

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

李 华,何幼斌,谈梦婷,冯 斌,葛稳稳,孙玉玺,于 星

(长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430100)

摘要:通过对鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组深水重力流沉积露头精细解剖,揭示深水重力流水道-朵叶体系演化规律,建立沉积模式,分析储层分布规律。研究表明:鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组重力流沉积单元包括复合水道、迁移水道、层状充填垂向加积水道、分支水道、近端及远端朵叶。沉积单元演化与重力流类型和能量密切相关。重力流爆发初期,碎屑流和浊流活跃,复合水道发育;当重力流能量降低,浊流占主导,伴随多期侵蚀-沉积作用,先后发育迁移水道和垂向加积水道;随着浊流的持续作用及能量逐渐衰减,分支水道、近端及远端朵叶依次发育。其中,复合水道可进一步分为青年期、壮年期和衰亡期,形成过程与短期重力流的演化过程相关。壮年期的复合水道、迁移水道和垂向加积水道为理想储层,储集性能依次减弱,水道中部储层质量一般高于两侧,近端朵叶储层质量优于分支水道。

关键词:浊流;碎屑流;重力流;水道-朵叶体系;沉积模式;拉什仲组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

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

Li Hua, He Youbin, Tan Mengting, Feng Bin, Ge Wenwen, Sun Yuxi, Yu Xing

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

Abstract: The fine analysis of deep-water gravity flow deposits in the Ordovician Lashenzhong Formation outcropping at the western margin of Ordos Basin, serves for revealing the evolutionary pattern and sedimentary model of deep-water gravity flow channel-lobe system, and then the reservoir distribution therein. The results show that the gravity flow depositional units in the study area include complex channels, migration channels, vertical aggradation channels with layered fill, distributary channels, as well as proximal and distal lobes, the evolution of which is closely related to the type and energy of gravity flow. At the initial stage, gravity flow is dominated by debris flows and turbidites, commonly leading to the development of complex channels. As the gravity flow gets waning in energy, turbidites become predominant, resulting in the formation of migration channels and vertical aggradation channels in succession through multi-stage erosion and sedimentation. Subsequently, distributary channels, proximal and distal lobes are generated in turn when the turbidites fade. In addition, the process of complex channel development could be divided into youthful, prime, and decline stages which are corresponding to the short-term gravity flow evolution processes. Complex channels in the prime stage, migration channels, and vertical aggradation channels are favorable reservoirs, with the storage capability declining in turn. The middle parts of channels are generally better compared with those at the flanks in terms of reservoir potential, and reservoirs of proximal lobes are superior to those of distributary channels.

Key words: turbidite, debris flow, gravity flow, channel-lobe system, depositional model, Lashenzhong Formation, Ordovician, Ordos Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20220414.

收稿日期:2021-09-23;修订日期:2022-04-27。

第一作者简介:李华(1984—),男,博士、副教授,深水沉积。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472096,41502101);国家科技重大专项(2017ZX05032-002-003);湖北省自然科学基金项目(2020CFB745);地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(2019KFJ0818010)。

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. DOI: 10. 11743/ogg20220414.

近年来,深水油气勘探获得了巨大突破,2018年全球新发现的10大油田中,深水-超深水油田占6个,主要分布在圭亚那盆地、墨西哥湾盆地和巴西桑托斯盆地^[1],其主要储层为重力流沉积。至2016年底,共发现深水油气田1300多个,大型、超大型油气田超过90个,深水沉积已成为了国际石油产量和储量增长的主体^[2]。目前,对重力流及重力流沉积研究存在几个薄弱环节:①重力流沉积单元丰富多样,如重力流水道,根据形态、沉积-侵蚀过程、叠置样式、伴生沉积单元及弯曲度等有不同的划分方案^[3-4],导致在油气勘探、现代沉积及野外露头研究工作中标准不统一;②深水油气勘探以地震资料为主,钻井及岩心资料极少,不能满足不同类型重力流沉积储层对比分析的需要;③深水勘探区块面积一般较小,特别是三维地震覆盖面积,重力流沉积单元(水道、朵叶和水道-堤岸等)不完整,导致对不同重力流沉积类型形成机理及优质储层展布研究难度较大^[5-10];④重力流的流态变化及沉积响应是重力流沉积机理研究中的重要内容之一^[11-19],但相关研究仍不能深入。因此,建立一套适合野外及室内开展研究的重力流沉积单元划分方案,加强重力流的流体演化及沉积响应,对不同类型重力流

沉积形成机理及优质储层分布规律研究具有重要的理论及实际意义。

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组重力流沉积极为发育,重力流沉积单元丰富,本文在2018年野外踏勘研究基础上^[19],根据野外砂体形态、叠置样式和岩相组合等特征,对鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组重力流沉积单元进行了划分,对比研究了水道-朵叶体系的演化过程,揭示了不同重力流沉积单元的储层分布规律。

1 地质概况

研究区鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组位于内蒙古乌海南区桌子山西南部,南距石嘴山市66 km,紧邻G109连接线,交通便利。构造位置为贺兰构造带与秦岭、北祁连海槽组成的三叉裂谷系,东部为鄂尔多斯剥蚀区,东北为伊盟古陆,西北为阿拉善古陆^[20]。从北向南依次发育古陆—斜坡—盆地。露头出露良好,地层发育齐全(图1)。

研究区奥陶系从下至上发育乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组及蛇山组^[17-20]。拉什仲组岩性主要为灰

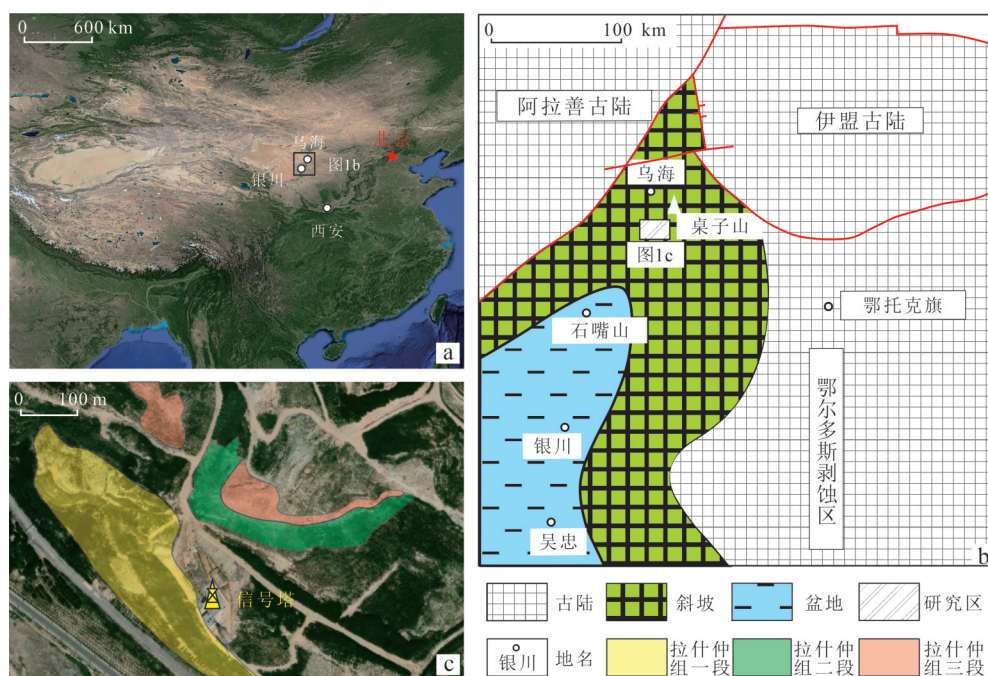


图1 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组地理位置及古地理环境^[20]

Fig. 1 Location and paleogeography of the Ordovician Lashenzhong Formation at the western margin of Ordos Basin^[20]

a. 地理位置; b. 古地理环境; c. 地层出露情况

绿色砂岩、粉砂岩及页岩,局部见砾屑灰岩,页岩中笔石、槽模、交错层理、变形构造等极为发育,整体为一套重力流沉积^[17-20]。根据岩性组合可将拉什仲组划分为3段:第一段为灰绿色砂岩、粉砂岩及页岩互层,透镜状砂岩较为常见;第二段为灰绿色页岩夹灰绿色薄-中层细砂-粉砂岩;第三段为灰绿色砂岩、粉砂岩及页岩不等厚互层,透镜状及层状砂岩发育。总体而言,沉积环境从早期的斜坡中部-上部演化为斜坡下部-盆地,最后过渡到斜坡中部-下部(图1c,图2)^[18-20]。

2 重力流沉积类型及特征

2.1 岩相特征

根据岩性、沉积构造、砂体形态及叠置关系等,判定研究区共发育8种岩相,其特征如下(表1)。

2.1.1 笔石页岩相

笔石页岩相在拉什仲组广泛发育,岩性为灰绿色页岩,水平层理常见,含丰富的笔石,常见腕足、腹足、海百合及三叶虫等化石。生物扰动较为发育,主要有蠕形迹、拟蠕形迹、古网迹及动藻迹等^[18]。其整体反映沉积环境能量低,水体深度较大,综合地质背景,推测为深水原地沉积。

2.1.2 透镜状块状层理砾屑灰岩相

透镜状块状层理砾屑灰岩相主要发育在拉什仲组一段及三段底部,外形为“U”形,单层厚度41 cm,宽度72 cm。岩性为砾屑灰岩,块状层理发育,见腕足、三叶虫、海百合和腹足等化石(图3)。砾屑粒径最大8 cm,最小0.3 cm,一般2~4 cm,次棱角状-次圆状。块状层理发育,局部见正粒序层理(图3c)。

2.1.3 透镜状粒序层理砂岩相

透镜状粒序层理砂岩相发育在拉什仲组一段下

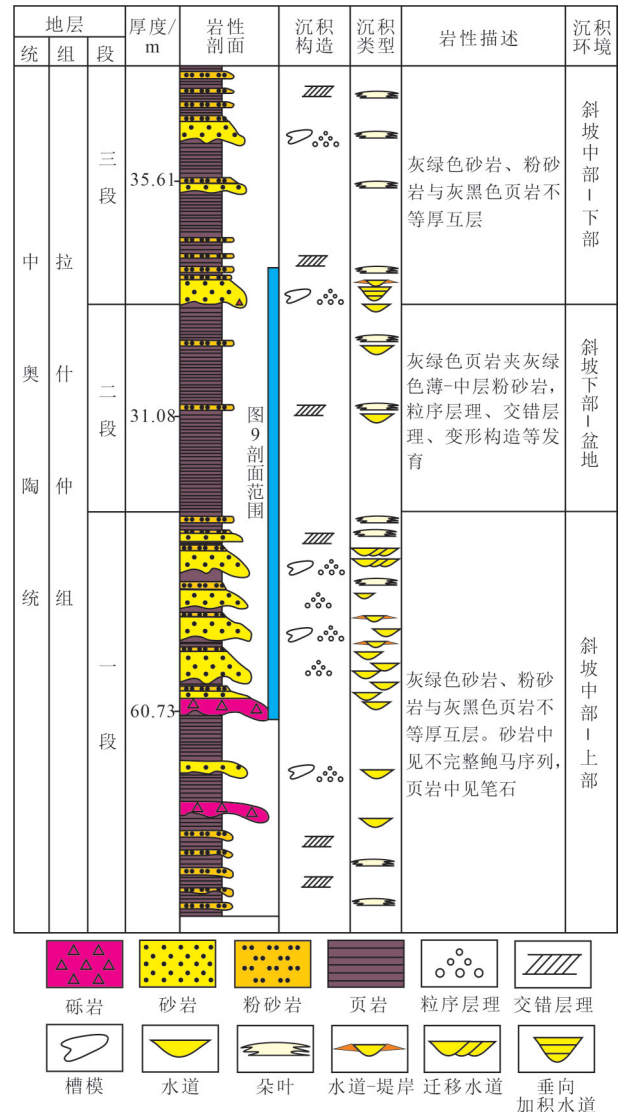


图2 鄂尔多斯盆地西缘拉什仲组岩性及沉积环境^[18-20]

Fig. 2 Composite stratigraphic column showing the lithology and sedimentary environment of Lashizhong Formation at the western margin of Ordos Basin^[18-20]

部,单层厚度17.0~112.0 cm,宽度2.4~21.0 m。岩性为砂岩,向两侧逐渐过渡为粉砂岩,形态为“U”形。以粒序层理最为常见,构成不完整的鲍马序列(T_a ,

表1 鄂尔多斯盆地西缘岩相特征

Table 1 Lithofacies of the western margin of Ordos Basin

序号	岩相	沉积构造	古生物	鲍马序列	沉积单元解释
1	笔石页岩相	水平层理	笔石、腕足、海百合和三叶虫等	—	原地沉积
2	透镜状块状层理砾屑灰岩相	块状层理、侵蚀面	腹足、腕足、海百合和三叶虫等	T_a	复合水道
3	透镜状粒序层理砂岩相	粒序层理、平行层理、侵蚀面、槽模	介壳	T_a, T_{ab}, T_{abc}	复合水道
4	透镜状平行层理砂岩相	平行层理、侵蚀面	介壳	T_{abc}, T_{bcd}	迁移水道
5	透镜状平行层理砂岩-粉砂岩相	平行层理、侵蚀面、见槽模	介壳、三叶虫等	T_{ab}	垂向加积水道
6	透镜状交错层理砂岩-粉砂岩相	交错层理、侵蚀面、槽模	介壳	T_{ab}, T_{abc}, T_{bc}	分支水道
7	楔状小型交错层理粉砂岩相	小型交错层理、平行层理	介壳	T_{ab}, T_{abc}, T_{bc}	堤岸
8	层状粒序层理砂岩相	粒序层理、平行层理	介壳	T_{ab}, T_{abc}	近端朵叶

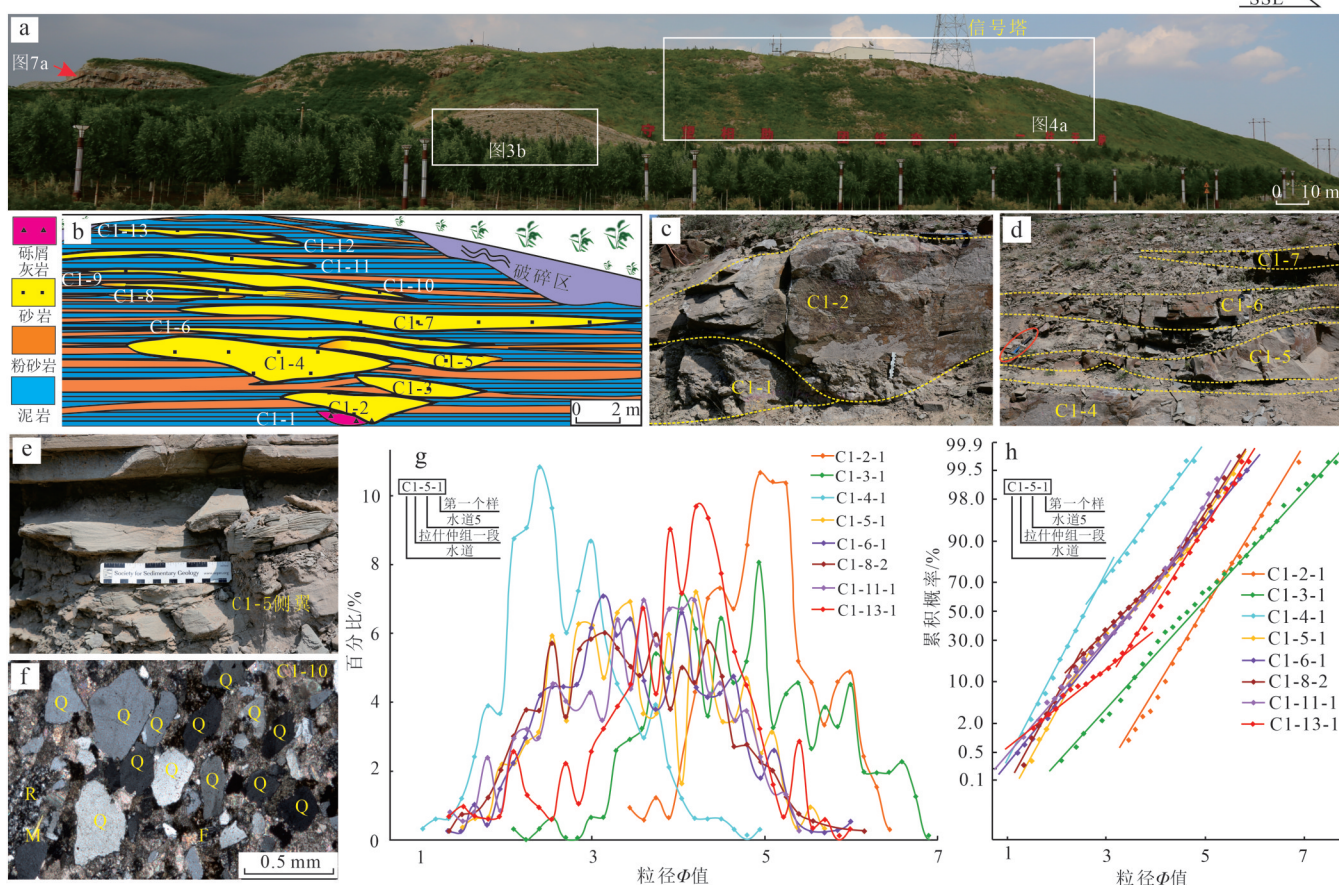


图3 鄂尔多斯盆地西缘复合水道沉积特征

Fig. 3 Characteristics of complex channel deposits at the western margin of Ordos Basin

a, b. 复合水道宏观特征; c, d. 次级水道及叠置关系, 黄色虚线为水道边界; e. 堤岸沉积; f. 镜下特征, 正交光; g, h. 粒度特征
Q. 石英; F. 长石; R. 岩屑; M. 云母

T_{ab} , T_{abc})。颗粒以石英为主, 含少量长石及岩屑, 棱角-次棱角状, 平均粒径 Φ 值 2.64 ~ 4.98, 标准偏差 (δ) 0.65 ~ 1.14 (一般 0.65 ~ 0.95), 分选较好-中等, 偏度 (SK) 值 -0.13 ~ 0.04, 峰度 (KG) 值 0.78 ~ 2.66, 概率累积曲线为一段式-两段式, 以一段式为主 (图 3f-h)。

2.1.4 透镜状平行层理砂岩相

透镜状平行层理砂岩相主要发育在拉什仲组一段中、上部, 单层厚度 60 ~ 162 cm。以平行层理最为发育, 局部水道底部见槽模, 中、上部见变形层理, 岩性为砂岩, 呈透镜状, 发育槽模、平行层理、交错层理及变形层理, 底部见侵蚀面, 组成鲍马序列 T_{abc} 和 T_{bcd} (图 4)。颗粒以石英为主, 棱角-次棱角状, 镜下常见由粗变细的正粒序, 水道的中、上部见介壳碎屑, 略具顺层分布特征 (图 4c)。平均粒径 Φ 值 3.23 ~ 4.48, δ 值 0.67 ~ 0.96 (分选中等-较好), SK 值 -0.03 ~ 0.13, KG 值处于 0.86 ~ 1.39, 概率累积曲线为一段式 (图 4d, e)。

2.1.5 透镜状平行层理砂岩-粉砂岩相

透镜状平行层理砂岩-粉砂岩相发育在拉什仲组三段下部, 外形为“U”形 (图 5), 厚度 90 cm, 宽度 1.3 m。岩性为砂岩及粉砂岩, 平行层理发育, 中、下部见槽模, 以鲍马序列 T_{ab} 常见 (图 5b)。颗粒以石英为主, 见少量的长石、岩屑及生屑, 棱角-次棱角状, 平均粒径 Φ 值 3.70 ~ 4.29, δ 值 0.62 ~ 0.74, 分选较好, SK 值 -0.02 ~ 0, KG 值分布于 0.10 ~ 1.08, 概率累积曲线以一段式为主 (图 5d-f)。

2.1.6 透镜状交错层理砂岩-粉砂岩相

透镜状交错层理砂岩-粉砂岩相在拉什仲组三段中、上部发育, 外形为“U”形, 单层厚度 23.0 ~ 73.0 cm, 宽度 6.9 ~ 12.3 m, 岩性为砂岩及粉砂岩, 槽模、交错层理、平行层理常见, 构成鲍马序列 T_{ab} , T_{abc} 和 T_{bc} (图 6)。颗粒以石英为主, 棱角-次棱角状, 平均粒径 Φ 值 3.77 ~ 4.36 (图 6c), δ 值 0.64 ~

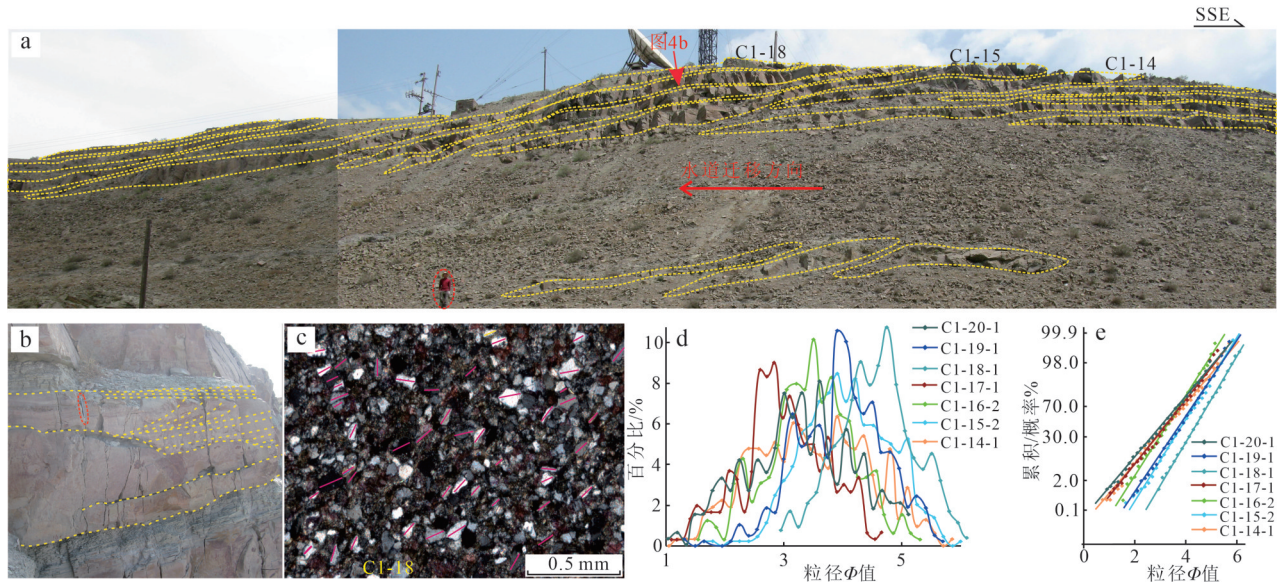


图4 鄂尔多斯盆地西缘迁移水道沉积特征

Fig. 4 Characteristics of migration channels at the western margin of Ordos Basin

a. 迁移水道特征, NNW 向迁移, 黄色虚线为水道边界; b. 局部见次级水道, 黄色虚线为水道边界;
c. 镜下特征, 正交光; d, e. 粒度特征, 样品号图例同图3

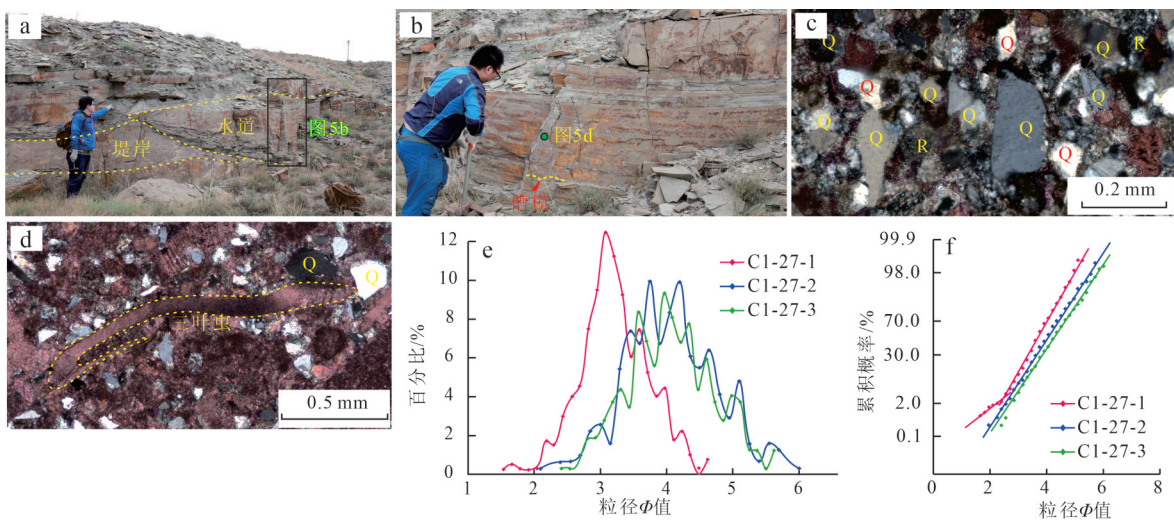


图5 鄂尔多斯盆地西缘层状充填垂向加积水道沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of vertical aggradation channels with layered fill at the western margin of Ordos Basin

a, b. 垂向加积水道; c. 层状充填, 正交光; d. 镜下特征, 正交光; e, f. 粒度特征, 样品号图例同图3

Q. 石英; R. 岩屑

0.84(分选中等-较好), SK值0.01~0.18, KG值0.94~1.52, 概率累积曲线一段式最为常见, 少量两段式(图6d, e)。

2.1.7 楔状小型交错层理粉砂岩相

楔状小型交错层理粉砂岩相岩性以粉砂岩为主, 主要分布在透镜状砂体两侧, 与岩相3—岩相6伴生, 外形为楔状, 发育小型交错层理、平行层理及变形构造, 常见鲍马序列 T_{ab} , T_{abc} 和 T_{bc} (图3e, 图5a, 图6a)。

2.1.8 层状粒序层理砂岩相

层状粒序层理砂岩相在拉什仲组一段及三段顶部发育, 单层厚度24~100 cm。岩性为砂岩夹薄层泥岩及粉砂岩, 局部见小水道, 整体为层状。粒序层理、平行层理及交错层理较为常见, 构成不完整的鲍马序列 T_{ab} 和 T_{abc} (图7)。颗粒以石英为主, 局部见由粗变细的正递变, 长条形颗粒略具顺层分布特征, 棱角-次棱角状(图7c, d), 平均粒径 Φ 值为3.36~4.35, δ 值在0.56~

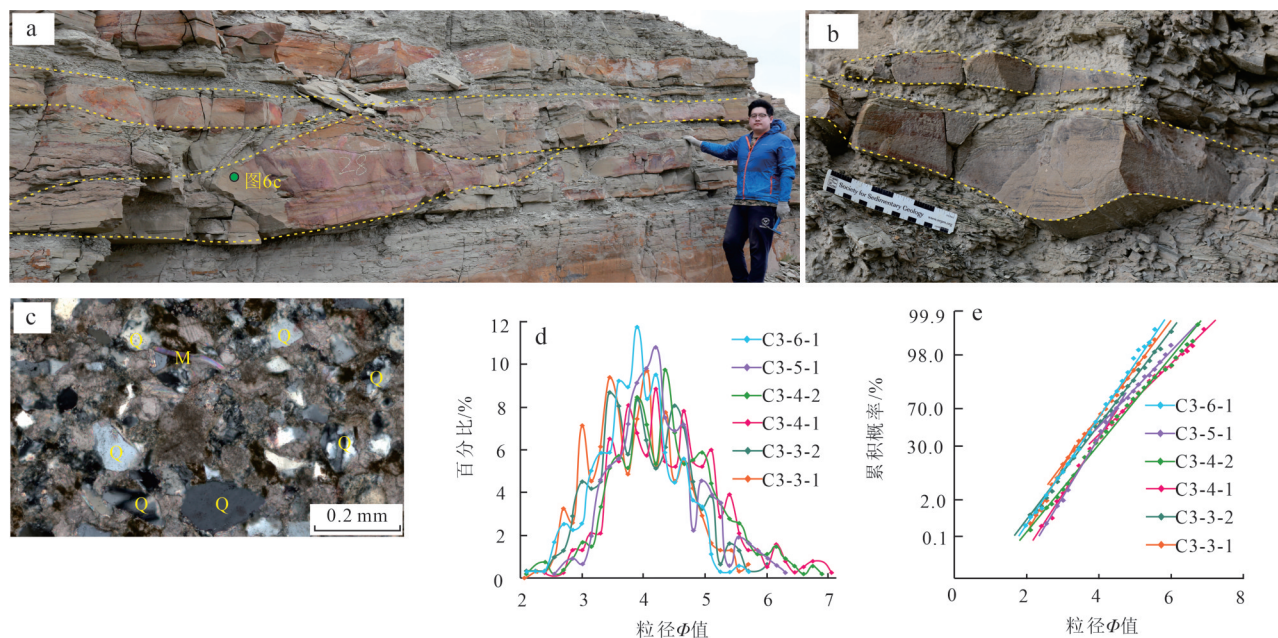


图6 鄂尔多斯盆地西缘分支水道沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of distributary channels at the western margin of Ordos Basin

a, b. 分支水道, 黄色虚线为水道边界; c. 镜下特征, Q 为石英, M 为云母, 正交光; d, e. 粒度特征, 样品号图例同图3

0.86, 分选中等—较好, SK 值分布于 $-0.01 \sim 0.25$, KG 值 $0.84 \sim 1.10$, 概率累积曲线以一段式为主, 少量二段及三段式(图7e, f)。

总体而言, 岩相2—岩相8含浅水生屑, 沉积环境为深水(岩相1), 不完整鲍马序列常见, 概率累积曲线多为一段式, 反映快速搬运及堆积, 为重力流沉积而成。其中, 岩相2为碎屑流沉积, 岩相3—岩相8以浊流沉积为主。

2.2 重力流沉积单元划分及特征

本文将研究区的重力流沉积单元划分为水道和朵叶。其中, 水道进一步分为复合水道(大型孤立)、迁移水道、分支水道、层状充填加积水道及小水道; 朵叶可进一步分为近端及远端朵叶。主要依据如下: ①露头资料, 能较完整地鉴别水道形成、结构及砂体叠置关系; ②上述沉积单元能满足当今地球物理(地震资料)

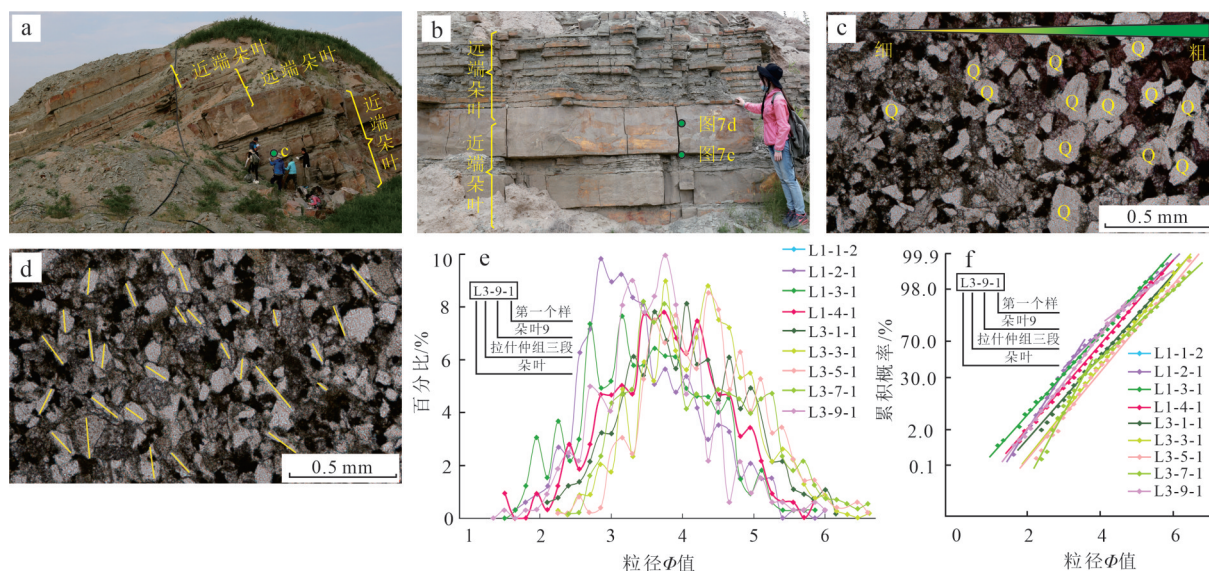


图7 鄂尔多斯盆地西缘朵叶沉积特征

Fig. 7 Sedimentary characteristics of lobes at the western margin of Ordos Basin

a, b. 近端及远端朵叶; c. 镜下特征, Q 为石英, 正交光; d. 镜下特征, 黄色实线为长颗粒展布, 正交光; e, f. 粒度特征

及露头研究需求;③尽管目前国内外对水道划分方案比较系统且成熟,但是划分相对较粗,不能很好地满足深水油气勘探的需求,如半限制型的水道类型很多,包括迁移型水道、垂向加积水道和无序迁移水道,其形成机理及储层分布规律有所不同,而且半限制及非限制型水道在野外及地震研究中不能很好识别;④基于形态及叠置关系的沉积单元划分,既可满足其形成机理的研究需求,又可为油气勘探提供指导。

复合水道以侵蚀为主,堤岸不发育,为限制型;迁移水道及垂向加积水道堤岸发育,侵蚀-沉积常见,多为半限制型;分支水道及小水道堤岸发育,沉积作用占主导,为非限制型。近端朵叶次级水道发育,整体为层状,砂/泥比高,而远端朵叶则与之相反。

2.2.1 复合水道

复合水道在拉什仲组一段中、下部,由13条水道构成,总厚度754 cm,整体为“U”形,底部发育岩相2,向上为岩相3(图3)。复合水道内部见多个水道透镜体,水道相互迁移叠置,但主要在水道内部,迁移幅度较小,水道外部以层状的粉砂岩及泥岩为主,堤岸沉积不发育。岩相2(水道C1-1)厚度41 cm,宽7.2 m(图3c)。岩相3(水道C1-2至水道C1-13)为复合水道主体,底部发育侵蚀面,厚度17~112 cm,宽度2.4~121.0 m。岩性为砂岩,向两侧逐渐过渡为粉砂岩,含砂率15.0%~95.7%(图3a—e)。

2.2.2 迁移水道

迁移水道主要发育在拉什仲组一段中、上部,岩相4发育。水道C1-14至水道C1-20构成迁移水道侧积体,整体具有向北北西迁移的特征(图4),厚度60~167 cm,含砂率58.3%~90.9%。砂岩多呈透镜状,向两侧逐渐过渡为平行层理及小型交错层理细砂及粉砂岩,局部见次级水道(图4b)。

2.2.3 垂向加积水道

本类型水道发育在拉什仲组三段中、下部,外形为“U”形,两侧发育楔状的堤岸沉积,以岩相5为主,内部由16个砂岩及粉砂岩组成的正递变旋回,层状充填为主,厚度90 cm,宽度1.3 m,含砂率90%(图5a,b)。下伏为两期复合水道(岩相2),生屑丰富,以海百合、腕足、三叶虫等为主(图5c—f)。

2.2.4 分支水道

重力流分支水道在拉什仲组三段中部发育,多为

“U”形,水道切割-叠置频繁,无明显的规律,岩相6极为发育,两侧堤岸发育(岩相7),厚度23~73 cm,宽度9.3~12.3 m,含砂率65.5%~90.0%(图6a)。另外,在拉什仲组一段中部泥岩段中还见少量的小型水道,厚度15~25 cm,宽度0.5~0.6 m,可能为孤立的小水道,因其规模小,本次对其不做详细研究(图6b)。

2.2.5 朵叶

朵叶主要发育在拉什仲组一段及三段上部,整体呈砂泥互层,以层状分布为主,厚度稳定,界面多平直,多由岩相8构成。根据砂岩厚度及砂泥互层程度可进一步划分为远端和近端朵叶(图7a,b)。其中,近端朵叶以砂岩夹薄层泥岩及粉砂岩为主,局部见小水道,砂岩单层厚度24~170 cm,一般50~100 cm,含砂率52.6%~80.6%。远端朵叶为薄层砂岩及泥岩互层,砂岩单层厚度1~6 cm,含砂率10%~62%。因远端朵叶砂岩厚度小,含砂率相对较低本次不做重点分析。

3 沉积演化及模式

因拉什仲组一段及三段重力流沉积类型及特征不同,本研究分别对两段重力流沉积厚度、平均粒径、标准偏差、偏度及孔隙度等参数相关性进行了分析。结果表明,研究区重力流水道-朵叶体系粒径-(单层砂体)厚度、粒径-标准偏差、粒径-偏度、粒径-孔隙度、标准偏差-孔隙度及孔隙度-渗透率等具有较好的相关性(图8)。

3.1 复合水道形成演化

复合水道主要发育在拉什仲组一段中部及三段底部,以拉什仲组一段最为典型(水道C1-1至水道C1-13)。从下至上,水道砂岩厚度、平均粒径及标准偏差整体呈现3个粗-细旋回(图9),主要有以下4个方面特征:①复合水道总体呈现3个下粗上细旋回。水道C1-1至水道C1-3构成第一个旋回,以底部砾屑灰岩为特征;水道C1-4至水道C1-8构成第二个旋回,水道规模在本旋回规模最大,水道砂最为发育,水道C1-4最厚(112 cm);水道C1-9至水道C1-13构成第三个旋回,水道规模逐渐减小,泥岩含量逐渐增加。②第一、第二个旋回概率累积曲线总体呈现一段式,向上逐渐出现两段式。③中、上部水道底部概率累积曲线以一段式为主,上部见两段式。

研究区复合水道的形成过程与重力流的发育及演化密切相关。复合水道的发育过程总体可以划分为3

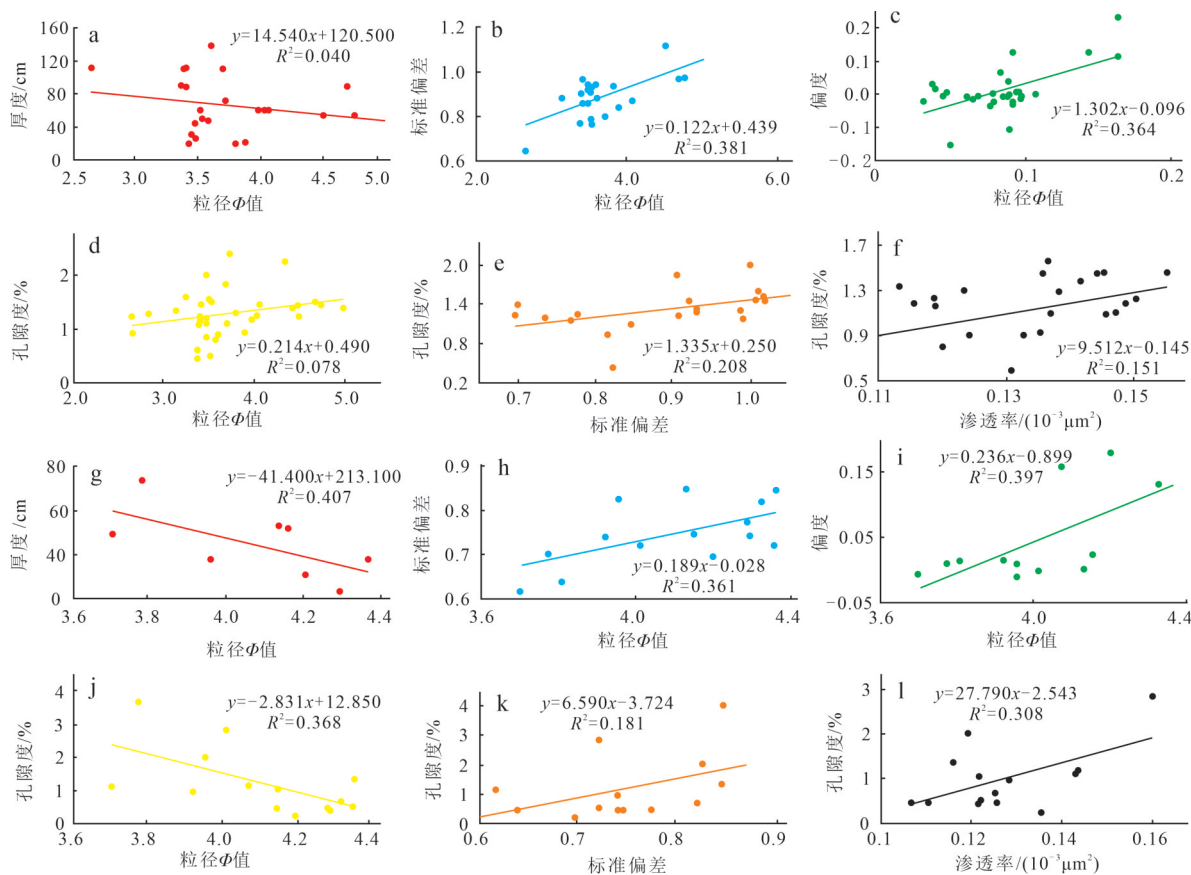


图8 鄂尔多斯盆地西缘水道及朵叶沉积参数交会图

Fig. 8 Cross correlation showing the sedimentary parameters of channels and lobes at the western margin of Ordos Basin

a—f. 拉什仲组一段; g—l. 拉什仲组二段

个阶段,即青年期、壮年期及衰亡期。重力流爆发初期,能量高、侵蚀作用强,形成水道雏形(水道C1-1至水道C1-3),碎屑流沉积构成水道轴部沉积;随后,重力流能量持续加强,复合水道内部次级水道(水道—堤岸)发育(水道C1-4至水道C1-10),规模大,以砂质沉积为主,浊流活跃,向两侧逐渐变细,水道两侧发育溢流沉积的堤岸;当浊流能量逐渐减弱时,水道规模逐渐减小,含砂率减小,以薄层砂泥互层及泥岩夹砂岩为主,整体进入衰亡期(水道C1-11至水道C1-13)。进入重力流末期及间歇期后,随着水道充满或废弃,总体呈现6 m厚的泥岩,中部夹薄层的细砂—粉砂岩透镜体(图4a下部)。

3.2 迁移水道形成演化

国内外对迁移水道的形成机理研究较多,主要有两种观点:一是重力流自身环流作用而成^[21-23],二是等深流与重力流共同作用形成^[24-26]。其中,重力流自身环流形成的迁移水道弯曲度较高。在黑海深水水道已经观察到了浊流的次生环流^[21];同时,物理及数值模拟也证明,浊流在水道内部运动过程中会因自身产生类似曲流河的环流而形成侧积体^[22-23]。

3.3 垂向加积水道形成演化

层状充填的垂向加积水道在国内外公开报道中极为少见。研究区垂向加积水道内部16个沉积轮回单厚度从下至上逐渐减小,砂岩含量降低,粉砂岩含量逐渐增加,平均粒径向上逐渐变细;同时,在中、下部见少量槽模,上部界面平直,总体反映水道为浊流能量逐渐衰减的充填过程,其相对能量弱于复合水道及迁移水道。

3.4 复合水道—迁移水道—垂向加积水道—分支水道—朵叶形成演化

研究区重力流沉积单元与重力流性质和能量密切相关。早期重力流能量高,侵蚀能力强,以碎屑流及浊流为主,发育复合水道;随着重力流能量降低,浊流活跃,依次发育迁移水道、垂向加积水道、分支水道及朵叶。主要依据如下。

1) 拉什仲组一段和三段重力流沉积单元的演化规律具有相似性。底部发育水道轴部沉积(砾屑灰岩),向上发育不同类型的水道,顶部为朵叶。但是,从

岩性组合及含量特征来看,沉积环境从中-上斜坡(一段)、斜坡下部-深海盆地(二段)向中-下斜坡(三段)演化。拉什仲组一段的粗粒沉积含量最大,三段次之,二段最低。可以推测拉什仲组一段复合水道发育的重力流能量及规模明显高于迁移水道,朵叶最低;拉什仲组三段中复合水道重力流能量最高,垂向加积水道次之,分支水道第三,朵叶最低(图2)。

2) 不同类型水道及朵叶的规模及沉积组合具有明显差异性。复合水道总体为“U”“V”形,规模大,底部发育明显的大型侵蚀面,水道两侧堤岸不发育,仅在水道内部次级水道两侧发育细砂-粉砂质堤岸沉积,表明碎屑流及浊流能量最高。迁移水道为“U”形,透镜体构成侧积体,以砂岩为主,两侧发育细砂质(粉砂较少)堤岸,堤岸规模大,与复合水道相比粒度相对较细,分选较好,表明浊流能量相对较高,但低于复合水道。垂向加积水道以“U”形为主,内部以层状细砂-粉砂充填为主,两翼砂质堤岸发育,但粒度、厚度及规模低于迁移水道,而分选相对好于迁移水道,反映重力流能量侵蚀-沉积作用较弱(低于迁移水道)。分支水道两侧细砂-粉砂质堤岸极为发育,但是水道厚度、粒径、含砂率及堤岸规模明显低于垂向加积水道。综合认为分支水道浊流能量弱于垂向加积水道(图9)。

3) 水道-朵叶沉积特征具有特殊性。拉什仲组一段顶部近端朵叶以层状砂岩夹薄层粉砂及泥岩为主,砂岩单层厚度及含砂率等低于下伏的迁移水道,其形成的浊流能量低于迁移水道。拉什仲组三段近端朵叶发育在分支水道上部,与分支水道相比含砂率较高、粒径略细,分选略好,推测近端朵叶形成的浊流能量相对弱于分支水道。然而,本段近端朵叶的砂岩单层厚度、累计厚度等都高于下伏分支水道,主要原因为:①未将远端朵叶纳入计算;②分支水道与朵叶形成机理不同。分支水道总体为非限制-半限制型无序迁移,为低能浊流多期侵蚀-充填而成。近端朵叶内部次级水道规模远小于分支水道,以片流多期持续沉积为主(图9)。

3.5 沉积模式

研究区重力流沉积整体以水道-朵叶体系为主,重力流沉积单元、充填特征与重力流的性质及能量密切相关。纵向上,早期碎屑流及浊流活跃,复合水道开始发育。随后浊流占主导,迁移水道逐渐形成。

当浊流继续衰减时,垂向加积水道、分支水道及朵叶依次发育。从平面上看,在重力流沿斜坡向下搬运过程中,中-上斜坡以碎屑流及浊流为主,侵蚀作用强,沉积作用较弱,发育复合水道。中-下斜坡浊流更

为活跃,侵蚀能力减弱,沉积作用逐渐加强,迁移水道、垂向加积水道、分支水道及朵叶依次发育(图10)。值得注意的是受地形、物源供给等影响,同一地区可能不会发育上述全部沉积单元,但可能出现多期的不同类型水道-朵叶演化旋回。

4 储层分布

研究区岩石较为致密,钙质及硅质胶结常见,水道及朵叶孔隙度及渗透率较低,但不影响水道与朵叶的储集性能对比研究。

青年期、壮年期及衰亡期所发育复合水道储层差异明显;青年期水道孔隙度最低(1.1%),壮年期水道孔隙度最好(0.9%~2.1%),衰亡期水道孔隙度较低(0.4%~0.8%)。综合砂体厚度、含砂率、孔隙度及渗透率分布特征,壮年期复合水道储集性能最好。因水道向两侧逐渐过渡为粉砂岩,厚度相应减薄,推测水道内中部储层储集能力优于水道两侧。

迁移水道侧积体以砂岩夹薄层泥岩及粉砂岩为主,单层砂岩厚度较大(60~167 cm)、含砂率较高(58.3%~90.9%),孔隙度0.9%~2.4%,储集能力较强。垂向加积水道以砂岩夹薄层粉砂岩为主,孔隙度(1.1%~2.8%)及渗透率($0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)高于迁移水道,综合考虑其规模及砂岩累计厚度等,垂向加积水道储层较好,但弱于迁移水道。分支水道储层质量中等(孔隙度0.7%~3.7%),水道中部储层优于两端。近端朵叶储层质量较好(孔隙度0.5%~4.1%)(图9)。

就孔隙度及渗透率而言,复合水道高于迁移水道,垂向加积水道第三。拉什仲组三段分支水道及朵叶孔隙度和渗透率多变,可能与其规模有关,分支水道孔隙度及渗透率略低于朵叶(图9)。最后,重力流水道-朵叶沉积储层勘探潜力还需要综合考虑砂体规模、物质组分及成岩作用等多种因素综合考虑。

5 结论

1) 提出了一套适合野外露头及地球物理研究的重力流沉积单元划分方案。结合形态、砂体叠置样式等特征,将重力流沉积单元划分为复合水道、迁移水道、垂向加积水道、分支水道、近端及远端朵叶沉积单元。

2) 分析了重力流性质及能量变化与沉积单元形成演化规律的关系。重力流爆发初期,碎屑流及浊流

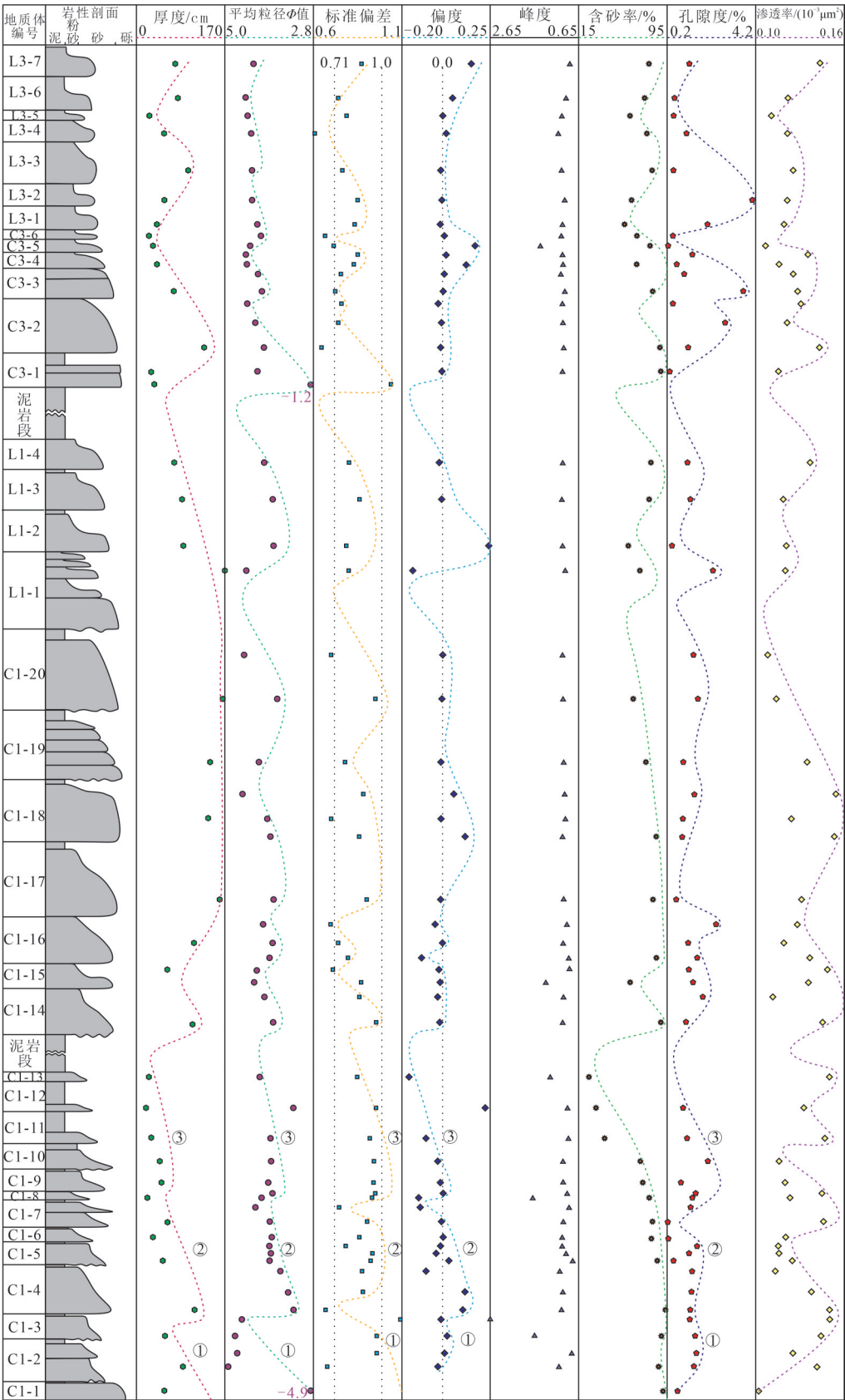


图9 鄂尔多斯盆地西缘水道及朵叶沉积垂向分布特征

Fig. 9 Vertical distribution of the channels and lobes deposited at the western margin of Ordos Basin
(地质体编号除“泥岩段”外均为水道名称;①,②和③为复合水道期次。)

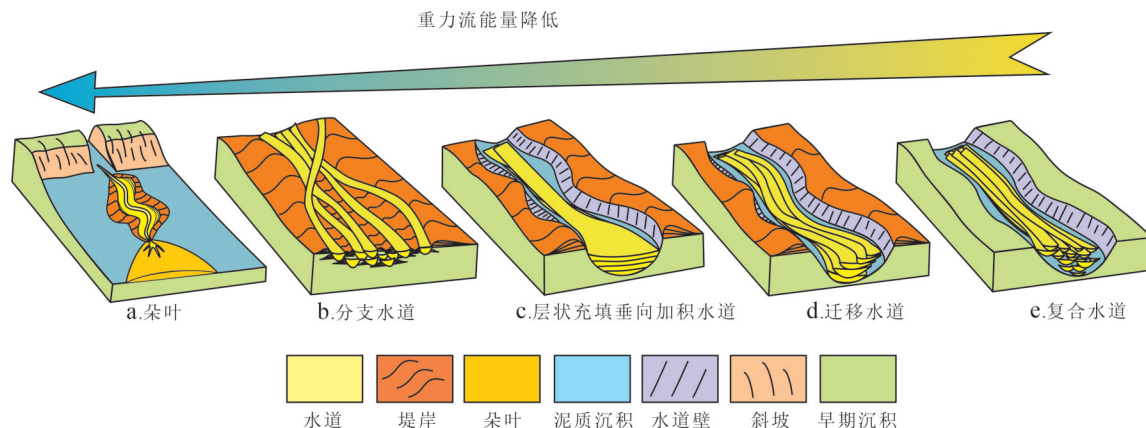


图10 鄂尔多斯盆地西缘水道-朵叶体系沉积模式

Fig. 10 Depositional model of the channel-lobe system at the western margin of Ordos Basin

活跃,能量高,侵蚀作用强,复合水道发育;当重力流能量逐渐降低时,浊流占主导,发育迁移水道;随着浊流能量的进一步衰减,先后发育垂向加积水道、分支水道-朵叶。其中,复合水道根据重力流的爆发、增强及衰减可相应划分为青年期、壮年期及衰亡期。

3) 揭示了水道-朵叶体系的储层分布规律。壮年期复合水道、迁移水道、垂向加积水道储层质量好,水道中部优于水道两端,朵叶储层质量略高于分支水道。

致谢:参加野外考察的还有研究生苏帅亦、郝烜、张灿、王继欣,在此表示感谢。衷心感谢编辑老师及审稿专家就稿件提出了一系列有益的意见和建议。

参 考 文 献

- [1] 搜狐网. 全球十大新发现油气田出炉! 中国上榜![EB/OL], (2019-11-13) [2019-11-14]. https://www.sohu.com/a/35366-3687_99897355.
- [2] 王陆新, 潘继平, 杨丽丽. 全球深水油气勘探发现现状与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(2): 31-37.
Wang Luxin, Pan Jiping, Yang Lili. Present conditions and prospect of global deepwater oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(2): 31-37.
- [3] 孙辉, 范国章, 邵大力, 等. 深水局限制型水道复合体沉积特征及其对储层性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1440-1450.
Sun Hui, Fan Guozhang, Shao Dali, et al. Depositional characteristics of locally restricted channel complex in deep water and its influence on reservoir properties: A case study of the Eocene series, Rovuma Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1440-1450.
- [4] Clark J D, Pickering K T. Architectural elements and growth patterns of submarine channels: Application to hydrocarbon exploration[J]. AAPG, 1996, 80(2): 194-221.
- [5] 李华, 王英民, 徐强, 等. 莺歌海盆地中新统黄流组一段重力流沉积特征[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 279-285.
Li Hua, Wang Yingmin, Xu Qiang, et al. Sedimentary characteristics of gravity flow deposits in the first member of Miocene Huangliu Formation, Yinggehai Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3): 279-285.
- [6] 李洪楠. 断陷湖盆陡坡带重力流沉积特征及模式[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 12-18.
Li Hongnan. Sedimentary characteristics and models of gravity flow in steep slope zone of faulted lacustrine basin [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(4): 12-18.
- [7] 阮昱, 王超, 代超. 华庆地区长6₃深水重力流沉积及油气地质意义[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 1-7.
Ruan Yu, Wang Chao, Dai Chao. Deep water gravity flow sedimentation of Chang 6₃ in Huaqing area and its petroleum geological significance [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(2): 1-7.
- [8] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩充填物特征及对储层发育的影响[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1098-1111.
Chen Zhaobing, Zhao Zhenyu, Fu Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1098-1111.
- [9] 惠威, 薛宇泽, 白晓路, 等. 致密砂岩储层微观孔隙结构对可动流体赋存特征的影响[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 87-92.
Hui Wei, Xue Yuze, Bai Xiaolu, et al. Influence of micro-pore structure on the movable fluid occurrence in tight sandstone reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 87-92.
- [10] Hubbaed S, Ruig M, Graham S. Confined channel-levee complex development in an elongate depo-center: Deep-water Tertiary Strata of the Austrian Molasse Basin [J]. Marine and Petroleum Geology.

- logy, 2009, 26: 85–112.
- [11] Li Pan, Kneller B, Thompson P, et al. Architectural and facies organisation of slope channel fills: Upper Cretaceous Rosario Formation, Baja California, Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 632–649.
- [12] Postma G, Lang J, Hoyal D C, Fedele J J, et al. Reconstruction of bedform dynamics controlled by supercritical flow in the channel-lobe transition zone of a deep-water delta (Sant Llorenç del Munt, north-east Spain Eocene) [J]. Sedimentology, 2021, 68 (4), 1674–1697.
- [13] 周新平, 何青, 刘江艳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段深水碎屑流沉积特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42 (5): 1063–1077.
- Zhou Xinping, He Qing, Liu Jiangyan, et al. Features and origin of deep-water debris flow deposits in the Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1063–1077.
- [14] 李智勇, 徐云泽, 邓静, 等. 陆相湖泊深水砂质碎屑流与浊流的微观沉积特征及区分方法——以鄂尔多斯盆地延长组长7段为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 415–423.
- Li Zhiyong, Xu Yunze, Deng Jing, et al. Microscale sedimentary characteristics and distinguishing methods for deep-water sandy debris flow and turbidity flow in continental lakes: A case study of seventh member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 415–423.
- [15] 岳绍飞, 张辉, 覃利娟, 等. 莺歌海盆地东方区黄流组一段砂质碎屑流沉积模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(4): 9–18.
- Yue Shaofei, Zhang Hui, Qin Lijuan, et al. Sandy debris-flow sedimentary mode in Member 1 of Huangliu Formation in Dongfang area of Yinggehai Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(4): 9–18.
- [16] Motanated K, Tice M M. Hydraulic evolution of high-density turbidity currents from the Brushy Canyon Formation, Eddy County, New Mexico inferred by comparison to settling and sorting experiments[J]. Sedimentary Geology, 2016, 337: 69–80.
- [17] Paull C, Talling P J, Maier K L, et al. Powerful turbidity currents driven by dense basal layers[J]. Nature Communications, 2018, 9: 4114.
- [18] 肖彬, 何幼斌, 罗进雄, 等. 内蒙古桌子山中奥陶统拉什仲组深水水道沉积[J]. 地质论评, 2014, 60 (2): 321–331.
- Xiao Bin, He Youbin, Luo Jingxiong, et al. Submarine channel complex deposits of the Middle Ordovician Lashizhong Formation in Zhuozishan area, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 2014, 60 (2): 321–331.
- [19] 李华, 何幼斌, 冯斌, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组深水水道沉积类型及演化[J]. 地球科学, 2018, 43(6): 2149–2159.
- Li Hua, He Youbin, Feng Bin, et al. Type and evolution of deep-water channel deposits of Ordovician Lashizhong Formation in West margin of Ordos Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(6): 2149–2159.
- [20] 吴兴宁, 孙六一, 于州, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶纪岩相古地理特征[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 87–96.
- Wu Xingning, Sun Liuyi, Yu Zhou, et al. Lithofacies paleogeography of Ordovician in western Ordos Basin [J]. 2015, 27(6): 87–96.
- [21] Parsons D, Peakall J, Aksu A, et al. Gravity-driven flow in a submarine channel bend: Direct field evidence of helical flow reversal [J]. Geology, 2010, 38(12): 1063–1066.
- [22] Keevil G, Peakall J, Best J, et al. Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel[J]. Marine Geology, 2006, 229(44): 241–257.
- [23] 黄璐, 张家年, 吴昊雨, 等. 弯曲海底峡谷中浊流的三维流动及沉积的初步研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1001–1007.
- Huang Lu, Zhang Jianian, Wu Haoyu, et al. Preliminary study of three-dimensional flow and deposition of turbidity currents in sinuous submarine canyons[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1001–1007.
- [24] Hernandez-Molina F J, Llave E, Stow D. Contiental slope contourites[M]. Amsterdam: Elsevier, 2008: 379–408.
- [25] Li Hua, Wang Yingmin, Zhu Weilin, et al. Seismic characteristics and processes of the Plio-Quaternary unidirectionally migrating channels and contourites in the northern slope of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 370–380.
- [26] Zhu M, Graham S, Pang X, et al. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 307–319.

(编辑 梁 慧)