

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

李 华^{1,2,3}, 何幼斌^{1,2,3}

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;

3. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100)

摘要:为研究鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组改造砂沉积特征,运用沉积学相关理论和方法,基于露头、古水流恢复及地球化学等资料对研究区,重点开展了改造砂沉积特征、形成过程、主控因素及油气勘探意义研究。认为改造砂在研究区较为发育,其影响因素包括物源、相对海平面、地形及构造运动。结果表明,平凉组岩性单一,沉积构造丰富,可分为3种典型岩相。岩相1为水平层理泥岩相,代表深水原地沉积;岩相2为交错层理砂岩相,反映浊流沉积;岩相3为双向交错层理砂岩相,为改造砂沉积。改造砂典型沉积特征为:①颗粒分选、磨圆相对较好,存在多个粒径分布总体;②具有两个古水流优势方向,一个为大致沿斜坡向下,代表浊流运动方向,另一个大致平行斜坡,为等深流运动方向;③生物扰动发育;④概率累计曲线1~3段式,兼具重力流和牵引流特征;⑤下粗上细正粒序,顶部见侵蚀特征;⑥B,Cr,V等微量元素相对富集。研究区等深流向西大致平行斜坡运动过程中,可对南东向沿斜坡向下运动的浊流沉积进行筛选、搬运、改造及再沉积,进而提高改造砂的储集性能,其与粗粒等深流沉积可作为良好的油气储集体。同时,细粒的深水原地沉积和等深流沉积是较好的烃源岩。改造砂、等深流沉积及原地沉积组合出现可形成理想的生储盖组合而成为潜在的油气储集场所。

关键词:浊流;等深流;改造砂;平凉组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and significance of reworked sands in the Ordovician Pingliang Formation, southwestern margin of Ordos Basin

Li Hua^{1,2,3}, He Youbin^{1,2,3}

[1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China;

3. Research Center of Sedimentary Basins, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China]

Abstract: The principles of sedimentology were used to study the sedimentary characteristics, forming process, dictating factors and petroleum exploration significances of reworked sands in the Ordovician Pingliang Formation at southwestern margin of Ordos Basin based on outcrops, restoration of paleocurrent and geochemistry data. The result shows that reworked sands are relatively well developed in the study area and they are mainly affected by factors including provenance, relative sea level, topography and tectonic activities. The Pingliang Formation in the study area is unitary in lithology and various in sedimentary structures and can be divided into three typical facies. Facies 1 of mudstone with horizontal bedding represents deep water autochthonous sediments. Facies 2 of sandstone with cross bedding indicates turbidity sediments. Facies 3 of sandstone with bimodal cross bedding points to reworked sands. The typical characteristics of reworked sands are as follows: 1) relatively well-sorted and -rounded grains of bimodal grain-size distribution; 2) two predominant directions of paleocurrent, with one going down along slopes, indicating the direction of turbidity current movement, and the other running parallel to slopes, showing the direction of contour current flowing; 3) obvious

收稿日期:2017-04-27; 修订日期:2018-01-05。

第一作者简介:李华(1984—),男,博士、讲师,沉积学。E-mail: Hli@yangtzeu.edu.cn。

通讯作者简介:何幼斌(1964—),男,教授,沉积学。E-mail: heyoubin@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472096, 41502101); 湖北省创新群体基金项目(2015CFA024); 长江青年基金项目(2015cqn26); 湖北省教育厅科学研究计划中青年人才项目(Q20171308)。

bioturbation;4) one to tripartite divisions of cumulative frequency curves, showing both gravity and tractive current features;5) upward-fining normal grading with erosive top;and 6) relatively abundant in trace elements (B,Cr,V, and etc). While flowing westward roughly parallel with the slope,the contour current in the study area could have helped to improve reservoir properties of the reworked sands through winnowing,transporting,reworking and re-deposition of the southeastward running turbidity sediments down the slope. Both turbidity sediments and coarse-grained contour current sediments could serve as good oil and gas reservoirs. At the same time,fine-grained deep water autochthonous sediments and contour current sediments could be quality source rocks. It is very likely for the reworked sands,contour current sediments and autochthonous sediments to combine with one another to form ideal hydrocarbon generation-accumulation-sealing assemblages in the study area.

Key words: turbidity, contour current, reworked sand, Pingliang Formation, Ordovician, Erdos Basin

深水区水动力复杂多样,重力流、等深流、内波及内潮汐等较为活跃^[1]。其中,重力流是受重力流作用顺斜坡向下运动的密度流^[2]。等深流是由地球自转而形成的温盐循环底流,其大致平行海底等深线运动^[3-4]。而内波是在海洋内部密度不均匀水层间发生的一种波动。它存在于两个不同密度的水层的界面上,或存在于具有密度梯度的水层之内^[4]。在地质时期内,同时同地存在的重力流、等深流及内波等不同性质的水动力势必相互影响,进而产生不同类型的交互作用沉积^[5-7],而等深流改造(早期)重力流沉积是交互作用沉积的主要类型。在实际研究工作中,也常称为“改造砂”或“底流改造砂”(reworked sand, reworked turbidites)^[5-10]。

目前,在墨西哥湾^[1,8-9]、南海北部莺歌海盆地^[11]及珠江口盆地^[10]、巴西 Campos 盆地^[12]与西非^[13]等均有改造砂研究报道。我国南海^[10-11]、鄂尔多斯盆地^[14-15]与扬子地台周缘^[16]等地区广泛发育重力流和等深流沉积,但是在改造砂研究方面极少。鉴于改造砂物性较好,可成为优质的油气储层;同时,地层记录中的改造砂蕴含重力流及等深流等古水流信息,对古地理、古气候及古海洋等研究有重要作用,使得其逐渐成为全球深水沉积研究的重点和热点之一。1993年,Shanmugam 等^[8-9]基于岩心资料,认为改造砂以细砂及粉砂为主,成熟度较高,发育不同类型及规模的牵引流沉积构造,厚度相对较薄。Gong 等^[10]在2016年对南海北部珠江口盆地改造砂沉积研究具有类似的特征。然而,对改造砂沉积特征相对较全的是 Stow 和 Faugères,其在产状、构造、结构、成分及沉积序列方面与等深流沉积进行了对比^[17]。但与深水沉积中的重力流和等深流沉积研究相比,改造砂相关研究无论是在成果还是研究力度方面都极为薄弱,存在鉴别标志不完善、形成过程及机理研究尚待深入等问题。鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组沉积时期,重力流、等深流及内波、内潮汐活跃,可形成海底扇、等深流沉积及

内潮汐沉积等^[18-20],这为改造砂研究提供了理想场所。本研究基于鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区露头资料,利用薄片、古生物、古水流恢复及地球化学测试等资料研究改造砂沉积特征,探讨其形成过程,分析其油气勘探意义。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国西部华北克拉通,地理位置处于陕西、甘肃、宁夏、及内蒙古部分地区,盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,为中国第二大沉积盆地,也是典型的多旋回叠合含油气盆地^[21-23]。盆地西南缘位于祁连山造山带、秦岭-大别山造山带与华北克拉通连接地区,北部为鄂尔多斯古陆,西部为西华山古陆、祁连山-秦岭海槽、祁连地块、北祁连造山带及阿拉善地块,南部为秦岭-大别山造山带,东部富平地区为富平裂堑,整体呈“L”形^[18]。陇县地区位于秦岭-祁连海槽东北部,且在“L”形拐点处(图1)。

鄂尔多斯盆地面积较大,经历了多次大构造事件。盆地南缘奥陶系从下至上可分为麻川组、水泉岭组、三道沟组、平凉组及背锅山组^[21]。奥陶系沉积时期相对海平面整体上升^[21]。陇县地区平凉组厚度约 500 m,整体为深灰-灰黑色泥岩夹薄层粉砂岩、砂岩、石灰岩及凝灰岩。根据岩性及沉积构造可大致划分为三段(表1)^[19]。本研究以陇县地区平凉组第三段为研究对象,并对其部分露头进行了详细测量。下部(LX1)22.4 m,多为深灰色泥岩与砂岩互层。从下至上,砂岩含量减少,泥岩含量增加。沉积构造发育,常见波痕、交错层理、槽模,另见 *Helminthorhapha*(蠕形迹)等生物扰动构造。中部被覆盖,约 20 m。上部(LX2)48.7 m,岩性主要为深灰色泥岩及砂岩,发育板状、波状及透镜状层理、平行层理及双向交错层理,生物扰动构造发育(图2)。

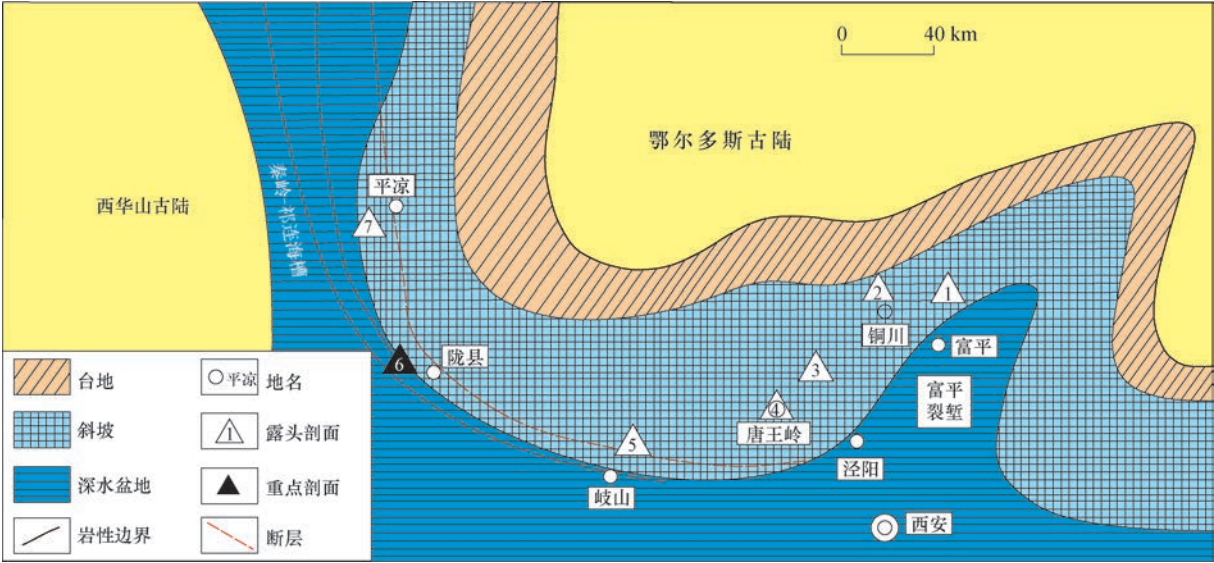


图 1 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区地理位置^[18]

Fig. 1 Diagram showing the location of Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin^[18]

表 1 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区奥陶系平凉组岩性特征^[19]

Table 1 Lithological characteristics of the Ordovician Pingliang Formation in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin^[19]

系	组	段	厚度/m	主要岩性特征
奥陶系	平凉组	背锅山组	439.49	浅灰色、灰白色块状泥—粉晶灰岩、藻灰岩、砾屑灰岩、生物屑灰岩、夹页岩及角砾岩。
		三	200.2	以灰绿、深灰、灰黑色砂质、粉砂质页岩、泥页岩为主，夹深灰色薄层砾屑骨屑团粒灰岩、粉—细晶灰岩、砂岩、粉砂岩薄层，上部夹青灰色灰化晶屑凝灰岩，中部部分被掩盖；页岩中含笔石化石和水平遗迹化石，可见黄铁矿晶体，发育水平层理，砂岩、粉砂岩及部分颗粒灰岩中发育交错层理、平行层理、波状层理等
		二	131.88	深灰、灰绿、灰色砂质粉砂质页岩夹灰岩、粉细晶砾屑骨屑针团粒灰岩、泥质粉砂岩，与灰绿色、浅灰绿色晶屑玻屑灰化层凝灰岩互层，下部页岩含笔石
		一	162.18	灰绿、灰色页岩、含粉砂质页岩、砂质页岩，中部夹浅灰色、灰色厚层粉—中晶砾屑灰岩，具微波状层理，含笔石
	峰峰组			浅灰色、灰色、深灰色厚层泥晶灰岩、泥晶颗粒灰岩、亮晶颗粒灰岩、白云质灰岩及白云岩

奥陶纪，北祁连造山带、秦岭—大别造山带与华北板块汇聚，形成板块边缘的沟—弧—盆体系，期间发育了3次大的海侵海退，整体呈海平面上升特征^[21-23]。鄂尔多斯盆地西南缘由被动大陆边缘转化为主动大陆边缘，发育沟、弧及弧后构造体系，火山活动、地震活跃^[24-25]。早奥陶世，盆地西南缘为水体深度较浅的广海陆架沉积环境。中奥陶世，盆地西南缘呈“L”形的边缘海，南部为末端变陡的继承性碳酸盐缓坡^[23]。从北向南大致为古陆、斜坡及深水海槽/盆地。晚奥陶世，加里东运动开始，构造活动强度增大，火山及地震等事件加剧，华北地块整体抬升，导致盆地部分地层缺失^[24]。

2 沉积类型及特征

研究区平凉组岩性较为单一，以深灰色泥岩及灰

绿色砂岩为主，发育交错层理、槽模及双向交错层理等沉积构造，常见生物扰动构造。总体可分为3种典型岩相，主要特征如下。

2.1 水平层理泥岩相(岩相1)

2.1.1 岩相特征

深灰色泥岩厚度最薄不到10 mm，最厚可达30 cm，一般为10~20 cm，侧向延伸稳定(图3a, b)，含丰富的笔石^[19]。沉积构造以水平层理为主，生物扰动常见(图3c, d)，如蠕形迹(*Helminthorhapse*) (图3c)。另见少量的黄铁矿^[19]。

2.1.2 地球化学特征

岩相1在剖面上部及下部都极为发育(图2)。11个泥岩样品地球化学测试结果如下：B, V, Cr,

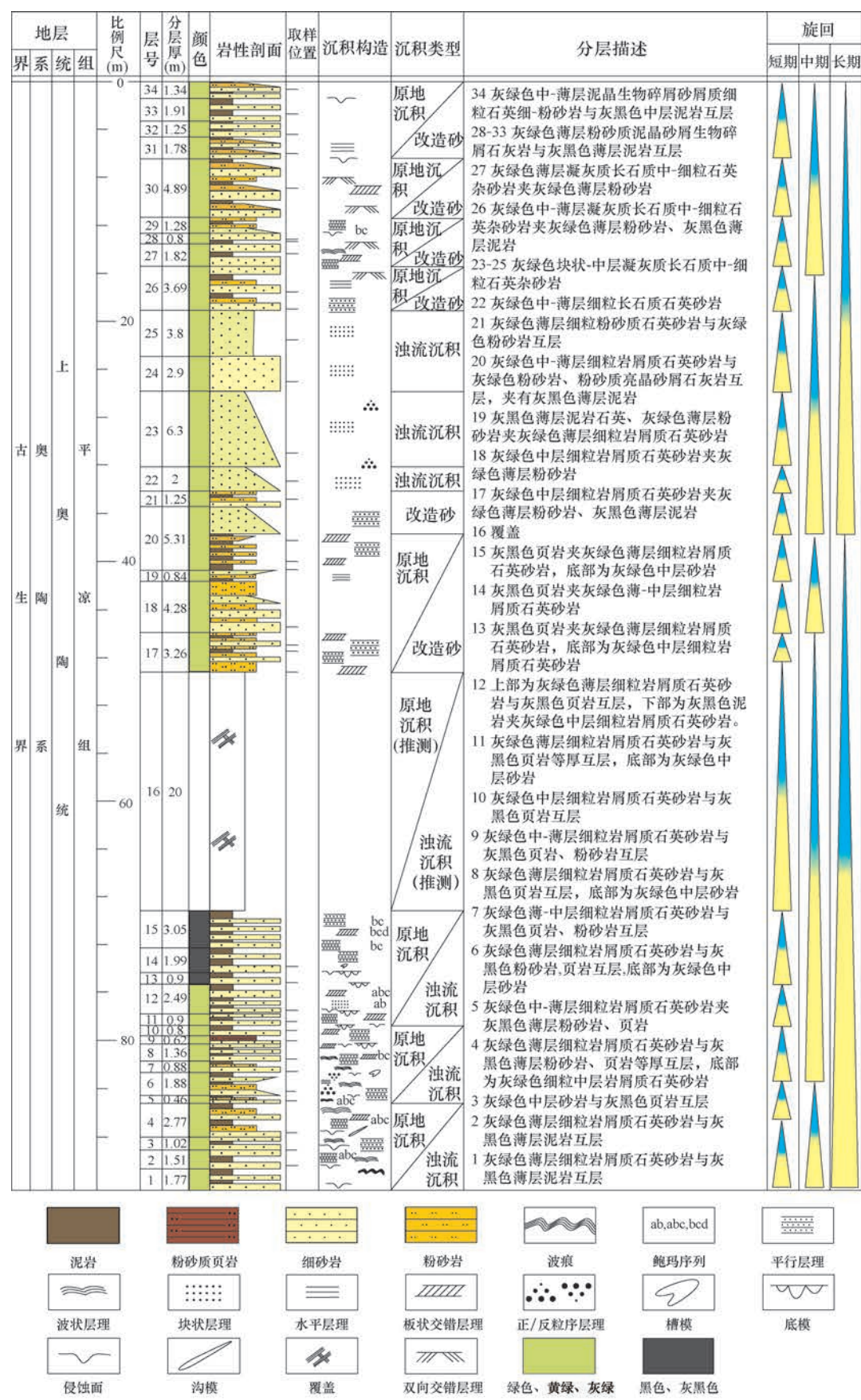


图2 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区平凉组三段岩性柱状图

Fig. 2 Lithological column of the third member of the Pingliang Formation in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

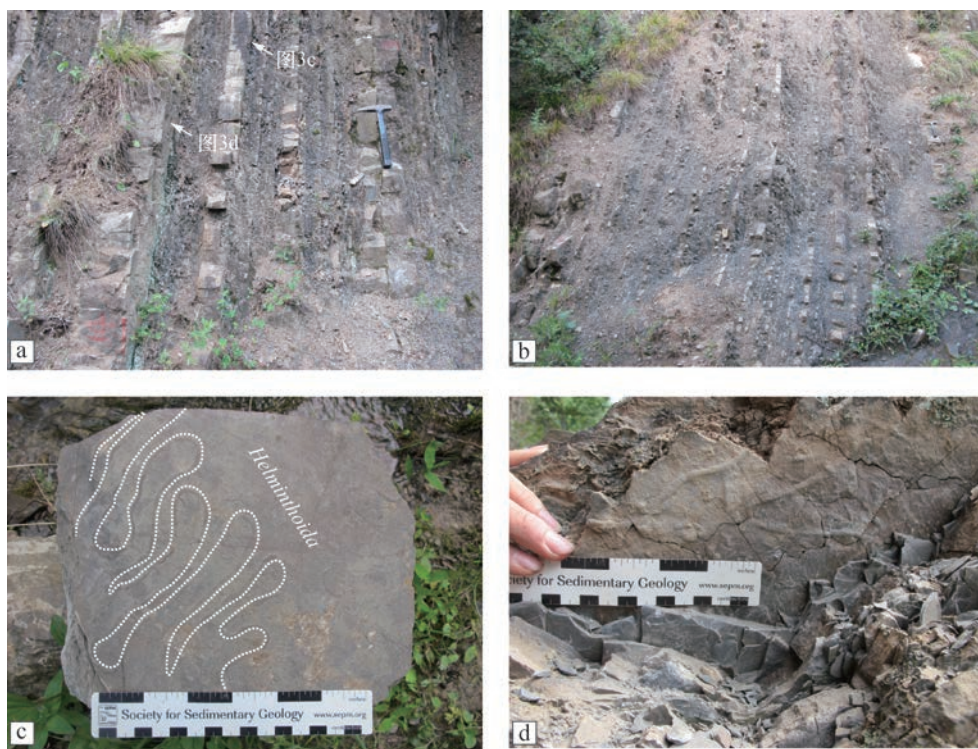


图 3 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区岩相 1 沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of lithological facies 1 in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

a. 深灰色泥岩与砂岩互层, 砂岩底部见遗迹化石及生物扰动; b. 深灰色泥岩夹砂岩; c. 遗迹化石, 砂岩底部; d. 生物扰动, 砂岩底部

Ni, Cu, Ga, Sr, Th 及 U 含量最大值分别为 143, 91.3, 99.6, 40.7, 57.9, 24.6, 436, 22.9 及 4.25 $\mu\text{g/g}$, 最小值为 9.7, 6.96, 8.56, 6.38, 6.92, 2.44, 64.9, 3.66 及 0.865 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 97.3, 60.8, 65.6, 30.4, 38.9, 17.8, 148, 17.1 及 2.965 $\mu\text{g/g}$ 。Sr/Cu, V/(V + Ni), Ce/La 及 Rb/Sr 最大值分别为 33.67, 0.771 2, 2.584 7 及 3.109, 最小值为 1.341, 0.379 1, 1.626 8 及 0.042, 平均值为 7.187, 0.646 4, 1.860 1 及 1.645。在 B - V, B - Cr, B - Ga, B - Sr, Ga - Cu, V - Ni, U - Th, Sr/Cu - Ce/La 及 V/(V + Ni) - Rb/Sr 等交汇图上具有明显的规律, 与岩相 2 和岩相 3 明显不同(图 4)。

2.1.3 成因

综合颜色、古生物、沉积构造及地化等特征推测岩相 1 为深水原地沉积。①深灰色代表沉积环境多为还原环境。②大量笔石反映滞留还原环境^[19]。③遗迹化石 *Helminthorhaphe* 等多发育在深水沉积环境。④水平层理发育代表沉积环境水动力较弱。⑤泥质沉积物多为垂直降落为主。⑥由于泥岩具有较强的吸附性, 其在深水安静环境中可吸附 B, V, Cr, Ga 等元素, 进而导致其相对富集^[26]。同时, B, V, Cr, U, Mo, Ni, Co 及 V/(V + Ni) 等对氧化还原环境极为敏感, 其含量(比值)与还原强度呈正相关^[27-28]。另外, B 元素还与盐

度密切相关; 盐度越高, B 含量越高^[29]。而 Ce/La 比值大于 2 反映沉积环境为厌氧环境, 比值在 1.5 ~ 1.8 为贫氧环境^[30]。岩相 1 岩性为深水泥岩, 其吸附作用可导致微量元素富集(图 4a—g)。Ce/La 为 1.626 8 ~ 2.584 7, 高 V/(V + Ni) 指示沉积环境为强还原环境(图 4h, i)。因此, 泥岩的吸附作用及强还原环境共同作用导致原地沉积微量元素含量高。

2.2 交错层理砂岩相(岩相 2)

2.2.1 岩相特征

岩相 2 岩性为灰绿色砂岩, 界面多平直, 多为层状, 侧向分布稳定, 单层厚度为 1 ~ 39 cm, 一般为 5 ~ 15 cm(图 5a—c)。古生物化石少见。颗粒多为石英, 以钙质胶结为主(图 5d)。颗粒粒径 Φ 值为 1.8 ~ 3.5, 以 2.48 ~ 2.96 最为常见(图 5e), 分选系数为 0.56 ~ 0.79, 棱角状—次棱角状(图 5d)。累计百分比曲线斜率较陡, 概率累计曲线呈 1 段式(图 5f, g)。沉积构造丰富, 常见交错层理、平行层理、波痕、粒序层理、变形构造、沟模及槽模, 底部见侵蚀面(图 5a—c)。总体为下粗上细正序列(图 5a—c)。槽模指示古水流优势方向为 E, 而交错层理反应古水流方向为 SE。综合认为古水流优势方向为 SEE 向(图 6a)。

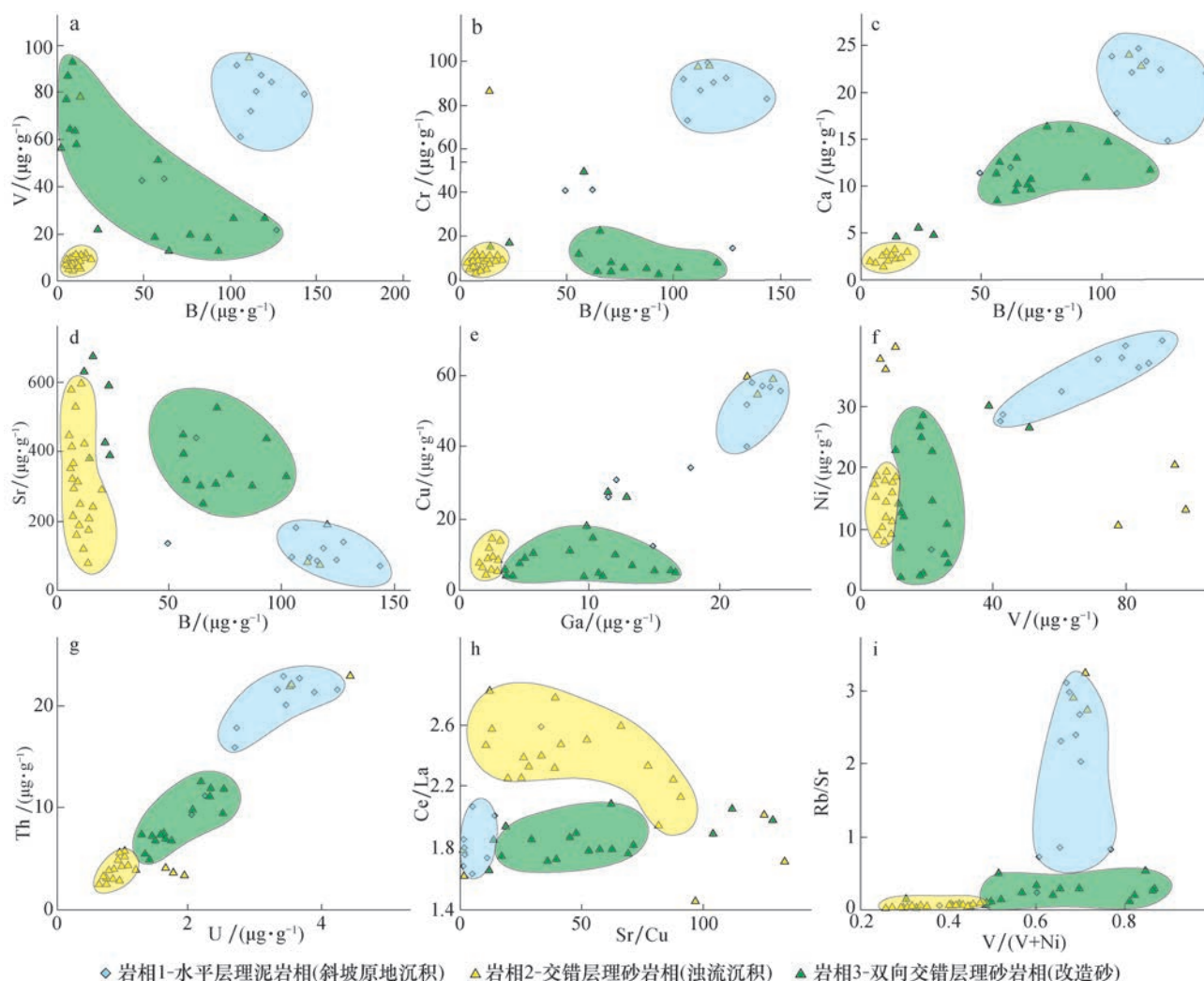


图4 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区岩相1,2,3 地球化学特征

Fig. 4 Geochemical characteristics of lithological facies 1 to 3 in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

2.2.2 地球化学特征

在该岩相24个样品地球化学测试结果表明: B, V, Cr, Ni, Cu, Ga, Sr, Th 及 U 含量最大值分别为 116, 98.2, 99, 39.7, 59.5, 24, 598, 23.1 及 4.44 $\mu\text{g/g}$, 最小值为 5.05, 4.48, 4.99, 8.07, 4.24, 1.5, 68.4, 2.47 及 0.639 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 18.5, 18, 18.6, 16.6, 13.6, 4.77, 303, 6.1 及 1.357 $\mu\text{g/g}$ 。Sr/Cu, V/(V + Ni), Ce/La 及 Rb/Sr 最大值分别为 133.1, 0.717 1, 2.820 8 和 3.246, 最小值为 1.244, 0.258 6, 1.447 4, 0.01, 平均值为 51.15, 0.409 6, 2.216 9, 0.397。在 B - V, B - Cr, B - Ga, B - Sr, Ga - Cu, V - Ni, U - Th, Sr/Cu - Ce/La 及 V/(V + Ni) - Rb/Sr 等交汇图上与岩相1明显不同(图4)。

2.2.3 成因

综合岩性、沉积构造、沉积序列和地球化学等资

料,认为岩相2为浊流沉积。①岩性为砂岩,颗粒以石英为主,其分选较差,棱角-次棱角状,说明沉积物为异地搬运,且搬运距离较短,快速堆积;②古生物及生物扰动不发育,说明沉积环境较为动荡,不适合生物生存;③颗粒粒度多在 2.48 ~ 2.96 ϕ , 指示物源相对单一;④概率累计曲线呈 1 段式,反应沉积物存以悬移搬运为主,其水动力性质为重力流;⑤槽模及沟模等多出现在重力流沉积之中;⑥岩性及沉积构造组成不完整的鲍玛序列,如 Tabed, Tabc, Ta, 为浊流沉积典型特征;⑦槽模及交错层理反应古水流方向为 SEE 向,单向流体且大致沿斜坡向下,在深水沉积环境中,其可能为浊流;⑧由于浊流沉积物源主要来自东北部鄂尔多斯古陆及浅水区,沉积物形成环境为氧化环境,微量元素富集程度整体比岩相1(原地沉积)低,同时岩相2主要为砂岩,其吸附性能明显低于岩相1的泥岩,进而导致微量元素含量较低。

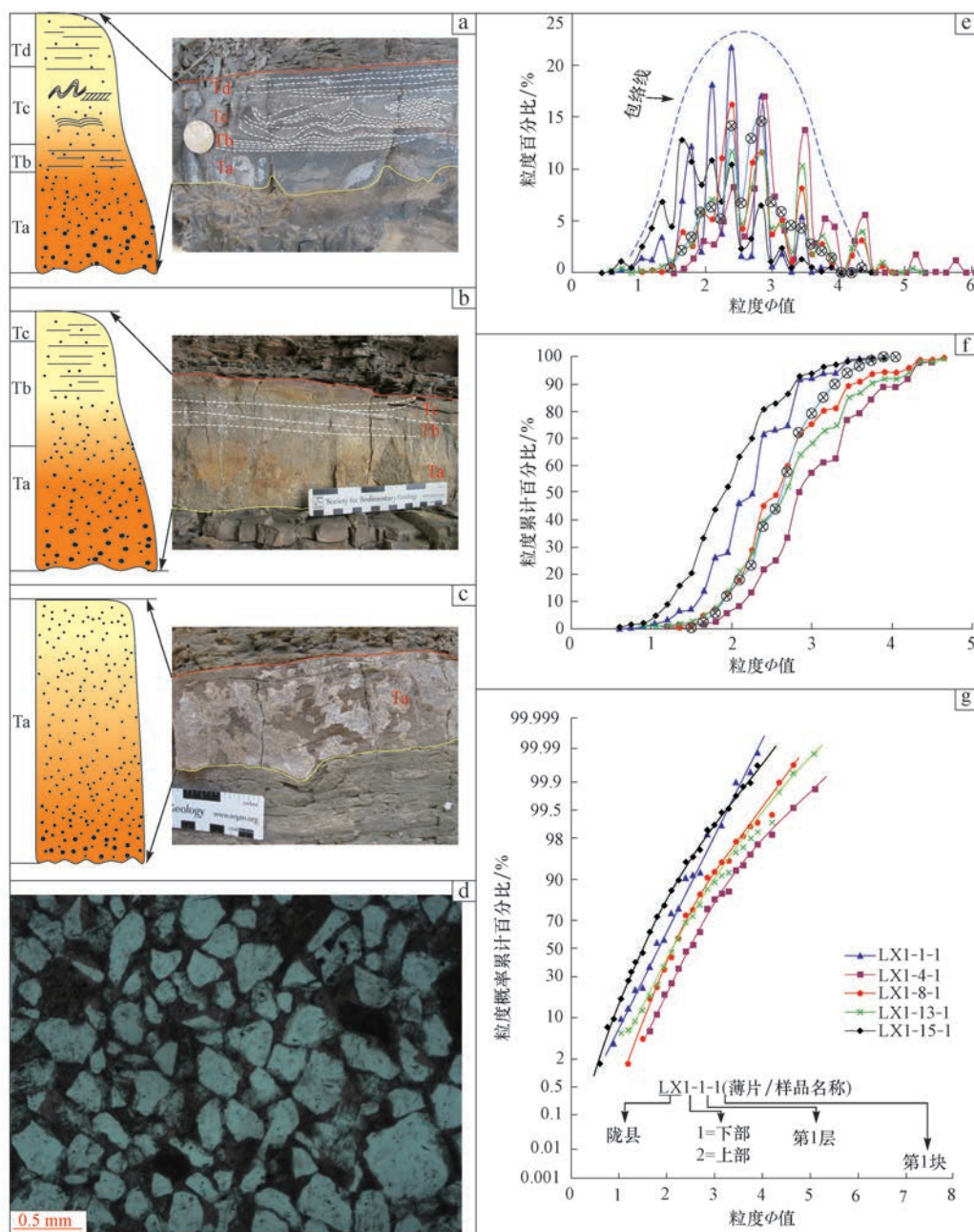


图5 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区岩相2沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of lithological facies 2 in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

a—c. 灰色薄层—中层砂岩,发育槽模、平行层理及变形构造等,组成不完整的鲍玛序列;d. 颗粒主要为石英,钙质胶结,分选较差,棱角状—次棱角状;e—g. 颗粒粒径较为集中,百分比累计曲线斜率较陡,概率累计曲线为1段式

2.3 双向交错层理砂岩相(岩相3)

2.3.1 岩相特征

岩相3岩性主要为灰绿色中—薄层砂岩及粉砂岩,界面平直或波状,单层厚度5~50 cm,以15~25 cm为主(图7a, b)。沉积构造丰富,常见双向交错层理、单向交错层理、平行层理及波状层理等,生物扰动较为发

育(图7a—c)。颗粒以石英为主,另见少量粉屑及生屑,多为钙质胶结,部分为硅质胶结,粘土基质为2%~8%(图7d)。粉屑成分多为泥晶方解石,生屑主要为介形虫、海绵骨针及三叶虫碎屑。颗粒粒径 Φ 值呈现两个总体为2.1~3和4~5(图7e),分选系数为0.52~0.58,次棱角状—次圆状(图7d)。累计百分比曲线斜率有大有小(图7f),概率累计曲线1~3段,多为1段及2段式(图7g)。沉积序列多为下粗

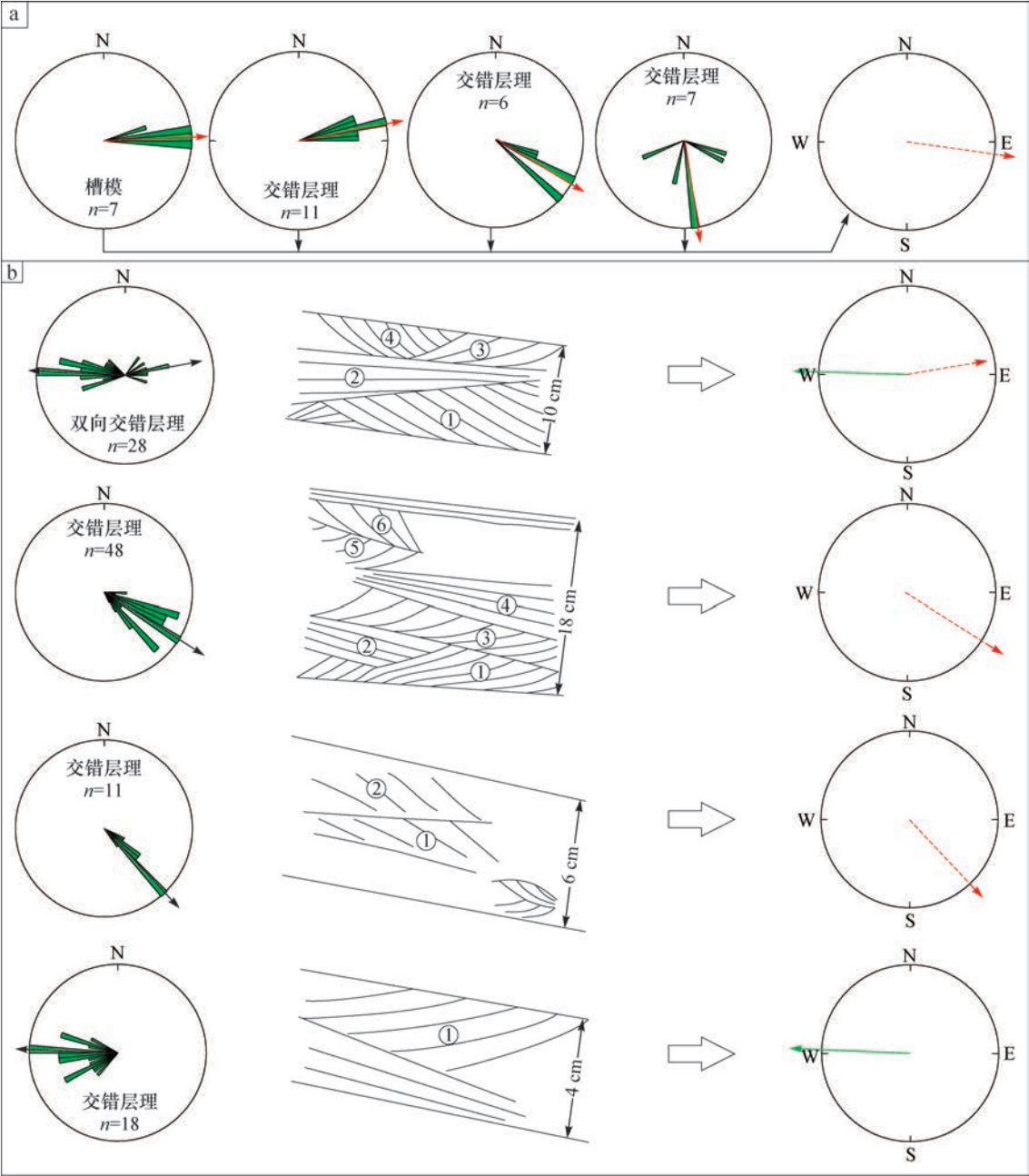


图 6 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区古水流特征

Fig. 6 Paleocurrent features of Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

a. 古水流优势方向为 E 向; b. 古水流具有两个优势方向, 分别为 W 和 SE 向

①, ②, ③, ④. 层系编号

上细正旋回。单向交错层理指示古水流方向为 W 和 SE 向,双向交错层理反应古水流方向为 W 及 NEE 向。综合分析,古水流方向大致为 W 和 SE 向(图 6b)。

2.3.2 地球化学特征

该岩相 20 个样品地球化学测试结果表明: B, V, Cr, Ni, Cu, Ga, Sr, Th 及 U 含量最大值分别为 120, 51.1, 50.4, 29.8, 27.3, 16.6, 676, 12.8 及 2.53 $\mu\text{g/g}$,

最小值为 7.44, 7.91, 3.63, 2.68, 3.69, 3.47, 192, 1.88 及 0.552 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 55.1, 19.9, 13, 15.8, 9.82, 9.47, 404, 7.16 及 1.579 $\mu\text{g/g}$ 。Sr/Cu, V/(V + Ni), Ce/La 及 Rb/Sr 最大值分别为 183.2, 0.868 3, 2.078 4, 0.557, 最小值为 12.16, 0.297 6, 1.457 3, 0.014, 平均值为 60.11, 0.576, 1.824, 0.176。在 B - V, B - Cr, B - Ga, B - Sr, Ga - Cu, V - Ni, U - Th, Sr/Cu - Ce/La 及 V/(V + Ni) - Rb/Sr 等交汇图上与岩相 1 及岩相 2 差异明显(图 4)。

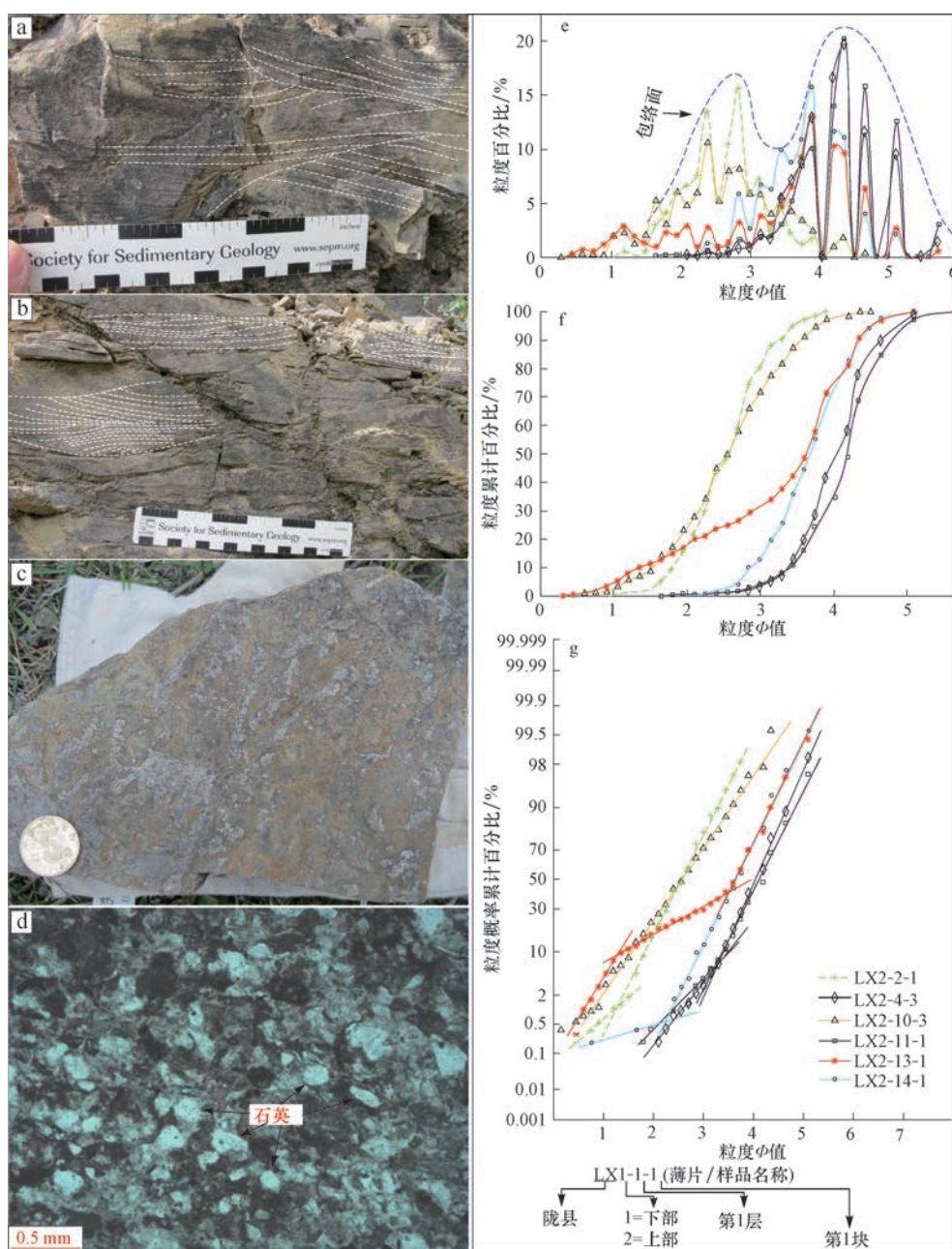


图7 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区改造砂沉积特征

Fig. 7 Sedimentary characteristics of reworked sands in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

a, b. 灰色中层石英,发育双向交错层理;c. 生物扰动,砂岩;d. 石英颗粒,分选较好,次棱角状-次圆状;e—g. 颗粒粒径两个总体,累计百分比曲线斜率大小不一,概率累计曲线1—3段,以见1段及2段式为主

2.3.3 成因

基于岩性、古生物及地球化学等特征,认为岩相3为等深流改造重力流沉积,即改造砂沉积。与岩相2(浊流沉积)相比,其典型特征较多。①颗粒主要为石英,见粉屑,粘土基质相对较多,既有钙质胶结,又有硅质胶结,其结构与浊流沉积明显不同。②古生物及生物扰动常见。介形虫在浅水及深水沉积环境中较为常见。海绵骨针在深水环境中较为发育。而三叶虫多为

浅水环境生物,其碎屑可能为重力流从浅水地区搬运至深水环境沉积而成。生物扰动发育说明沉积环境在某段地质时期内相对稳定,便于生物生长发育。③颗粒粒度有两个总体,反应可能具有多种搬运方式及沉积机制。④概率累计曲线以1段及2段式为主。1段式反应沉积物以悬浮搬运为主。2段式以推移及跳跃为主,多为牵引流搬运方式。⑤双向交错层理反应双向水流的存在,说明沉积环境中存在1种双向水流,或2种不同方向的水流。⑥沉积构造指示古水流方向为

W 及 SE 向。其中,SE 向大致沿斜坡向下,与重力流方向相同,代表浊流运动优势方向,与岩相 2 大致相同。而 W 向大致平行斜坡。由于研究区等深流活动极为活跃^[14],因此 W 向可能为等深流运动方向。⑦沉积序列多为下粗上细,与鲍玛序列有所不同的是,上部或顶部常见侵蚀面,反应早期沉积物受后期水流侵蚀改造程度较高。⑧岩相 3 岩石结构与岩相 2 相比,粘土基质较多,同时还夹有粉砂岩及泥岩,其具有较好的吸附性,可导致微量元素 B、V、Ni 等相对富集。其次,等深流在对浊流改造的过程中,一方面其自身可搬运深水原地的细粒沉积物进而产生沉积(颗粒粒径 Φ 值为 4~5),而形成微量元素相对富集现象(富集程度低于岩相 1 的原地沉积泥);另一方面,等深流改造作用通常会造成水团中含氧量的增加和盐度变化^[31]。含氧量相对变化,但程度远低于浅水环境,微量元素含量与岩相 2 相比较。而盐度的增加可促使微量元素 B 等富集。综上,改造砂微量元素 B 等富集程度总体小于岩相 1,而略高于岩相 2。

2.4 沉积演化

根据岩性及组合等特征,研究区平凉组从下至上,可分为 2 个长期旋回,5 个中期旋回及 17 个短期旋回(图 2)。各旋回从下至上,砂岩总体含量减少,泥岩及粉砂岩增多,总体为下粗上细沉积旋回。下部沉积构造多为粒序层理、单向交错层理、平行层理、波痕、槽模、沟模及水平层理,以岩相 1 及岩相 2 为主;而上部发育单向交错层理、双向交错层理、平行层理及生物扰动构造等,岩相 1 及岩相 3 相对发育。研究区平凉组沉积时期,相对海平面总体上升^[21],而岩性旋回特征与区域相对海平面升降规律大致吻合。在平凉组早期,由于相对海平面较低,深水原地沉积(岩相 1)及浊

流沉积(岩相 2)较为发育;而平凉组晚期相对海平面逐渐上升,浊流沉积规模减小,等深流作用逐渐显著,其可对早期浊流沉积进行改造,形成改造砂。而在各个次级岩性旋回中也较为类似,相对海平面较低时发育原地沉积和浊流沉积;相对海平面升高时,原地沉积和改造砂较为发育。

3 讨论

3.1 浊流沉积与改造砂沉积特征对比

研究区 3 种典型岩相分别代表深水原地沉积、浊流沉积及改造砂,其在岩性、结构、构造、沉积序列等方面明显不同(表 2)。其中,浊流沉积与改造砂的有效鉴别是开展地层记录中研究工作的前提和基础。改造砂在岩性、结构、粒度及古水流方向等特征与浊流沉积明显不同,这些特征可作为地层记录中改造砂的鉴别标志,其主要有以下 6 个方面:①结构明显不同,颗粒分选相对较好;粒径分布存在两个或多个总体;②概率累计曲线呈 1~3 段式,既有浊流沉积特征,又有牵引流沉积特征;③双向交错层理发育,古水流具有多个优势方向;④生物化石及生物扰动较为常见;⑤下粗上细正粒序沉积序列,顶部见侵蚀现象;⑥微量元素相对富集,其含量低于原地沉积而高于浊流沉积。

3.2 改造砂形成过程及主控因素

3.2.1 形成过程

1) 浊流及浊流沉积

岩相 2 中石英颗粒粒径 Φ 值集中在 2.48~2.96,分选较差,棱角状-次棱角状,概率累计曲线为 1 段

表 2 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区深水原地沉积、浊流沉积及改造沉积特征
Table 2 Sedimentary characteristics of deep water autochthonous, turbidity and reworked sediments in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

对比项目	原地沉积	浊流沉积	改造砂
岩性	泥岩	砂岩	砂岩、粉砂岩
结构	粘土、见少量粉砂	石英颗粒为主,分选差,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,分选中等-较好,钙质、硅质胶结,次棱角状-次圆状,粒径主要分布在两个区域
概率累计曲线	无	1 段	2~3 段,2 段为主
沉积构造	水平层理、遗迹化石	平行层理、波痕、交错层理、槽模及沟模的	双向交错层理、平行层理、透镜状层理
生物化石	笔石	少量生屑,多为介壳	介壳、少量三叶虫碎屑
沉积序列	无	下粗上细,鲍玛序列	下粗上细,上部见侵蚀
古水流	无	沿斜坡向下	大致平行斜坡
产状	层状	层状	层状
地化特征	微量元素富集	微量元素相对富集	微量元素含量较低

式,发育不完整的鲍玛序列(图5),说明浊流在沿斜坡向下快速运动过程中,沉积物快速搬运、堆积。陇县地区平凉组早期,浊流沉积占主导,其可为改造砂提供丰富的物质基础。

2) 等深流及等深流沉积

鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组沉积时期,等深流较为活跃,其从东向西大致平行斜坡运动^[20],这使得等深流改造浊流沉积成为可能。岩相3中,石英颗粒粒径 Φ 值主要有两个总体(2.1~3,4~5),分选系数0.52~0.58,次棱角状~次圆状;概率累计曲线1~3段式(图7),古水流方向为W和SE向(图6b)。其中,粒径 Φ 值2.1~3,SE向古水流(顺斜坡向下),概率累计曲线1段式等特征与岩相2类似,可能为早期浊流沉积。但颗粒分选及磨圆相对较好,说明可能存在等深流对早期浊流沉积的淘洗、搬运、再沉积作用。而颗粒粒径 Φ 值4~5,W向水流(大致平行斜坡),概率累计曲线2段式,其可能是等深流大致平行斜坡运动过程中,对细粒沉积物进行搬运及沉积作用而成。因此,岩相3包括了浊流沉积被改造残余部分和等深流搬运沉积,两者综合组成了等深流改造浊流沉积,即改造砂。

3) 改造砂形成过程

结合研究区沉积特征及类型大致推测改造砂形成过程主要经历3个阶段。浊流爆发初期,其在沿斜坡向下(SE向)运动过程中,能量高,形成大规模的浊流沉积。而等深流能量远小于浊流,其对浊流沉积改造作用不明显,基本可以忽略。此时,以浊流沉积为主。浊流爆发中后期,其能量逐渐降低,仍可形成大规模的浊流沉积。当等深流能量与浊流大致相当时,等深流可影响浊流沉积,进而形成狭义的浊流及等深流交互作用沉积。由于本研究不能有效对其进行识别及研究,在此不对其沉积特征及过程进行阐述。当浊流作用末期或间歇期时,能量极弱。相反,向西运动的等深流开始占主导,其长时间、持续作用可对早期的浊流沉积进行筛选、搬运及改造等作用,最终形成改造砂。

3.2.2 主控因素

研究区改造砂沉积规模直接取决于浊流和等深流相对能量的大小。而影响二者能量的间接因素相对较多,主要包括物源供给、相对海平面升降、地形及构造运动等。

1) 物源供给

物源供给决定沉积体规模及类型,其是浊流及等

深流沉积的物质保障。陇县地区浊流古水流方向大致为SEE,大致顺斜坡向下(图1)。研究区北部为鄂尔多斯古陆,古陆碎屑物质通过波浪、岸流及海流等作用从浅水区搬运至斜坡,进而发育浊流沉积。同时,也可作为等深流沉积提供物源供给。而无论是浊流沉积、深水原地沉积还是等深流沉积都可为改造砂提供物质来源。

2) 相对海平面升降

一般而言,浊流能量远高于等深流。相对海平面升降可间接影响浊流及等深流沉积等的规模。相对海平面较低,沉积物更容易运达斜坡,使得浊流沉积发育,该时期内浊流沉积规模远大于等深流沉积。同时,由于浊流具有较强的侵蚀破坏能力,其可破坏等深流沉积,导致浊流沉积发育。相反,相对海平面较高,沉积物运至斜坡难度增大,浊流沉积相对减少,等深流沉积增加。陇县地区奥陶系沉积时期,从早至晚相对海平面逐渐上升^[21],因此,早期相对海平面相对较低,浊流沉积发育。晚期相对海平面较高,浊流作用逐渐减弱,等深流活动占主导。此时,占主导作用的等深流可对早期浊流沉积进行改造,形成改造砂(图2)。

3) 地形

陇县地区奥陶系平凉组时期地形为“裂坡型”,地层厚度向西急剧增大,地形差异明显^[18]。其西北为鄂尔多斯古陆,西南为秦岭-祁连海槽,地形差异明显导致浊流沉积较为发育(图1)。另外,陇县地区位于秦岭-祁连海槽末端,其东南部为开阔环境,西南进入海槽(限制型环境),等深流从东向西运动过程中,在陇县地区从开阔环境进入限制性环境,将导致其能量局部增大,进而改造早期浊流沉积程度增大,可形成可观的改造砂。同时,研究区位于鄂尔多斯盆地西南缘“L”形拐点,局部地形变化也有可能等深流在运动过程中速度局部提高,进而有利改造砂的发育。

4) 构造运动

早奥陶世,盆地整体表现为被动大陆边缘特征。中奥陶世,鄂尔多斯洋盆向北俯冲形成弧后盆地,盆地西南缘以深水沉积的海槽及斜坡环境为主^[24-25]。由于构造活动加剧,地形高差明显,使得陇县地区发育大规模的浊流沉积。而等深流作用相对较弱,改造砂相对不发育。

4 油气勘探意义

浊流沉积一直是深水油气勘探的重点。但是,由于等深流可对浊流沉积进行淘洗、筛选、再沉积,其

可改变沉积物的结构,提高其成熟度,最终使得改造砂具有优质的储集性能。墨西哥湾改造砂含砂率最高达80%,孔隙度25%~40%,渗透率 $100 \times 10^{-3} \sim 1800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[8]。南海莺歌海盆地改造砂平均面孔率18.7%,平均孔隙度19.2%,平均渗透率 $106.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $8.34 \mu\text{m}$ ^[11]。另在巴西Campos盆地古近系-新近系^[12]、西非白垩系-第三系斜坡^[13]、中国南海珠江口盆地^[10]均发育大规模的改造砂沉积,并逐渐成为油气勘探的对象。同时,等深流沉积,特别是特殊环境中高能的等深流可形成粗粒的等深流沉积,其本身可成为潜在储层。阿拉伯克拉通白垩系等深流沉积已具有数十年的油气开发历史^[32]。而细粒等深流沉积可作为良好的烃源岩。因此,改造砂及粗粒的等深流沉积作为良好的储层与细粒的等深流沉积及深水原地沉积伴生可形成优质的生储盖组合。

首先,鄂尔多斯西南缘奥陶系平凉组从东北向西南分别发育鄂尔多斯古陆、碳酸盐台地、斜坡及深水盆地。西缘斜坡区发育3个大型海底扇,芦参1井砂岩厚度286 m,石英含量为36%~70%,次圆状,分选中等。苦深1井砂岩厚度112 m,在井深3 923~3 927 m气测全烃含量 $3765 \times 10^{-6} \sim 22781 \times 10^{-6}$,甲烷含量 $3600 \times 10^{-6} \sim 21794 \times 10^{-6}$ ^[33]。而南部平凉、陇县、

岐山以及富平等区仍然发育大规模的重力流沉积^[12, 28, 34],其可成为潜在油气储集体。

其次,鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组沉积时期,等深流作用极为活跃,在盆地南缘其从东到西,大致平行斜坡运动。在盆地西缘,通过秦岭-祁连海槽,转而向北运动^[20],在此过程中形成了一系列的等深流沉积。如东部富平的粉屑及泥质等深岩,西部平凉的砂屑等深岩,以及北部桌子山的泥晶及砂屑等深岩。其中,平凉地区砂屑等深岩侧向厚度变化大,局部呈透镜状,层面多为波状。砂屑 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$,含量为35%~65%,粉屑及磨圆较好,亮晶及泥晶胶结,其具有较好的储集性能。另外,等深流在运动过程中,当其进入秦岭-祁连海槽时,由于地形变化(限制型环境和盆地边缘“L”形拐点),其能量会局部增强,进而导致其可能对陇县及平凉地区的重力流沉积进行筛选、改造,提高其成熟度,最终形成改造砂。

第三,鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组等深流沉积有机碳含量为0.10%~1.08%;总烃含量多大于60%,多数为腐泥型,可作为较好的烃源岩^[35]。桌子山地区泥晶等深岩有机碳平均值约0.607%^[36]。富平及平凉地区等深流沉积中常见灰黑色及褐色条带状及团块状有机质(图8)。另外,张月巧等对鄂尔多斯

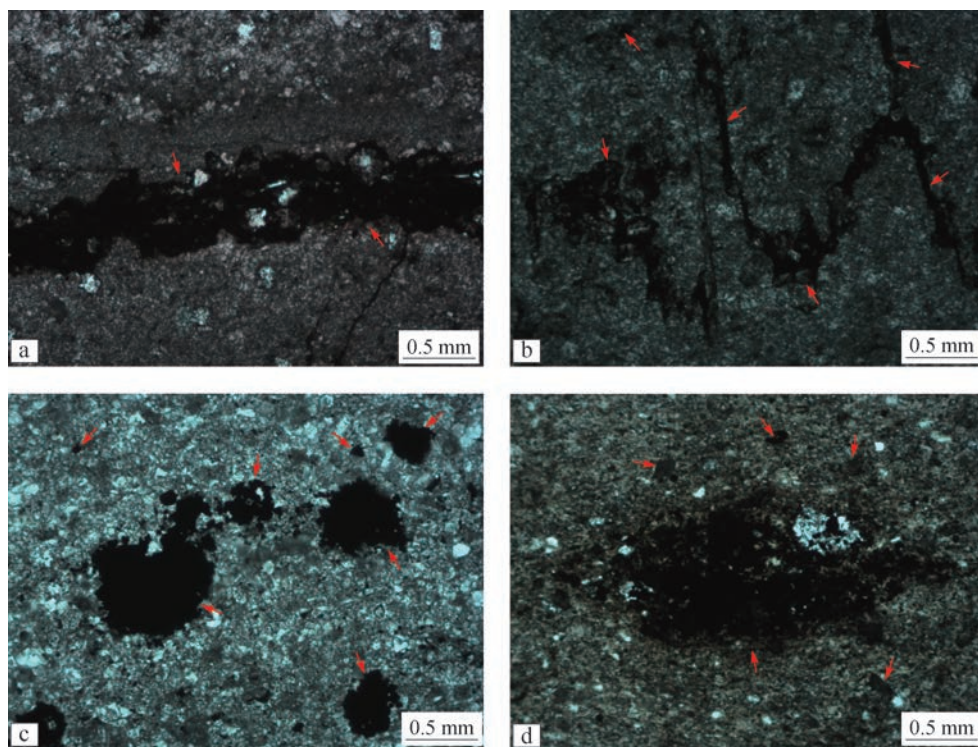


图8 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区平凉组有机质特征

Fig. 8 Organic matter features of the Pingliang Formation in Longxian area, southwestern margin of Ordos Basin

a. 条带状,沿泥质条带分布,泥晶灰岩;b. 条带状,沿缝合线分布,泥晶灰岩;c. 灰黑色团块状,泥晶灰岩;d. 褐色团块状,泥晶灰岩

盆地西南缘中上奥陶统克里摩里组合乌拉力克组(相当于峰峰值和部分平凉组)中原地沉积烃源岩研究表明:盆地西南缘中上奥陶统烃源岩生气强度高,约 $(2 \sim 10) \times 10^3/\text{km}^2$ 。总生烃量约 $48 \times 10^{12} \text{ m}^3$,排烃量约为 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,资源量约 $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。在南部富平和陇县之间的淳化存在一个生气中心^[37]。综上所述,陇县地区及周缘重力流、改造砂及粗粒的等深流沉积可作为潜在的油气储层,而细粒的等深流沉积和原地沉积具有较好的生烃能力,其相互叠置可形成理想的生储盖组合,进而成为油气勘探的潜在区。

5 结论

1) 研究区岩石类型较为单一,以砂岩及泥岩为主,沉积构造丰富,常见波痕、交错层理、槽模、平行层理、水平层理、双向交错层理及生物扰动。可进一步分为3种典型岩相。岩相1为水平层理泥岩相,代表深水原地沉积;岩相2为交错层理砂岩相,为浊流沉积;岩相3为双向交错层理砂岩相,为改造砂沉积。

2) 改造砂为等深流改造浊流沉积而成。与浊流沉积相比,其典型特征包括:①颗粒分选及磨圆较好,粒径具有两个或多个总体;②具有两个古水流优势方向。一个与浊流运动方向相同,另一个大致平行斜坡;③生物扰动较为发育;④概率累计曲线1~3段式,以1~2段为主,包含重力流和牵引流特征;⑤沉积序列多为下粗上细,顶部多见侵蚀特征;⑥微量元素相对较高。

3) 由于等深流持续、稳定、长时间对早期浊流沉积的簸选、搬运、再沉积作用,导致改造砂结构及成分成熟度明显高,其具有良好的油气储集性能。同时,粗粒的等深流沉积可作为潜在的储层,细粒等深流沉积是较好的烃源岩。因此,改造砂及其伴生沉积可以形成良好的生储盖组合,是油气勘探的理想对象。

致谢:研究生张灿、王季欣、冯斌、苏帅亦、郝烃及黄瑾参加了野外及部分室内工作,编辑及审稿人提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

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, 20:471-491.
- [2] Bouma A H. Sedimentology of some flysch deposits[M]. Elsevier, Amsterdam, 1962:168.
- [3] Rebesco M, Hernández-Molina, Rooij D V, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. *Marine Geology*, 2014, 352:111-154.
- [4] Gao Z Z, Kenneth A E, He Y B, et al. Deep-water traction current deposits—The study of internal-tide, internal-wave, and contour current deposits[M]. Beijing: Science Press, 1996:77-113.
- [5] Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. Mixed turbidite-contourite systems[M]. Elsevier, 2008:435-456.
- [6] 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.
- [7] 李华,何幼斌,王英民,等.深水交互作用沉积研究进展——以南海北部珠江口盆地为例[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5):218-224.
Li Hua, He Youbin, Wang Yingmin, et al. Research advances in deep water interaction deposition: A case from the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(5):218-224.
- [8] Shanmugam, 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*, 1993, 77(7):1241-1259.
- [9] Shanmugam G, Spalding T D, Rofheart D H. Traction structures in deep-marine, bottom-current-reworked sands in the Pliocene and Pleistocene, Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1993, 21:929-932.
- [10] Gong C L, Wang Y M, Zheng R C, 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.
- [11] 黄银涛,姚光庆,朱红涛,等.莺歌海盆地东方区黄流组重力流砂体的底流改造作用[J]. *石油学报*, 2016, 37(7):854-866.
Huang Yintao, Yao Guangqing, Zhu Hongtao, et al. Reworking of gravity flow sandbody by bottom-current from Huangliu Formation in Dongfang area of Yinggehai Basin, northwestern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7):854-866.
- [12] Moraes M A S, Maciel W B, Braga M S S, et al. Bottom-current reworked Palaeocene-Eocene deep-water reservoirs of the Campos Basin, Brazil[M]. in: Viana A R and Rebesco M (eds). *Economic and palaeoceanographic significance of contourite deposits*. London, Geological Society, 2007, 81-94.
- [13] Mitchum R M. Interaction between deepwater current drifts (contourites) and canyon fill-slope valley turbidites, Cretaceous and Tertiary sediments of offshore West Africa[C]. AAPG 2014 annual convention & exhibition, USA, 2014, 06983.
- [14] 高振中,罗顺社,何幼斌,等.鄂尔多斯盆地西缘中奥陶世等深流沉积[J]. *沉积学报*, 1995, 13(4):16-26.
Gao Zhenzhong, Luo Shunshe, He Youbin, et al. The Middle Ordovician contourite on the West Margin of Ordos [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(4):16-26.
- [15] 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 Wenhou, et al. The characteristics of Middle Ordovician contour current deposits and geological implication in Fuping region, Shaanxi Province, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9):1304-1309.
- [16] 刘宝珺,许效松,梁仁枝,湘西黔东南寒武纪等深流沉积[J]. *矿物*

- 岩石, 1990, 10(4): 43–47.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Liang Renzhi. Contourites of Cambrian in western Huan and eastern Guizhou [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1990, 10(4): 43–47.
- [17] Stow D A V, Fargères J C. Contour faces and the facies model [M]. in: Rebesco M, Camerlenghi A (eds.). *Contourites. Developments in sedimentology* 60, the Great Britain, 2008, 223–256.
- [18] 吴胜和, 冯增昭. 鄂尔多斯盆地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.
- Wu Shenghe, Feng Zengzhao. 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.
- [19] 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.
- [20] 李华, 何幼斌, 黄伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组等深流沉积 [J]. *古地理学报*, 2016, 18(4): 631–642.
- Li Hua, He Youbin, Huang Wei, et al. Contourites of the Ordovician Pingliang Formation in southern margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(4): 631–642.
- [21] 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 44–60.
- Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Xu Wanglin, et al. Sequence Stratigraphy of the Ordovician system in the Ordos Basin [J]. *Acta sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 44–60.
- [22] Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1378–1401.
- [23] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用 [J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- Wang Zhenhao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Ordovician geological events group in the west and south Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- [24] 陈小烩, 牟传龙, 周恩恩, 等. 鄂尔多斯西缘中晚奥陶世大坪阶—艾家阶岩相古地理 [J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 2028–2038.
- Chen Xiaowei, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Lithofacies-paleogeography of middle-late Ordovician Daping stage-Aijiashan stage on the western margin of the Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 2028–2038.
- [25] 冯益民, 何世平. 祁连山及其邻区大地构造基本特征——兼论早古生代海相火山岩的成因环境 [J]. *西北地质科学*, 1995, 16(1): 92–103.
- Feng Yimin, He Shiping. Basic characteristics of tectonics in the Qilian Mountains and its neighbourings—On genetic environment of Early Paleozoic margin volcanics [J]. *Northwest Geoscience*, 1995, 16(1): 92–103.
- [26] 鲍志东, 朱井泉, 江茂生, 等. 海平面升降中的元素地球化学响应——以塔中地区奥陶纪为例 [J]. *沉积学报*, 1998, 16(4): 32–36.
- Bao Zhidong, Zhu Jingquan, Jiang Maosheng, et al. Isotope and trace element evolution: Responding to sea-level fluctuation—An example of Ordovician in Middle Tarim Basin [J]. *Acta sedimentologica Sinica*, 1998, 16(4): 32–46.
- [27] Akarish A I M, El-Gohary A M. Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: implications for provenance and tectonic setting [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2008, 52: 43–54.
- [28] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1035–1045.
- Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, et al. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia formation in Shizhu, Chongqing [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1035–1045.
- [29] Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data [J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55(10): 1829–1837.
- [30] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约 [J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 755–771.
- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Wang Xianhui, et al. Geochemistry of Nanhuan-Cambrian sandstones in southeastern Hunan, and its constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic setting of South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 755–771.
- [31] Heezen B, Hollister C. Deep sea current evidence from abyssal sediment [J]. *Marine Geology*, 1964, 1: 141–174.
- [32] Bein A, Weiler Y. The Cretaceous Talme Yafe Formation: a contour current shaped sedimentary prism of calcareous detritus at the continental margin of the Arabian Craton [J]. *Sedimentology*, 1976, 23(4): 511–532.
- [33] 席胜利, 李振宏, 王欣, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 405–412.
- Xi Shengli, Li Zhenghong, Wang Xin, et al. Distribution and exploration potential of Ordovician reservoir in Ordos basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 405–412.
- [34] 李华, 何幼斌, 刘朱睿, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组重力流沉积特征 [J]. *中国科技论文*, 2017, 12(15): 1774–1779.
- Li Hua, He Youbin, Liu Zhuruizhi, et al. Characteristic of gravity flow deposit in Pingliang Formation of Ordovician in the southwest margin of the Ordos Basin [J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(15): 1774–1779.
- [35] 徐焕华, 杨忠芳, 丁海军. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流烃源岩 [J]. *西部探矿工程*, 2008, (3): 88–90.
- Xu Huanhua, Yang Zhongfang, Ding Haijun. Contourite source rocks of Ordovician in north part of Helan Aulacogen [J]. *West Exploration Engineering*, 2008, (3): 88–90.
- [36] 丁海军, 孟祥华, 葛铭, 等. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流沉积 [J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(1): 58–64.
- Ding Haijun, Meng Xianghua, Ge Ming, et al. Ordovician contourite of the north of Helan Aulacogen [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(1): 58–64.
- [37] 张月巧, 郭彦如, 侯伟, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中上奥陶统烃源岩特征及勘探潜力 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 894–904.
- Zhang Yueqiao, Guo Yanru, Hou Wei, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of the Middle-Upper Ordovician source rocks on the western and southern margin of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 894–904.