\Phi$ , 粒度逐渐变细。标准偏差为 0.57 ~ 0.65, 分选较好。最大搬运水动力  $C$  值为 303.86 ~ 399.96  $\mu\text{m}$ , 均值为 358.45  $\mu\text{m}$ ; 平均搬运水动力  $M$  值为 119.91 ~ 144.59  $\mu\text{m}$ , 均值为 134.18  $\mu\text{m}$ , 水动力明显减弱。该段泥岩含量高, 单层厚度减薄, 发育低密度浊流和深水悬浮沉积, 沉积微相为远端朵叶沉积, 整体处于高海平面阶段, 重力流能量较弱。

低海平面阶段: 42.84 ~ 66.58 m, 包含 27 ~ 36 层。砂岩单层厚度为 0.07 ~ 2.00 m, 厚度较厚。岩性主要为中—厚层含砾中砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩, 砂泥比为 13:1, 由下至上泥岩含量逐渐增多。平均粒径为 2.67 ~ 3.56  $\Phi$ , 均值为 3.15  $\Phi$ , 粒度逐渐变细。标准偏差为 0.44 ~ 0.76, 分选较好。最大搬运水动力  $C$  值为 208.22 ~ 529.21  $\mu\text{m}$ , 均值为 351.89  $\mu\text{m}$ ; 平均搬运水动力  $M$  值为 84.33 ~ 156.14  $\mu\text{m}$ , 均值为 113.96  $\mu\text{m}$ , 水动力增强。主要发育高密度浊流、低密度浊流和深水悬浮沉积, 近端朵叶沉积和远端朵叶沉积间互出现, 部分近端朵叶中发育水道化朵叶。相较于上一期低海平面阶段, 砂岩层厚无明显变化, 分选变好, 砂泥比较大, 表明此阶段浊流能量更强, 处于低海平面阶段。

高海平面阶段: 66.58 ~ 76.98 m, 包含 37 ~ 40 层。砂岩单层厚度为 0.13 ~ 0.92 m, 厚度较薄。岩性主要为泥岩夹薄—中层细砂岩和粉砂岩, 砂泥比为 2:1。沉积构造多为平行层理、交错层理和包卷层理。平均粒径为 2.75 ~ 4.23  $\Phi$ , 均值为 3.62  $\Phi$ ,

粒度明显减小。标准偏差为 0.5 ~ 0.72, 均值为 0.63, 分选较好。最大搬运水动力  $C$  值为 145.73 ~ 585.31  $\mu\text{m}$ , 均值为 300.40  $\mu\text{m}$ ; 平均搬运水动力  $M$  值为 53.06 ~ 146.69  $\mu\text{m}$ , 均值为 86.95  $\mu\text{m}$ , 水动力明显减弱。该段泥岩含量高, 单层厚度减薄, 发育低密度浊流和深水悬浮沉积, 为远端朵叶沉积, 整体处于低海平面阶段, 重力流能量较弱。

## 3.2 沉积模式

### 3.2.1 主控因素

构造运动。早古生代, 鄂尔多斯盆地西缘的贺兰裂谷急剧沉降, 裂谷肩部区域发生均衡翘升作用, 在鄂尔多斯西缘与贺兰裂谷之间形成了较大高差 (于洲等, 2021; 何登发等, 2024)。樱桃沟组沉积时期处于加里东运动第三幕, 构造活动强烈, 贺兰凹陷剧烈沉降, 在米钵山等地区的砂岩中形成了明显的挤压、缩短、褶皱和逆冲变形 (许淑梅等, 2016)。频繁剧烈的构造活动导致沉积地形高低差异加剧, 有利于重力流的形成; 也可能引发了地震, 使得与樱桃沟组沉积时期发育大规模滑塌角砾岩和浊流沉积。

物源供给。中奥陶世, 鄂尔多斯盆地西缘自东向西依次为鄂尔多斯古陆、开阔碳酸盐岩台地、缓坡型碳酸盐岩斜坡、深水盆地和阿拉善古陆。魏泽朕 (2024) 通过分析米钵山组滑塌角砾岩的堆叠方式判断其物源方向大致为东部; 高振中 (1995) 通过交错层理恢复的古水流方向为 NE 向, 与斜坡方向相同, 推测研究区樱桃沟组的物源主要来自鄂尔多斯古陆。鄂尔多斯古陆地形平坦, 且浅水区发育碳酸盐岩台地, 构造运动形成的陆源碎屑在浅水台地沉积后剩余的相对细粒物质才能继续搬运至深水区域 (谈梦婷等, 2023), 因此研究区樱桃沟组砂岩颗粒以细砂—粉砂为主, 分选相对较好, 单层厚度远小于砾屑灰岩。由于鄂尔多斯西缘碳酸盐岩台地发育, 物源供给充足, 研究区樱桃沟组砾屑灰岩延伸距离远, 单层厚度远大于砂岩单层厚度。

海平面升降。奥陶系沉积时期, 相对海平面变化呈上升趋势, 陆源碎屑物质搬运难度增加 (郭彦如等, 2014; 于洲等, 2021; 王振, 2023)。但据陈强等 (2012, 2020) 对碳同位素的研究, 中晚奥陶世时期存在大规模海退, 水动力动荡。研究区樱桃沟组岩性特征、沉积水动力特征与相对海平面变化基本保持一致, 相对海平面升高时, 陆源碎

屑物质搬运难度增加，主要发育低密度浊流，重力流规模减小，多为远端朵叶沉积；相对海平面降低时，碎屑物质搬运难度减小，高密度浊流和碎屑流发育，重力流规模增大，见水道沉积和水道化朵叶沉积。

### 3.2.2 沉积模式

根据鄂尔多斯盆地西缘的沉积背景，结合重力流沉积特征、组合类型和演化期次，建立了鄂尔多斯盆地西缘樱桃沟组重力流沉积模式(图 7)。

樱桃沟组沉积时期，构造活动强烈，来自鄂尔多斯古陆的碎屑物质沿斜坡向下移动，至海底开阔地形处，形成海底扇。剖面上，由下自上砂岩含量减少，向上变细变薄，泥岩含量增多，重力流能量逐渐减弱。平面上，斜坡上部重力流能量强，主要为碎屑流，发育厚层透镜状砾屑灰岩，为上扇水道沉积。斜坡中部重力流能量逐渐减弱，以高密度浊流为主，延斜坡依次发育水道化朵叶、近端朵叶和远端朵叶。斜坡下部重力流能量继续衰减，同时物源供应减少，高密度浊流向低密度浊流转变，主要发育远端朵叶。最终随着重力流能量衰减、物源供应不足，朵叶沉积被深水悬浮沉积覆盖。

## 4 油气勘探意义

随着一系列以海底扇储集层为主的油气田被发现，海底扇沉积在全球深水油气资源的勘探开发中逐渐占据关键地位(王星星等, 2025)。海底扇沉积中包括浊流沉积、碎屑流沉积和滑塌沉积等重力流沉积类型，其中浊流沉积由于通常表现出较好的物性，形成分选好、高孔、高渗的砂岩层，因而具有极高的油气勘探价值(徐长贵和范彩伟, 2021; 马佳明等, 2025)，如在巴西、墨西哥湾、西非以及中国南海等世界主要深水区，针对浊积朵叶的油气勘探均取得了重要进展(林煜等, 2014)。

奥陶系乌拉力克组是鄂尔多斯盆地西缘相对优质的主力烃源层段，主要为厚层泥页岩和泥质碳酸盐岩沉积(陆江等, 2025)，厚度为 40~140 m，整体呈南北竖向分布，南北延伸可达 600 km，分布面积约  $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，有利区约为 9000  $\text{m}^2$ (席胜利等, 2023, 2024)。目前已有多口探井获得工业油气流，其中忠平 1 井试气获日产气  $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，银探 3 井试油获日产石油 5.3 t、天然气  $1013 \text{ m}^3$ ，这些均证实了鄂尔多斯盆地西缘海相烃源岩的可靠性(陆江等, 2025)。虽然研究区樱桃

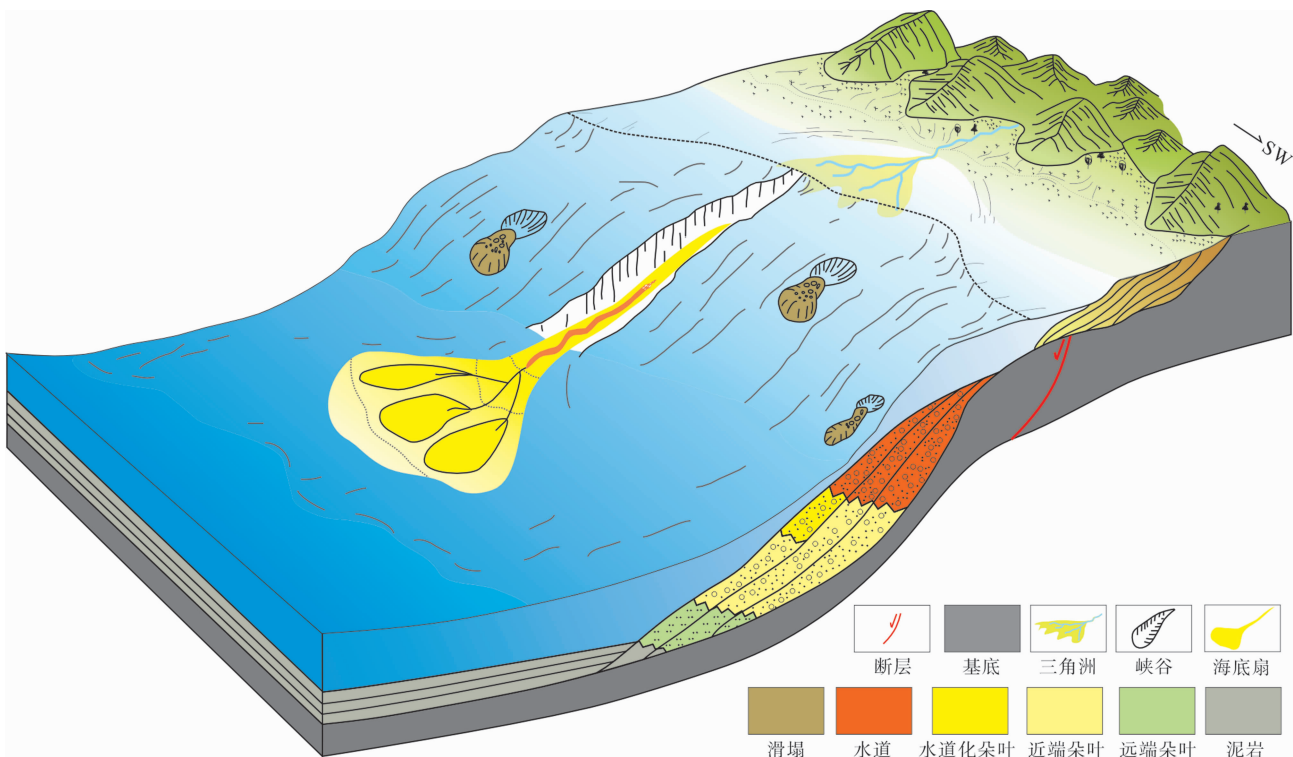


图 7 鄂尔多斯盆地西缘樱桃沟组沉积模式

Fig. 7 Sedimentary model in the Yingtaogou Formation, southwest margin of Ordos Basin

沟组已抬升至地表,但奥陶系沉积时期,鄂尔多斯西缘从东向西依次为鄂尔多斯古陆、台地、斜坡和深水盆地,重力流沉积极为发育,可能存在多个覆盖的海底扇沉积。乌拉力克组的深水悬浮沉积和海底扇沉积相互叠置可以形成良好的生储盖组合,具有较好的常规与非常规油气成藏所需的地质条件(梁积伟等,2023)。

鄂尔多斯盆地西缘高密度浊流沉积层厚为0.2~2 m,平均孔隙度为4.59%,平均渗透率为 $2.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;低密度浊流沉积层厚为0.1~0.3 m,平均孔隙度约2.75%,平均渗透率约 $2.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。高密度浊流沉积虽然平均渗透率小于低密度浊流沉积,但层厚更厚,平均孔隙度更大,因此储集性能更好。水道化朵叶和近端朵叶沉积均由高密度浊流形成,但其平均孔隙度和平均渗透率存在较大差异。前者的平均孔隙度约1.91%,平均渗透率约 $1.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。后者的平均孔隙度约6.61%,平均渗透率约 $6.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。近端朵叶储集层质量明显优于水道化朵叶。樱桃沟、胡基台等地区近端朵叶发育,累计厚度可达1771 m,与深水悬浮沉积可形成良好的生储盖组合。

## 5 结论

1) 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组发育碎屑流沉积、高密度浊流沉积、低密度浊流沉积和深水悬浮沉积4种深水沉积类型。碎屑流沉积以砾屑灰岩为主;高密度浊流沉积以含砾中砂岩及细砂岩为主,见逆-正粒序,发育似鲍马序列;低密度浊流沉积以细砂岩及粉砂岩为主,常见不完整的鲍马序列;深水悬浮沉积以泥岩为主。在此基础上识别出4种沉积微相:水道沉积主要为碎屑流沉积;水道化朵叶沉积由高密度浊流沉积相互叠置组成;近端朵叶沉积下部为高密度浊流沉积上部为低密度浊流沉积;远端朵叶沉积主要发育低密度浊流沉积。

2) 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组在垂向上根据岩性、粒度参数和鲍马序列等特征划分了5个演化阶段,由下至上依次为高海平面阶段、低海平面阶段、高海平面阶段、低海平面阶段和高海平面阶段。高海平面阶段主要发育低密度浊流和深水悬浮沉积,低海平面阶段主要发育碎屑流、高密度浊流和低密度浊流。

3) 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组近端朵

叶相较于水道化朵叶储集性能更好。虽然研究区樱桃沟组已抬升至地表,但鄂尔多斯西缘可能发育多个覆盖的海底扇,应是潜在的油气勘探开发区域。

**致谢** 感谢赵仲祥、刘娜、侯向阳、张晟及郑友怡在野外工作中的倾情帮助!感谢编辑部及评审专家仔细阅读全文并提出宝贵的修改意见!

## 参考文献 (References)

- 安太序,郑昭昌. 1990. 鄂尔多斯盆地周缘的牙形石. 北京: 科学出版社. [An T X, Zheng Z C. 1990. The Conodonts of the Marginal Areas around the Ordos Basin, North China. Beijing: Science Press]
- 陈强,张慧元,李文厚,郝松立,刘卓. 2012. 鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义. 古地理学报, 14(1): 117-124. [Chen Q, Zhang H Y, Li W H, Hao S L, Liu Z. 2012. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 14(1): 117-124]
- 陈强,李文厚,李智超,陈刚,刘溪,李蒙. 2020. 鄂尔多斯西南缘奥陶系碳酸盐重力沉积及古地理意义. 西北大学学报(自然科学版), 50(1): 113-123. [Chen Q, Li W H, Li Z C, Chen G, Liu X, Li M. 2020. Ordovician carbonate gravity deposition in the southwestern margin of Ordos and its palaeogeographical significance. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 50(1): 113-123]
- 操应长,金杰华,刘海宁,杨田,刘可禹,王艳忠,王健,梁超. 2021. 中国东部断陷湖盆深水重力流沉积及其油气地质意义. 石油勘探与开发, 48(2): 247-257. [Cao Y C, Jin J H, Liu H N, Yang T, Liu K Y, Wang Y Z, Wang J, Liang C. 2021. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in eastern China. Petroleum Exploration and Development, 48(2): 247-257]
- 冯增昭,鲍志东,康祺发,张永生,谭健,李振亚,庞福民,赵学仁. 1999. 鄂尔多斯早古生代古构造. 古地理学报, 1(2): 84-91. [Feng Z Z, Bao Z D, Kang Q F, Zhang Y S, Tan J, Li Z Y, Pang F M, Zhao X R. 1999. Palaeotectonics of Ordos in the Early Palaeozoic. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 1(2): 84-91]
- 高振中,罗顺社,何幼斌,张吉森. 1995. 鄂尔多斯西缘奥陶纪海底扇沉积体系. 石油与天然气地质, 16(2): 119-125, 203. [Gao Z Z, Luo S S, He Y B, Zhang J S. 1995. Sedimentary system of Ordovician submarine fan in the western margin of Ordos. Oil & Gas Geology, 16(2): 119-125, 203.]
- 郭彦如,赵振宇,徐旺林,史晓颖,高建荣,包洪平,刘俊榜,张延玲,张月巧. 2014. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架. 沉积学报, 32(1): 44-60. [Guo Y R, Zhao Z Y, Xu W L, Shi X Y, Gao J R, Bao H P, Liu J B, Zhang Y L, Zhang Y Q. 2014. Sequence stratigraphy of the Ordovician system in the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 32(1): 44-60]
- 何一鸣,何幼斌,李华,冯斌,姜纯伟,张显坤,姚凤南,吴吉泽. 2025

- 深水斜坡区重力流水道沉积形成机理分析: 以鄂尔多斯盆地西北缘乌海地区拉什仲组为例. 地质学报, 99(9): 3096-3112. [He Y M, He Y B, Li H, Feng B, Jiang C W, Zhang X K, Yao F N, Wu J Z. 2025. Analysis of the mechanism of gravity flow channel deposits in deep-water slope: a case study of the Lashizhong Formation in Wuhai area, northwestern margin of the Ordos Basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 99(9): 3096-3112]
- 何登发, 牛小兵, 郑娜, 刘新社, 毛丹凤, 包洪平, 邹松, 魏柳斌, 成昌宇. 2024. 鄂尔多斯盆地早古生代构造分异类型与分布特征. 地质学报, 98(12): 3601-3618. [He D F, Niu X B, Zheng N, Liu X S, Mao D F, Bao H P, Zou S, Wei L B, Cheng C Y. 2024. Tectonic differentiation and distribution of Early Paleozoic Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(12): 3601-3618]
- 黄喜峰, 钱壮志, 逯东霞, 吴文奎, 王成, 陆彦俊. 2009. 贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析. 地球学报, 30(1): 65-71. [Huang X F, Qian Z Z, Dai D X, Wu W K, Wang C, Lu Y J. 2009. Element geochemistry and depositional setting of Ordovician Miboshan Formation in central-southern Helan Mountain. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 65-71]
- 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 冯斌, 葛稳稳, 孙玉玺, 于星. 2022. 深水重力流水道一朵叶体系形成演化及储层分布: 以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例. 石油与天然气地质, 43(4): 917-928. [Li H, He Y B, Tan M T, Feng B, Ge W W, Sun Y X, Yu X. 2022. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: a case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 917-928]
- 李相博, 卫平生, 刘化清, 王菁. 2013. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式. 地质论评, 59(4): 607-614. [Li X B, Wei P S, Liu H Q, Wang J. 2013. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model. *Geological Review*, 59(4): 607-614]
- 梁积伟, 宗浩, 冯昆明, 常小斌, 李汉林, 冯振伟, 郑萌, 陈欣, 李文厚. 2023. 鄂尔多斯盆地奥陶系平凉组深水沉积特征. 古地理学报, 25(3): 554-572. [Liang J W, Zong H, Feng K M, Chang X B, Li H L, Feng Z W, Zheng M, Chen X, Li W H. 2023. Characteristics of deep water deposits of the Ordovician Pingliang Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 554-572]
- 林煜, 吴胜和, 王星, 赵晓明, 凌云, 路璐, 张佳佳. 2014. 深水浊积朵叶储层构型模式研究. 天然气地球科学, 25(8): 1197-1204. [Lin Y, Wu S H, Wang X, Zhao X M, Ling Y, Lu Y, Zhang J J. 2014. Research on reservoir architecture models of deep-water turbidite lobes. *Natural Gas Geoscience*, 25(8): 1197-1204]
- 陆江, 王健, 吴楠, 李程善, 冯子飞. 2025. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力. 岩性油气藏, 37(5): 34-48. [Lu J, Wang J, Wu N, Li C S, Feng Z F. 2025. Exploration potential of shale gas in Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(5): 34-48]
- 吕奇奇, 付金华, 罗顺社, 李士祥, 周新平, 蒲宇新, 闫红果. 2022. 坳陷湖盆重力流水道一朵叶复合体沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7段为例. 石油勘探与开发, 49(6): 1143-1156. [Lyu Q Q, Fu J H, Luo S S, Li S X, Zhou X P, Pu Y X, Yan H G. 2022. Sedimentary characteristics and model of gravity flow channel-lobe complex in a depression lake basin: a case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1143-1156]
- 马佳明, 朱定军, 周伟, 王俊轲. 2025. 深水重力流沉积研究综述. 中外能源, 30(1): 47-56. [Ma J M, Zhu D J, Zhou W, Wang J K. 2025. Review on deep-water gravity flow deposits. *Sino-Global Energy*, 30(1): 47-56]
- 裴羽, 何幼斌, 李华, 肖彬. 2015. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨. 地质论评, 61(6): 1281-1292. [Pei Y, He Y B, Li H, Xiao B. 2015. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow. *Geological Review*, 61(6): 1281-1292]
- 盛辉, 段政明, 刘善伟, 曾喆, 冯建伟. 2020. 大坡度地质露头高分辨率无人机影像采集方法与建模实践. 古地理学报, 22(4): 799-806. [Sheng H, Duan Z M, Liu S W, Zeng Z, Feng J W. 2020. High resolution UAV image acquisition method and modeling practice for geological outcrop with a large slope. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(4): 799-806]
- 谈梦婷, 李华, 何幼斌, 葛稳稳, 孙玉玺, 冯斌, 于星. 2023. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组复合水道沉积特征及演化. 古地理学报, 25(1): 119-132. [Tan M T, Li H, He Y B, Ge W W, Sun Y X, Feng B, Yu X. 2023. Characteristics and evolution of complex channel in the Ordovician Lashizhong Formation in western margin of Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(1): 119-132]
- 王振. 2023. 华北克拉通西部中一晚奥陶世深水底流沉积体系及其演化. 中国地质大学博士学位论文. [Wang Z. 2023. Middle-Late Ordovician deep-water bottom current sedimentary system and its evolution in the western North China craton. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 王振涛. 2014. 鄂尔多斯盆地基底特征及西、南缘奥陶纪构造演化及沉积响应. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Wang Z T. 2014. Basement features of the Ordos Basin and the Ordovician tectonic-sedimentary respond in western and southern margin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 景秀春. 2014. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组物源及构造背景分析. 沉积学报, 32(2): 205-217. [Wang Z T, Zhou H R, Wang X L, Jing X C. 2014. Provenance and tectonic settings analysis of Yingtaogou Formation of Middle Ordovician in Helan Mountain area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 205-217]
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 景秀春. 2015. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组深水牵引流沉积的发现及其意义. 地学前缘, 22(2): 221-231. [Wang Z T, Zhou H R, Wang X L, Jing X C. 2015. Discovery of deep-water tractive current deposits in Middle Ordovician Yingtaogou Formation, Helan Mountain area, and its significance. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 221-231]
- 王星星, 万杏, 何云龙, 孙启良. 2025. 中国南海北部底流对深水沉积体系的影响及其油气地质意义. 石油与天然气地质, 46(3): 827-845. [Wang X X, Wan X, He Y L, Sun Q L. 2025. Impact of bot-

- tom currents in the northern South China Sea on deep-water depositional systems and their petroleum geological implications. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 827-845]
- 魏泽跃. 2024. 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统米钵山组深水沉积及其油气勘探意义. 昆明理工大学硕士学位论文. [Wei Z Y. 2024. Deep-water sedimentation of the Middle Ordovician Miboshan Formation and its significance for oil and gas exploration in the western margin of the Ordos Basin. Masteral dissertation of Kunming University of Science and Technology]
- 吴胜和,冯增昭,张吉森. 1994. 鄂尔多斯地区西缘及南缘中奥陶统平凉组重力流沉积. *石油与天然气地质*, 15(3): 226-234. [Wu S H, Feng Z Z, Zhang J S. 1994. Sedimentology of gravity flow deposits of Middle Ordovician Pingliang Formation in west and south margins of Ordos. *Oil & Gas Geology*, 15(3): 226-234]
- 许强,陈洪德,赵俊兴,陈安清,苏中堂,王峰. 2010. 贺兰拗拉槽胡基台地区中奥陶统樱桃沟组深海重力流沉积特征. *海相油气地质*, 15(2): 14-19. [Xu Q, Chen H D, Zhao J X, Chen A Q, Su Z T, Wang F. 2010. The features of Middle Ordovician Yingtaogou deep-sea gravitational current deposits at Hujitai area in the Helan aulacogen, Ordos Basin. *Marine Petroleum Geology*, 15(2): 14-19]
- 徐长贵,范彩伟. 2021. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考. *中国海上油气*, 33(2): 13-25. [Xu C G, Fan C W. 2021. New exploration progress and thinking of offshore large-medium-sized oil and gas fields in the western South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 33(2): 13-25]
- 席胜利,刘新社,任军峰,刘刚,张才利,惠潇,赵伟波,王红伟,井向辉,董国栋,魏嘉怡,李涵. 2023. 鄂尔多斯盆地风险勘探领域油气成藏认识新进展与勘探潜力. *中国石油勘探*, 28(3): 34-48. [Xi S L, Liu X S, Ren J F, Liu G, Zhang C L, Hui X, Zhao W B, Wang H W, Jing X H, Dong G D, Wei J Y, Li H. 2023. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(3): 34-48]
- 席胜利,闫伟,刘新社,张才利,殷亮亮,董国栋,井向辉,魏柳斌. 2024. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 45(1): 33-51, 132. [Xi S L, Yan W, Liu X S, Zhang C L, Yin L L, Dong G D, Jing X H, Wei L B. 2024. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 33-51, 132]
- 许淑梅,冯怀伟,李三忠,李萌. 2016. 贺兰山及周边地区加里东运动研究. *岩石学报*, 32(7): 2137-2150. [Xu S M, Feng H W, Li S Z, Li M. 2016. Study on Caledonian movement in Helanshan and its surrounding area. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2137-2150]
- 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. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 88-111]
- 于洲,周进高,李程善,宋晓娇,罗超,吴兴宁,吴东旭,胡琮. 2021. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶纪克里摩里期—乌拉力克期构造—岩目古地理特征. *天然气地球科学*, 32(6): 816-825. [Yu Z, Zhou J G, Li C S, Song X J, Luo C, Wu X N, Wu D X, Hu C. 2021. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Ordovician Kelimoli and Wulalike stages in the western edge of Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(6): 816-825]
- 章诚诚,方朝刚,刘桃,吴通,邵威,廖圣兵,徐锦龙. 2024. 沉积盆地洪水异重流研究进展. *华东地质*, 45(1): 49-61. [Zhang C C, Fang C G, Liu T, Wu T, Shao W, Liao S B, Xu J L. 2024. Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary basins. *East China Geology*, 45(1): 49-61]
- 朱如凯,孟祥化,葛铭. 1994. 巴彦浩特盆地东缘中奥陶统混合型深水重力流沉积层序及其旋回. *沉积学报*, 12(2): 77-85. [Zhu R K, Meng X H, Ge M. 1994. Sedimentary sequence and cycle of Middle Ordovician mixed deep-water gravity flow in the eastern margin of Bayanhaote Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(2): 77-85]
- Amy L A, Peakall J, Talling P J. 2005a. Density and viscosity-stratified gravity currents: insights from laboratory experiments and implications for submarine flow deposits. *Sedimentary Geology*, 179(1-2): 5-29.
- Amy L A, Talling P J, Peakall J, Wynn R B, Arzola Thynne R G. 2005b. Bed geometry used to test recognition criteria of turbidites and (sandy) debrites. *Sedimentary Geology*, 179(1-2): 163-174.
- Bouma A H. 1962. *Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation*. Amsterdam/New York: Elsevier, 1-168.
- Lowe D R. 1982. Sediment-gravity flows, II: depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52(1): 279-297.
- Martín-Merino G, Fernández L P, Colmenero J R, Bahamonde J R. 2014. Mass-transport deposits in a Variscan wedge-top foreland basin (Pisuerga area, Cantabrian Zone, NW Spain). *Marine Geology*, 356(1): 71-87.
- Stow D A V, Johansson M. 2000. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 145-174.
- Shanmugam G. 1996. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? *Journal of Sedimentary Research*, 66(2): 2-10.
- Shanmugam G. 2015. The landslide problem. *Journal of Palaeogeography*, 4(2): 109-166.
- Talling P J. 2014. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings. *Marine Geology*, 352(1): 155-182.
- Talling P J, Paull C K, Piper D J W. 2013. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows. *Earth-Science Reviews*, 125(7): 244-287.
- Walker R G. 1965. The origin and significance of the internal sedimentary structures of turbidites. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 35(1): 1-32.

(责任编辑 王绍华)