

鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系拉什仲组一段 重力流沉积特征及演化^{*}

姜纯伟 李 华 何幼斌 何一鸣 姚凤南 吴吉泽 张显坤

长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘 要 针对鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系拉什仲组一段深水重力流沉积演化过程不明确的问题, 以露头、岩石薄片和粒度等为基础, 对重力流沉积特征和演化规律展开研究, 最终建立沉积模式。结果表明: (1) 研究区共发育 5 种岩相, 分别为水平层理页岩相 (岩相 1)、块状层理砾屑灰岩相 (岩相 2)、粒序层理细砂岩相 (岩相 3)、平行层理细砂岩—粉砂岩相 (岩相 4) 和小型交错层理粉砂岩相 (岩相 5)。(2) 根据砂岩形态和叠置样式共识别出 4 种深水重力流沉积类型: 即复合水道沉积、迁移水道沉积、近端朵叶沉积和远端朵叶沉积。(3) 从下至上依次发育复合水道、朵叶、迁移水道和朵叶沉积。(4) 重力流沉积可以划分为 2 个阶段, 第 1 阶段重力流能量强, 形成复合水道, 随着能量降低, 发育小规模朵叶; 第 2 阶段新一期重力流爆发, 能量弱于第 1 阶段, 形成迁移水道, 随着重力流能量持续降低, 以沉积作用为主, 垂向上水道向朵叶转化, 近端朵叶和远端朵叶依次发育。该研究可提升对重力流沉积演化规律的认识, 为深水油气勘探提供帮助。

关键词 重力流沉积 水道 朵叶 浊流 鄂尔多斯盆地 奥陶系

第一作者简介 姜纯伟, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 研究方向为深水沉积学。E-mail: jcw2209266011@163.com。

通讯作者简介 李华, 男, 1984 年生, 教授, 主要从事沉积学研究。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Characteristics and evolution of gravity flow deposits of the first member of Ordovician Lashizhong Formation in northwestern margin of Ordos Basin

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

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract For the problem of unclear evolutionary process of deep-water gravity flow deposition in the first member of Ordovician Lashizhong Formation in northwestern margin of Ordos Basin, the characteristics and evolution are studied on the basis of outcrop data, microscopic observation and grain size analysis, and finally the sedimentary modes are established. The results show that: (1) five lithofacies are developed in the study area, corresponding to horizontal bedding shale facies (F1), massive bedding calcirudite facies (F2), graded bedding fine sandstone facies (F3), parallel bedding fine sandstone to siltstone facies (F4) and small-scale cross-bedding siltstone facies (F5); (2) four deep-

^{*} 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 (No. 42272113, 42272115)]

收稿日期: 2025-04-16 改回日期: 2025-07-04

water depositional types are identified according to the shapes and stacking styles of sandstones: complex channels deposition, migrating channels deposition, proximal lobes deposition and distal lobes deposition; (3) complex channels, lobes, migrating channels and lobes are developed vertically in sequence; and (4) gravity flow deposition can be divided into two stages. In the first stage, the energy of gravity flow is high, forming the complex channel; With energy attenuation, small-scale lobes are developed. When in the second stage, the gravity flow erupts, which the energy is lower than the gravity flow in the first stage, and migrating channel is developed. As the energy of gravity flow continues to wane, deposition becomes dominant, resulting in a vertical transition from channels to lobes, with proximal lobes and distal lobes sequentially are developing in the depositional system. This study can improve the understanding of the sedimentary evolution law of gravity flow and is helpful to deep-water oil and gas exploration.

Key words gravity flow deposit, channel, lobe, turbidity current, Ordos Basin, Ordovician

About the first author JIANG Chunwei, born in 2001, postgraduate, is engaged in deep-water sedimentology. E-mail: jcw2209266011@163.com.

About the corresponding author LI Hua, born in 1984, professor, is engaged in sedimentology. E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn.

近年来,深水油气勘探在墨西哥湾、东非鲁伍马盆地、西非尼日尔三角洲盆地、孟加拉湾和中国南海等地区取得重要突破,实践表明重力流沉积是最主要的优质储集体(杨仁超等,2014;张功成等,2019;龚承林等,2023)。其中,水道和朵叶作为重要的富砂沉积单元,一直是深水沉积学领域研究的热点和前沿(李华等,2011;于吉星等,2023;刘钰星等,2024)。一般而言,重力流运动过程中会出现水道和朵叶沉积交替发育的情况,垂向上形成不同的水道—朵叶或朵叶—水道旋回,导致砂体叠置样式和非均质性不一(Cross *et al.*, 2009; Masalimova *et al.*, 2016; 陈宇航等,2017; 张佳佳和吴胜和,2019; 张佳佳等,2023)。因此,查明重力流沉积演化过程对于深水砂体预测和开发至关重要。

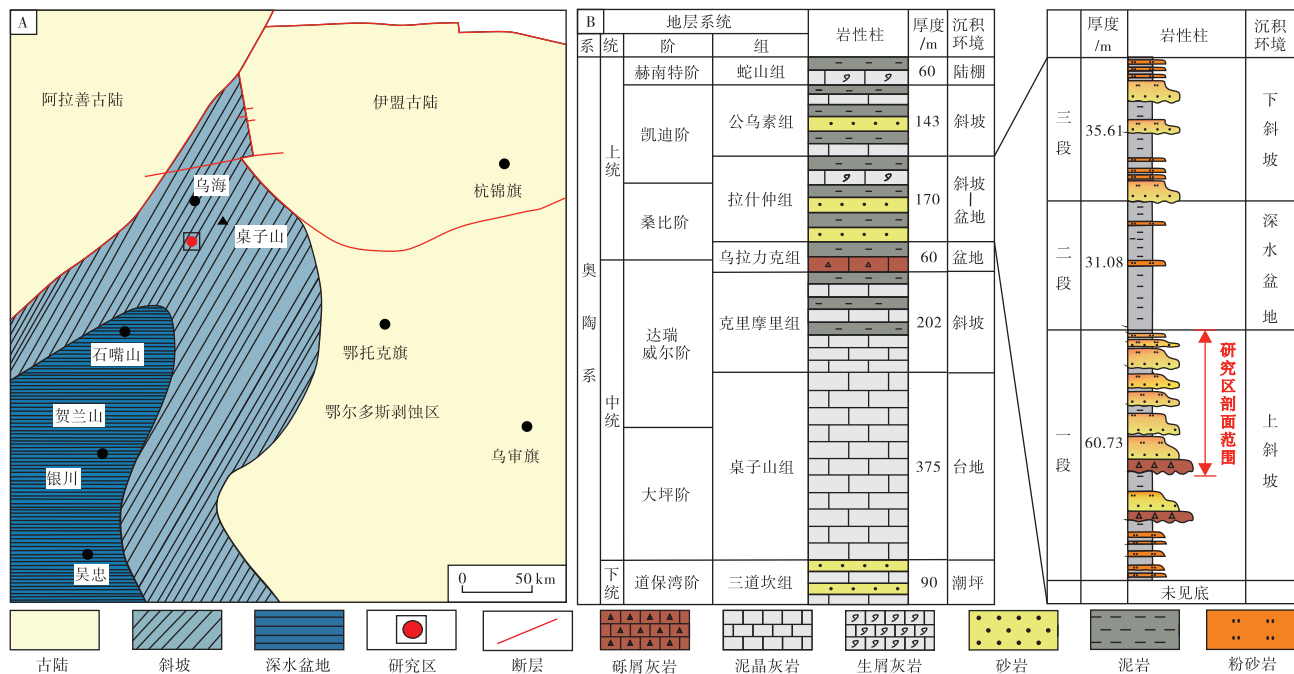
早在1970年,“水道”和“沉积朵叶(depositional lobe)”等术语已被提出(Normark, 1970)。21世纪以来,学术界更是综合利用露头、岩心、测井和地震等信息深入探讨了不同成因下的水道—朵叶沉积特征和时空演化(Bernhardt *et al.*, 2011; Hofstra *et al.*, 2015; Zavala and Arcuri, 2016; 李华等,2022; 吕奇奇等,2022)。然而,现有研究更多聚焦于水道或朵叶单一沉积单元的沉积构成及水道—朵叶的宏观沉积模式,对于垂向上不同类型水道—朵叶的特征和差异研究较少,限制了重力流沉积过程的理论认知。本研究以鄂尔多斯

盆地西北缘奥陶系拉什仲组一段(以下简称“拉一段”)露头为例,综合利用野外实测、粒度分析、岩石薄片和古水流等资料,系统研究了拉一段不同类型水道—朵叶沉积和演化特征,进而探讨其沉积过程和沉积模式,以期更好地认识深水重力流水道—朵叶沉积的形成机理,为研究区及类似地区深水沉积的研究提供理论基础。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国东西两大构造带的结合部位,其中生界和新生界叠加在古生界之上,构成大型多旋回克拉通盆地,为中国第二大沉积盆地(杨华等,2011)。研究区位于该盆地西北缘,大地构造位置位于贺兰构造带与秦岭、北祁连海槽构成的三叉裂谷系,其北部宽度小,南部宽度大,外形上构成南宽北窄的楔形,插入阿拉善古陆和伊盟古陆之间,从东北到西南依次发育古陆—斜坡—盆地(吴兴宁等,2015)(图1-A)。

鄂尔多斯盆地西北缘在晚奥陶世进入强烈的坳陷阶段,在拉什仲组沉积时期形成了一套近百米厚的重力流沉积,其下部发育乌拉力克组,上部发育公乌素组及蛇山组(晋慧娟等,2005;李向东和陈海燕,2020)(图1-B)。奥陶系拉什仲组自下而上可分为3段。其中拉什仲组一段(简称拉一段)的中部到顶部为本次研究对象,其地层连续出露,整体沉积厚度约为39 m,岩性主要为灰绿



A—晚奥陶世沉积岩相古地理；B—地层特征

图 1 鄂尔多斯盆地西北缘位置、地层特征 (据吴兴宁等, 2015; 李向东和陈海燕, 2020; 有修改)

Fig. 1 Location, strata of northwestern margin of Ordos Basin (modified from Wu *et al.*, 2015; Li and Chen, 2020)

色砂岩、粉砂岩与灰黑色泥页岩不等厚互层, 鲍马序列发育(图 1-B)。

2 研究资料和方法

本研究资料为 2024 年 7 月 22 日至 8 月 14 日期间通过野外踏勘采集, 对研究区拉一段剖面进行了详细观察和记录, 并系统取样进行了分析测试(图 2)。通过对野外露头进行详细的观察及测量, 建立综合柱状图 1 幅。为详细解剖剖面下部复合水道, 共测量 8 条剖面。系统统计了剖面中 T_a - T_d 及泥岩段垂向上的厚度; 选取地层未发生变形的小型

交错层理进行了古水流的测量, 共 14 组数据。测量数据通过吴氏网进行校正后并通过 Stereonet 软件进行玫瑰花图的绘制。对拉一段剖面厚层砂岩进行采样, 共采集样品 30 个, 制成岩石薄片 30 块。使用显微镜和 Nano Measurer 软件对 30 个样品进行粒度统计, 并通过 Origin 软件绘制概率累积曲线图。

3 重力流沉积类型及特征

3.1 岩相特征及成因

根据岩性、粒度、砂地比、厚度及沉积构造



图 2 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段剖面特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of the Ordos Basin

等，研究区拉什仲组一段共发育 5 种岩相(表 1)，分别为水平层理页岩相(岩相 1)、块状层理砾屑灰岩相(岩相 2)、粒序层理细砂岩相(岩相 3)、平行层理细砂岩—粉砂岩相(岩相 4)和小型交错层理粉砂岩相(岩相 5)。

1) 水平层理页岩相(岩相 1)：本岩相在剖面各个位置都极为发育。岩性为黑色页岩，横向稳定性和成层性较好，水平层理发育(图 3-A)，含丰富的笔石类化石(晋慧娟等，2005)。该岩相为浊流末期及间歇期安静水体环境下由悬浮物质垂直沉降形成。

2) 块状层理砾屑灰岩相(岩相 2)：本岩相在剖面的底部发育，形态为透镜状，岩层厚度最大为 60 cm，与底部泥岩和顶部砂岩呈突变式接触。岩性为褐灰色砾屑灰岩，整体为块状，局部见正粒序层理，以基质支撑为主，砾石悬浮在砂质基质中，见三叶虫和腕足化石。砾石大小混杂，最小为 0.2 cm，最大可达 8 cm，多为次棱角一次圆状(图 3-B)。其可能为浅海沉积物搬运至深海后快速堆积而成的碎屑流沉积。

3) 粒序层理细砂岩相(岩相 3)：岩性主要为细砂岩(图 3-F)，其典型识别特征为无结构或正粒序层理 T_a 段(鲍马序列)占主导(图 3-C)，厚度占比一般大于这种岩相总厚度的 80%，顶部可能发育平行层理段(T_b 段)，在垂向上组成 T_a 和

T_{ab} 的不完整鲍马序列，底部侵蚀面和槽模较为发育，局部可见棱角一次棱角状砾石呈定向排列；砂岩厚度为 30~156 cm，平均厚度为 91 cm，砂地比较高，一般大于 80%；颗粒以石英为主，分选和磨圆较差(图 3-F)。岩相 3 的平均厚度较大，主体部分的无结构或不明显的正粒序细砂岩代表了鲍马序列的 T_a 段，属于高密度浊流成因；颗粒粒度相对较粗且分选磨圆较差，说明沉积物搬运距离较短；底部侵蚀面和槽模发育以及高砂地比，反映浊流的起始能量较强，主要为侵蚀能力强的高密度浊流通过悬浮沉降快速堆积形成的产物。

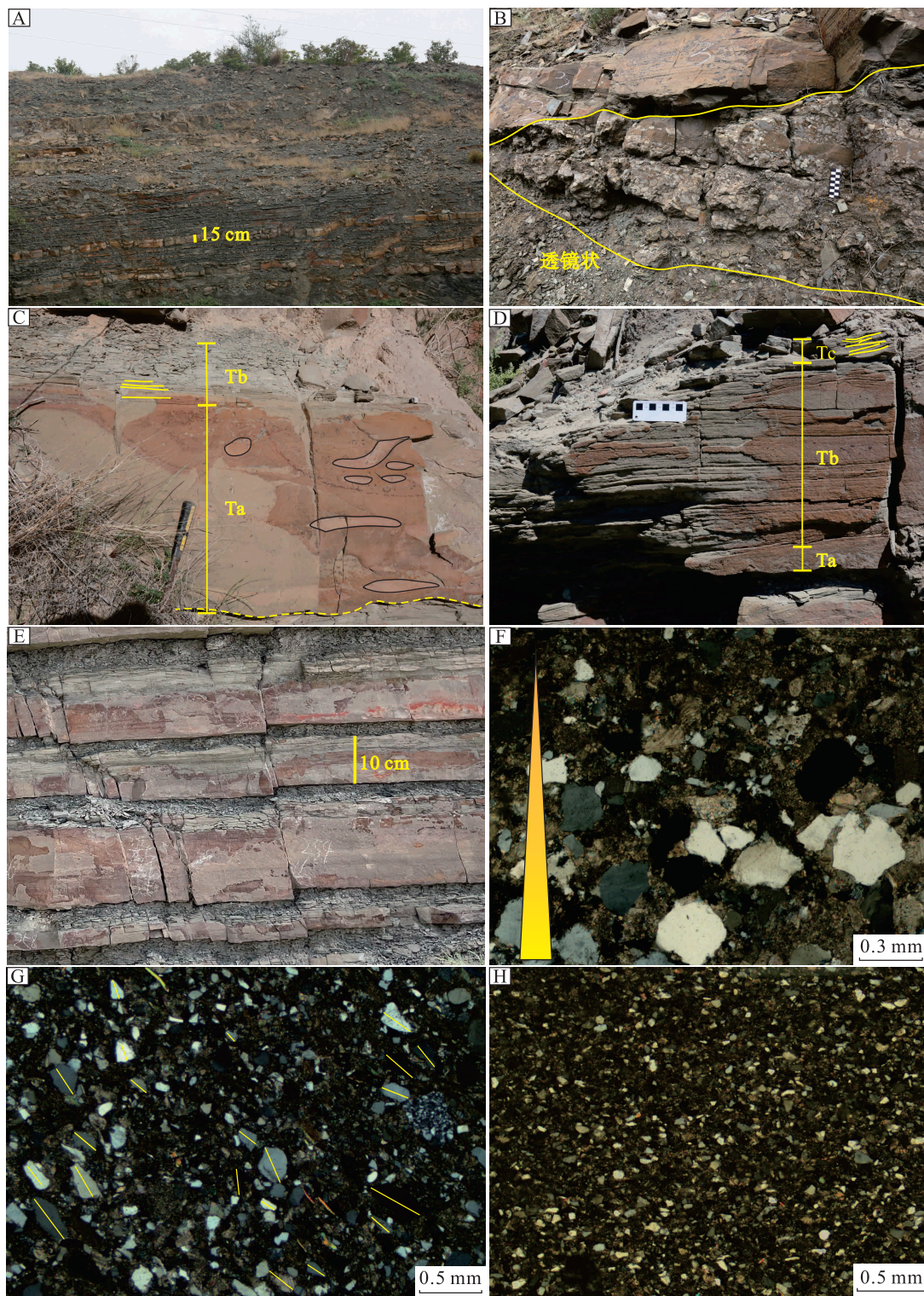
4) 平行层理细砂岩—粉砂岩相(岩相 4)：以灰绿色细砂岩—粉砂岩为主，石英常见，见少量岩屑，局部见长条颗粒及生屑呈定向排列的特征。平行层理、交错层理较为常见，组成不完整的 T_{abc} 、 T_{bcd} 和 T_{cd} 鲍马序列(图 3-D)。其中， T_a 段占比较小，一般小于 20%。单层厚度 15~98 cm，平均厚度为 33 cm，砂地比一般小于 80%(图 3-G)。岩相 4 具有低密度浊流沉积特征，相较于岩相 3，岩相 4 的厚度、粒度和砂地比偏低，反映形成该岩相的初始水动力相对较弱或者离物源位置更远。

5) 小型交错层理粉砂岩相(岩相 5)：岩性主要为粉砂岩，以石英为主，泥质含量较高(图 3-H)，沉积构造特征与岩相 4 类似。相较于岩相 4，岩相 5 多以薄层砂岩为主(图 3-E)，厚度

表 1 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段岩相类型及沉积特征

Table 1 Lithofacies types and sedimentary characteristics of the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

岩相类型	岩性	厚度	砂地比	鲍马序列	成因	沉积序列
岩相1	黑色泥页岩	2~500 cm	/	/	深水环境中悬浮沉积	
岩相2	砾屑灰岩	60 cm	/	/	碎屑流	
岩相3	细砂岩为主	38~156 cm 平均91 cm	>80%	T_a, T_{ab}	高密度浊流	
岩相4	细砂岩-粉砂岩	11~98 cm 平均33 cm	30%~85%	T_{abc}, T_{bcd}, T_{cd}	高能低密度浊流	
岩相5	粉砂岩为主	2~27 cm 平均11 cm	<70%	T_{bcd}, T_{cd}, T_d	低能低密度浊流	



A—岩相1, 暗色泥页岩, 发育水平层理; B—岩相2, 块状砾屑灰岩, 基底支撑, 含砾石; C—岩相3, 中—厚层砂岩, 主体发育鲍马序列 T_a 段, 局部可见次棱角状砾石呈定向排列; D—岩相4, 中厚层砂岩, 鲍马序列 T_{bc} 段占主导; E—岩相5, 中厚—薄层砂岩, 常常与泥岩互层发育; F—细砂岩, 发育粒序层理, 正交光; G—细砂岩—粉砂岩, 长条颗粒定向排列, 正交光; H—粉砂岩, 正交光

图3 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段岩相典型沉积特征

Fig. 3 Typical sedimentary characteristics of lithofacies in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

一般不超过 20 cm, 平均厚度为 11 cm, 砂地比较低, 为 20%~70%。岩相 5 由鲍马序列 T_{bed} 组成, 大多与岩相 1 以互层形式存在, 说明其距离物源较远。一般形成于单期浊流活动的末期, 浊流平均厚度、粒度和砂地比较低, 反映其能量较低, 侵蚀能力极弱, 为低能的低密度浊流沉积而成。

3.2 沉积单元类型及特征

关于重力流沉积体系的构成单元, 不同学者分类不尽相同, 一般包括峡谷、水道、堤岸、朵叶体、块体搬运沉积 (mass transport deposits) 和席状沉积等 (Posamentier and Kolla, 2003; 李华和何幼斌, 2020; 陈华等, 2021)。研究区共识别出水道和朵叶 2 种沉积单元, 其中水道又可细分为复合水道和迁移水道, 朵叶由近端朵体和远端朵叶组成。

3.2.1 重力流水道

复合水道发育在剖面下部(图 2), 整体沉积厚度为 13.6 m, 含 13 期次级水道 (C1-C13), 其中底部 C1 水道发育岩相 2, 厚度为 60 cm, 向上 C2-C13 水道主要发育岩相 3 和 4, 与岩相 1 交替发育, 厚度为 16~156 cm, 粒度为 2.06~3.47 Φ , 砂地比为 28.75%~97.41% (图 4-A)。

迁移水道沉积发育在剖面的中部(图 2), 由水道 C15-C21 构成, 整体向北北西一侧迁移, 以岩相 3 和 4 为主, 与岩相 1 交替发育, 层厚为 80~140 cm, 粒度为 2.56~3.84 Φ , 砂地比为 80%~94.74% (图 5-A)。

3.2.2 朵叶

朵叶在研究区主要表现为层状砂岩, 发育在剖面的中部及上部, 累计厚度将近 14 m。根据平均粒度、厚度、砂地比又可将层状砂岩分为中—厚层型和薄互层型 2 种, 分别对应近端朵叶和远端朵叶。

近端朵叶以中—厚层状砂岩为主, 厚度为 58~135 cm, 粒度为 3.06~3.64 Φ , 岩相 3 和 4 发育, 夹少量的薄层泥岩 (岩相 1), 具高砂地比, 一般大于 90% (图 6-B)。远端朵叶以岩相 4 和 5 为主, 与岩相 1 形成薄互层, 厚度为 2~27 cm, 粒度偏细, 多以粉砂岩为主, 砂地比较低, 一般为 20%~70% (图 6-B, 6-C)。

4 垂向演化特征

基于研究剖面的砂岩厚度、平均粒径、砂地比

及岩相分布特征不同, 认为其自下而上可分为复合水道—朵叶及迁移水道—朵叶 2 个沉积演化阶段。

4.1 复合水道—朵叶沉积演化

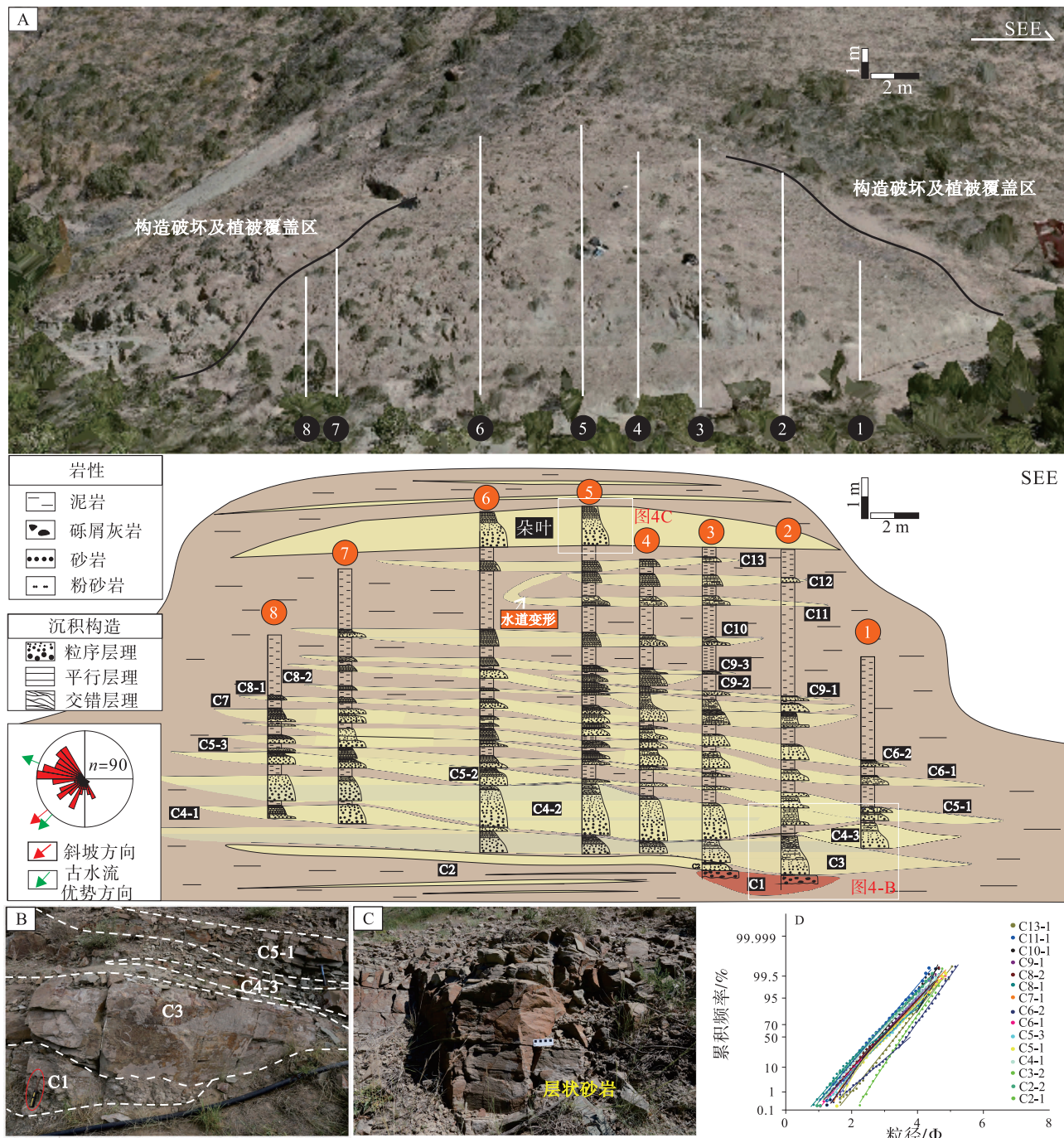
第 1 阶段为复合水道—朵叶沉积演化阶段, 复合水道沉积主要发育在下部(图 3-A), 根据水道砂岩厚度、平均粒径、砂地比及岩相占比在垂向上可以划分为 4 个不同的期次(图 7), 其特征如下:

第 1 期底部为砾屑灰岩, 厚度为 60 cm, 向上水道为砂质充填, 规模相对最大, 厚度为 52~156 cm, 粒度较粗(图 4-D), 砂地比较高, 为 0.94~0.97 (图 4-B, 4-C); 第 2 期水道规模有所减小, 厚度为 33~52 cm, 粒度变细, 砂地比较高, 为 0.74~0.85; 第 3 期水道规模持续减小, 厚度为 11~52 cm, 粒度变细, 砂地比降低, 为 0.38~0.54; 第 4 期发育层状砂岩, 为朵叶沉积, 单层厚 1.5 m。

4.2 迁移水道—朵叶沉积演化

第 2 阶段为迁移水道—朵叶沉积演化阶段, 迁移水道沉积分布在研究剖面的中部(图 5-A), 从下到上呈现 2 个下粗上细旋回, 具有以下特征: (1) 第 1 个旋回由 15~17 层构成(图 7), 岩相 4 发育, 约占该旋回总体的 81%, 其余为岩相 1; 18~21 层构成第 2 个旋回, 以岩相 3 为主, 约占 77%, 次之为岩相 1, 所占比例为 23%。(2) 在迁移水道中, 第 1 个旋回水道厚度相对较小, 厚度为 80~98 cm, 粒度为 2.56~3.18 Φ , 砂地比为 72%~91%; 第 2 个旋回水道厚度较大, 以厚层砂岩为特征(图 5-C), 层厚为 113~140 cm, 粒径为 2.40~3.84 Φ , 砂地比较第 1 个旋回高, 为 81%~95%。(3) 整体来看, 该阶段从第 1 个旋回到第 2 个旋回, 砂岩厚度、平均粒径、砂地比先增大后减小, 顶部未见水道废弃现象。

拉什仲组顶部发育大规模朵叶沉积, 累计厚度达 14 m (图 6-A), 根据厚度、平均粒度和砂地比可将该阶段划分为 5 个粗—细的旋回, 即发育 5 期朵叶沉积(图 7)。其中, 22 和 23 层构成第 1 个旋回, 24~26 为第 2 个旋回, 27~29 层为第 3 个旋回, 30~31 层构成第 4 个旋回, 32 和 33 层构成第 5 个旋回。每期朵叶底部发育岩相 3, 向上砂岩厚度逐渐变小, 粒度向上逐渐细化, 砂地比逐渐降低, 上部转变为薄层砂和泥岩互层,



A—复合水道内部结构及充填特征；B—复合水道下部充填特征，发育透镜状砂岩，以碎屑流和高密度浊流充填为主；
C—复合水道顶部小规模朵叶沉积特征，发育层状砂岩；D—复合水道概率累积曲线。C1—C13为次级水道

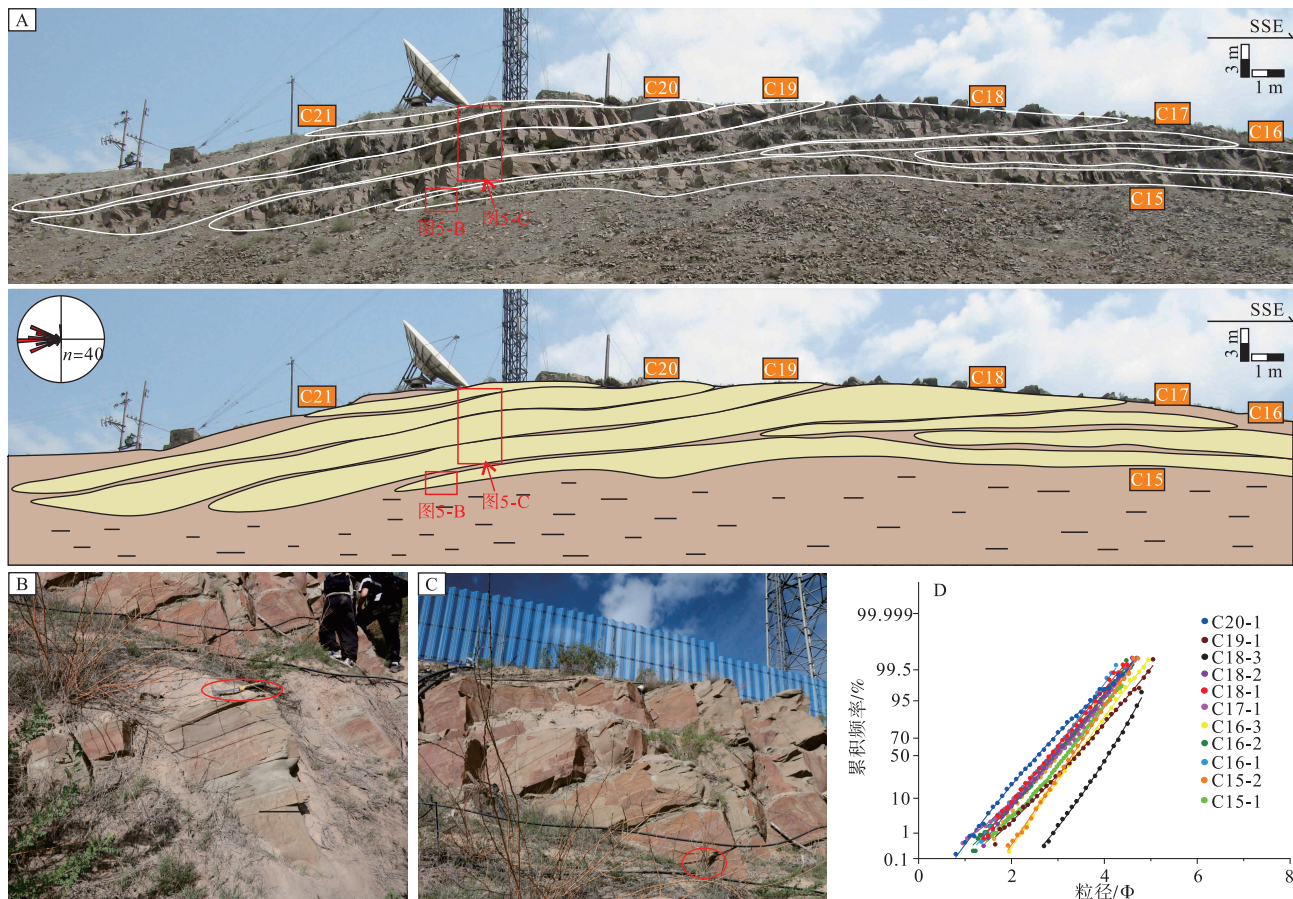
图 4 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段复合水道内部结构及充填特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of complex channel in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

岩相 4 和 5 发育(图 6-B)。将 5 期朵叶垂向变化进行对比，发现从底部到顶部，朵叶粒度整体有细化的趋势，砂岩厚度在逐渐变小，砂地比也略微降低。

4.3 复合水道一朵叶沉积演化与迁移水道一朵叶沉积演化

综上所述，鄂尔多斯盆地拉一段从下到上依次



A—迁移水道宏观特征及解释；B—迁移水道下部沉积特征；C—迁移水道上部沉积特征；D—迁移水道概率累积曲线图

图 5 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段迁移水道沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of migrating channel in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

发育复合水道一朵叶和迁移水道一朵叶两个沉积旋回。下部第 1 个旋回水道规模较大，小规模朵叶发育，砂体厚度整体相对较小，粒度较粗，砂泥比整体较小；上部第 2 个旋回水道规模减小，砂体单层厚度变大，颗粒粒径变细，砂泥比增高。

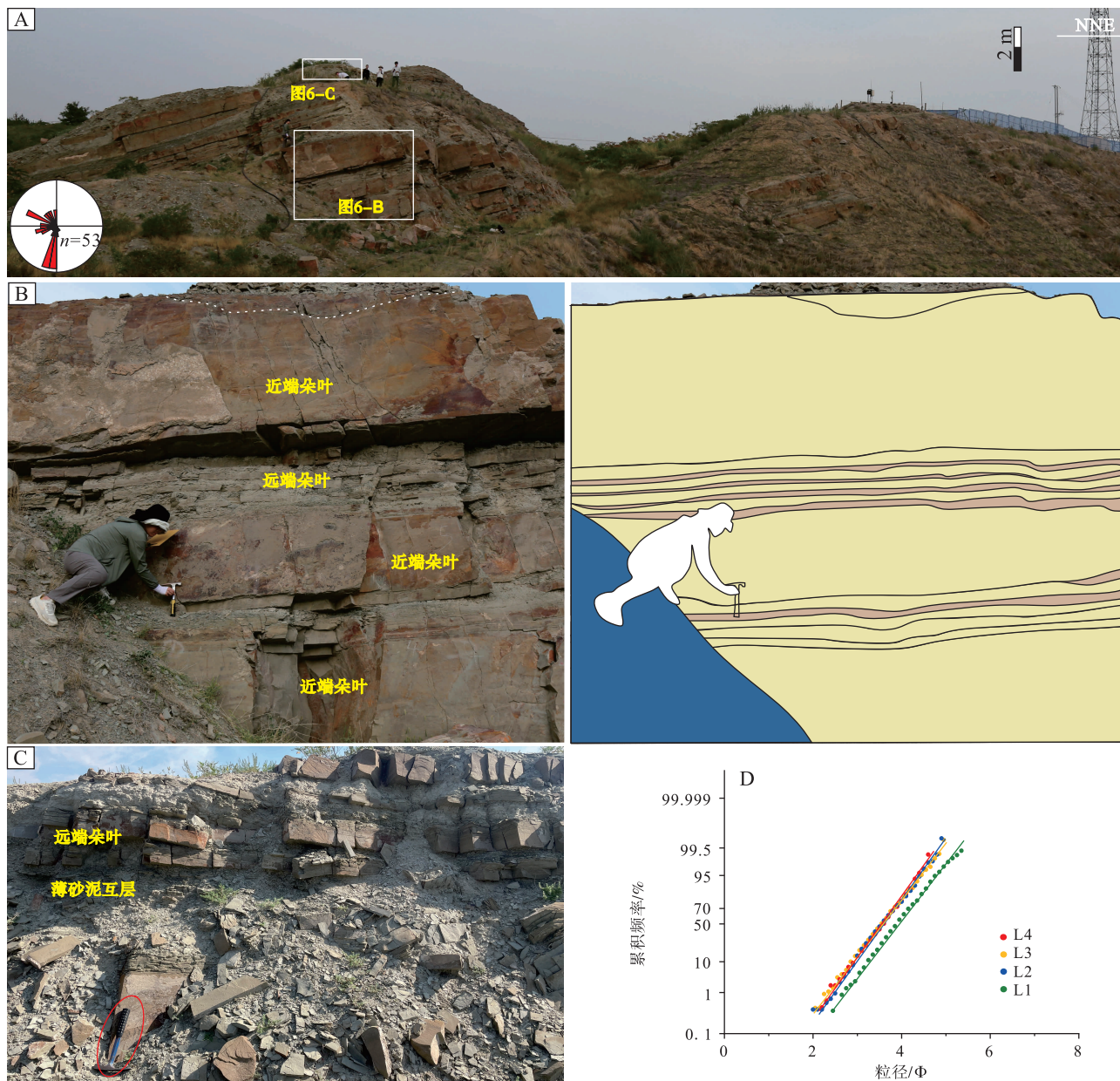
5 讨论

5.1 沉积过程

重力流能量变化是控制沉积单元类型及其内部特征的直接因素，基于已划分的各个阶段，从重力流岩相占比、砂岩厚度、平均粒度及砂地比的角度出发(图 7)，对重力流能量变化及沉积演化过程进行探讨。

重力流爆发早期，该时期沉积物供应充足，重力流能量极强，以向下侵蚀作用为主。复合水道底

部发育碎屑流，其一般在水道切谷侵蚀或过路不沉积的末期，说明当时重力流能量极强；向上主要发育高密度浊流充填水道，砂岩厚度、砂地比和平均粒度先变大后变小，反映重力流爆发初期，流体能量先增强后减弱。中部 C6-C8 水道主要以高密度浊流和低密度浊流共同充填为主要特征，砂地比、粒度和厚度呈下降趋势，泥质含量增多，说明该时间沉积物供应量下降，重力流能量逐渐变低，侵蚀能力下降。上部 C9-C13 为低密度浊流充填水道，相较于中部，上部的砂地比、厚度和粒度更低，揭示了复合水道沉积末期物源供应不足，由以砂质充填转变为以泥砂共同充填。随着重力流能量持续降低，水道在被完全充填后，在其上方发育小规模朵叶，垂向上形成了复合水道一朵叶的沉积演化旋回。到此，重力流进入间歇期，以深水原地沉积为主，沉积大段泥岩。



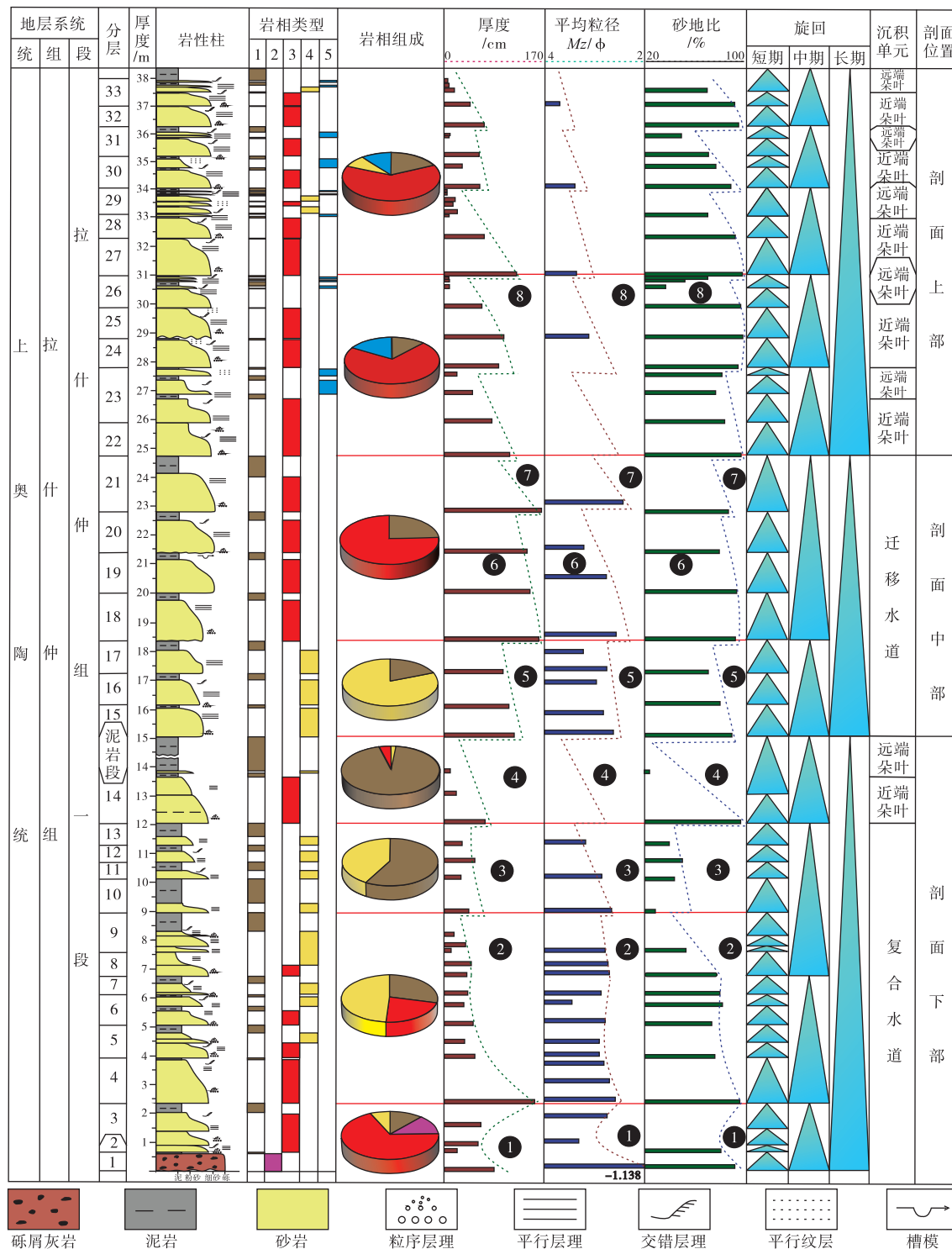
A—朵叶露头宏观特征；B—朵叶露头下部沉积特征；C—朵叶露顶部沉积特征；D—朵叶概率累积曲线图

图 6 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段朵叶沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of lobes in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

随后第 2 期重力流爆发，迁移水道粒度比复合水道初始阶段和最强阶段细，说明形成迁移水道的重力流能量较形成复合水道的能量要低，水道沉积的环境限制能力减弱，水道容易发生侧向摆动，由向下侵蚀作用为主转变为侧向侵蚀作用占主导。整体较高的砂地比说明该时期物源供应仍然充足，水道下部 C15-C17 水道为高密度浊流和低密度浊流共同充填。迁移水道上部 C18-C21 则为高密度浊流沉积充填，与下部相比，其厚度、砂地比和粒

度相对较大，说明其重力流能量变强，能量高于下部。C18-C21 沉积时期，水道向上细化不明显，该时期物源供应充足，重力流能量较强、规模较大，水道被填满后，弱限制性环境转变为非限制性环境，向上发育大规模朵叶沉积(图 5-A；图 7)。粒径分析结果显示朵叶粒度相对水道沉积偏细，说明重力流能量在逐渐降低，以沉积作用为主，形成层状砂岩。每期朵叶底部发育高密度浊流，向上砂体厚度逐渐变小，粒度向上逐渐细化，砂泥比逐渐



①复合水道沉积第 1 期；②复合水道沉积第 2 期；③复合水道沉积第 3 期；④小规模朵叶沉积时期；⑤迁移水道沉积第 1 期；⑥迁移水道沉积第 2 期；⑦水道向朵叶转化时期；⑧大规模朵叶沉积时期。-1.138φ：复合水道底部砾屑灰岩中砾石粒径（测量取平均值）

图 7 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段重力流沉积垂向演化特征

Fig. 7 Vertical characteristics of gravity flow in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

降低，上部转变为薄层砂和泥岩互层，以低密度浊流为主，反映单期重力流能量逐渐减弱并衰亡。将

5 期朵叶垂向变化进行对比，发现从底部到顶部，朵叶厚度、平均粒径和砂地比整体有减小的趋势，

垂向上为变薄变细的序列,说明随着物源供给和重力流能量持续降低,朵叶不断退积直至重力流能量衰亡(图 6-B;图 7)。

5.2 沉积模式

基于研究区重力流沉积演化特征,建立了鄂尔多斯盆地西北缘拉一段重力流沉积模式(图 8)。其演化过程可分为 2 个阶段:第 1 阶段为复合水道—小规模朵叶的沉积演化时期,早期重力流能量强,形成限制性较强的环境,水道横向迁移受限,发育复合水道,垂向上,水道下部以碎屑流和高密度浊流充填为主,向上过渡为低密度浊流充填主导,随着砂地比逐渐降低和物源供应减弱,复合水道被完全充填并在其上方发育小规模朵叶;第 2 阶段形成迁移水道—大规模朵叶的沉积演化旋回,该期重力流能量相对减弱但物源供应充足且砂地比整体相对较高,易形成弱限制性环境,水道容易发生左右摆动,形成迁移水道沉积。在重力流活动停止前,水道已被填满,沉积环境转变为非限制性环境,迁移

水道向朵叶发生转换,随着重力流能量降低和物源供应量降低,朵叶不断退积直至重力流能量衰亡。

6 结论

通过野外露头测量、岩相、薄片及粒度等,对鄂尔多斯盆地西北缘拉一段重力流沉积特征、演化及形成机理进行了研究。主要认识如下:

1) 研究区拉什仲组一段发育 5 种岩相,分别为水平层理页岩相(岩相 1)、块状层理砾屑灰岩相(岩相 2)、粒序层理细砂岩相(岩相 3)、平行层理细砂岩—粉砂岩相(岩相 4)和小型交错层理粉砂岩相(岩相 5)。

2) 根据砂岩的形态和叠置样式,在鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组一段识别出 4 种深水沉积单元:复合水道沉积、迁移水道沉积、近端朵叶沉积和远端朵叶沉积。自下而上发育复合水道—小规模朵叶和迁移水道—大规模朵叶 2 个沉积演化阶段。

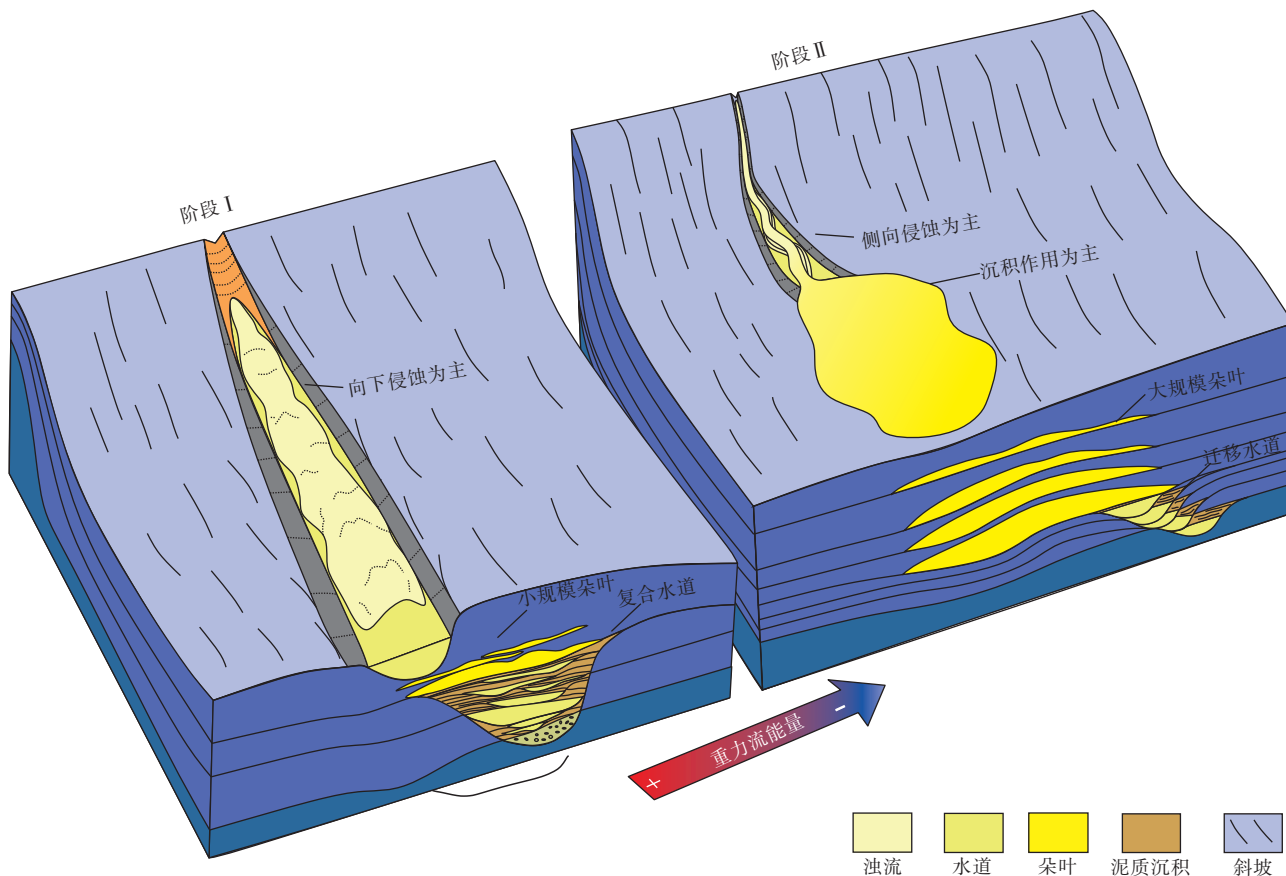


图 8 鄂尔多斯盆地西北缘拉什仲组一段重力流沉积模式

Fig. 8 Depositional model of gravity flow in the first member of Lashizhong Formation, northwestern margin of Ordos Basin

3) 重力流沉积早期, 能量强, 向下侵蚀作用较强, 形成复合水道和小规模朵叶; 随后新一期重力流爆发, 能量弱于前一期重力流, 侧向侵蚀能力强, 形成迁移水道; 随着重力流持续衰减, 在迁移水道被填满后, 在其上部依次形成近端朵叶和远端朵叶沉积。

致谢 适逢冯增昭先生诞辰100周年, 谨以本文向先生致以深切的缅怀与崇高的敬意。感谢先生对团队在深水沉积和岩相古地理研究过程中的指导和帮助, 先生的严谨治学及对地质的热爱一直激励着晚辈们继续探索沉积学的奥秘。参加野外研究的还有老师赵仲祥, 研究生侯向阳、刘娜、张晟、李纾羽、郭蒙蒙及郑友怡, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 鲁银涛, 陈亮, 唐鹏程, 曹全斌. 2017. 东非鲁伍马盆地渐新统深水水道一朵体沉积特征及控制因素. 石油学报, 38(9): 1047–1058. [Chen Y H, Yao G S, Lü F L, Lu Y T, Chen L, Tang P C, Cao Q B. 2017. Sedimentary characteristics and controlling factors of Oligocene deep-water channel-lobe in Rovuma Basin of the East Africa. *Acta Petrolei Sinica*, 38(9): 1047–1058]
- 陈华, 林畅松, 张忠民, 张德民, 李茗, 吴高奎, 朱奕璇, 徐海, 陆文明, 陈继华. 2021. 下刚果—刚果扇盆地中新统层序地层格架内重力流沉积体系特征、演化及其控制因素. 石油勘探与开发, 48(1): 127–138. [Chen H, Lin C S, Zhang Z M, Zhang D M, Li M, Wu G K, Zhu Y X, Xu H, Lu W M, Chen J H. 2021. Evolution and controlling factors of the gravity flow deposits in the Miocene sequence stratigraphic framework, the Lower Congo-Congo Fan Basin, West Africa. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 127–138]
- 龚承林, 朱一杰, 邵大力, 郭荣涛, 戈道瑶, 丁梁波, 齐昆, 马红霞. 2023. 海底扇规模优质储集体的分布模式与成因分析: 以上新世—更新世孟加拉扇为例. 沉积学报, 41(1): 1–17, 341. [Gong C L, Zhu Y J, Shao D L, Guo R T, Ge D Y, Ding L B, Qi K, Ma H X. 2023. Distribution patterns and genetic analyses of potentially productive good deep-water reservoirs: a case study from the Pliocene-Pleistocene Bengal fan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 1–17, 341]
- 晋慧娟, 孙明良, 李育慈. 2005. 内蒙古桌子山中奥陶统的“特殊”浊积岩系. 沉积学报, 23(1): 34–40. [Jin H J, Sun M L, Li Y C. 2005. The “special” turbidite measure of the Middle Ordovician series in Zhuozishan area, Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 34–40]
- 李华, 何幼斌. 2020. 深水重力流水道沉积研究进展. 古地理学报, 22(1): 161–174. [Li H, He Y B. 2020. Research progress on deepwater gravity flow channel deposit. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 22(1): 161–174]
- 李华, 何幼斌, 王振奇. 2011. 深水高弯度水道—堤岸沉积体系形态及特征. 古地理学报, 13(2): 139–149. [Li H, He Y B, Wang Z Q. 2011. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levee system. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 13(2): 139–149]
- 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体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]
- 李向东, 陈海燕. 2020. 深水环境下古水流方向分析和阻塞浊流沉积的识别: 以鄂尔多斯盆地桌子山地区上奥陶统拉什仲组为例. 石油学报, 41(11): 1348–1365. [Li X D, Chen H Y. 2020. Analysis of paleocurrent direction and identification of ponded turbidity current deposits in deep water environment; a case study of the Upper Ordovician Lashenzhong Formation in Zhuozishan area, Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(11): 1348–1365]
- 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]
- 刘钰星, 陈宇航, 范国章, 李林, 鲁银涛, 左国平, 曹全斌, 丁群峰. 2024. 底流与重力流交互作用下的朵体沉积特征: 以东非鲁伍马盆地中新统为例. 古地理学报, 26(4): 1005–1016. [Liu Y X, Chen Y H, Fan G Z, Li L, Lu Y T, Zuo G P, Cao Q B, Ding Q F. 2024. Sedimentary characteristics of lobes formed by interacting bottom currents and gravity flows: a case study from the Miocene in Rovuma Basin, East Africa. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 26(4): 1005–1016]
- 吴兴宁, 孙六一, 于洲, 任军峰, 丁振纯, 黄正良. 2015. 鄂尔多斯盆地西部奥陶纪岩相古地理特征. 岩性油气藏, 27(6): 87–96. [Wu X N, Sun L Y, Yu Z, Ren J F, Ding Z C, Huang Z L. 2015. Lithofacies paleogeography of Ordovician in western Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 27(6): 87–96]
- 杨华, 陶家庆, 欧阳征健, 李刚, 景春利. 2011. 鄂尔多斯盆地西缘构造特征及其成因机制. 西北大学学报(自然科学版), 41(5): 863–868. [Yang H, Tao J Q, Ouyang Z J, Li G, Jing C L. 2011. Structural characteristics and forming mechanism in the western margin of the Ordos Basin. *Journal of Northwest University* (Natural Science Edition), 41(5): 863–868]
- 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]
- 于吉星, 杨田, 田景春, 蔡来星, 任启强, 郭为雪. 2023. 深水重力流沉积油气勘探中的几个基础沉积学问题与研究展望. 古地理学报, 25(6): 1299–1314. [Yu J X, Yang T, Tian J C, Cai L X, Ren Q Q, Guo W X. 2023. Some basic sedimentological problems and research prospects of deep-water gravity-flow sedimentary in oil and gas exploration. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(6): 1299–1314]
- 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]
- 张佳佳, 吴胜和. 2019. 海底扇朵叶沉积构型研究进展. 中国海上油气, 31(5): 88–106. [Zhang J J, Wu S H. 2019. Research progress on the depositional architecture of submarine-fan lobes. *China Offshore Oil and Gas*, 20(4): 275–282]
- 张佳佳, 吴胜和, 王瑞峰, 王敏, 陈梅, 王晓丰, 徐庆岩, 熊绮聪, 余季陶, 王黎. 2023. 东非鲁伍马盆地深水 X 气藏海底扇储层构型研究: 重力流—底流交互作用的指示意义. 古地理学报, 25(1): 163–179. [Zhang J J, Wu S H, Wang R F, Wang M, Chen M, Wang X F, Xu Q Y, Xiong Q C, Yu J T, Wang L. 2023. Submarine-fan reservoir architecture of deepwater gasfield X in Rovuma Basin offshore East Africa: insights for the interaction between sediment gravity flows and bottom currents. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(1): 163–179]
- Bernhardt A, Jobe Z R, Lowe D R. 2011. Stratigraphic evolution of a submarine channel-lobe complex system in a narrow fairway within the Magallanes foreland basin, Cerro Toro Formation, southern Chile. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 785–806.
- Cross N E, Cunningham A, Cook R J, Taha A, Esmaie E, El Swidan N. 2009. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water slope-channel system: the Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt. *AAPG Bulletin*, 93: 1063–1086.
- Hofstra M, Hodgson D M, Peakall J, Flint S S. 2015. Giant scour-fills in ancient channel-lobe transition zones: formative processes and depositional architecture. *Sedimentary Geology*, 329: 98–114.
- Masalimova L U, Lowe D R, Sharman G R, King P R, Arnot M J. 2016. Outcrop characterization of a submarine channel-lobe complex: the Lower Mount Messenger Formation, Taranaki Basin, New Zealand. *Marine and Petroleum Geology*, 71: 360–390.
- Normark W R. 1970. Growth patterns of deep-sea fans. *AAPG Bulletin*, 54(11): 2170–2195.
- Posamentier H W, Kolla V. 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73: 367–388.
- Zavala C, Arcuri M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics. *Sedimentary Geology*, 337: 36–54.

(责任编辑 李新坡)