

鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统克里摩里组深水等深流溢岸混合沉积

李向东¹, 阙 易¹, 邹雅棋², 陈海燕¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国石油 冀东油田分公司, 河北 唐山 063200)

摘要:鄂尔多斯盆地西缘桌子山地区中奥陶统克里摩里组普遍发育深水等深流沉积, 其中石峡谷剖面发育完整, 岩性变化明显, 为达瑞威尔期等深流沉积的理想剖面。以石峡谷剖面克里摩里组中段为研究对象, 在详细的野外观察基础上, 结合室内岩石薄片研究、相关地球化学测试和已有的研究成果, 探讨石灰岩岩组与页岩互层的形成机制。结果表明: 克里摩里组中段共发育10个石灰岩岩组可划分为3个旋回; 单层石灰岩以不同的透镜体形态及样式尖灭于页岩之中; 石灰岩中发育平行层-均匀层-平行层序列和平缓微波状条纹构造, 在显微镜下表现为交替的灰泥和粉晶聚集带。结合已有研究成果综合判断认为: 克里摩里组中段石灰岩与页岩组成混积层系, 包含有陆源碎屑与碳酸盐混积层系及碳酸盐(陆源碎屑岩)与混积岩混积层系2种类型, 可能为受天文旋回控制的深水等深流周期性溢岸混合沉积所致。克里摩里组中段深水等深流成因混积层系的发现对于鄂尔多斯盆地西缘奥陶系页岩气的勘探具有重要意义。

关键词:碳酸盐岩; 混合沉积; 等深流; 奥陶系; 桌子山地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Mixed carbonate-siliciclastic sequences of deep-water contour current overflow origin of Kelimoli Formation in Zhuozishan area, western margin of Ordos Basin

Li Xiangdong¹, Que Yi¹, Huan Yaqi², Chen Haiyan¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;

2. Jidong Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: The deep-water contourites are widely developed in the Middle Ordovician Kelimoli Formation in Zhuozishan area, western margin of Ordos Basin. The Shixiagu outcrop thereto is generally regarded as an ideal section for studying the contourites of the Darriwilian stage for its complete stratum and obvious lithological variations. Here we focus on the mechanism of limestone associations alternating with shale in the middle Kelimoli Formation based on outcrop observations, study of thin sections in labs, data from relevant geochemical tests and previous works. The results show that: ① the middle part of Kelimoli Formation consists of ten limestone associations which could be grouped into three cycles; ② the single limestone layer pinches out in shale with different forms and patterns of lens; ③ a succession of parallel layer-homogeneous layer-parallel layer and streaky structures in the shape of gentle ripples are developed in the limestone, displaying alternating zones of lime mud and very fine crystalline under microscope. In combination of previous research, we may conclude that the mixed sequences consisting of limestone and shale in the middle Kelimoli Formation can be divided into two types, one is the mixed sequence of terrigenous clastics with carbonate, and the other is the mixed sequence of carbonate(terrigenous clastics) with diamictite, and their genetic mechanism could be attributed to the periodic overflow of contour current controlled by astronomical cycles in deep-water slope environment. The discovery of mixed sequences caused by deep-water contour currents can be of great significance for the Ordovician shale gas exploration at the western margin of Ordos Basin.

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2018-08-20。

第一作者简介: 李向东(1973—), 男, 博士、讲师, 沉积学。E-mail: lixiangdong614@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272119)。

Key words: carbonate rock, mixed deposition, contour current, Ordovician, Zhuozishan area, Ordos Basin

等深流是指由于地球旋转而在大洋中形成的温盐环流,这种环流平行海底等深线作稳定低速流动^[1-2]。等深流沉积研究则始于1964年^[3],随后缓慢发展^[4]。在过去的50多年里,虽然提出和完善了等深流鉴别标志,总结出了等深流事件性沉积序列,并对等深岩丘和大型沉积物波等大型沉积体展开研究^[2,5-7],提出了等深流沉积体系^[8-9],探讨了深水底流对砂质沉积物的改造^[10]。特别是大洋钻探339航次的执行^[11],使得等深流沉积研究取得长足的进步,进一步完善了等深流沉积体系^[12-13],但是研究领域仍以现代海洋沉积为主,研究手段仍以地球物理方法为主^[14-19]。地层记录中的等深流沉积研究的薄弱^[20-24]和有关等深流沉积的大洋钻探资料研究形成显明的对比,两者之间的不均衡,仍然是未来等深流沉积研究的重要挑战之一^[4]。

鄂尔多斯盆地油气资源丰富,其西缘和中北部天然气资源丰富,具有良好的勘探前景^[25],是当前下古生界天然气勘探的重要地区之一^[26],并且在奥陶纪曾发生过较大规模的油气团聚成藏^[27]。依据固体沥青的研究成果,鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统克里摩里组顶部发育有较大规模(相对桌子山组和乌拉力克组古油藏)的孔洞型(晶间孔和粒间孔为主)古油藏^[27]。就整个克里摩里组而言,西缘中部的砾屑石灰岩发育缝洞型储集空间,已获高产工业气流^[28];西缘北部的泥质岩和泥质石灰岩有机碳含量较高,是相对有利的生排烃层段,也是下古生界的主力生烃层段^[29-31]。

就沉积类型而言,鄂尔多斯盆地西缘中、晚奥陶世是等深流极为发育的时期。已发现的等深流沉积主要包括:平凉地区官庄剖面平凉组^[23]、桌子山地区克里摩里组^[32]、乌拉力克组^[23]、拉什仲组^[33]和公乌素组^[34]。其中对克里摩里组深水等深流沉积已进行了较为详细的研究^[35-38],本文即以鄂尔多斯盆地西缘北段桌子山地区克里摩里组中段为研究对象,认为其中的薄层石灰岩和页岩在垂向上构成混积层系^[39-41],属于混合沉积。该混合沉积的研究,对于剖析等深流沉积的内部结构及鄂尔多斯盆地西缘天然气的生烃、排烃和储集均具有重要的意义。

1 区域地质背景

研究区位于鄂尔多斯盆地西缘北部,内蒙古桌子山地区(图1),在中奥陶世克里摩里组沉积的达瑞威尔期,北部为阿拉善古陆和伊盟古陆;东部为开阔碳酸

盐岩台地;台地边缘斜坡呈向西南开口的环带状分布;中部为深水盆地^[42-43]。桌子山地区奥陶系从沉积环境上可分为台地和斜坡(含深海盆地)两大类(系列)。台地相由下奥陶统三道坎组和中奥陶统桌子山组组成:三道坎组为浅灰色石英砂岩、灰白色白云质石灰岩、石灰岩互层,属于潮坪沉积;桌子山组由浅灰色厚层石灰岩组成,属于碳酸盐岩台地沉积。斜坡相由中奥陶统克里摩里组和上奥陶统乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组和蛇山组组成:克里摩里组和乌拉力克组主要由晶粒石灰岩和页岩组成,含砾屑石灰岩;拉什仲组主要由灰绿色砂岩、泥岩组成;公乌素组为薄层石灰岩、泥岩、砂岩互层;蛇山组以生物碎屑石灰岩为主。整体上反映了从深水石灰岩、深水碎屑岩到浅水石灰岩的演化序列,其中最大海侵期可能发生在克里摩里组上段^[37],随后在拉什仲组和公乌素组共出现4次大陆斜坡与深海盆地的转化^[44-45],至蛇山组才变为浅海陆棚环境。

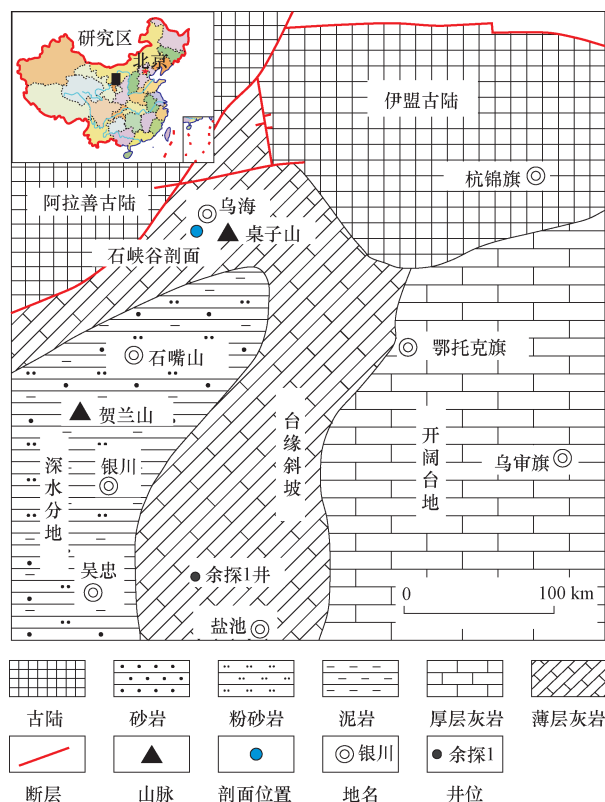


图1 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶世达瑞威尔期古地理略图
(据文献[42]绘制)

Fig. 1 Outline showing the Darriwilian paleogeography during the Middle Ordovician, western margin of Ordos Basin (drawn from reference [42])

克里摩里组在区域上岩性变化较大。内蒙古桌子山地区主要由深灰色薄-中层石灰岩和页岩、钙质页岩组成,表现为斜坡薄层石灰岩序列沉积^[46-47],厚度为80~202 m;宁夏吴忠市灵武地区为页岩、钙质页岩和泥质石灰岩,表现为极弱的静水沉积,厚度为85~140 m(未见底);余探1井则为垮塌作用形成的角砾石灰岩,属于台地边缘斜坡沉积^[28];宁夏盐池地区为石灰岩与白云质石灰岩,厚度约为102 m(未见底);从灵武继续向南至宁夏青龙山地区,下部以中-厚层石灰岩为主,向上逐渐变为薄层石灰岩,其中云斑石灰岩和颗粒石灰岩发育,厚度突然增至400多米^[48]。总之,克里摩里组整体表现为东西向和南北向的双重演化,并非简单化的大陆斜坡,其构造特征东西向为东部高、西部低,南北向为两边低、中间高,具有鞍状的特点^[28]。

2 研究方法

本文以详细的野外观察为基础,对桌子山地区石峡谷剖面石灰岩和页岩厚度进行了逐层测量,并在横向上进行追踪,详细观察有关的沉积构造,对石灰岩进行了逐层采样。在室内以岩石薄片研究为主,共鉴定薄片28张,重点对岩性和岩石结构进行了分析和归类。结合野外地质剖面测量与观察和室内岩石薄片鉴定所获得的沉积环境信息以及区域沉积背景,恢复其原始沉积相;同时以水槽实验的相关成果为依据,从沉积流体特征与沉积岩特征之间的关系入手,着重探讨沉积流体演化与沉积演化之间的关系,恢复克里摩里组中段混合沉积的沉积作用过程。

3 岩性特征与沉积环境

克里摩里组在桌子山地区自下而上依据岩性变化可分为3段(图2),与下伏桌子山组厚层-块状石灰岩呈整合接触,在石峡谷剖面两者之间为正断层。克里摩里组下段为深灰色薄-中层石灰岩夹灰黑色极薄层页岩、灰质页岩组成,具有高旋回性(图3a),与克里摩里组中段和上段相比,其显著特点是石灰岩之间的页岩夹层极薄,甚至缺失,往往形成薄层石灰岩叠置层(图3b)。石灰岩主要由粉晶石灰岩(含细粉晶与粗粉晶)和泥晶石灰岩组成,单个晶粒呈散点状分布,粉晶之间为泥晶充填,但粗粉晶、细粉晶和泥晶之间可形成条纹及条带。石灰岩单层厚度最薄层为3 cm,最厚层为31 cm,平均为10.2 cm(石峡谷剖面);岩层上、下界

面不规则,呈波状起伏及透镜状,习惯上也称为瘤状石灰岩。在石灰岩中主要发育2种沉积构造,一是具有双向递变特征的粒序层,从下到上表现为细-粗-细序列,主要由细粉晶-粗粉晶-细粉晶构成,也可由泥晶-细粉晶-泥晶构成;二是平行层-均匀层-平行层序列,平行层的晶粒相对较小,而均匀层的晶粒相对较粗^[36-37]。

克里摩里组中段主要由深灰色中-薄层石灰岩夹灰黑色薄-极薄层页岩组成的岩石组合与灰黑色页岩互层,其顶部出现灰黑色页岩夹浅灰绿色粉砂岩组合与灰黑色页岩互层(图3c)。夹层一般由3~4层石灰岩组成,单层石灰岩之间一般为薄层页岩所隔,石灰岩不形成叠置层,有时为中层页岩所隔,形成石灰岩与页岩互层组合(图3d);石灰岩与页岩中均含有丰富的笔石。在石峡谷剖面中共由10组这样的岩组组成,从下到上页岩中灰质成分增多。石灰岩结构特征与沉积构造详见后文。

克里摩里组上段由灰黑色页岩及含灰页岩组成,富含笔石,在风化弱的剖面上表现为厚层状,风化较严重时呈页理状(图3e),其中含灰页岩的CaO和MgO含量合计小于4%。灰黑色页岩及含灰页岩中均发育有薄的水平纹层,在风化面上表现尤为突出,形成密集条纹状构造,在1 cm的宽度上可发育6~10条,单条纹厚度约为0.1~0.2 cm(图3f)。就单条纹的特征可分出断续型和连续型两类:断续型条纹表现为连续或不连续的极小的透镜体形态(图3f中长箭头);连续型条纹表现为平直、连续的单纹层,与水平层理或平行层理相当(图3f中短箭头);断续型条纹与连续型条纹可呈过渡状态。其顶部以透镜状砾屑石灰岩与乌拉力克组分界,两者呈整合接触。

薄层石灰岩与常见的台地相厚层-块状石灰岩不同,具有薄的单层厚度(一般小于30 cm)、高旋回性(一般为米级旋回)和石灰岩-页岩对(石灰岩-灰质页岩对),据已有文献,其沉积环境一般解释为斜坡至深水盆地^[46-47,49-50]。克里摩里组下段即由薄层石灰岩-页岩对组成,且具旋回性,而中段在页岩中也含有薄层石灰岩-薄层页岩对岩石组合,其沉积环境可能均为深水斜坡(图2)。其中克里摩里组下段石灰岩中的细-粗-细序列和平行层-均匀层-平行层序列则反映了沉积流体强度由弱变强再变弱的变化过程,在深水环境中解释为等深流沉积^[2,51],具体可能为等深流水下道沉积^[38],而中段则可能为等深流水下天然堤沉积(详见后文)。

克里摩里组上段条纹状页岩、含灰页岩中富含笔

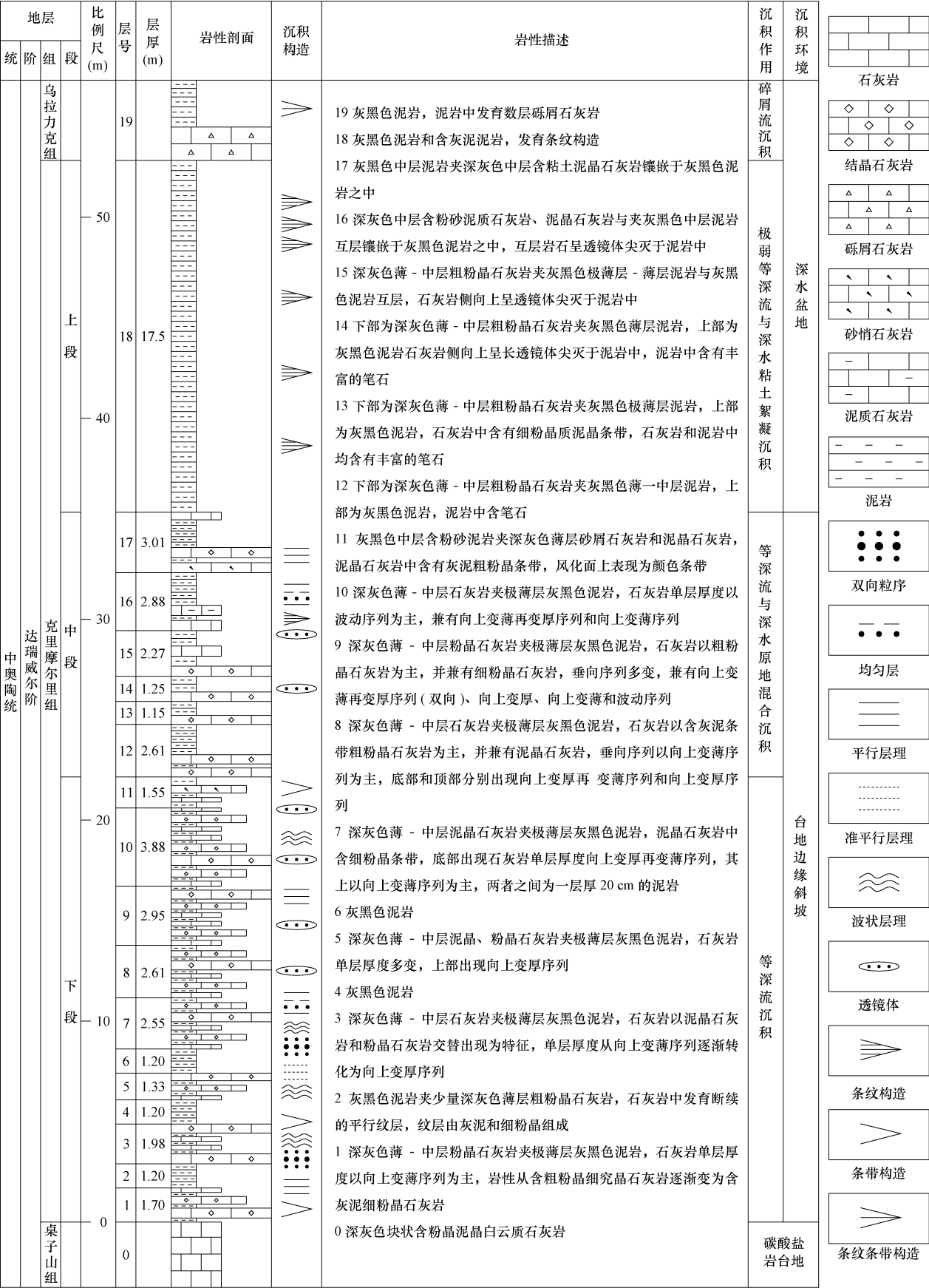


图 2 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组岩性柱状图
Fig. 2 Lithologic column of the Middle Ordovician Kelimoli Formation in Zhuozishan area, Inner Mongolia



图3 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组岩性特征

Fig. 3 Lithologic characteristics of the Middle Ordovician Kelimoli Formation in Zhuozishan area, Inner Mongolia

a. 深灰色中-薄层石灰岩夹灰黑色极薄层页岩, 克里摩里组下段; b. 深灰色(风化成浅黄色)薄层石灰岩叠置层, 克里摩里组下段; c. 深灰色中-薄层石灰岩与灰黑色页岩互层(远景), 图中数字为岩组序号, 克里摩里组中段; d. 互层序列中的中-薄层石灰岩夹薄层页岩岩组与灰黑色页岩, 图中数字为岩组序号, 克里摩里组中段; e. 灰黑色呈厚层状灰质页岩, 克里摩里组上段; f. 灰黑色灰质页岩中的条纹状构造, 克里摩里组上段

石, 为典型的笔石页岩, 形成于滞留环境中平缓底流的条件下悬浮沉积物垂直降落沉积^[52-53], 其沉积环境可能为深水盆地, 又由于条纹条带发育于页岩中, 故沉积可能发生在碳酸盐岩补偿深度以下。依据水槽实验结果, 当流体速度小于 25 cm/s 时, 流体中的悬浮物质主要由粘土物质组成, 絮凝波发育且具有长的尾迹, 在流体改造底床沉积物的同时, 絮凝波中的粘土也发生垂直降落沉积, 可形成粗粒和细粒相间的条纹状沉积^[53]。结合区域地质背景及克里摩里组沉积特征, 克里摩里组上段条纹状页岩、含灰页岩解释为由弱等深流引起的粘土絮凝波和底载荷交互沉积形成^[37]。

4 等深流溢岸混合沉积

4.1 混积层系特征

桌子山地区克里摩里组中段由灰黑色页岩、钙质页岩组成背景沉积, 深灰色中-薄层粉晶-泥晶石灰岩与少量浅灰色含粉砂石灰岩则分布在页岩之中, 将页岩隔开(图 3c, d), 单层页岩厚度 30~90 cm, 石灰岩段一般由中-薄层石灰岩与中-薄层页岩组成夹层或互层岩组(图 4a), 但也有 1 组由 1 层石灰岩组成(图 4b)。单层石灰岩可表现出错断、弯曲及揉皱现象, 在侧向上也出现分层现象(图 4a 中短箭头及图 4b 中箭头所示), 而页岩在侧向上则出现局部加厚或减薄现象(图 4a)。在岩组中石灰岩的厚度一般大于页岩厚度, 而夹层页岩的厚度和互层页岩的厚度相关(与石

灰岩岩组互层), 当互层页岩的厚度达到 80~90 cm 时, 夹层页岩厚度可达 35 cm。

在石峡谷剖面(中段厚 13.17 m)共发育 10 个岩组, 依据石灰岩与页岩的组合特征, 从下到上可划分 3 个旋回: 第 1 岩组(底界)至第 3 岩组(其上页岩顶部)为第 1 旋回; 第 4 岩组至第 7 岩组为第 2 旋回; 第 8 岩组至第 10 岩组(中段顶界)为第 3 旋回(图 3c, d)。在旋回中, 第 1 和 2 旋回从下到上石灰岩减少, 页岩增多, 和岩组互层的页岩也由薄到厚, 这种旋回性质在第 2 旋回中表现尤为突出(图 3c, d), 而第 3 旋回石灰岩较均匀地分布在页岩之中, 3 个岩组的石灰岩层数分别为 1, 4, 2, 也表现为一定的随机性。

依据 18 张石灰岩薄片鉴定结果, 粗粉晶、细粉晶和灰泥呈连续的过渡, 在岩性上则表现为粗粉晶石灰岩到灰泥石灰岩的演化。在旋回内部, 石灰岩岩组从下到上粗粉晶含量减少, 细粉晶和灰泥含量增加。在旋回之间也存在类似的变化特征: 第 1 旋回底部为粗粉晶石灰岩, 粉晶之间为灰泥充填, 偶见细砂级的石英颗粒(图 4c), 顶部(第 3 岩组)则出现含灰泥及粗粉晶的细粉晶石灰岩; 第 2 旋回底部(第 4 岩组)为含细粉晶的粗粉晶石灰岩, 经含灰泥细粉晶质粗粉晶石灰岩(第 5 岩组), 至顶部(第 7 岩组)为含粉砂灰泥石灰岩(图 4d), 同时陆源物质增加, 但颗粒变小, 较大的也为粉砂级颗粒(图 4d 中箭头); 第 3 旋回基本上为灰泥石灰岩, 沉积构造发育, 详见后文。

依据 7 件石灰岩样品及 8 件页岩样品地球化学测

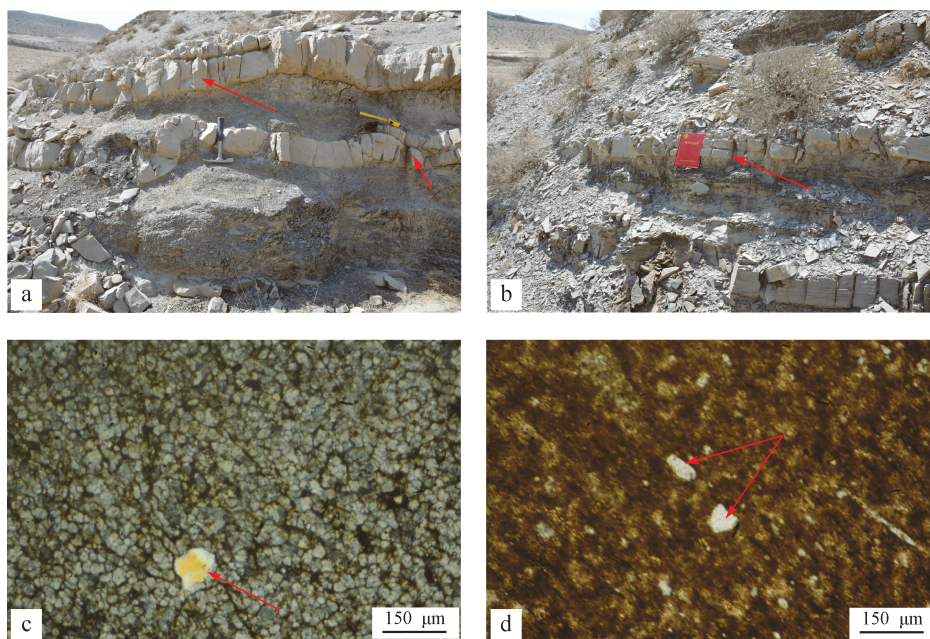


图4 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组中段混积层系特征

Fig. 4 Characteristics of the mixed sequence in the middle part of the Middle Ordovician

Kelimoli Formation, Zhuozishan area, Inner Mongolia

a. 深灰色薄-中层粗粉晶石灰岩与灰黑色薄层页岩互层(岩组),第1组,长箭头所示为图4c采样层位,短箭头所示为岩层的受力分层现象,岩组上、下灰黑色页岩均厚约80 cm,地质锤长40 cm;b. 深灰色中层含粉砂灰泥石灰岩,第8组,唯一由单层石灰岩构成的1组,其下页岩厚40 cm,箭头所示为岩层的受力分层现象,其上页岩厚35 cm,野外记录本长18 cm;c. 深灰色薄-中层粗粉晶石灰岩,第1组,岩层见图4a箭头所示,正交偏光,箭头所示为石英颗粒,粗粉晶方解石颗粒之间为灰泥充填;d. 深灰色中层含粉砂灰泥石灰岩,箭头所指为较大颗粒石英,第7组

试结果:石灰岩成份稳定,CaO 含量为 49.6%~51.8%,平均 50.9%; SiO_2 含量为 3.98%~7.86%,平均 5.29%; Al_2O_3 含量为 0.99%~1.57%,平均 1.17%。页岩按化学成分可分为 2 组, SiO_2 含量 CaO 含量呈镜像关系,而与 Al_2O_3 含量关系略呈正相关:第 1 组 4 个样品,均在第 1 和第 2 旋回中,CaO 含量为 22.5%~23.5%,平均 22.9%; SiO_2 含量为 36.67%~38.54%,平均 37.82%; Al_2O_3 含量为 8.78%~9.85%,平均 9.32%。第 2 组 4 个样品,第 1 和第 2 旋回中各 1 件,第 3 旋回中 2 件,CaO 含量为 5.04%~10.05%,平均 7.61%; SiO_2 含量为 53.10%~65.57%,平均 61.34%; Al_2O_3 含量一般为 11.64%~12.86%,平均 12.35%,第 3 旋回中存在 1 个异常值,为 7.38%,小于第 1 组的最低值 8.78%(相关数据由澳实分析检测(广州)有限公司测试)。

在石灰岩中,CaO、 SiO_2 及 Al_2O_3 等化学含量稳定,说明石灰岩从粗粉晶到灰泥的变化只是晶粒大小的变化,与陆源物质的混入关系不大,结合粗晶颗粒周边为灰泥充填的现象(图 4c)说明石灰岩受成岩作用的影响有限,因此石灰岩晶粒大小的变化可能反映了沉积时水动力的变化。石灰岩层的错断、弯曲、揉皱现象及页岩在侧向上的加厚或减薄,说明岩层受到过挤

压力作用,因此可以推测石灰岩层在侧向上的分层现象可能与挤压作用相关,属于受力分层(图 4a,b)。

在页岩中 CaO 与 SiO_2 含量呈镜像关系,说明了陆源物质沉积对碳酸盐沉积的抑制作用,但是二者的关系不是渐变的,而是突变,可分为 2 组:第 1 组测试样品其 CaO 平均含量为 22.9%,应为灰泥质页岩,属于陆源碎屑与清水碳酸盐混合沉积包括混积岩,即碳酸盐质-陆源碎屑岩^[39-41];第 2 组测试样品其 CaO 平均含量为 7.61%,略高于 5%(该地区上奥陶统拉什仲组灰绿色页岩),可视为页岩及含灰泥页岩,基本属于陆源碎屑岩沉积。

从混合沉积的角度对克里摩里组的岩石进行分类^[39-41]:薄层石灰岩主要由碳酸盐组分构成,属于非混积岩;而顶部的砂质石灰岩则属于混积岩;第 1 组页岩由碳酸盐组分和陆源碎屑组分(粘土)构成,属于混积岩;第 2 组页岩主要由陆源碎屑组分(粘土)构成,属于非混积岩。因此,薄层石灰岩与第 1 组页岩构成碳酸盐与混积岩混积层系,主要发育在第 1 和第 2 旋回下部;薄层石灰岩与第 2 组页岩构成碳酸盐与陆源碎屑混积层系,主要发育在第 1 和第 2 旋回上部以及第 3 旋回;而第 2 旋回顶部(第 7 岩组)砂质石灰岩和第 2 组页岩则构成陆源碎屑与混积岩混积层系。故整

个克里摩里组中段即为广义的混合沉积。

4.2 岩层形态特征

克里摩里组中段10个石灰岩组,就单层石灰岩形态而言可分为3类,其在垂向上的发育及岩性特征也具有一定的规律性:①单层石灰岩呈透镜状,侧向上尖灭于页岩之中,其规模较小(图5a,c),发育在第1岩组至第6岩组,岩性为粉晶石灰岩,包括粗粉晶和细粉晶,并含有灰泥。其尖灭方式可观察到3种:单层石灰岩尖灭于和岩组互层的页岩中,而且不同的岩层可向不同的方向尖灭,而非一定向同一方向尖灭(图5a);多个石灰岩层在短距离内呈透镜体向两个方向同时尖灭,在形态上表现为小型水道形态(图5b);单个石灰岩层呈透镜体尖灭于岩组中的夹层页岩之中(图5c)。②单个石灰岩层呈长透镜体尖灭于互层页岩之中(图5d),其规模较大,需要沿岩层走向追踪,发育在第7岩组和第8岩组,岩性为含粉砂灰泥石灰岩,是克里摩里组中段方解石颗粒最小(平均)而陆源物质含量最多的岩层。③单层石灰岩呈板状,在侧向上延伸远,顺层追踪,未发现侧向尖灭现象,但有小断层错开,发育在第9岩组和第10岩组,岩性为粉晶质(条带状)灰泥石灰岩,该岩层中沉积构造发育,详见后文。

第1岩组至第6岩组中单层石灰岩多呈透镜状,

其岩性以粗粉晶及细粉晶石灰岩为主,均说明了沉积时水流的相对集中。而图5b中双向尖灭的石灰岩透镜体显示出小型水道形态,就其规模而言,相当于小冲沟,石灰岩在后期压实过程中厚度变化较小,因此冲沟的深度也很浅。不同单层石灰岩透镜体在同一位置分别向两个相反的方向尖灭(图5a)以及单层石灰岩尖灭于岩组内部夹层页岩之中(图5c),均说明了相对聚集的水流侧向迁移较快,且迁移方向具有随机性。从剖面底部小规模透镜体尖灭(第1岩组至第6岩组)逐渐演变为长透镜体尖灭(第7岩组和第8岩组)及板状石灰岩层(第9岩组和第10岩组),则反映了水流由强到弱的变化。上述所有特征,均体现了水道溢岸水流在天然堤上的沉积特征:由于溢岸水流的相对集中,在天然堤上形成小的冲沟,沉积了石灰岩;溢岸水流具有事件性和随机性,则导致了石灰岩层在不同方向上的尖灭及尖灭于夹层页岩和互层页岩之中;由于天然堤的不断加高和水深的不断加深,溢岸水流越来越弱,则形成了长透镜体尖灭和板状石灰岩层。

4.3 沉积构造特征

克里摩里组中段的沉积构造主要发育在第9和第10岩组,发现了2种类型。第1种是平行层-均匀层-平行层序列(图6a),发育在同一石灰岩层中,平

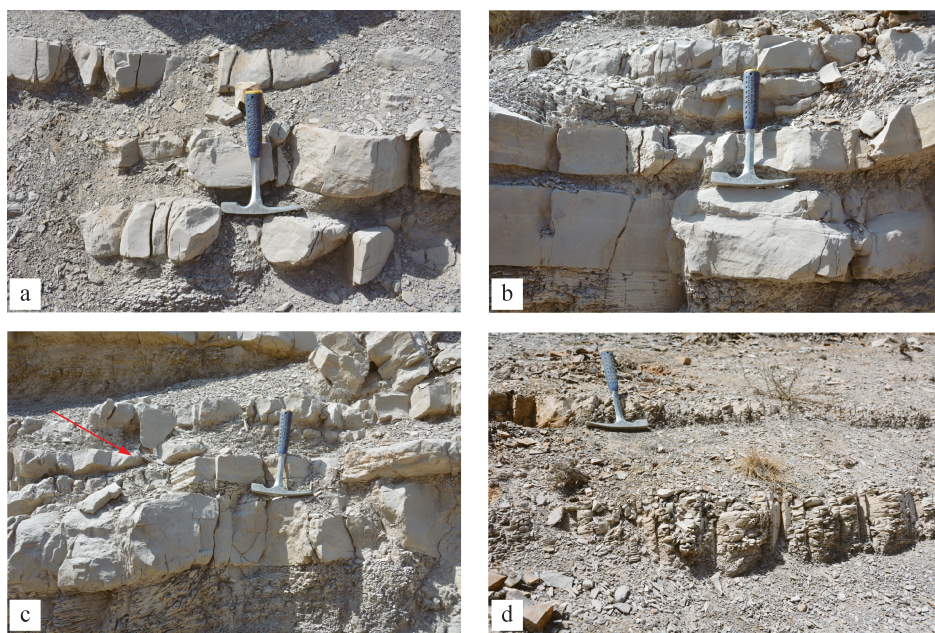


图5 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组中段混积层系中石灰岩形态特征

Fig. 5 Geometry of limestones in the mixed sequence of the middle part of the Middle Ordovician Kelimoli Formation, Zhuozishan area, Inner Mongolia

a. 单层石灰岩侧向上尖灭于页岩中,呈透镜体状,第3岩组;b. 石灰岩双向尖灭透镜体所指示的小型水道,第3岩组;c. 薄层石灰岩侧向上呈透镜体尖灭于石灰岩层所夹的页岩夹层中(箭头),第4岩组;d. 浅灰色薄-中层含粉砂灰泥石灰岩侧向呈透镜体尖灭于灰黑色页岩之中,第7岩组

行层的晶粒相对较小,层系厚度薄,但是非常明显,将均匀层隔开(图6a长箭头),均匀层的晶粒相对较粗。均匀层和平行层是相对的,其区别在于纹层厚度的不同,2者可以连续变化,形成条纹条带构造(图6a短箭头),不同的序列之间可相互叠置,宏观上构成同一岩层(图6a)。第2种是平缓微波状条纹构造(图6b),平缓是指整个纹层近水平状,微波是指纹层本身不平直,呈微小的不规则波状起伏(图6b箭头)。平缓微波状条纹构造和准平行层理不同,区别主要有两点:①前者纹层间的距离较大且不相等,有时呈现出有规律的窄—宽—窄变化,而后者纹层间的距离较小且均匀;②前者纹层围绕“平衡位置”出现众多的不规则微小波状起伏,而后者是单一的较大的波状起伏,波长与波高之比一般大于100^[55-56]。在显微镜下,可清晰地看到这种条纹是由灰泥和粉晶聚集带交替形成(图6c,d),粉晶具有正粒序,其上粉晶与灰泥呈不规则交替,粉晶具有撕裂团块状;底界波状起伏,具有明显的剥蚀性(图6c,d中长箭头所示);而顶界则与灰泥呈连续过渡,但常存在晶粒反常现象(图6c,d中短箭头所示)。灰泥和粉晶聚集带可宽可窄,与其宏观纹层特征(图6b)相吻合。平行层—均匀层—平行层序列和平缓微波状条纹构造并非截然分开,二者之间可

呈现出连续过渡,平行层—均匀层—平行层序列中的平行层可以为较清晰的平行层,也可为模糊的平行层,也可演化为断续的平行层,甚至平缓的波状层。

克里摩里组中段石灰岩中的平行层—均匀层—平行层序列(图6a),事实上包含了粒度的细—粗—细变化,反映了沉积流体强度由弱变强再变弱的变化过程,在深水环境中解释为等深流沉积^[2,51],这是中段等深流沉积的直接标志。平缓微波状条纹构造(图6b)反映了等深流具有弱的剥蚀性^[2,51],而显微镜下灰泥和粉晶聚集带的分布特征则进一步提供了具有剥蚀性质的等深流信息。粉晶底界的波状起伏与突变,说明流体一开始速度较大,具有剥蚀性,没有从小到大的变化过程,这和等深流低速期与高速期的交互略有不同^[1-2];而粉晶聚集带具有正粒序以及粉晶聚集带顶部粉晶到灰泥的连续过渡,则说明沉积流体速度随时间而减小,具有衰弱流的性质^[57-58];而粉晶聚集带上部粉晶与灰泥的不规则交替以及灰泥聚集带下部存在的晶粒反常现象,则显示出紊流的悬浮特征。以上沉积特征所显示的低速流体(等深流低流速期速度一般为5~20 cm/s;在高流速期速度一般为20~40 cm/s^[1])开始速度相对较高,具有剥蚀性,之后随时间而衰弱,但紊流性质加强,这和水道中的水流在高速期溢岸,随后在

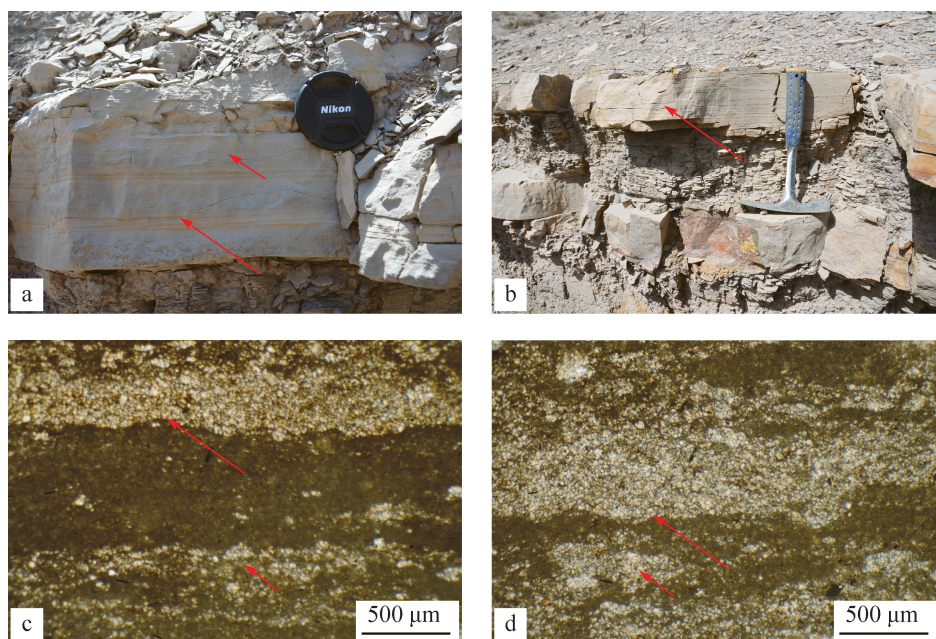


图6 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组中段混积层系中石灰岩沉积构造

Fig. 6 Sedimentary structure of limestones in the mixed sequence of the middle Middle

Ordovician Kelimoli Formation, Zhuozishan area, Inner Mongolia

a. 深灰色中层含粉砂灰泥石灰岩中的平行层—均匀层—平行层,平行层(长箭头)晶粒较细,向上演变为条纹条带构造(短箭头),第8岩组;b. 浅灰至深灰色中层粗粉晶质灰泥石灰岩,发育条纹状构造,条纹呈微波状起伏(箭头),第10岩组;c. 粗粉晶质灰泥石灰岩由粗粉晶组成的条纹状构造,粗粉晶略呈正粒序,底界不平整且粒度突变(长箭头),下部灰泥与粉晶呈连续过渡,局部存在晶粒反常(短箭头),第10岩组;d. 同c,灰泥条纹较窄,粉晶颗粒相对较为分散,存在不平整且粒度突变的底界(长箭头),及下部局部晶粒反常(短箭头),第10岩组

天然堤发散,而在冲沟中紊流性质加强的现象吻合,因此其沉积构造特征也显示了溢岸水流沉积,与依据岩层形态特征所推测出的结论一致。

5 解释与讨论

依据区域地质及岩相古地理的相关研究成果,在中奥陶世达瑞威尔期研究区位于鄂尔多斯盆地西缘台地边缘斜坡,其南部为深水盆地(图1)^[42],就其岩性特征而言,下段的薄层状石灰岩夹极薄层泥岩(图3b)可直接作为深水沉积的指相标志^[46-47,49-50];克里摩里组整体上为深水等深流沉积^[37-38],就其中段而言:平行层-均匀层-平行层序列和平缓微波状条纹构造(图6a,b)可做等深流沉积的直接标志^[1-2];石灰岩单层的透镜体尖灭(图5)及石灰岩中粉晶聚集带和灰泥聚集带的关系(图6c,d)则具有天然堤溢岸水流的沉积特征。因此,克里摩里组中段可能为深水斜坡环境下等深流溢岸混合沉积,结合该组沉积时等深流受米兰柯维奇旋回控制的现象^[35],可做出研究区克里摩里组中段混合沉积机制示意图(图7)。

由于等深流强度受天文旋回控制,故在一个天文旋回内可分出等深流强作用期和弱作用期(图7)。在弱作用期,等深流限制在水道范围内,在水道中改造已有沉积物,由于沉积物极薄,每次等深流作用都对表层的碳酸盐晶粒和粘土进行重新分选,在一个岁差周期内,形成改造后的薄层石灰岩和粘土层,即发育在下段的石灰岩-页岩对。在天然堤上则无等深流改造作用,由深水垂直降落作用形成粘土和灰质的混合物,越靠近碳酸盐补偿深度(CCD),灰质越少泥质越多。在

等深流强作用期,等深流发生溢岸,但海底的低密度流体在溢岸之后仍在一定的时间内保持原有形态,即仍然沿天然堤作等深流动(图7)。在天然堤上部形成改造型的薄层石灰岩和粘土层,即粉晶石灰岩与页岩对(图7),但在小周期(如岁差周期)的弱作用期也可在改造粘土层之上沉积垂直降落形成的粘土和灰质粘土,这可能是中段岩组中的页岩层较厚且和互层中的页岩层厚度相关的原因。

依据已有研究成果,克里摩里组对应一个3级海侵旋回(底部缺失开始海侵阶段)^[35],和鄂尔多斯盆地中奥陶世马六期(对应达瑞威尔期)3级海侵一致^[59-60],至上段和乌拉力克组达到最大海侵^[37],中段大致对应淹没阶段和浅化阶段^[35],海平面呈持续上升趋势。在石峡谷剖面中克里摩里组中段依据石灰岩与页岩的组合特征可划分3个旋回,结合该组下段的研究成果^[35],每个旋回可能相当于超旋回束,受低频离心率旋回(约0.41 Ma)控制;依据每个旋回所包含的岩组数,每个岩组可能对应于旋回束,受高频离心率旋回(约0.10 Ma)控制;岩组中的石灰岩-页岩对则受岁差周期(约0.02 Ma)控制^[35]。依据每个旋回中从下到上石灰岩减少、页岩增多的现象,可以判断在受低频离心率旋回控制的等深流强作用期和弱作用期一般分别对应较低和较高的海平面(4级或5级海平面变化);受岁差周期控制的等深流强作用期和弱作用期一般和海平面变化关系不大。受高频离心率旋回控制的等深流强作用期和弱作用期与海平面变化之间的关系尚需进一步研究。

已有研究表明,鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩主要发育在克里摩里组和乌拉力克组,为一套分布广、

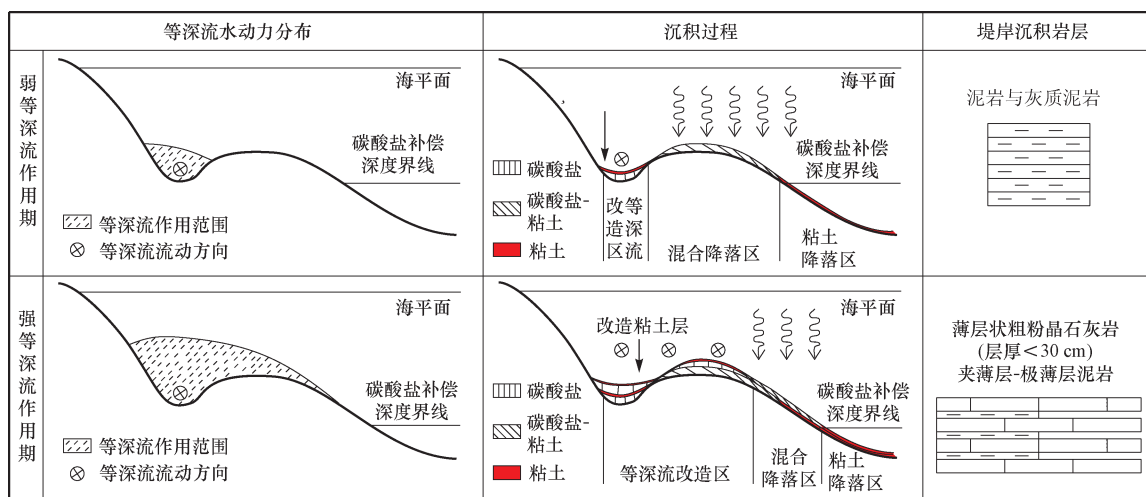


图7 内蒙桌子山地区石峡谷中奥陶统克里摩里组中段混合沉积机制示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the mixed deposition mechanism in the middle part of the Middle Ordovician Kelimoli Formation in the Shixiagu outcrop of Zhuozishan area, Inner Mongolia

厚度大的深海相泥页岩和泥质碳酸盐岩沉积^[31],其中克里摩里组泥岩有机碳含量平均为0.52%^[29],最高可达1.25%^[61],均大于海相泥页岩烃源岩生烃有机碳含量下限0.5%^[31];克里摩里组石灰岩有机碳含量平均为0.33%^[62],而前人在综合海相碳酸盐岩烃源岩生烃的有机碳含量下限及鄂尔多斯盆地下古生界多项无机与有机参数分析,认为烃源岩有机碳含量为0.2%是个重要的界限,认为碳酸盐岩生烃的有机碳含量下限一般为0.2%~0.4%。因此,克里摩里组中的深灰色薄层石灰岩和灰黑色页岩均为鄂尔多斯盆地西缘下古生界重要的烃源岩^[31,62]。

等深流对油气系统中的储集层几何形态及烃源岩的分布均可产生重要的影响^[4],克里摩里组中由等深流形成的薄层晶粒石灰岩往往有利于排烃,也有利于孔隙和裂缝的发育,间接改善储层物性。克里摩里组中段溢岸混积层系的发现,起到了承上启下的作用,连通着下段的薄层石灰岩叠置层和上段及乌拉力克组的页岩,且其自身可构成小规模自生自储岩系,对鄂尔多斯盆地西缘下古生界页岩气的勘探具有重要的意义。

6 结论

通过对桌子山地区中奥陶统克里摩里组中段深灰色中-薄层石灰岩与灰黑色页岩的组合特征、石灰岩单层形态及侧向尖灭特征和石灰岩中沉积构造的研究,结合区域地质背景和页岩的相关主量元素测试结果,综合判断石灰岩与页岩组成混积层系,包含有陆源碎屑与碳酸盐混积层系及碳酸盐(陆源碎屑岩)与混积岩混积层系2种类型。混积层系可能是深水斜坡环境下受天文旋回控制的等深流周期性溢岸混合沉积所致,在等深流强作用期形成薄层石灰岩,在弱作用期形成页岩。这种溢岸混积层系由晶粒石灰岩岩组和还原环境下形成的页岩组成互层,是小规模的自生自储岩系,对页岩气的勘探具有重要意义。

致谢:昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系教师董有浦、钟军伟,参加了相关讨论,提出了宝贵的意见,研究生张东阳、廖勇军参加了部分野外工作,在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 何幼斌,高振中,罗顺社,等. 等深流沉积的特征及其鉴别标志[J]. *江汉石油学院学报*, 1998, 20(4): 1-6.

- He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, et al. Features of contourites and their discrimination [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 1998, 20(4): 1-6.
- [3] Heezen B C, Hollister C D. Deep sea current evidence from abyssal sediments [J]. *Marine Geology*, 1964, 1(2): 141-174.
- [4] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. *Marine Geology*, 2014, 352(3): 111-154.
- [5] Stoker M S, Akhurst M C, Howe J A, et al. Sediment drifts and contourites on the continental margin off northwest Britain [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1): 33-51.
- [6] Stow D A V, Faugères J C, Viana A, et al. Fossil contourites: A critical review [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1): 3-31.
- [7] Gao Zhenzhong, Eriksson K A, He Youbin, et al. Deep-water traction current deposits-A study of internal tides, internal waves, contour currents and their deposits [M]. Beijing: Science Press, 1998, 57-119.
- [8] Hernández-Molina F J, Llave E, Somoza L, et al. Looking for clues to paleoceanographic imprints: a diagnosis of the gulf of Cadiz contourite depositional systems [J]. *Geology*, 2003, 31(31): 19-22.
- [9] Hernández-Molina F J, Paterlini M, Violante R, et al. Contourite depositional system on the Argentine slope: an exceptional record of the influence of Antarctic water masses [J]. *Geology*, 2009, 37(6): 507-510.
- [10] Shanmugam G. Modern internal waves and internal tides along oceanic pycnoclines: challenges and implications for ancient deep-marine baroclinic sands [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(5): 767-811.
- [11] Hernández-Molina F J, Hodell D A, Stow D A V, et al. IODP Expedition 339-The Mediterranean outflow. *Marine Geology & Global And Planetary Change*. <http://www.journals.elsevier.com/global-and-planetary-change/news/article-collection-iodp-expedition-339>.
- [12] Hernández-Molina F J, Sierro F J, Llave E. Evolution of the gulf of Cadiz margin and southwest Portugal contourite depositional system: Tectonic, sedimentary and paleoceanographic implications from IODP expedition 339 [J]. *Marine Geology*, 2016, 377(8): 7-39.
- [13] Lofi J, Voelker A H L, Ducassou E, et al. Quaternary chronostratigraphic framework and sedimentary processes for the gulf of Cadiz and Portuguese contourite depositional systems derived from Natural Gamma Ray records [J]. *Marine Geology*, 2016, 377(8): 40-57.
- [14] Hernández-Molina F J, Llave E, Stow D A V, et al. The contourite depositional system of the gulf of Cádiz: A sedimentary model related to the bottom current activity of the Mediterranean outflow water and its interaction with the continental margin [J]. *Deep-Sea Research II*, 2006, 53(11-13): 1420-1463.
- [15] Howe J A, Shimmield T M, Harland R. Late Quaternary contourites and glaciomarine sedimentation in the Fram strait [J]. *Sedimentology*, 2008, 55(1): 179-200.
- [16] Verdicchio G, Trincardi F. Mediterranean shelf-edge muddy contourites: examples from the Gela and south Adriatic basins [J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(3): 137-151.
- [17] Llave E, Matias H. Pliocene-Quaternary contourites along the northern gulf of Cadiz Margin: Sedimentary stacking pattern and regional distribution [J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(5-6): 377-390.
- [18] Nielsen T, Andersen C, Knutz P C. The Middle Miocene to recent Davis Strait drift complex: Implications for Arctic-Atlantic water ex-

- change[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(5-6): 419-426.
- [19] Marshall N R, Piper D J W, Saint-Ange F, et al. Late Quaternary history of contourite drifts and variations in Labrador current flow, Flemish Pass, offshore eastern Canada[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34(5): 457-470.
- [20] Jiang Zaixing, Zhao Chenglin, Xiong Jihui. The Lower Silurian contourite and its geological implication in central Anhui Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(13): 1101-1104.
- [21] 刘宝珺, 许效松, 梁仁枝. 湘西黔东寒武纪等深流沉积[J]. *矿物岩石*, 1990, 10(4): 43-47.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Liang Renzhi. Contourites of Cambrian in western Hunan and eastern Guizhou[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1990, 10(4): 43-47.
- [22] 段太忠, 郭建华, 高振中, 等. 华南古大陆边缘湘北九溪下奥陶统碳酸盐等深岩丘[J]. *地质学报*, 1990, 64(2): 131-143.
- Duan Taizhong, Guo Jianhua, Gao Zhenzhong, et al. A Lower Ordovician carbonate drift on the margin of the south China palaeocontinent in Jiuxi, northern Hunan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1990, 64(2): 131-143.
- [23] 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯地区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.
- [24] Bozzano G, Violante R A, Cerredo M E. Middle slope contourite deposits and associated sedimentary facies off NE Argentina[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(5-6): 495-507.
- [25] 何自新, 付金华, 孙六一. 鄂尔多斯盆地西北部地区天然气成藏地质特征与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2002, 7(1): 56-66.
- He Zixin, Fu Jinhua, Sun Liuyi. Geological characteristics and exploration potential of natural gas reservoir in Northwest region of Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2002, 7(1): 56-66.
- [26] 杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 733-740.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 733-740.
- [27] 张春林, 庞雄奇, 田世澄, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系古油藏油源对比与靖边气田油源[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1242-1251.
- Zhang Chunlin, Pang Xiongqi, Tian Shicheng, et al. Oil-source correlation of paleo-reservoir in Ordovician and the gas source of Jingbian gasfield, west Ordos basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1242-1251.
- [28] 吴伟涛, 赵靖舟, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系克里摩里组天然气成藏特征[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1862-1872.
- Wu Weitao, Zhao Jingzhou, Sun Liuyi, et al. Accumulation characteristics of natural gas from the Ordovician Kelimoli Formation, western Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1862-1872.
- [29] 赵靖舟, 王大兴, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系气源及其成藏规律[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 711-720.
- Zhao Jingzhou, Wang Daxing, Sun Liuyi, et al. Origin of the Ordovician gas and its accumulation patterns in Northwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 711-720.
- [30] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩生烃能力评价[J]. *天然气工业*, 2007, 27(12): 62-64.
- Kong Qingfen, Zhang Wenzheng, Li Jianfeng, et al. Evaluation of the oil generation capability of Ordovician Source Rocks in Western Margin of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(12): 62-64.
- [31] 武春英, 贾亚妮, 韩会平, 等. 鄂尔多斯盆地西缘探区奥陶系烃源岩评价[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(2): 180-185.
- Wu Chunying, Jia Yani, Han Huiping, et al. Evaluation of Ordovician source rocks in western margin of Ordos basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(2): 180-185.
- [32] 丁海军, 孟祥化, 葛铭, 等. 从桌子山剖面看贺兰坳拉谷北段奥陶系等深流沉积[J]. *安徽地质*, 2008, 18(1): 8-15.
- Ding Haijun, Meng Xianghua, Ge Ming, et al. Ordovician contourite deposition on the northern segment of the Helan aulacogen seen from the Bench MT section[J]. *Geology of Anhui*, 2008, 18(1): 8-15.
- [33] 丁海军, 徐焕华. 浊流与等深流的流态转化[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(1): 87-91.
- Ding Haijun, Xu Huanhua. Transformation from turbidity current to contour current[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(1): 87-91.
- [34] 李日辉. 桌子山中奥陶统公乌素组等积岩的确认及沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(3): 235-240.
- Li Rihui. Identification of contourites in Middle Ordovician Gongwushu Formation, Zhuozishan, and depositional environment[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(3): 235-240.
- [35] 李向东, 阙易, 邹雅棋. 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[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(3): 276-291.
- Li Xiangdong, Que Yi, Huan Yaqi. Analysis of vertical sedimentary successions in the lower part of Kelimoli Formation, Middle Ordovician, Zhuozishan area[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(3): 276-291.
- [36] 李向东, 邹雅棋, 阙易. 桌子山中奥陶统克里摩里组下段稀土元素特征与沉积介质分析[J]. *地质科学*, 53(2): 547-565.
- Li Xiangdong, Huan Yaqi, Que Yi. REE geochemistry and analysis of sedimentary aqueous media in lower part of Kelimoli Formation, Middle Ordovician, Zhuozishan area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 53(2): 547-565.
- [37] 李向东, 邹雅棋. 鄂尔多斯盆地西缘桌子山地区奥陶系深水条纹条带状泥岩等深流成因分析[J]. *古地理学报(中文版)*, 2017, 19(6): 987-997.
- Li Xiangdong, Huan Yaqi. Origin of deep-water stripped-and-banded mudstones related to contour currents in the Ordovician, Zhuozishan area, Western margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese edition)*, 2017, 19(6): 987-997.
- [38] 李向东, 阙易, 邹雅棋. 桌子山地区中奥陶统克里摩里组深水等深流沉积模式[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(2): 285-296.
- Li Xiangdong, Que Yi, Huan Yaqi. Depositional model for contourites the Kelimoli Formation, Middle Ordovician, Zhuozishan Area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(2): 285-296.
- [39] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(12): 432-435.
- [40] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. *古地理学报*, 2001, 3(3): 63-66.
- Sha Qingan. Discussion on mixing deposit and hunji rock[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(3): 63-66.
- [41] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中

- 的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931–939.
- Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediment[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 931–939.
- [42] 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.
- [43] 韩品龙, 张月巧, 冯乔, 等. 鄂尔多斯盆地祁连海域奥陶纪岩相古地理特征及演化[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 822–827.
- Han Pinlong, Zhang Yueqiao, Feng Qiao, et al. Petrofacies palaeogeography and evolution of Ordovician of Qilian sea area in Ordos basin[J]. *Geoscience*, 2009, 23(5): 822–827.
- [44] 费安玮. 鄂尔多斯盆地拉什仲组遗迹化石组合与古环境[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3): 278–287.
- Fei Anwei. Study of trace fossil assemblage and paleoenvironment of Middle Ordovician Lashizhong Formation, Ordos basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(3): 278–287.
- [45] 费安玮. 桌子山中奥陶世古乌素组遗迹化石组合与古地理环境[J]. 现代地质, 2000, 14(3): 366–372.
- Fei Anwei. Trace fossil assemblages and palaeoenvironment of Middle Ordovician Gongwusu Formation, Zhuozishan, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 2000, 14(3): 366–372.
- [46] Mawson M, Tucker M. High-frequency cyclicity (Milankovitch and millennial-scale) in slope-apron carbonates: Zechstein (Upper Permian), North-east England[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(6): 1905–1936.
- [47] Hersi O S, Abbasi I A, Al-Harthy A. Sedimentology, rhythmicity and basin-fill architecture of a carbonate ramp depositional system with intermittent terrigenous influx: The Albian Kharfot Formation of the Jeza-Qamar Basin, Dhofar, Southern Oman[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 331: 114–131.
- [48] 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区岩石地层(全国地层多重划分对比研究 64)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 3–46.
- Bureau of Geological and Mineral Resources of Ningxia Hui Autonomous Region. Stratigraphy (Lithostratic) of Ningxia Hui Autonomous Region (Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy of China 64)[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 3–46.
- [49] Búdenas B, Pomar L, Aurell M, et al. A facies model for internalites (internal wave deposits) on a gently sloping carbonate ramp (Upper Jurassic, Rícla, NE Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 271–272: 44–57.
- [50] Kietzmann D A, Palma R M, Riccardi A C, et al. Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian-Valanginian carbonate ramp (Vaca Muerta Formation): A misunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquén Basin, Argentina[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 302: 64–86.
- [51] Kietzmann D A, Palma R M, Llanos M P I. Cyclostratigraphy of an orbitally-driven Tithonian-Valanginian carbonate ramp succession, Southern Mendoza, Argentina: Implications for the Jurassic-Cretaceous boundary in the Neuquén Basin[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 315: 29–46.
- [52] 蔡雄飞. 深水沉积环境条带状层理的分类特征及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(4): 84–88.
- Cai Xiongfei. The types and geological implications of the banded stratification in deep-water sedimentary environments[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21(4): 84–88.
- [53] Schieber J, Southard J B, Kissling P, et al. Experimental deposition of carbonate mud from moving suspensions: importance of flocculation and implications for modern and ancient carbonate mud deposition[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(11): 1025–1031.
- [54] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松, 等. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 312–314.
- Guo Fusheng, Yan Zhaobin, Du Yangsong, et al. Discussion on mixing deposit, Hunji rock and Hunji sequence[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 312–314.
- [55] Arnott R W, Southard J B. Exploratory flow-duct experiments on combined-flow bed configurations and some implications for interpreting storm-event stratification[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(2): 211–219.
- [56] Arnott R W C. Quasi-planar-laminated sandstone beds of the Lower Cretaceous Bootlegger Member, North-Central Montana: Evidence of combined-flow sedimentation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(3): 488–494.
- [57] Kneller B C, Branney J M. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands[J]. *Sedimentology*, 1995, 42(4): 607–616.
- [58] Mulder T, Migeon S, Savoye B, et al. Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2001, 21(2): 86–93.
- [59] 苏中堂, 陈洪德, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 623–633.
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Ouyang Zhengjian et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 623–633.
- [60] 王起琼, 闫佐, 宁博, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组豹皮灰岩特征及其成因[J]. 古地质量, 2016, 18(1): 39–48.
- Wang Qicong, Yan Zuo, Ning Bo et al. Characteristics and genesis of leopard limestone of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(1): 39–48.
- [61] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相沉积有机质的碳同位素记录及其环境意义—以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 11–16.
- Tengger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Organic carbon isotope record in marine sediment and its environmental significance—An example from Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 11–16.
- [62] 肖晖, 赵靖舟, 熊涛, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起西侧奥陶系烃源岩评价及成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1087–1097.
- Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Xiong Tao et al. Evaluation of Ordovician source rocks and natural gas accumulation patterns in west flank of a paleo-uplift, Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1087–1097.