

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组等深流—重力流交互作用沉积特征及形成机理

吴吉泽,李 华,何幼斌,姜纯伟,何一鸣,姚凤南,张显坤

(长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430100)

摘要:为了明确等深流与重力流交互作用下的沉积特征、形成过程及主控因素,对研究区进行了岩性、古水流和粒度分析。研究区发育6种岩相及4种沉积类型:①粉砂质泥(页)岩相,属于深水原地沉积;②块状层理砾屑灰岩相,为碎屑流沉积;③粒序层理砂岩相,为浊流沉积;④波状层理砂岩相、透镜状层理砂岩相和双向交错层理砂岩相,为等深流改造重力流沉积。改造砂沉积具有5个特征:①分选系数更好(0.63~0.70)、次棱角状—次圆状,具有多个粒度次总体;②古水流方向为NW向和NE向,沿斜坡向下的浊流方向为NW向,等深流平行斜坡运动方向为NE向;③概率累积曲线可为一段式、两段式和三段式,具重力流和牵引流沉积特征;④沉积物由底部到顶部粒度变细,为正递变层理,层内部发育冲刷面、顶部多被侵蚀;⑤沉积构造丰富多样,以波状层理、透镜状层理和双向交错层理较为典型。研究区从下至上依次发育改造砂沉积、浊流沉积、改造砂沉积和碎屑流沉积。浊流顺斜坡向NW向运动,等深流大致呈NE向平行于斜坡运动。当浊流能量强于等深流时,以浊流沉积为主;当浊流能量弱于等深流时,等深流可对原始沉积物(浊流沉积等)进行搬运、改造和再沉积,从而形成改造砂。改造砂孔隙度为7.56%,渗透率为 $2.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;浊流沉积砂孔隙度为2.42%,渗透率为 $1.74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。改造砂相比浊流沉积储集性能更好。深水原地沉积内发育较好的烃源岩,与改造砂互层沉积形成了有利于油气富集和保存的生-储-盖组合。

关键词:重力流;等深流;改造砂沉积;浊流沉积;樱桃沟组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and mechanisms of deposition under joint action of contour current and gravity flow in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

WU Jize, LI Hua, HE Youbin, JIANG Chunwei, HE Yiming, YAO Fengnan, ZHANG Xiankun

(School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Based on the analyses of lithologies, paleocurrents, and grain sizes, we investigate the characteristics, formation processes, and controlling factors of deposition under the joint action of contour current and gravity flow. The results indicate the presence of six lithofacies and corresponding four types of sedimentary origins in the study area: (1) silty mudstone (shale) facies, indicative of deep-water autochthonous deposits; (2) calcirudite facies with massive bedding, representing debris flow deposits (debrites); (3) sandstone facies with graded bedding, reflecting turbidity current deposits (turbidites); and (4) sandstone facies with wavy bedding, lenticular bedding, and bi-directional cross-bedding, corresponding to the contour current-reworked gravity flow deposits (also referred to as reworked sands). Among these sedimentary types, the reworked sands exhibit five distinct characteristics. First, the reworked sands exhibit favorable sorting coefficients ranging from 0.63 to 0.70, sub-angular to sub-rounded morphologies, and multiple grain-size subpopulations. Second, paleocurrents moved in the NW and NE directions. Specifically, the turbidity currents moved in the NW direction downward along slopes, while the contour currents moved in the NE direction parallel to slopes. Third, the cumulative probability curves of grain sizes present a pattern of one to three segments, suggesting the characteristics of gravity flow and traction current deposits. Fourth, the grain sizes of sediment decrease

收稿日期:2025-04-07;修回日期:2025-05-08。

第一作者简介:吴吉泽(2000—),男,硕士研究生,深水沉积学。E-mail: 2651144729@qq.com。

通信作者简介:李华(1984—),男,博士、教授,沉积学、深水沉积学。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42272113,42272115)。

gradually from bottom to top, forming normally graded bedding, with scour surfaces developed within layers and erosion extensively occurring at the top. Fifth, a variety of sedimentary structures are identified, typified by wavy bedding, lenticular bedding, and bi-directional cross-bedding. From the bottom up, the study area exhibits sedimentary types of reworked sands, turbidites, reworked sands, and debrites sequentially. In this area, turbidity currents moved in the NW direction northwestward along slopes, while contour currents moved northeastward roughly parallel to slopes. In the case where the turbidity currents have higher energy than the contour currents, turbidites predominate. While when they are equal in strength, the contour currents could transport, modify, and redeposit original sediment (e. g., turbidites), leading to the formation of reworked sands. The reworked sands exhibit a porosity of 7.56% and a permeability of $2.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. In contrast, the turbidites display a porosity of 2.42% and a permeability of $1.74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Therefore, the reworked sands deliver more favorable reservoir performance than the turbidites. The deep-water autochthonous deposits exhibit favorable source rocks. These deposits are interbedded with reworked sands, forming a source rock-reservoir-cap rock assemblage that facilitates hydrocarbon accumulation and preservation.

Key words: gravity flow, contour current, reworked sands, turbidites, Yingtaogou Formation, Ordovician, Ordos Basin

引用格式: 吴吉泽, 李华, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组等深流-重力流交互作用沉积特征及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1522–1535. DOI: 10.11743/ogg20250509.

WU Jize, LI Hua, HE Youbin, et al. Characteristics and mechanisms of deposition under joint action of contour current and gravity flow in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1522–1535. DOI: 10.11743/ogg20250509.

深海沉积环境中重力流(浊流和碎屑流等)、底流(等深流、内波和内潮汐等)和深水原地沉积较为常见,在陆缘沉积体系形成过程中扮演着重要角色^[1–2]。深水重力流和底流沉积的研究在古海洋、古气候^[2–3]、古地貌^[4]、地质灾害评估^[5]和油气资源勘探^[1,6]等领域具有重要的研究价值。重力流沿着陆架斜坡地带经海底峡谷及水道向下运输沉积物可形成海底扇沉积^[7–8]。等深流主要在陆隆区沿海底等深线稳定、低速流动(流速5~20 cm/s),主要由海水温度-盐度差异导致的密度差驱动,在地转偏向力的作用下沿等深线运动,其长期持续作用可形成较大规模的等深流沉积^[9–11]。研究发现,顺斜坡向下的重力流和平行海底等深线运动的等深流在时空上很有可能同时同地出现在同一个“十字路口”上,从而频繁相互作用,形成第三种作用过程——等深流和重力流交互作用沉积^[2,12–14]。而同一地区的深海沉积环境中等深流和重力流受地质营力、物源供给和相对海平面升降等影响,会发育不同的交互作用沉积类型^[9,15–16]。2008年,Mulder等^[17]将等深流和重力流交互作用沉积类型划分为:等深流沉积与浊流沉积互层,等深流改造重力流沉积以及等深流和浊流同时作用沉积。吴嘉鹏等^[15]按照某一地质时期内等深流与重力流主导沉积机制的不同,将其划分为等深流对前期重力流沉积的改造、重力流对前期等深流沉积的改造、重力流和等深流交互主导同一地区沉积以及等深流与重力流共同作用沉积。其中,等深流

改造(早期)重力流沉积(改造砂)是交互作用沉积的主要类型之一。然而,前人对深水沉积的研究大多基于地震、岩心和测井等资料,露头研究相对较少^[18–19]。而等深流改造重力流沉积相关研究成果存在研究实例较少、研究程度较低,识别标志不完善以及形成机制不明确等薄弱之处。鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统以深水沉积为主,包括深水原地沉积、重力流沉积和等深流沉积等,为研究等深流与重力流交互作用沉积提供了理想场所。本研究通过野外实测、薄片分析和粒度分析等手段,对等深流与重力流交互作用沉积特征、演化规律和形成过程进行了研究,进而建立了其沉积模式,该研究既可提升深水沉积认识,又可服务油气勘探。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是中国第二大沉积盆地,盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,横跨甘肃、宁夏、陕西、山西和内蒙古等地,盆地内部基底稳定,构造简单,蕴含丰富的石油、天然气和煤炭等矿产资源。盆地西缘地处祁连山构造带、秦岭-大别山造山带与华北板块的交接地带,由东到西依次为鄂尔多斯古陆、碳酸盐台地、碳酸盐斜坡、深水盆地和阿拉善古陆^[20],研究区位于鄂尔多斯古陆与阿拉善古陆之间(图1)。

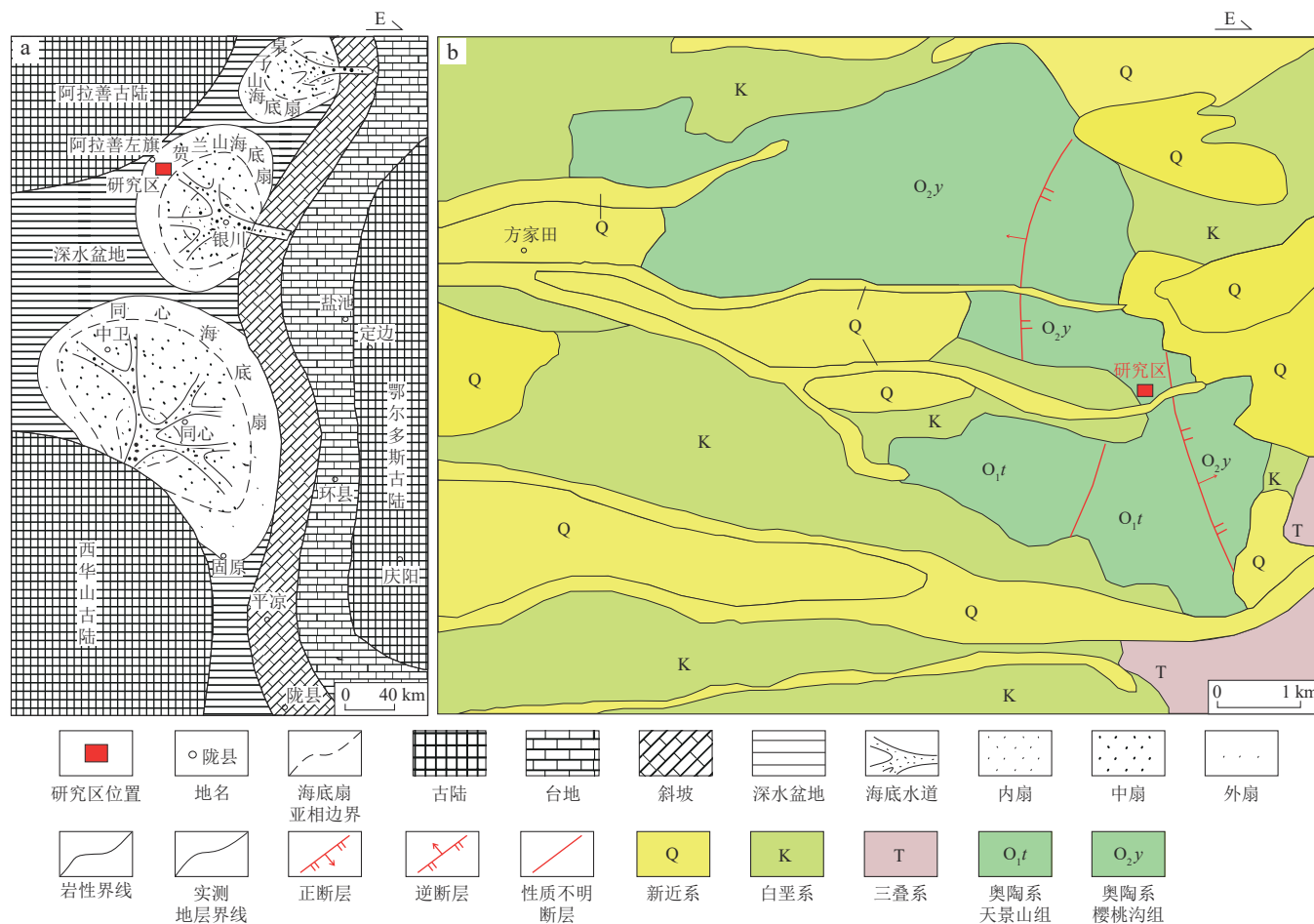


图1 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶世岩相古地理(a)及研究区地质简图(b)

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of the western margin of Ordos Basin (a) and the geological sketch map of the investigated area (b)

(底图来自 <https://geocloud.cgs.gov.cn/>, J-48-10阿拉善左旗幅1:200 000区域地质图空间数据库。)

早奥陶世治里期—亮甲山期鄂尔多斯盆地西南缘及东部发生海浸,中奥陶世马家沟期鄂尔多斯盆地整体沉降并发生海浸,晚奥陶世平凉期—背锅山期受加里东运动使鄂尔多斯盆地内部整体抬升而西南缘持续沉降,形成中部隆起与西南缘凹陷整体呈“L”形构造格局^[21-24],位于盆地西缘的樱桃沟组形成于奥陶世长期发育的斜坡—深海环境,发育大量海相沉积。1991年,郑昭昌等^[25]根据贺兰山附近地层中的三叶虫、笔石和头足类等化石的详细研究和对比,建立了樱桃沟组。盆地西缘贺兰山地区地层自下而上依次为:下岭南沟组、前中梁子组、中梁子组、樱桃沟组、山沟子组和银川组。樱桃沟组自东向西岩相及厚度变化巨大,在樱桃沟地区厚度仅141 m,其下部以薄层泥晶灰岩、砾屑灰岩与黑灰色板岩互层为主,发育丘状交错层理;上部过渡为深灰色泥岩与细粒砂岩互层夹少许不纯灰岩,向西至方家田一带,厚度陡增至1 771 m^[25-26],岩性随之变粗,主要由砂岩与泥岩不等厚互层夹砾岩、砂质灰岩及厚层块状砾屑灰岩等^[25]。

2 沉积类型及特征

研究区奥陶系樱桃沟组岩性变化不大,以灰色粉砂质泥(页)岩和灰绿色、浅棕色砂岩为主,顶部沉积一套砾屑灰岩。中、下部主要发育平行层理、交错层理、波状层理、透镜状层理、双向交错层理、槽模和沟模等,局部细粒砂岩中含有笔石,少数砂岩层底部见生物扰动构造。根据沉积特征、结构组分和古水流等资料可识别出6种岩相和4种岩相组合,分别代表4类沉积类型(表1)。

2.1 岩相特征

2.1.1 粉砂质泥(页)岩相(岩相1)

岩相1主要为薄板状灰色粉砂质泥(页)岩(图2a, b),层内无明显的沉积构造,表面风化严重,沉积厚度1~180 cm。研究区粉砂质页岩沉积较多,薄层泥

表 1 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组深水原地沉积、碎屑流沉积、浊流沉积和改造砂沉积特征对比

Table 1 Characteristics of deep-water autochthonous deposits, debrites, turbidites, and reworked sands in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

沉积类型	原地沉积	碎屑流沉积	浊流沉积	改造砂沉积
岩相	岩相 1	岩相 2	岩相 3	岩相 4、岩相 5、岩相 6
岩相组合	岩相组合一	岩相组合二	岩相组合三	岩相组合四
结构	黏土、粉砂	钙质、硅质胶结，分选、磨圆极差	石英颗粒为主，分选一般，钙质胶结为主，棱角状-次棱角状，粒径相对集中	石英颗粒为主，分选较好，钙质-硅质胶结，次棱角状-次圆状
概率累积曲线	无	无	一段式	一段式、两段式、三段式
沉积构造	水平层理	块状层理	平行层理、交错层理、变形层理、沟模和槽模	透镜状层理、波状层理、双向交错层理
生物遗迹化石	笔石	腹足类	无	笔石、生物扰动
沉积序列	无	无	正粒序、鲍马序列	正粒序，顶部和内部见侵蚀
古水流方向	无	无	NW 向	NE 向
地层产状	层状	层状、透镜状	层状	层状

(页)岩通常与岩相组合三或岩相组合四互层,在露头剖面中,薄层泥(页)岩下部发育较多,而厚层泥(页)岩一般分布在上部。该岩相缺乏明显的交错层理等沉积构造,常与砂岩岩层呈突变接触,含笔石化石^[28]。

2. 1. 2 块状层理砾屑灰岩相(岩相 2)

以灰色块状砾屑灰岩为主,砾石分选极差且磨圆度差,发育块状层理。砾石粒度为细砾至粗砾,粒径 2 ~ 20 cm。其成分为碳酸盐岩和石英岩等(图 2d)。

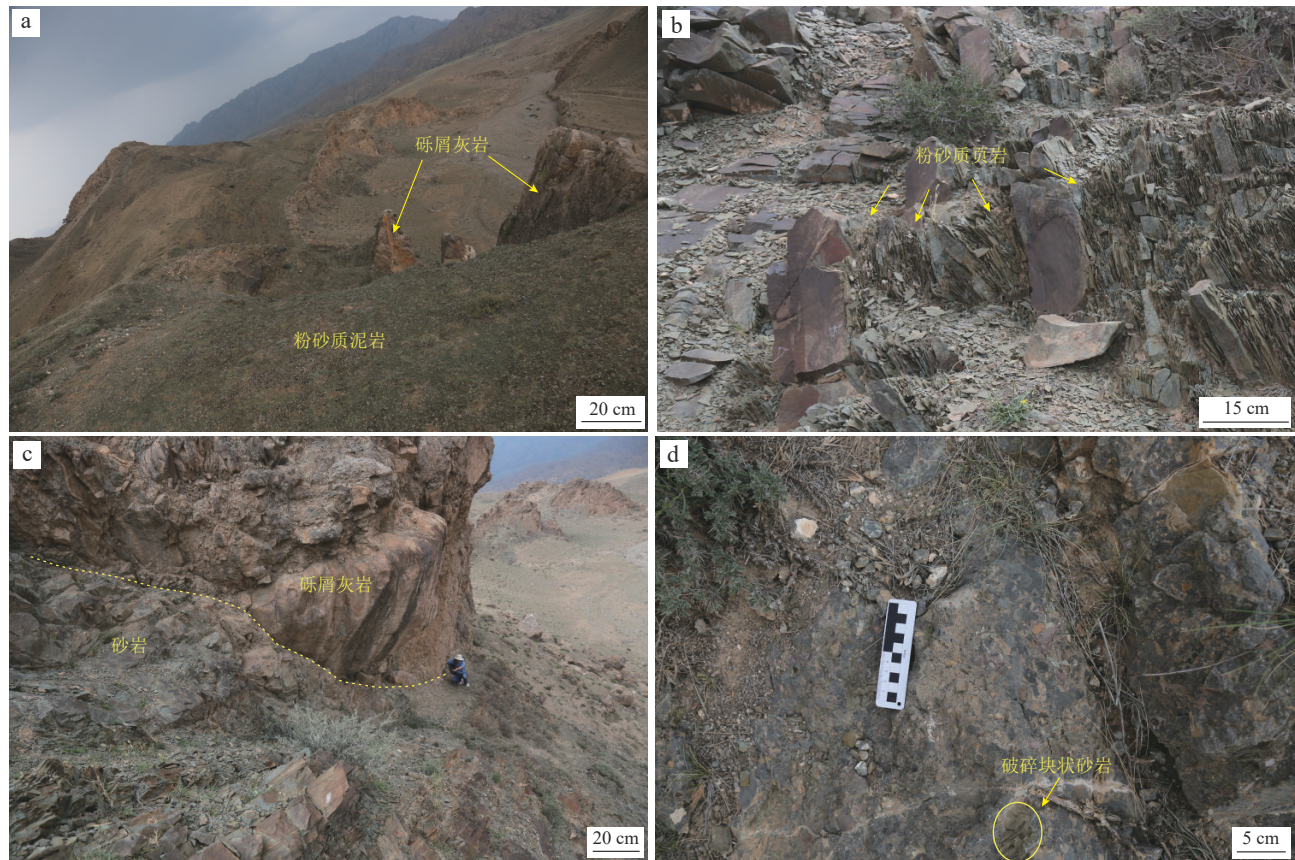


图 2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组深水原地沉积和碎屑流沉积特征(樱桃沟组剖面,野外照片)

Fig. 2 Characteristics of deep-water autochthonous deposits and debrites in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

a. 粉砂质泥岩与碎屑流沉积;b. 粉砂质页岩与砂岩互层沉积;c. 砾屑灰岩与下伏砂岩呈侵蚀接触;d. 砾屑灰岩内含破碎块状砂岩

岩层横向沿伸数百米,厚度不均,最薄的地方厚度小于1 m,最厚可达十几米,与下伏灰绿色砂岩侵蚀接触(图2c)。侵蚀面常呈槽状,最深可达1 m。部分砾屑灰岩中含有浅水环境的腹足类化石^[28-29]。岩层顶面平直,与上覆灰绿色砂岩和灰绿色粉砂质泥(页)岩突变接触(图2a)。

2.1.3 粒序层理砂岩相(岩相3)

岩相3为浅棕色中-厚层砂岩,单层厚度为0.1~0.6 m,一般为0.3 m。部分岩层底部含砾石(图3a),砾石层厚度为1~15 cm,砾石粒径2~5 mm,分选差,颗粒磨圆度多为棱角状-次棱角状,侧向分布稳定。该岩相的沉积构造丰富,常见粒序层理(图3a,b)、交错层理、平行层理(图3b)、变形构造、沟模和槽模(图3c)等,底部多呈波状。岩性呈现下粗上细的正递变序列,组成不完整的鲍马序列。古生物化石少见。颗粒成分多为石英(图3d,e),以钙质胶结为主,颗粒粒径 Φ 值为1.1~3.5,分选程度中等,颗粒磨圆度多为棱角状-次棱角状。粒度的概率累积曲线呈一段式(图3f)。交错层理指示古水流方向为NW向(图4b)。

2.1.4 波状层理砂岩相(岩相4)

该岩相主要由灰绿色粉砂岩-细砂岩构成,单层厚

度为0.1~0.3 m。波状层理发育,见交错层理和平行层理(图5a),局部砂岩底部见生物扰动构造(图5d)。波状层理由小型粉砂质交错纹层组成。整体上由多个层系构成,垂向上层系相互叠加、切割。纹层形态多样,单个层系多呈波状或条带状(图5a),纹层相对平缓,角度较低,大致平行于层面分布。层内发育较明显的小型侵蚀面,侵蚀面上、下岩性有明显变化,部分侵蚀切割纹层,“前积”纹层多发育于侵蚀面之上(图5a)。其存在两种大角度斜交的古水流方向,分别为NW向和NE向(图4a)。部分破碎的细粒砂岩中,发现笔石化石碎片(图5f)。颗粒以石英为主,多为钙质胶结,部分为硅质胶结。颗粒粒径 Φ 值分布呈现双峰特征(图5g),分选系数为0.63~0.70,颗粒磨圆度为次棱角状-次圆状(图5e)。粒度的概率累积曲线可为一段式、两段式和三段式,多为一段式及两段式(图5h)。

2.1.5 透镜状层理砂岩相(岩相5)

岩相5以灰绿色粉砂岩-中砂岩为主,透镜状层理极为发育,指示两个古水流方向(图5a,b)。其中,小型透镜状交错纹层岩性为粉砂岩,颜色浅,单层厚度0.1~0.3 m。该岩相透镜体多呈扁平状或束状,垂向上透镜体相互叠加、切割。岩层内部发育大量的小型冲刷面。与下伏岩层呈渐变接触,与上覆粉砂质页岩

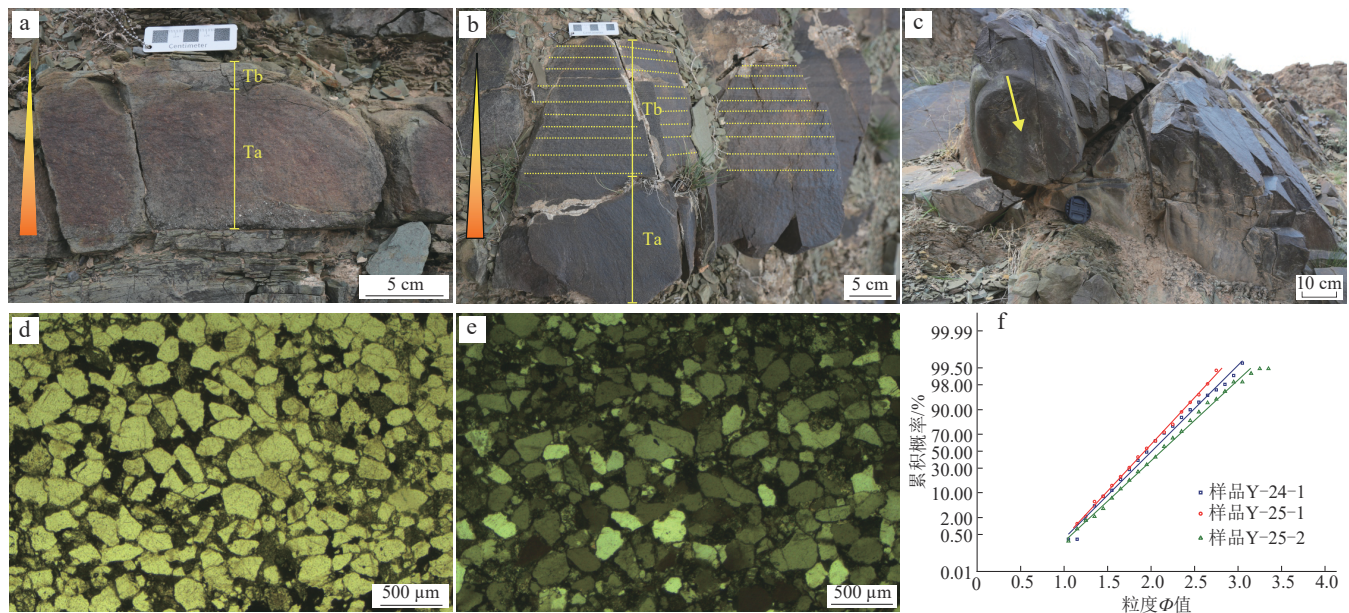


图3 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组浊流沉积特征

Fig. 3 Characteristics of turbidites in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

a. 正粒序层理砂岩,底部含砾石颗粒,樱桃沟组剖面,野外照片;b. 正粒序砂岩顶部发育平行层理,樱桃沟组剖面,野外照片;c. 底模构造,樱桃沟组剖面,野外照片;d. 中-细砂岩,分选中等,棱角状-次棱角状,样品Y-25-1,樱桃沟组剖面,单偏光,普通薄片显微照片;e. 石英颗粒为主,钙质胶结,样品Y-25-2,樱桃沟组剖面,正交光,普通薄片显微照片;f. 概率累积曲线(一段式)

(Ta为鲍马序列A段;Tb为鲍马序列B段。)

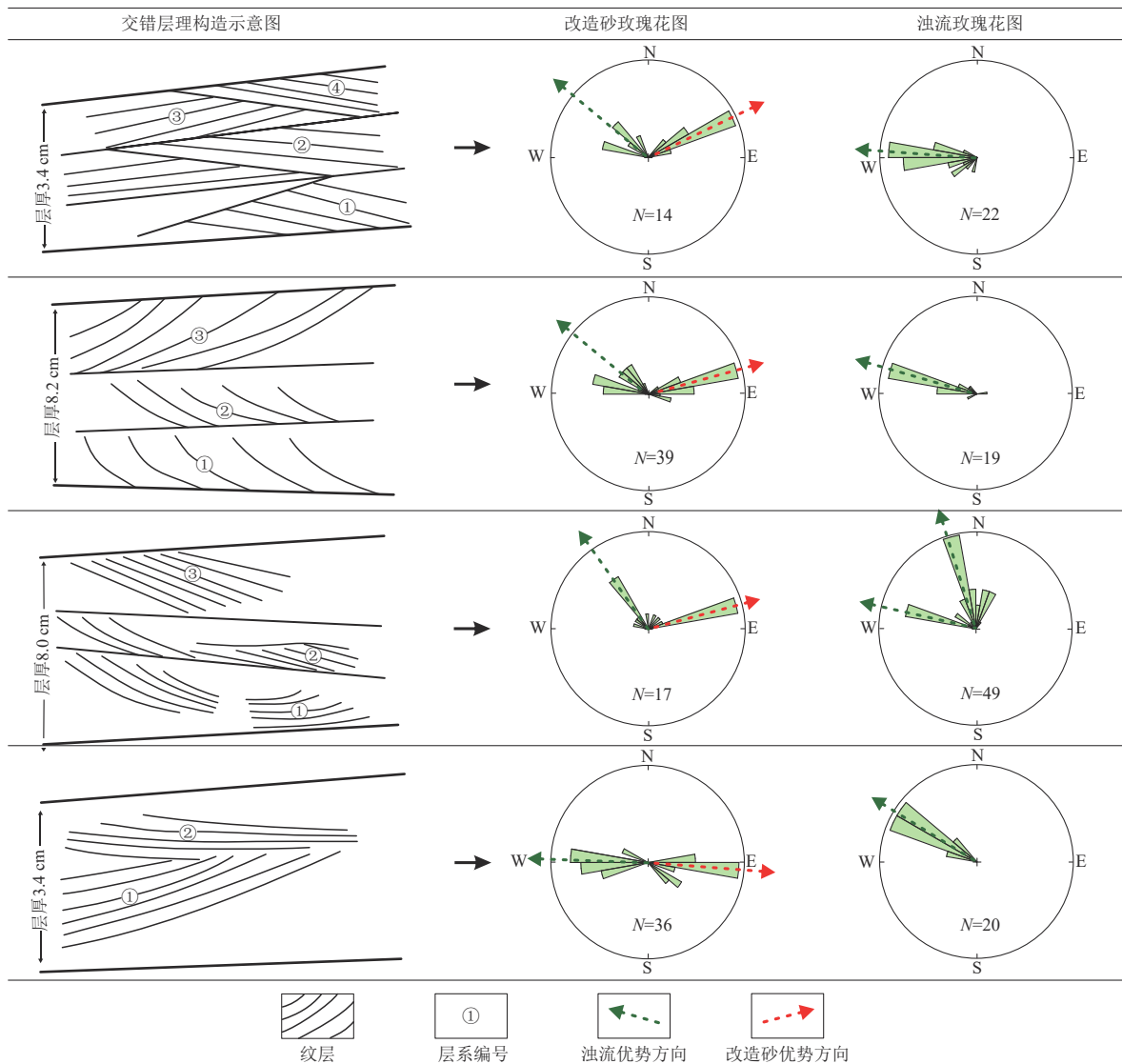


图4 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组古水流特征

Fig. 4 Paleocurrent characteristics of the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin (N为样品个数。)

呈突变接触。

2.1.6 双向交错层理砂岩相(岩相6)

该岩相由灰绿色粉砂岩-细砂岩组成,单层厚度0.1~0.2 m。双向交错层理较为发育(图5c),层系之间普遍相互切割,呈楔状、透镜状,层系厚度在0.5~3.0 cm。其具有两个古水流方向(图4a),即近W向和近E向。与岩相2和岩相3不同的是双向交错层理层系是彼此之间互相切割,而其他两种岩相中,层系之间普遍比较独立。

2.2 岩相组合

研究区识别出的6种岩相可以归为4种岩相组合,分别代表了斜坡-盆地沉积环境中发育的深水原地沉

积、碎屑流沉积、浊流沉积和等深流改造重力流沉积(改造砂)(表1)。

2.2.1 岩相组合一

发育灰色粉砂质页岩和泥岩,厚度变化范围广泛,最薄不足5 cm,最厚超过180 cm,侧向延伸稳定,部分岩层含丰富的笔石和放射虫化石^[25,28],但生物扰动构造少见。沉积构造以水平层理为主。通过岩性、颜色、生物化石和沉积特征推测岩相组合一为深水原地沉积。主要依据如下:①泥岩普遍为灰色,推测其多沉积于缺氧还原环境;②笔石反映滞留还原环境;③水平层理的发育以弱水动力的低能沉积环境为主;④泥岩沉积物多为水动力条件弱、安静水体的沉积环境下垂直降落而成。

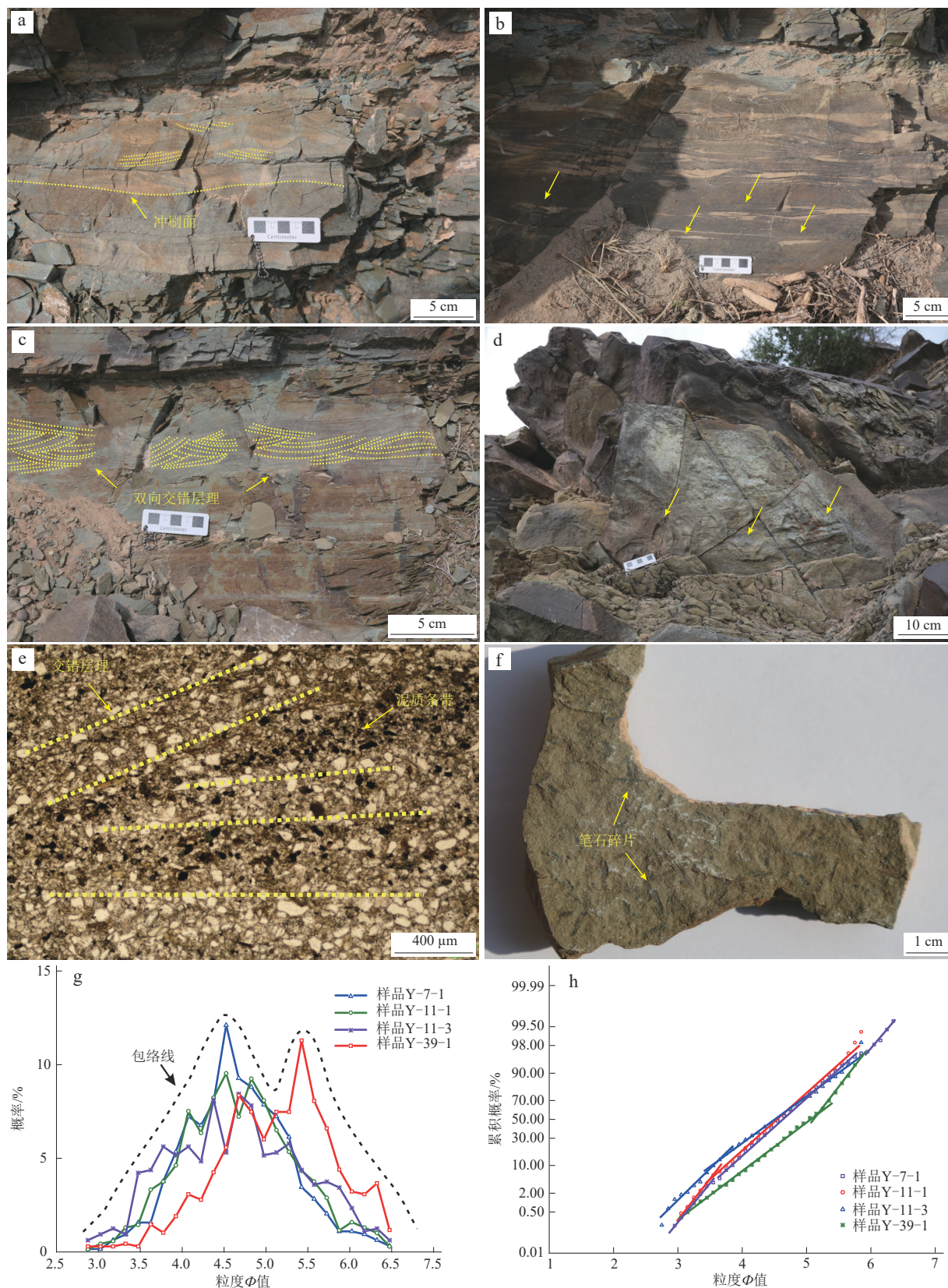


图5 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组改造砂沉积特征

Fig. 5 Characteristics of reworked sands in the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

a. 中-细砂岩,波状层理,发育冲刷面,樱桃沟组剖面,野外照片;b. 中-细砂岩,透镜状层理、波状层理,樱桃沟组剖面,野外照片;c. 中-细砂岩,双向交错层理,樱桃沟组剖面,野外照片;d. 生物扰动,砂岩底部,樱桃沟组剖面,野外照片;e. 石英颗粒为主,分选较好,次棱角状-次圆状,交错层理,含泥质条带,样品Y-39-1,樱桃沟组剖面,单偏光,普通薄片显微照片;f. 细粒砂岩含笔石化石碎片,樱桃沟组剖面;g. 颗粒粒径分布呈现双峰特征;h. 概率累积曲线为两段式

2.2.2 岩相组合二

主要由浅灰色块状砾屑灰岩组成,砾屑成分包括钙质和硅质。砾屑粒径普遍几毫米至几十厘米,粒径大小悬殊,最大可达1 m。分选极差,呈棱角状-次棱角状,无规则排列。岩层顶面平直,底面呈波状,横向厚度变化极大,整体呈层状,局部呈透镜状,对下伏岩层具有强烈的侵蚀作用,通常发育槽型侵蚀面(图2c)。岩层内部含早期沉积砂岩(图2d)。其可能为碎屑流沉积。①浅灰色砾屑灰岩及砾屑成分反映其物源可能为浅水环境;②分选磨圆极差、排列杂乱,同时对下伏岩层产生剧烈侵蚀,反映沉积时期水动力极强,多为事件性沉积形成;③砾屑成分复杂,可能为重流从浅水到深水搬运过程中边侵蚀、边沉积而成。

2.2.3 岩相组合三

由岩相3组成,可能为浊流沉积。①岩性为砂岩,以石英颗粒为主,其分选一般、多呈棱角状-次棱角状,结构成熟度较差,显示该沉积物为异地搬运,近物源快速堆积而成;②缺乏生物遗迹化石,表明沉积水体能量较高,不适宜生物生存和活动;③概率累积曲线呈一段式,粒径区间集中(0.1~0.5 mm),悬浮组分占比超过95%;④槽模、沟模、交错层理和平行层理等和岩层底部的侵蚀接触,组成不完整的鲍马序列,如Tabc, Tab和Tbc;⑤古水流方向为NW向(图4b),与区域古斜坡倾向一致^[20]。

2.2.4 岩相组合四

由岩相4、岩相5和岩相6组成。岩性以灰绿色和浅棕色的细-粉砂岩为主,界面平直或呈波状,单层厚度普遍为0.1~0.4 m,以0.2 m为主。沉积构造多样,发育双向交错层理、单向交错层理、波状层理、透镜状层理及平行层理等,个别砂岩层底部可见生物扰动构造(图5d)。以石英颗粒为主,黏土基质较多(图5e),钙质胶结常见。颗粒粒径 Φ 值为2.5~6.0,分选系数为0.63~0.70,次棱角状-次圆状。概率累积曲线可为一段式、两段式和三段式,多为一段式及两段式(图5h)。岩层垂向特征为下粗上细。岩层内单向交错层理揭示古水流方向为NE向,双向交错层理反映古水流方向则分别为NW向和NE向(图4a),整体上,岩相组合四古水流方向为NW向和NE向。该岩相可能为改造砂沉积。相较于岩相组合三,典型特征明显不同。①石英颗粒为主,粒度相对较小;②概率累积曲线以一段式和两段式为主,

反映沉积物以悬浮搬运和跳跃搬运为主,即该流体性质为重力流和牵引流;③部分波状层理、透镜状层理“前积”纹层及双向交错层理具有两个古水流方向。波状层理和透镜状层理古水流方向分别为NW向和NE向,前者大致顺斜坡向下(浊流运动方向),后者大致平行斜坡(等深流运动方向),两者大致垂直(图6);④岩层垂向上是正粒序,相较于浊流沉积,其岩层顶部和岩层内部有大量的小型侵蚀面,可能为等深流持续改造浊流沉积而成。

2.3 沉积演化

研究区自下而上可以分为4个阶段,依次为改造砂沉积、浊流沉积、改造砂沉积及碎屑流沉积阶段。

1~12层为改造砂沉积阶段(图6)。研究区露头未见底,底部发育数十厘米的浊流沉积,在此之上发育厚度约20 m的改造砂沉积。其多发育波状层理、双向交错层理、透镜状层理、单向交错层理、平行层理及生物扰动等沉积构造,以岩相组合一和岩相组合四为主。此阶段主要为等深流改造浊流沉积而成,因而其交错层理多具两个古水流方向,一个沿着斜坡向下(NW向),另一个大致平行于斜坡(NE向)。

13~38层为浊流沉积阶段,为研究区主要沉积类型。该阶段主要为岩相组合一和岩相组合三。根据岩相组合一和岩相组合三相对沉积厚度,浊流能量经历了两次由强到弱的变化过程,即13~29层和30~38层。浊流爆发初期能量强,浊流沉积厚度大,对下部岩层侵蚀严重,粒度以中-粗砂岩为主,多发育槽模和沟模等,而原地沉积厚度较小(1~20 cm)。随着浊流能量逐渐减弱,侵蚀能力减弱,沉积薄层中-细砂岩,而原地沉积相对厚度较大,约15~180 cm。

39~40层为改造砂沉积阶段,此时浊流处于末期或间歇期,沿北东向运动的等深流可以对浊流沉积物筛选、搬运、再沉积,形成改造砂沉积,发育大量波状层理和透镜状层理等,但沉积厚度相对较小。

41层为碎屑流沉积阶段,发育在研究区顶部,其砾屑大小混杂,分选极差,排列杂乱,成分复杂,对下伏地层侵蚀作用强,其可能受构造运动等影响,碎屑流由浅水向深水搬运,形成大规模碎屑流沉积(岩相2)。

3 讨论

3.1 形成过程

等深流和重力流相对能量大小是控制浊流沉积和

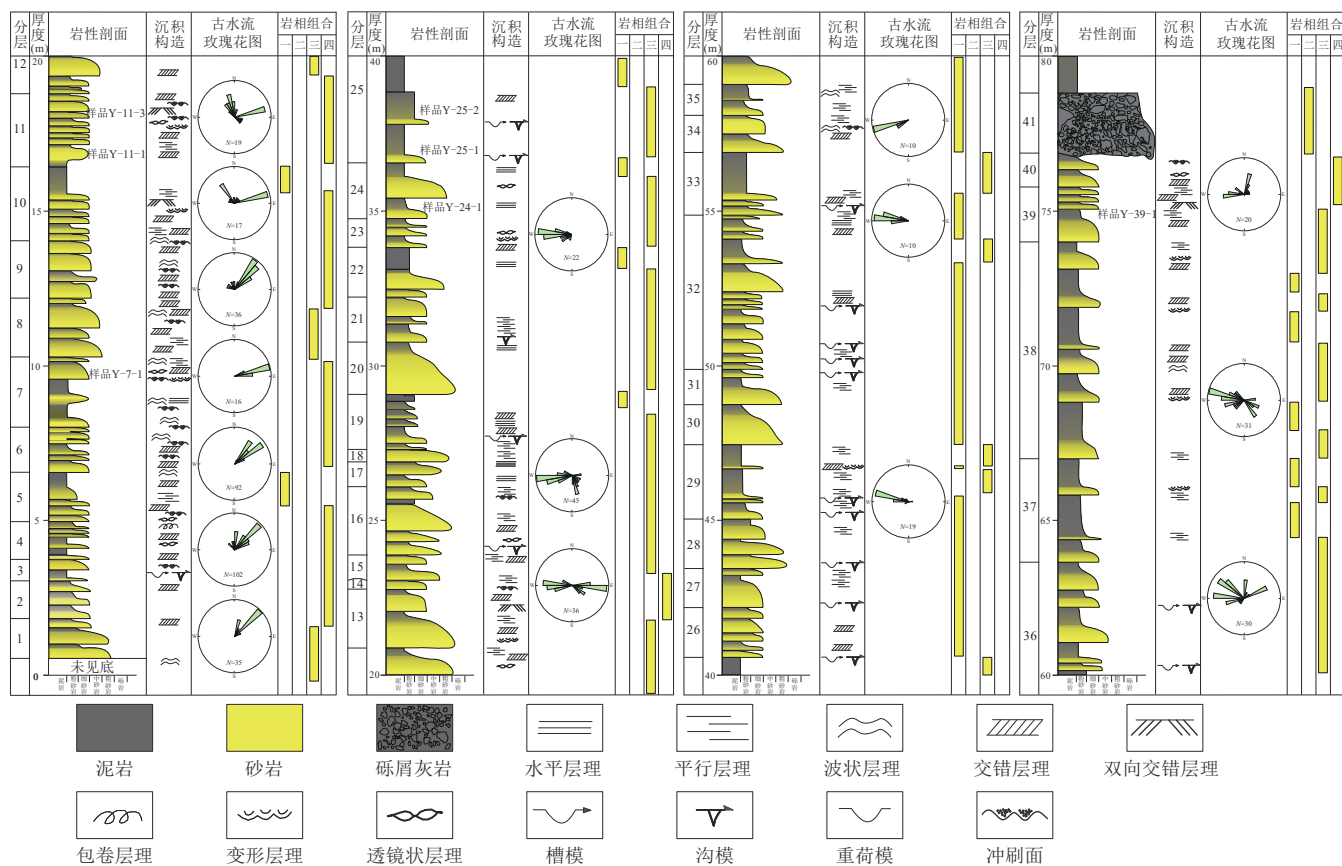


图6 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组沉积演化特征

Fig. 6 Sedimentary evolutionary characteristics of the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

改造砂沉积的直接因素。研究区的等深流-重力流交互作用沉积形成过程可分为4个阶段。

3.1.1 浊流爆发初期

浊流处于爆发初期,能量高,沿斜坡向下(NW向)运动,形成大规模的浊流沉积,以不完整的鲍马序列为主,如Tabc, Tab和Tbc等,发育平行层理、交错层理、槽模和沟模等。本阶段等深流能量远小于浊流,无法对浊流沉积产生影响,以浊流沉积为主,主要发育岩相组合三。砂岩单层厚度大,一般为20~80 cm,含砂率为40%~90%。古水流方向为NW向。颗粒粒径 Φ 值为1.1~3.5,分选中等,棱角状-次棱角状。概率累积曲线为一段式。

3.1.2 浊流爆发中、后期

能量变弱,仍可沿斜坡向下运动(NW向)形成大规模浊流沉积,主要发育鲍马序列Tc和Td段。砂岩单层厚度减薄(10~40 cm),含砂率减小为10%~80%。颗粒粒径 Φ 值为2.5~3.5,分选一般,次棱角状-次圆状。概率累积曲线一段式。此时浊流能量虽

有减弱,但依旧强于等深流能量,等深流无法影响此阶段的浊流沉积。但此时浊流粒度相对细,沉积范围广,为后续等深流改造提供了充足的物质基础和活动场所。

3.1.3 浊流处于末期或间歇期

能量极弱,向北东方向运动的等深流开始占据主导地位,对中、后期浊流沉积物长时间、持续性地簸选、改造及搬运形成改造砂沉积。此阶段主要发育岩相组合四。砂岩单层厚度为10~40 cm,含砂率为50%~90%。古水流方向具有平行斜坡的等深流运动方向(NE向)及沿斜坡向下的浊流运动方向(NW向)。碎屑颗粒相对浊流沉积(岩相3)更细(粒径 Φ 值2.5~6.0),分选较好,次棱角状-次圆状。概率累积曲线多为一段式和两段式,兼具浊流和等深流性质。

最后,受强烈构造运动的影响,碎屑流发育。本阶段碎屑流规模大、能量高,侵蚀、搬运能力强,沉积物粒度粗,变化大、分选极差。腹足类化石可能是在构造作用下,随碎屑流从浅水区向斜坡运移的过程中被异地搬运形成的。

3.2 沉积模式

中奥陶世樱桃沟组沉积时期,鄂尔多斯盆地西缘自东向西依次为鄂尔多斯古陆、开阔碳酸盐台地、缓坡型碳酸盐斜坡、深水盆地和阿拉善古陆^[20,30](图1b)。研究区倚靠斜坡地形背景,当构造运动活跃、物源供给充足时,重力流(浊流和碎屑流)携带大量碎屑物质经海底峡谷和水道等,沿斜坡向下搬运至海底形成海底扇。

此时等深流也较为活跃,自富平^[6,31]—陇县^[32]—平凉^[6,32]—银川—乌海^[33]一线,平行斜坡由南向北持续运动。当等深流进入鄂尔多斯古陆与阿拉善古陆之间的狭窄通道时^[20,28,30],等深流能量迅速增大,这使得等深流和重力流交互作用有更多可能。

基于等深流与重力流相对能量大小,将等深流与

重力流交互作用划分为3个阶段。第一阶段重力流能量强,等深流无法对其造成影响,重力流沿斜坡向下搬运至海底,此时搬运距离远、沉积范围广,形成以厚层粒序层理砂岩/块状砾屑灰岩与薄层粉砂质泥(页)岩互层的近端朵叶沉积^[34-35]。第二阶段重力流能量逐渐减小,浊流携带粒度较细的碎屑颗粒搬运至海底形成薄层粒序层理砂岩与厚层粉砂质泥(页)岩互层的远端朵叶沉积^[34],此时浊流受等深流的影响,在沉积过程中逐渐向等深流运动方向迁移,形成不对称的远端朵叶^[16,34-35]。同时也为等深流改造提供了物质基础。第三阶段浊流进入末期或间歇期,浊流不再沉积,而较高能量的等深流对前期远端朵叶的细粒沉积物进行筛选、改造和搬运等,形成以波状层理砂岩相、透镜状层理砂岩相和双向交错层理砂岩相为代表的改造砂沉积(图7)。

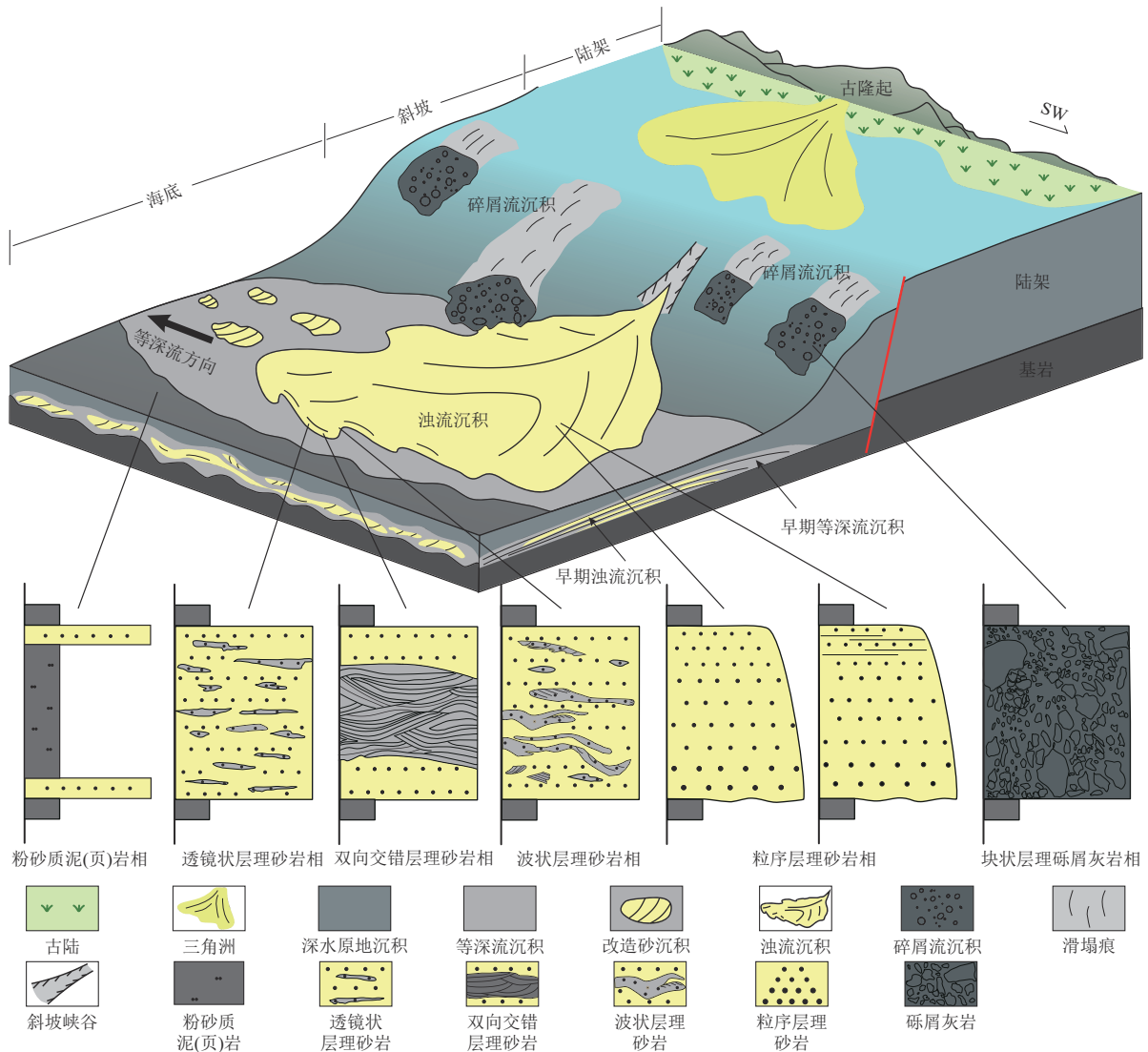


图7 鄂尔多斯西缘奥陶系樱桃沟组沉积模式示意图

Fig. 7 Sedimentary model of the Ordovician Yingtaogou Formation along the western margin of the Ordos Basin

4 油气勘探意义

浊流沉积具有较大的油气勘探潜力,是深水油气勘探的重点之一。而等深流可对浊流沉积进行淘洗、筛选、再沉积,提高其成熟度,使得等深流改造后的浊流沉积(改造砂)具有更好的储集性能。墨西哥湾尤因浅滩改造砂沉积孔隙度为25%~40%,含砂率高达80%,渗透率 $(100 \sim 1\,800) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。南海莺歌海盆地重力流砂岩孔隙度为18.8%,渗透率为 $5.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $0.9 \mu\text{m}$;而改造砂孔隙度较高(19.2%),渗透率达 $106.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $3.5 \mu\text{m}$ 。新西兰 Hikurangi 边缘的细粒等深流沉积体可能是有效的封堵层^[38]。另外,在中国海南珠江口盆地^[39]、东非莫桑比克盆地^[13]和巴西 Campos 盆地^[40]等地均发现了大规模的等深流-重力流交互作用沉积储层实例。

奥陶系樱桃沟组沉积时期,鄂尔多斯盆地西缘以海相沉积为主^[25],自富平^[6]—岐山—陇县^[32]—平凉^[6,32]—银川—乌海^[33]方向,沿斜坡运动,在此过程中形成了一系列的等深流沉积。细粒的深水原地沉积和等深流沉积可作为良好的烃源岩,如富平的粉屑及泥质等深岩^[6,31],平凉的砂屑等深岩^[6,32],桌子山的泥晶和碎屑等深岩^[6,33],盆地西缘乌拉力克组的黑色页岩。

最后,鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组是相对优质的主力烃源层段^[41]。中-晚奥陶世,鄂尔多斯盆地西缘持续性沉降,使乌拉力克组发育深水沉积,自东向西水体逐渐加深,依次发育深水斜坡、广海陆棚和盆地。其中广海陆棚位置缺氧、还原的沉积环境有利于形成富含笔石的黑色页岩^[42]。乌拉力克组东西宽50~200 km,南北长达600 km,呈南北竖向分布,整体具有“北厚南薄、西厚东薄”特征^[43],沉积厚度为40~140 m,分布面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,有利区占 $9\,000 \text{ m}^2$ ^[44-45],预测天然气资源量为 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。2019年,盆地西缘中段的ZP1井测试日产天然气量 $6.42 \times 10^4 \text{ m}^3$,获 $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 无阻流量(AOF)高产气流^[44,46]。目前已有多口评探并获得工业油气流,乌拉力克组已成为鄂尔多斯盆地重要的天然气勘探领域^[45]。乌拉力克组页岩孔隙度为1%~3%,渗透率一般为 $(0.01 \sim 0.10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,总有机碳含量(TOC)为0.25%~1.10%,最高达1.86%,干酪根类型主要为I型,少量为II型,腐泥组含量在85%以上,镜质体反射率(R_o)介于1.81%~1.95%,整体达到了有效生气阶段^[44-45,47]。

研究区改造砂沉积孔隙度为7.56%,渗透率为 $2.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含砂率25%~96%;浊流沉积孔隙度约2.42%,渗透率约 $1.74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含砂率12%~90%,改造砂相较于浊流沉积具有更好的储集性能。而樱桃沟组地处鄂尔多斯盆地西缘斜坡-深海环境,含生物遗迹化石的深水泥质沉积物和部分细粒等深流沉积大量发育,证明研究区具有一定的生烃能力,而深水泥质沉积与储集性能较好的改造砂沉积互层产出可以形成良好的生-储-盖组合。

5 结论

通过对鄂尔多斯盆地西缘奥陶系樱桃沟组进行岩性、古水流和粒度分析,系统研究了该区的岩相类型及其组合特征,剖析了等深流与重力流交互作用沉积过程,探讨了其主控因素及油气勘探潜力。

1) 研究区发育6种岩相,分别代表4种沉积类型。粉砂质泥(页)岩相指示深水原地沉积;块状层理砾屑灰岩相代表碎屑流沉积;粒序层理砂岩相反映浊流沉积;波状层理砂岩相、透镜状层理砂岩相和双向交错层理砂岩相为等深流改造浊流沉积。

2) 改造砂具有以下主要特征:①分选、磨圆度较好;②概率累积曲线可为一段式、两段式和三段式,以悬浮和跳跃搬运为主;③发育波状层理、透镜状层理和双向交错层理等;④部分岩层底部可见生物扰动构造;⑤具有两个大角度斜交的古水流方向,一个为顺斜坡向下的浊流运动方向,另一个为平行斜坡运动的等深流方向。

3) 研究区自下而上依次发育浊流沉积、改造砂沉积、浊流沉积、改造砂沉积和碎屑流沉积。浊流爆发初期,能量明显强于等深流,以浊流沉积为主,等深流沉积不发育;浊流爆发中、后期,能量减弱,但仍高于等深流,浊流沉积粒度变细,单层沉积厚度减薄,等深流沉积相对不发育;浊流沉积末期或间歇期,等深流能量强于浊流,可对早期浊流沉积侵蚀、搬运、分选和再沉积,形成改造砂。当构造运动强烈时,碎屑流由浅水搬运至深水,边侵蚀边沉积,形成不等厚砾屑灰岩。

4) 改造砂沉积比浊流沉积物性更好,深水原地沉积具有较好的生烃能力。改造砂和深水原地沉积互层可以形成良好的生-储-盖组合。

致谢:参加野外考察工作的还有老师赵仲祥,研究生侯向阳、刘娜、张晟、李纾羽、郭濛濛及本科生郑友怡,编辑及审稿专家提出了宝贵的意见和建议,在此致

以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] SHANMUGAM G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 471–491.
- [2] FUHRMANN A, KANE I A, CLARE M A, et al. Hybrid turbidite-drift channel complexes: An integrated multiscale model [J]. *Geology*, 2020, 48(6): 562–568.
- [3] KNUTZ P C. Chapter 24 palaeoceanographic significance of contourite drifts [J]. *Developments in Sedimentology*, 2008, 60: 511–535.
- [4] MOSHER D C, CAMPBELL D C, GARDNER J V, et al. The role of deep-water sedimentary processes in shaping a continental margin: The Northwest Atlantic [J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 245–259.
- [5] MIRAMONTES E, GARZIGLIA S, SULTAN N, et al. Morphological control of slope instability in contourites: A geotechnical approach [J]. *Landslides*, 2018, 15(6): 1085–1095.
- [6] 李华, 何幼斌. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组改造砂沉积特征及意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 384–397.
- LI Hua, HE Youbin. Sedimentary characteristics and significance of reworked sands in the Ordovician Pingliang Formation, southwestern margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 384–397.
- [7] READING H G, RICHARDS M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(5): 792–822.
- [8] STOW D A V, MAYALL M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125–135.
- [9] HEEZEN B C, HOLLISTER C D, RUDDIMAN W F. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents [J]. *Science*, 1966, 152(3721): 502–508.
- [10] FAUGÈRES J C, STOW D A V. Bottom-current-controlled sedimentation: A synthesis of the contourite problem [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 82(1/4): 287–297.
- [11] STOW D, SMILLIE Z. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites [J]. *Geosciences*, 2020, 10(2): 68.
- [12] GONG Chenglin, WANG Yingmin, REBESCO M, et al. How do turbidity flows interact with contour currents in unidirectionally migrating deep-water channels? [J]. *Geology*, 2018, 46(6): 551–554.
- [13] FONNESU M, PALERMO D, GALBIATI M, et al. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: The giant Eocene Coral Field in northern Mozambique [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 179–201.
- [14] MIRAMONTES E, EGGENHUISEN J T, JACINTO R S, et al. Channel-levee evolution in combined contour current-turbidity current flows from flume-tank experiments [J]. *Geology*, 2020, 48(4): 353–357.
- [15] 吴嘉鹏, 王英民, 王海荣, 等. 深水重力流与底流交互作用研究进展 [J]. *地质论评*, 2012, 58(6): 1110–1120.
- WU Jiapeng, WANG Yingmin, WANG Hairong, et al. The interaction between deep-water turbidity and bottom currents: A review [J]. *Geological Review*, 2012, 58(6): 1110–1120.
- [16] 李华, 何明薇, 邱春光, 等. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000—2022年)研究进展 [J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 18–36.
- LI Hua, HE Mingwei, QIU Chunguang, et al. Research processes on deep-water interaction between contour current and gravity flow deposits, 2000 to 2022 [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 18–36.
- [17] LIU Y, DAI S, ZHOU Y, et al. Fault characteristics and their control on oil and gas accumulation in the southwestern Ordos Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(1): 100151.
- [18] HOVIKOSKI J, UCHMAN A, WEIBEL R, et al. Upper Cretaceous bottom current deposits, north-east Greenland [J]. *Sedimentology*, 2020, 67(7): 3619–3654.
- [19] DE WEGER W, HERNÁNDEZ-MOLINA F J, MIGUEZ-SALAS O, et al. Contourite depositional system after the exit of a strait: Case study from the late Miocene South Rifian Corridor, Morocco [J]. *Sedimentology*, 2021, 68(7): 2996–3032.
- [20] 梁岳立, 赵晓明, 张喜, 等. 轨道周期约束下海-陆过渡相页岩层系高精度层序界面识别及其地质意义——以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组23亚段为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1231–1242.
- LIANG Yueli, ZHAO Xiaoming, ZHANG Xi, et al. Orbital forced high-resolution sequence boundary identification of marine-continental transitional shale and its geological significance: A case in Shan 23 sub-member at the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1231–1242.
- [21] 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(1): 85–100.
- LI Wenhui, CHEN Qiang, LI Zhichao, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2012, 14(1): 85–100.
- [22] 张春林, 邢凤存, 张月巧, 等. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 89–100.
- ZHANG Chunlin, XING Fengcun, ZHANG Yueqiao, et al. Tectonic evolution of Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts during the Early Paleozoic and its control on Cambrian lithofacies

- paleogeography in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 89–100.
- [23] 吴胜和, 冯增昭, 张吉森. 鄂尔多斯地区西缘及南缘中奥陶统平凉组重力流沉积[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(3): 226–234, 271.
- WU Shenghe, FENG Zengzhao, ZHANG Jisen. Sedimentology of gravity flow deposits of Middle Ordovician Pingliang Formation in west and South margins of Ordos[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(3): 226–234, 271.
- [24] 周雁, 付斯一, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界构造-沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 264–275.
- ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 264–275.
- [25] 郑昭昌, 李玉珍. 贺兰山奥陶系研究的新进展[J]. *现代地质*, 1991, 5(2): 119–137.
- ZHENG Zhaochang, LI Yuzhen. The new advances in the study of the Ordovician system in Hilanshan area[J]. *Geoscience*, 1991, 5(2): 119–137.
- [26] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组物源及构造背景分析[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 205–217.
- WANG Zhentao, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian, et al. Provenance and tectonic settings analysis of Yingtaogou Formation of Middle Ordovician in Helan Mountain area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 205–217.
- [27] 杨向阳. 贺兰构造带构造变形特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- YANG Xiangyang. The study of the deformation characteristic of the Helanshan Tectonic Belts [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [28] WANG Zhen, FAN Ruoying, ZONG Ruiwen, et al. Composition and spatiotemporal evolution of the mixed turbidite-contourite systems from the Middle Ordovician, in western margin of the North China Craton[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 421: 105943.
- [29] 许强, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 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[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(2): 14–19.
- XU Qiang, CHEN Hongde, ZHAO Junxing, et al. The features of Middle Ordovician Yingtaogou deep-sea gravitational current deposits at Hujitai area in the Helan aulacogen, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(2): 14–19.
- [30] 董云鹏, 李玮, 张菲菲, 等. 南北构造带北段贺兰山的形成与演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 951–968.
- DONG Yunpeng, LI Wei, ZHANG Feifei, et al. Formation and evolution of the Helan Mountain in the northern section of the North-South Tectonic Belt [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(6): 951–968.
- [31] 屈红军, 梅志超, 李文厚, 等. 陕西富平地区中奥陶统等深流沉积的特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1304–1309.
- QU Hongjun, MEI Zhichao, LI Wenhui, et al. The Middle Ordovician contour current deposits and its geological implication in Fuping region, Shaanxi Province, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1304–1309.
- [32] 何幼斌, 高振中, 罗顺社, 等. 陕西陇县地区平凉组三段发现内潮汐沉积[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(4): 28–33.
- HE Youbin, GAO Zhenzhong, LUO Shunshu, et al. Discovery of internal-tide deposits from the third member of Pingliang Formation in Longxian area, Shaanxi Province [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(4): 28–33.
- [33] 何发岐, 张威, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 276–291.
- HE Faqi, ZHANG Wei, DING Xiaoqi, et al. Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 276–291.
- [34] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-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[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 917–928.
- LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. 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[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 917–928.
- [35] 龚承林, 徐长贵, 尤丽, 等. 深海重力流与底流交互作用的沉积响应及其勘探意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(4): 721–733, 687.
- GONG Chenglin, XU Changgui, YOU Li, et al. Depositional responses of the interaction between deep-marine gravity and bottom currents and their exploration significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(4): 721–733, 687.
- [36] SHANMUGAM G, SPALDING T D, ROFHEART D H. Process sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): An example from the Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(7): 1241–1259.
- [37] 李华, 杨朝强, 周伟, 等. 莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 429–440.
- LI Hua, YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, et al. Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 429–440.

- [38] BAILEY W, MCARTHUR A, MCCAFFREY W. Sealing potential of contourite drifts in deep-water fold and thrust belts: Examples from the Hikurangi Margin, New Zealand[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104776.
- [39] GONG Chenglin, WANG Yingmin, ZHENG Rongcai, et al. Middle Miocene reworked turbidites in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin: Processes, genesis, and implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 128: 116–129.
- [40] PANDOLPHO B T, DA FONTOURA KLEIN A H, DUTRA I, et al. Seismic record of a cyclic turbidite-contourite system in the Northern Campos Basin, SE Brazil[J]. *Marine Geology*, 2021, 434: 106422.
- [41] 师良, 范柏江, 李忠厚, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段烃组分的运移分异作用[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 157–168.
- SHI Liang, FAN Bojiang, LI Zhonghou, et al. Migration differentiation of hydrocarbon components in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, central Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 157–168.
- [42] 万俊雨, 朱建辉, 姚素平, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组成烃生物及烃源岩地球生物学评价[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 393–405.
- WAN Junyu, ZHU Jianhui, YAO Suping, et al. Geobiological evaluation of hydrocarbon-generating organisms and source rocks in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 393–405.
- [43] 席胜利, 李文厚, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系乌拉力克组沉积特征及其控源作用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 1013–1022.
- XI Shengli, LI Wenhui, HUANG Zhengliang, et al. Sedimentary characteristics and controlling effect on source rocks in Wulalike Formation of Ordovician in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 1013–1022.
- [44] 席胜利, 刘新社, 任军峰, 等. 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[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 34–48.
- XI Shengli, LIU Xinshe, REN Junfeng, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 34–48.
- [45] 席胜利, 闫伟, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 33–51, 132.
- XI Shengli, YAN Wei, LIU Xinshe, et al. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 33–51, 132.
- [46] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力——以忠平1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1235–1246.
- XI Shengli, MO Wuling, LIU Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1235–1246.
- [47] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(2): 33–44.
- FU Suotang, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(2): 33–44.

(编辑 刘格云)