

文章编号: 1671-1505(2024)04-0962-10 DOI: 10.7605/gdxb.2024.04.086

鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系克里摩里组等深流沉积*

李 华¹ 何幼斌¹ 姚凤南¹ 何一鸣¹ 姜纯伟¹
张显坤¹ 吴吉泽¹ 徐艳霞¹ 梁建设²

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 中海油石油国际有限公司, 北京 100028

摘要 等深流沉积是深水沉积中的常见类型之一。古代地层记录中等深流沉积的鉴别及形成机理研究相对薄弱。在鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组发现了一种新的等深流沉积类型, 即透镜状等深流沉积。研究表明: (1) 研究区发育 4 种岩相及组合。岩相 1 为透镜状泥晶灰岩, 岩相 2 以透镜状粉晶灰岩为主, 岩相 3 为透镜状泥晶及亮晶方解石胶结砾屑-砂屑灰岩, 岩相 4 以层状砾屑灰岩最为常见。(2) 透镜状泥晶、粉晶及砾屑-砂屑灰岩相单层厚度相对较小, 波状界面, 呈透镜状, 局部见泥质纹层、条带及斑点, 粉晶方解石多呈斑块状, 整体呈细—粗—细沉积序列, 为等深流持续作用而成; 层状砾屑灰岩相中砾屑见叠瓦状构造, 局部见倒“小”字排列, 可能与风暴相关。(3) 碳氧同位素反映相对海平面及古温度具有 2 个升高—降低旋回及 1 个持续上升半旋回。(4) 研究区等深流为相对低能的温盐环流。等深流活动强度与海平面升降、盐度变化呈正相关。(5) 从下至上, 等深流活动逐渐加强, 局部存在短暂极强现象, 并可能受风暴影响。

关键词 等深流 等深流沉积 克里摩里组 奥陶系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 李华, 男, 1984 年生, 博士、副教授, 长期从事沉积学、特别是深水沉积方面的教学及科研工作。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

Contour current deposits in the Ordovician Kelimoli Formation,
northwestern margin of Ordos BasinLI Hua¹ HE Youbin¹ YAO Fengnan¹ HE Yiming¹ JIANG Chunwei¹
ZHANG Xiankun¹ WU Jize¹ XU Yanxia¹ LIANG Jianshe²

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

2 CNOOC International Limited, Beijing 100028, China

Abstract Contour current deposits are a common type of deep-water deposits. However, limited work has been done on identification and formative mechanisms of contour current deposits in the rock record. Here, a new type of contour current deposits (lenticular contour current deposits) is documented in the Ordovician Kelimoli Formation of the study area in the Ordos Basin. The results show that There are four types of lithofacies and lithofacies associations in the study area, including lenticular micrite (lithofa-

* 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: 2024-01-30 改回日期: 2024-03-22

cies 1), mainly lenticular silt-sized silt-crystalline limestone (lithofacies 2), micrite and sparry calcarenite or calcirudite (lithofacies 3), and bedded calcirudite (lithofacies 4). It is found that lenticular micrite, silt-sized silt-crystalline limestone, and calcarenite or calcirudite are present as fine-grained through coarse-grained to fine-grained facies sequences. These deposits are characterized by relatively thin bed thickness, wavy surface, lenticular geometry, and association with muddy lamina, stripe, and spot, which are attributed to the persistent effect of contour current. Silt-sized silt-crystalline limestones are usually mottled. Bedded calcirudites with imbricate structures and the inverse Chinese character of “small” are likely to be storm deposits. In addition, carbon and oxygen isotopes indicate that relative sea level and paleotemperature show two rising to falling cycles and a continuously-rising half cycle. It is also found that the contour current in the study area are low energy thermohaline circulation and that the strength of the contour current is positively correlated with eustatic sea level and salinity change. Finally, the energy of the contour current increases gradually upsection with occasional transient extremes, which might be also effected by storms in the Kelimoli stage.

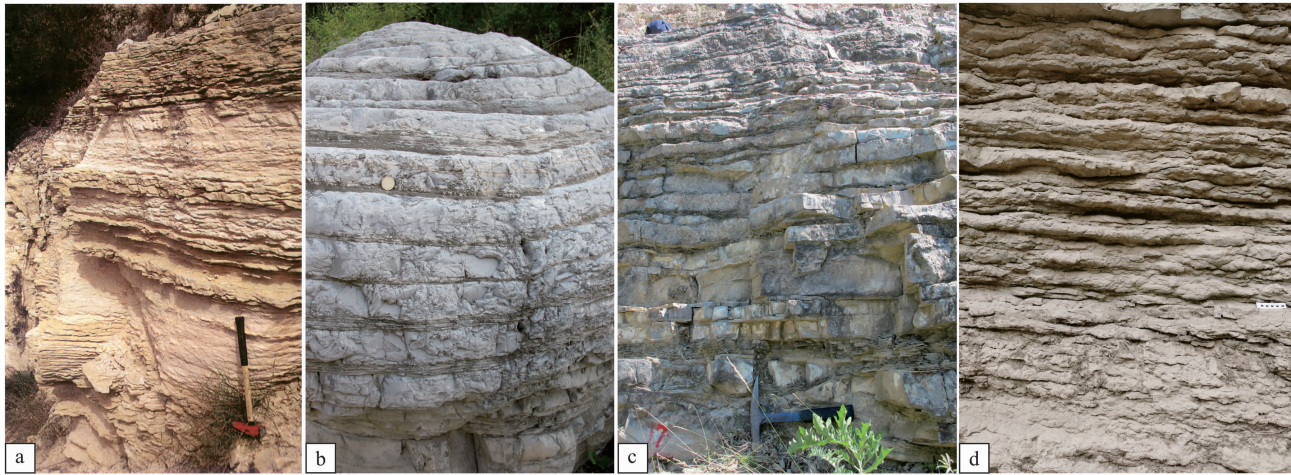
Key words contour current, contour current deposit, Kelimoli Formation, Ordovician, Ordos Basin

About the first author LI Hua, born in 1984, Ph.D., an associate professor, is engaged in teaching and research on sedimentology and deepwater deposits. E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn.

等深流沉积是深水异地沉积的主要类型之一，蕴含了丰富的地质信息。中国等深流沉积在震旦系、寒武系、奥陶系、泥盆系、三叠系等地层中皆有发育（李华和何幼斌，2017）。与现代等深流沉积研究相比，古代等深流沉积研究成果相对较少，主要原因之一是古代地层记录中等深流沉积鉴别受诸多因素影响（如出露面积小、沉积构造数量少、规模小，甚至缺乏等），导致野外有效鉴别难度大（李华和何幼斌，2017；李华等，2023）。古代地层记录中等深流沉积的重要鉴别标志除岩石结构、古水流、生物扰动、沉积序列之外等，还有一个较为重要的特征为透镜状，界面多为波状，其以塞浦路斯渐新统等深流沉积最为“典型”（图 1-a）（Stow *et al.*, 2002; Rebesco *et al.*, 2014）。与透镜状等深流沉积相比，中国等深流沉积存在 2 个特点：（1）多为层状，底部界面较为平直，仅在内部见波状纹层；（2）仅在局部地层（只有几层，且数量少、规模小）见透镜状（图 1-b 至 1-d）（罗顺社等，2015；李华等，2016，2018，2023；李华和何幼斌，2017；李向东等，2017；Wang *et al.*, 2022）。另外，在鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系发育的粗粒等深流沉积存在争议，部分国外研究人员认为可能为重力流成因（Li *et al.*, 2017, 2018, 2020）。上述问题阻碍了中国古代地层记录中等深流沉积研究的步伐。

鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系克里摩里组等深流沉积较为发育，前人通过野外、地球化学及磁组构等对乌海地区等深流沉积岩性、结构、古水流及垂向演化等进行了研究，认为研究区等深流沉积证据包括发育牵引流沉积构造、古水流方向平行斜坡、常见细—粗—细沉积序列、层内见渐变、突变界面及侵蚀面等（李向东等，2017；Wang *et al.*, 2022）。作者团队也分别在 2011、2017、2022 及 2023 年对内蒙古乌海石峡谷地区深水沉积进行了研究。因研究区克里摩里组以薄层泥晶灰岩为主，岩层界面多平直，仅在地层内部见波状纹层，未见“典型”的透镜状，指向性沉积构造较为缺乏，而细—粗—细沉积序列非等深流沉积所独有，深水原地沉积与泥晶等深流沉积难以有效区分等原因，未公开发表相关研究成果。

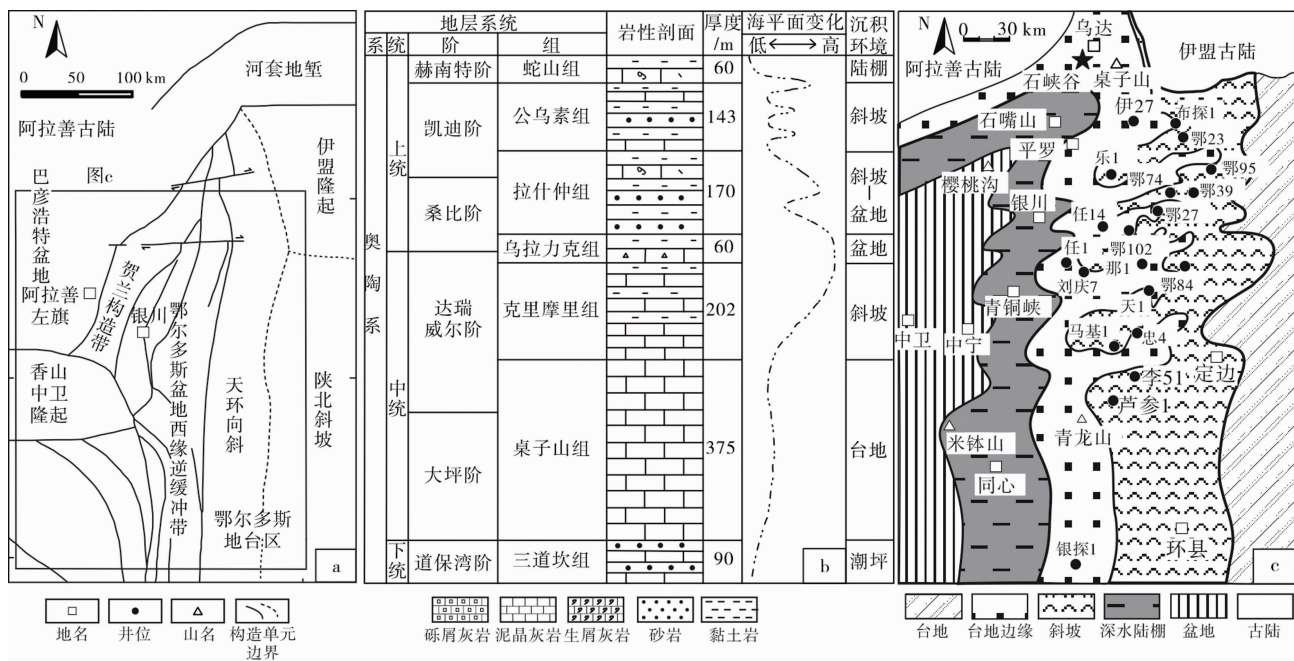
值得庆幸的是，2023 年 9 月，团队在乌海石峡谷地区进一步开展奥陶系深水沉积时，因水库管道维修，在水库内原淹没的克里摩里组发现了大规模的透镜状等深流沉积。该类型的等深流沉积研究具有 2 个方面的重要意义：（1）增加国内等深流沉积类型及实例，促进中国等深流沉积研究成果推广；（2）鄂尔多斯盆地西缘及南缘中晚奥陶世的透镜状等深流沉积的发现与证实，可为同时期等深流沉积的存在提供证据，这将有助于鄂尔多斯盆地古环境、古海洋的研究。



a—塞浦路斯 (Stow *et al.*, 2002; Rebesco *et al.*, 2014); b—陕西富平 (李华等, 2016);
c—甘肃平凉 (李华等, 2016); d—鄂尔多斯盆地西北缘

图 1 等深流沉积特征

Fig. 1 Characteristic of contour current deposits



a—构造位置(王振涛等, 2016); b—地层特征 (李向东等, 2023); c—克里摩里组沉积期岩相古地理 (据于州等, 2021; 有修改)

图 2 鄂尔多斯盆地西北缘位置、地层及沉积环境

Fig. 2 Location, strata and sedimentary environment of northwestern margin of Ordos Basin

1 地质概况

石峡谷位于内蒙古乌海市西北侧, 与乌海市直线距离约 7 km。构造位置处于鄂尔多斯盆地西缘华北地块西部, 属于华北克拉通。研究区西北部为阿拉善古陆, 东北部为伊盟隆起, 东部为天环向斜及鄂尔多斯盆地西缘逆缓冲带, 西南部发育弧形构造(图 2-a)(王振涛等, 2016; 于州等, 2021; 李

向东等, 2023)。中晚奥陶世, 北部阿拉善及伊盟古陆持续剥蚀, 西部发育深水沉积。

乌海地区奥陶系从下至上发育三道坎组、桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组及蛇山组。三道坎组和桌子山组以灰白色云质灰岩为主, 为潮坪及台地沉积。克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组和公乌素组多为薄层灰岩及碎屑

岩，整体为深水斜坡—盆地沉积。蛇山组发育浅水生屑灰岩，沉积环境为浅海陆棚(图 2-b)(李向东等, 2023)。石峡谷剖面发育桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组及拉什仲组。克里摩里组沉积时期，鄂尔多斯盆地西缘由东向西依次发育开阔台地、台地边缘、斜坡、深水陆棚及盆地(图 2-c)(于州等, 2021)。

2 资料与方法

本研究对石峡谷水库底部剖面进行了详细测量、记录。以沉积旋回为单元进行分层，并进行了系统取样。室内进行了资料整理，进一步分析沉积环境及沉积相演化。

本次研究共制作薄片 9 块。通过镜下观察，对岩石的成分、结构、构造等进行深入分析，结合大薄片的典型沉积现象，综合研究深水沉积特征。对 11 个样品做了 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 测试。样品以沉积旋回为单位，对重点岩相进行密集取样，其中，

泥晶灰岩 9 个样品，粉晶灰岩 2 个样品。室外选取岩性较纯、少有方解石脉及风化程度极低的样品。室内首先将样品无污染粉碎至 200 目并干燥，随后送至中国核工业地质研究院分析测试研究中心。测试仪器型号为 MAT253；测试方法和依据为 DZ/T0184.17—1997。充分利用 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 指标，研究剖面垂向上相对海平面升降和古温度变化。

3 结果

3.1 剖面特征

石峡谷水库底部露头出露良好，地层大致平行地表，因上部地层为陡崖，仅对下部进行了实测。剖面顶部及底部以砾屑灰岩为界，共划分了 13 层(图 3)。研究区克里摩里组岩性以深灰色透镜状泥晶灰岩为主。第 0 层及 12 层发育层状砾屑灰岩，单层厚度 8~25 cm。第 1、3、4、5 层中部见粉晶灰岩，第 5 层中部发育亮晶砾屑-砂屑灰岩。灰岩中见放射虫、海绵骨针、三叶虫碎片等生物碎屑。

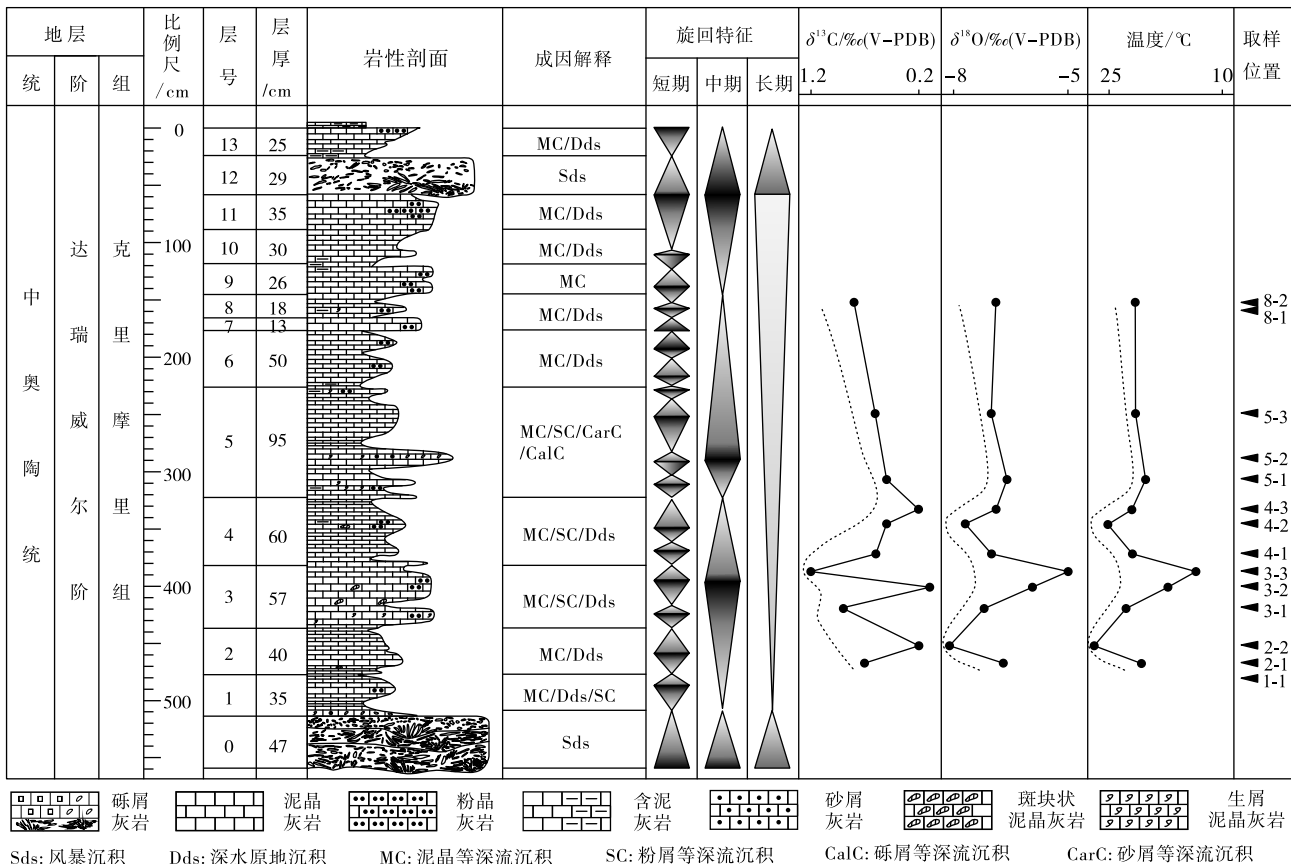
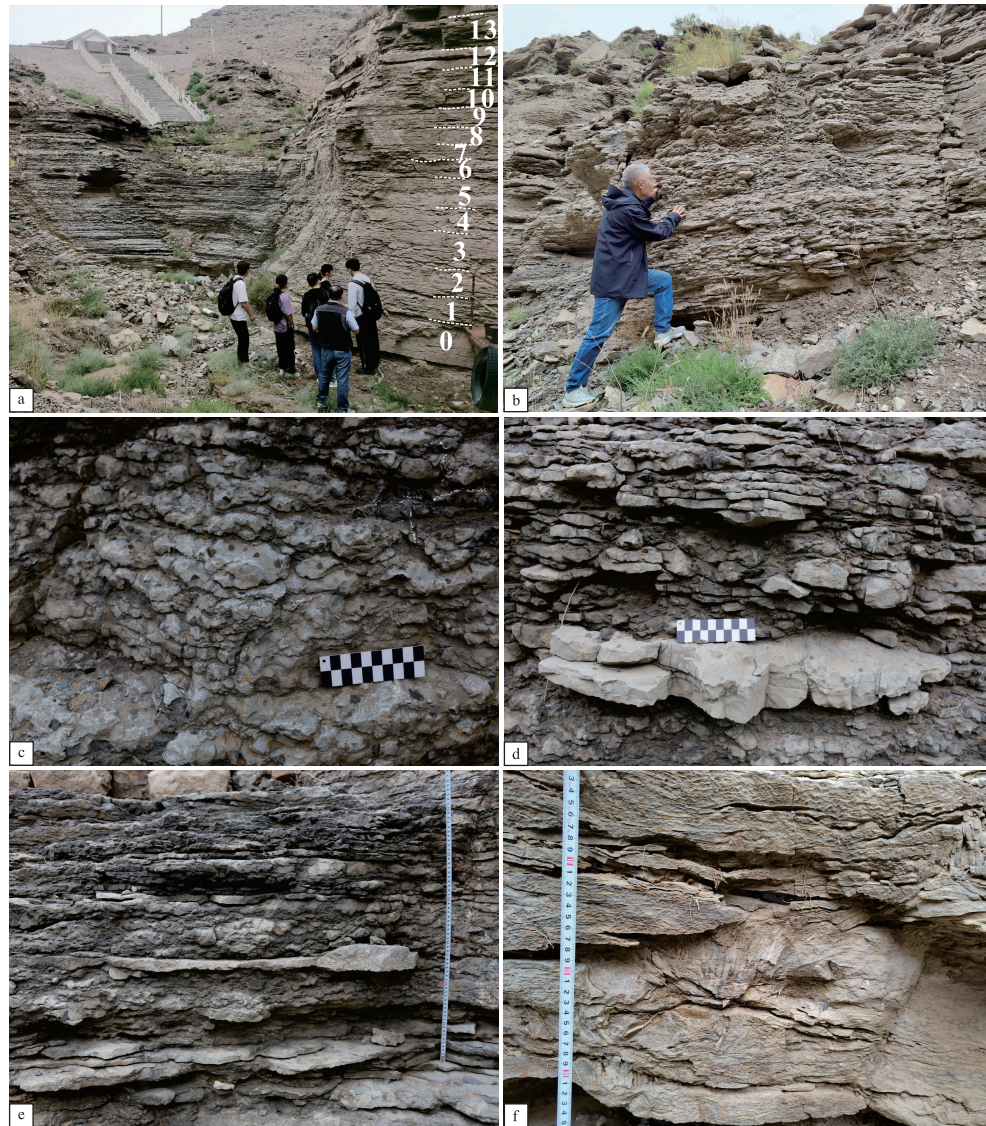


图 3 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the Kelimoli Formation in northwestern margin of Ordos Basin



a—内蒙古乌海石峡谷水库底部剖面全景；b—等深流沉积；c—泥晶、粉晶灰岩，下部、上部为泥晶灰岩，中部为粉晶灰岩，透镜状，第2层；d—泥晶、粉晶、砂屑—砾屑灰岩，下部及上部为泥晶、粉晶灰岩，中部透镜状砾屑—砂屑灰岩，透镜状，第1层；e—泥晶、粉晶、亮晶砂屑—砾屑灰岩，下部、上部为泥晶、粉晶灰岩，中部为亮晶胶结砂屑—砾屑灰岩，透镜状，第5层；f—层状砾屑灰岩，底部侵蚀面，砾屑呈倒“小”字排列，第0层

图 4 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组等深流沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of contour current deposits in the Kelimoli Formation in northwestern margin of Ordos Basin

各层大致呈细—粗—细沉积序列。

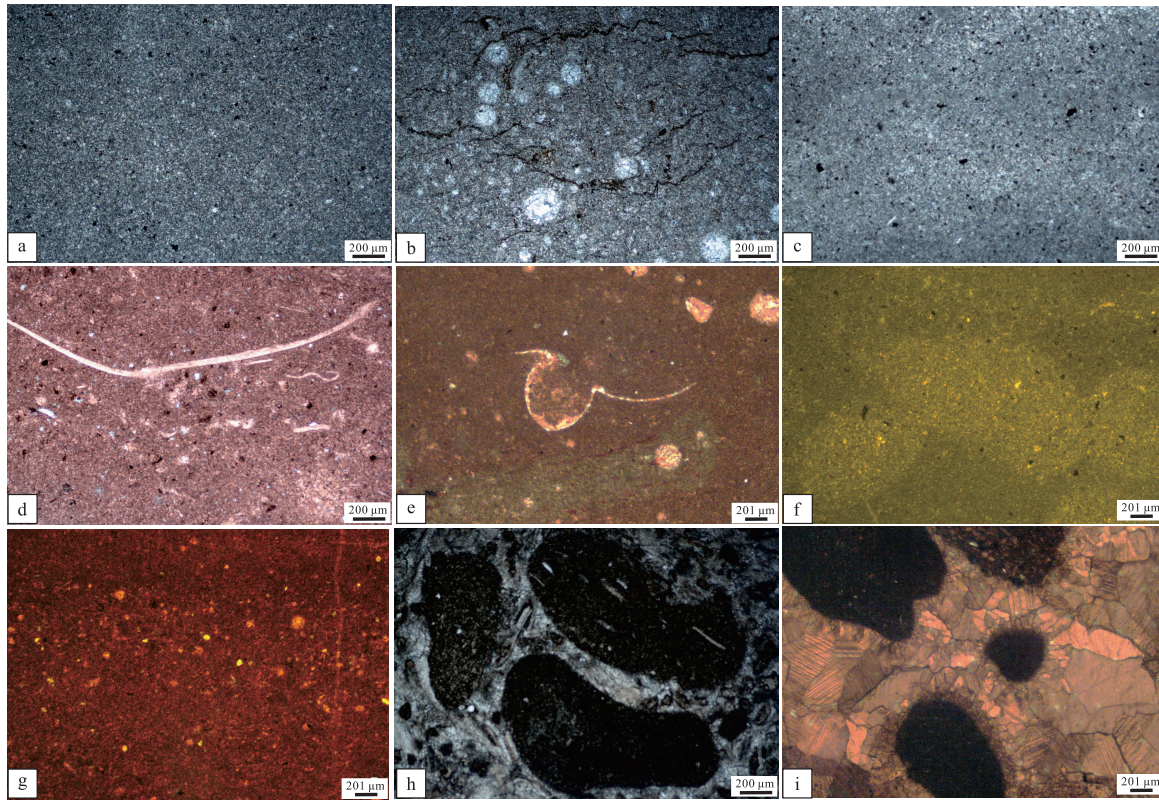
3.2 岩相类型及特征

根据剖面岩性及组合特征，认为石峡谷水库发育透镜状泥晶灰岩、透镜状粉晶灰岩、透镜状砾屑—砂屑灰岩及层状砾屑灰岩 4 种岩相。

1) 岩相 1：透镜状泥晶灰岩。本岩相以深灰色泥晶灰岩为主，局部见泥质纹层、条带及团块（图 4-a 至 4-c）。薄层泥晶灰岩单层厚度 1~5 cm，

界面多为波状，整体呈透镜状，见放射虫、海绵骨针、三叶虫碎片等生屑，生屑大致具有顺层分布特征（图 5-a 至 5-c）。 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 0.2‰~1.2‰之间，平均值为 0.56‰。 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 -8.1‰，最大值为 -5‰，平均值为 -6.66‰（表 1）。

2) 岩相 2：透镜状粉晶灰岩。透镜状深灰色粉晶灰岩单层厚度相对岩相 1 较大，一般为 4~8 cm，与泥晶灰岩伴生，见泥质纹层及条带（图 4-c），见生物碎屑。波状界面明显，呈透镜



a-c—泥晶灰岩，局部见斑块状粉晶方解石，b中见放射虫，样品 2-1；d-e—生物碎屑，三叶虫，介壳，d 样品 5-1，e 样品 3-1；f—泥晶—粉晶灰岩，粉晶呈斑块状，样品 4-2；g—泥晶—粉晶灰岩，细—粗—细，样品 3-1；h—砾屑灰岩，泥晶方解石胶结，生物碎屑，样品 1-1；i—亮晶方解石胶结砾屑—砂屑灰岩，世代胶结，样品 5-2。a-i 为正交光。样品位置见图 3

图 5 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组等深流沉积镜下特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of contour current deposits in the Kelimoli Formation in northwestern margin of Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组碳氧同位素测试结果及古温度特征

Table 1 Carbon and oxygen isotopes and paleotemperature in the Kelimoli Formation in northwestern margin of Ordos Basin

岩相	层号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (V-PDB)	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ (V-PDB)	古温度 /°C
岩相1: 透镜状泥晶灰岩	2	0.7	-6.7	21
	2	0.2	-8.1	27
	3	1.2	-5	13
	4	0.2	-6.9	22
	5	0.5	-6.6	20
	最大值	1.2	-5	27
最小值	0.2	-8.1	13	
平均值	0.56	-6.66	20.6	
岩相2: 透镜状粉晶灰岩	3	0.9	-7.2	23
	3	0.1	-5.9	17
	4	0.6	-7	22
	4	0.5	-7.7	25
	5	0.6	-7	22
	8	0.8	-6.9	22
	最大值	0.9	-5.9	25
最小值	0.1	-7.7	17	
平均值	0.58	-6.95	21.8	

状。显微镜下粉晶方解石多呈斑块状及层状(图 5-d 至 5-f)。相邻 2 条泥质条带之间见细晶—粉晶—细晶的双向递变沉积序列(图 5-g)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $0.1\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$ 之间，平均值为 0.58‰ 。 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-7.7\text{‰} \sim -5.9\text{‰}$ 之间，平均值为 -6.95‰ (表 1)。

3) 岩相 3: 透镜状砾屑—砂屑灰岩。透镜状砾屑—砂屑灰岩主要在第 1 层底部(图 4-d) 及第 5 层中部(图 4-e)。颜色相对较浅，多为深灰—灰色，单层厚度约 $5 \sim 10 \text{ cm}$ ，波状界面，透镜状。三叶虫、海绵骨针、放射虫等生物碎屑较为常见，大致顺层分布。不同的是，第 1 层为泥晶方解石胶结(图 5-h)，而第 5 层胶结物以亮晶方解石为主，具有明显的世代胶结特征(图 5-i)。

4) 岩相 4: 层状砾屑灰岩。层状砾屑灰岩在第 0 层及 13 层发育。颜色为灰色，单层厚度 $10 \sim 20 \text{ cm}$ ，底部界面多平直，局部侵蚀下凹。砾屑分选极差，杂乱分布，常见叠瓦状构造及倒“小”字排列(图 4-f)。

3.3 岩相组合及成因分析

根据研究区岩相类型及特征，垂向序列变化及组合，将岩相组合划分为了岩相 1 和 2 组合（泥晶—粉晶—泥晶灰岩相）、岩相 1、2、3 组合（泥晶—粉晶—泥晶砂—砾屑—粉晶—泥晶灰岩相）、岩相 1、2、3 组合（泥晶—粉晶—亮晶砂—砾屑—粉晶—泥晶灰岩相）及岩相 4（层状砾屑灰岩相）4 类。其沉积特征及成因如下。

3.3.1 岩相组合 1（岩相 1 及岩相 2）

本岩相组合在研究区最为常见。岩性为深灰色薄层泥晶灰岩及粉晶灰岩(图 6)。从下至上大致为泥晶灰岩、粉晶灰岩、泥晶灰岩。底部泥晶灰岩层薄，界面相对平直，向上界面逐渐呈波状，透镜状逐渐明显，单层厚度略具增加趋势。上部泥晶灰岩

层厚、界面变化与下部大致相反。中部粉晶灰岩单层厚度比下部及上部泥晶灰岩大，顶底界面为波状，侧向连续性差，呈透镜状，透镜体相互叠置，断续呈层状分布。该岩相组合整体构成细—粗—细沉积序列，厚度几十厘米到数米，其可能为相对低能等深流作用而形成。其中，底部及顶部薄层泥晶灰岩可能为低能等深流及深水原地沉积，野外及显微镜下不能有效区分。

3.3.2 岩相组合 2（岩相 1、岩相 2 及岩相 3）

该岩相组合在第 1 层发育。从下至上依次发育泥晶灰岩、粉晶灰岩、泥晶砂—砾屑灰岩、粉晶灰岩及泥晶灰岩(图 7)。下部泥晶及粉晶灰岩与岩相组合 1 类似，具有层薄、波状界面、透镜状特征。中部砂屑—砾屑灰岩单层厚度较小（6 cm），呈透镜状，局部见泥质条带及粉晶方解石。粉晶方解石

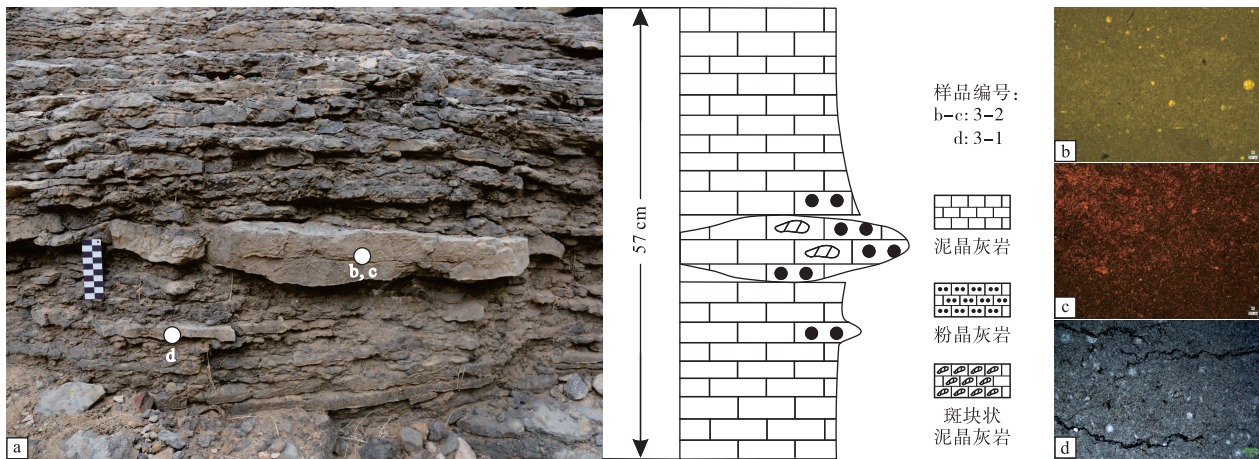


图 6 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组泥晶—粉晶等深流沉积特征

Fig. 6 Characteristics of micrite and silt contour current deposits in the Kelimoli Formation in northwestern margin of Ordos Basin

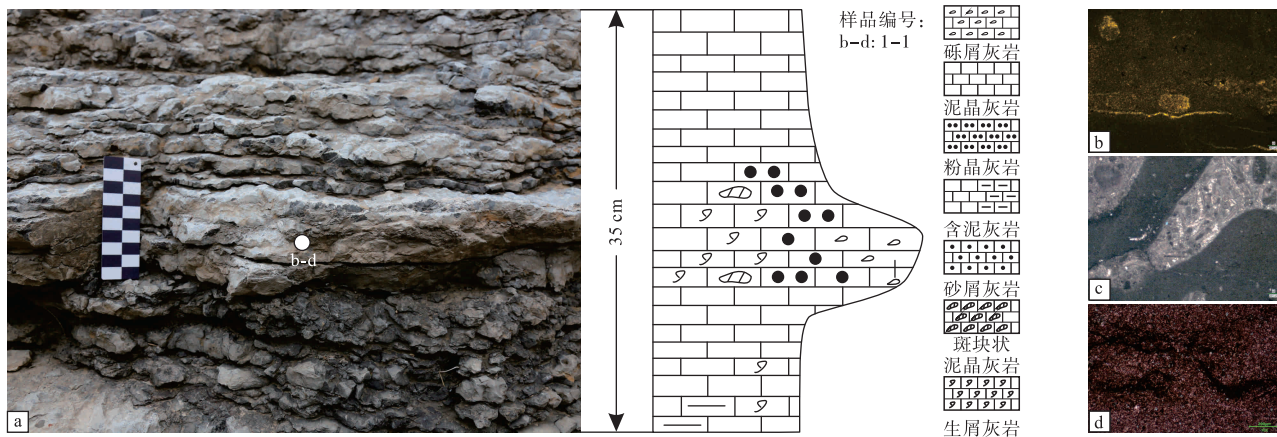


图 7 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组泥晶—粉晶—泥晶砂—砾屑等深流沉积

Fig. 7 Characteristics of micrite-silt-micrite calcarenite to calcirudite contour current deposits in northwestern margin of Ordos Basin

综上所述, 研究区在克里摩里组沉积时期, 等深流较为活跃, 但等深流能量整体相对较弱 (以泥晶及粉晶等深流沉积为主), 存在局部等深流能量急剧增强情况 (泥晶及亮晶砾屑-砂屑等深流沉积)。同时, 等深流持续作用过程中, 还可能伴随有风暴等事件作用。

4 讨论

基于岩相及组合、 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 分析, 认为研究区等深流沉积受控于相对海平面升降、等深流能量变化、温度高低等。

4.1 相对海平面

$\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 可以较好地反映相对海平面升降。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 的含量与相对海平面升降具有明显的正相关性, $\delta^{18}\text{O}$ 含量与相对海平面升降负相关 (Scholle *et al.*, 1980; 李华等, 2018)。

研究区 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值为1.2‰, 最小值为0.1‰, 平均为0.63‰。 $\delta^{18}\text{O}$ 为-8.1‰~-5‰, 平均为-6.8‰。从下至上, $\delta^{13}\text{C}$ 从第2层至第3层逐渐增大, 到第3层上部达到最大, 第4层降低, 从第5层开始逐渐增大, 总体可分为1个先增大后减小旋回 (第2-4层) 和1个上升半旋回 (第5-6层)。 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征与 $\delta^{13}\text{C}$ 较为类似, 第2-3层为先负偏后正偏, 第4-6层为负偏-正偏旋回 (图3; 表1)。

综合表明, 研究区相对海平面整体呈现上升。相对海平面上升过程中, 等深流活动较为活跃。同时, $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 在各层次级旋回变化与岩相变化规律大致相同 (岩性、粒径变化及薄-厚-薄旋回厚度变化), 反映等深流活动具有较为明显的弱-强-弱变化规律 (图3; 表1)。

4.2 古温度

$\delta^{18}\text{O}$ 对水体温度较为敏感 (童乐等, 2019), 可通过 $\delta^{18}\text{O}$ 较好地恢复古水温。结合团队在鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组等深流沉积研究 (童乐等, 2019), 根据 Graig (1961) 经验公式对研究区各层等深流沉积反映的古温度进行了恢复。

$$T_{\text{校正}} = 16.9 - 4.2 (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}} + 0.22) + 0.13 (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}} + 0.22)^2 \quad (\text{Graig, 1961; 童乐等, 2019})$$

研究区水体古温度为13~27℃, 平均21℃。

从下至上, 古温度可分为2个先升高、后降低旋回 (第1-3层、第3-5层), 第5、6层古温度相对较高。2个旋回中, 第2、4层古温度分别最高, 多为粉晶等深流沉积, 而泥晶等深流沉积温度相对较低; 砾屑-砂屑等深流沉积因粗粒沉积可能为风暴或重力流从浅水区异地搬运而来, 未对其进行地化测试。总体而言, 研究区等深流为较低能的温盐环流, 等深流的温度与活动强度正相关 (图3)。

5 结论

综合野外观测、地化分析对鄂尔多斯盆地西北缘石峡谷地区奥陶系克里摩里组等深流沉积进行了研究, 主要认识如下:

1) 研究区发育4种岩相及组合, 即透镜状泥晶灰岩、透镜状粉晶灰岩、透镜状砾屑-砂屑灰岩及层状砾屑灰岩相。透镜状泥晶、粉晶及砾屑-砂屑灰岩相为等深流沉积, 层状砾屑灰岩相可能与风暴作用相关。

2) 透镜状等深流沉积是研究区发现的一种新的等深流沉积类型。岩性以泥晶及粉晶等深流沉积为主。剖面底部发育风暴沉积和砂屑-砾屑等深流沉积; 下部以泥晶及粉晶等深流沉积为主; 中部发育泥晶、粉晶及亮晶胶结砾屑-砂屑等深流沉积; 上部泥晶及粉晶等深流沉积发育; 顶部发育风暴沉积。从下至上, 等深流活动逐渐加强, 存在局部短期极强现象, 并可能受风暴等影响。

3) 等深流作用强度与相对海平面升降、古温度变化呈正相关。研究区等深流为相对低能的温盐环流, 但存在等深流能量短暂增强现象。同时, 在持续的等深流影响过程中伴随有风暴、重力流等事件作用。

致谢 审稿专家及编辑老师对稿件提出了宝贵的意见和建议, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 李华, 何幼斌. 2017. 等深流沉积研究进展. 沉积学报, 35(2): 228-240. [Li H, He Y B. 2017. Research processes on contourites. Acta Sedimentologica Sinica, 35(2): 228-240]
- 李华, 何幼斌, 黄伟, 刘朱睿, 张锦. 2016. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组等深流沉积. 古地理学报, 18(4): 631-642. [Li H, He Y B, Huang W, Liu Z R Z, Zhang J. 2016. Contourites of the Or-

- dovician Pingliang Formation in southern margin of Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 361-642]
- 李向东, 阙易, 郇雅棋. 2017. 桌子山中奥陶统克里摩里组下段薄层状石灰岩垂向序列分析. *地球科学进展*, 32(3): 276-291. [Li X D, Que Y, Huan Y Q. 2017. Analysis of vertical sedimentary successions in the lower part of Kelimoli Formation, Middle Ordovician, Zhuozishan area. *Advances in Earth Science*, 32(3): 276-291]
- 李华, 何幼斌, 黄伟, 刘朱睿, 张锦. 2018. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组深水沉积特征及其与古环境关系: 以陕西富平赵老峪地区为例. *沉积学报*, 36(3): 483-499. [Li H, He Y B, Huang W, Liu Z R Z, Zhang J. 2018. Research on relationship between characteristics of deep-water deposits and palaeoenvironment in the Ordovician, Pingliang Formation, southern margin of the Ordos Basin: a case of Zhaolaoyu countryside, Fuping town, Shaanxi Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(3): 483-499]
- 李华, 何明薇, 邱春光, 王英民, 何幼斌, 徐艳霞, 何瑞武. 2023. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000—2022年)研究进展. *沉积学报*, 41(1): 18-36. [Li H, He M W, Qiu C G, Wang Y M, He Y B, Xu Y X, He R W. 2023. Research processes on deep-water interaction between contour current and gravity flow deposits, 2000 to 2022. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 18-36]
- 李向东, 魏泽跃, 陈洪达. 2023. 鄂尔多斯盆地西缘上奥陶统拉什仲组内波和内潮汐沉积成因分析. *地质学报*, 97(4): 1278-1294. [Li X D, Wei Z Y, Chen H D. 2023. Genetic analysis of internawave and internal-tide deposits in the Upper Ordovician Lashengzhong Formation, western Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 97(4): 1278-1294]
- 罗顺社, 席明利, 吕奇奇, 何幼斌, 李梦杰, 肖彬. 2015. 湘北沉古坪地区下奥陶统等深流沉积特征研究. *沉积学报*, 22(4): 641-648. [Luo S S, Xi M L, Lü Q Q, He Y B, Li M J, Xiao B. 2015. Study on characteristics of Lower Ordovician contour current deposits in Yuan-guping, northern Hunan, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 641-648]
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 景秀春, 张永生, 袁路明, 沈智军. 2016. 鄂尔多斯盆地西缘北部奥陶纪盆地原型: 来自贺兰山和桌子山地球奥陶系的沉积响应. *地质论评*, 62(4): 1041-1061. [Wang Z T, Zhou H R, Wang X L, Jing X C, Zhang R S, Yuan L M, Shen Z J. 2016. The Ordovician basin prototype in the northwest Ordos basin: constraint from the Ordovician sedimentary respond in the Helan-Zhuozishan Mountains. *Geological Review*, 62(4): 1041-1061]
- 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组—乌拉力克期构造—岩相古地理特征. *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]
- Li H, He Y B, Huang W, Liu Z R Z, Zhang J, Zhang C, Wang J X, Huang J. 2017. Characteristics of contourites in the Upper Ordovician Pingliang Formation along southwestern margin of the Ordos Basin, western China. 3rd Deep-water Circulation Conference. Wuhan.
- Li H, He Y B, van Loon A J, Huang W, Liu Z R Z, Zhang J, Zhang C, Wang J X, Huang J. 2018. Interaction between gravity flows and contour currents along the southern margin of the Ordos Basin (China): a study of the Ordovician Pingliang Formation. The 20th International Sedimentological Congress, 2018. Québec City, Canada.
- Li H, van Loon A J, He Y B. 2020. Cannibalism of contourites by gravity flows: explanation of the facies distribution of the Ordovician Pingliang Formation along the southern margin of the Ordos basin, China. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 57: 331-347.
- Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, Wählin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations. *Marine Geology*, 352: 111-154.
- Scholle P A, Arthur M A. 1980. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *AAPG Bulletin*, 64(1): 67-87.
- Stow D A V, Kahler G, Reeder M. 2002. Fossil contourites: type example from an Oligocene palaeoslope system, Cyprus. In: Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, Faugères J-C, Viana A R (eds). *Deep-water contourite systems: modern drifts and ancient series, seismic and sedimentary characteristics*. Geological Society Memoir 22, 443-455.
- Wang Z, Fan R Y, Zong R W, Gong Y M. 2022. Middle Ordovician bottom current deposits in the western margin of the North China craton: evidence from sedimentary and magnetic fabrics. *Sedimentology*, 69: 1424-1455.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)