

文章编号: 1000-0550(2025)04-1213-20

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组混积岩岩相类型及沉积模式

白莹¹, 马占荣², 黄正良³, 闫伟³, 高建荣¹, 赵振宇¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 西安 710018

3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

摘要 【目的】近年来, 多口探井在奥陶系乌拉力克组混积岩层位获得工业气流, 突破了鄂尔多斯盆地西缘混积岩的勘探禁区。探明乌拉力克组混积岩岩相类型及沉积模式, 可为西缘地区下步油气勘探工作提供理论基础和实际资料。【方法】基于典型钻井岩心和露头资料, 综合利用薄片、扫描电镜及测井资料, 对西缘乌拉力克组岩相、沉积相及展布规律进行研究。【结果与结论】鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组岩石可分为混积岩相、陆源碎屑岩相和碳酸盐岩相三类, 其垂向序列组合方式受控于两期海侵事件, 而岩相变化则进一步受控于局部水动力条件。岩相类型、垂向序列、测井、地球化学等相标志显示, 乌拉力克组发育台地、陆棚、斜坡和盆地四种沉积相带, 并可进一步划分为7种亚相和15种微相。东部台地相发育“潮间滩—潮间坪”序列和“潮汐风暴—潮汐水道—潮汐砂坝”序列; 中部陆棚相发育“陆棚风暴—滨岸/浅海砂坝”序列和“陆棚泥”序列; 西部斜坡—盆地相以浊积扇、峡谷水道和盆泥为主。层序SQ1形成时期水体整体较深, 发育大段泥页岩, 层序SQ2沉积时期水体整体变浅, 加之受微生物建造以及西缘—中东部相连影响, 导致斜坡相—陆棚相亦整体变窄且向西后退。乌拉力克组的岩石类型和沉积特征主要受物源供给、古地貌特征和水动力条件影响, 其中充足的物源供给是西缘地区混合沉积的基本条件。

关键词 鄂尔多斯盆地; 乌拉力克组; 混积岩; 岩相; 沉积相

第一作者简介 白莹, 女, 1990年出生, 博士研究生, 高级工程师, 储层沉积学, E-mail: byshimmer@petrochina.com.cn

通信作者 赵振宇, 男, 高级工程师, E-mail: zhaozy01@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.120

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.120

0 引言

混积岩是混合沉积的狭义概念, 为陆源碎屑组分与碳酸盐组分在同一岩层内相互混合的产物^[1-6], 其沉积环境可涵盖湖泊、滨岸、台地和陆棚^[7-13], 另外大陆架和斜坡等深水环境中亦有分布^[14-19]。随着油气勘探工作的逐步深入, 混积岩在渤海湾盆地古近系沙河街组^[15]和柴达木盆地古近系下干柴沟组^[16], 以及美国 Williston 盆地 Bakken 组^[17]、Maverick 盆地 Eagle Ford 组^[18]和非洲 Lower Congo 盆地 Albian 阶^[19]均已成功突破。

鄂尔多斯盆地混积岩分布广泛, 但因缺乏重大

油气发现, 未能引起足够重视^[20]。20世纪80年代以来下古生界天然气勘探主要集中在中奥陶统克里摩里组碳酸盐岩储层^[21], 而对上奥陶统发育的混积岩缺乏关注。2017年Z4井在上奥陶统乌拉力克组获4.18万方/日工业气流, 拉开了西缘海相页岩气勘探的序幕^[21-23], 2019年ZP1井获6.42万方/日工业气流, 标志着页岩气勘探取得突破性进展。然而, 后续跟进研究表明, Z4井和ZP1井的出气层位实际为乌拉力克组底部深水相泥质灰岩和灰质泥岩。与此同时, L52井在乌拉力克组顶部浅水相含泥灰岩获1.7万方/日工业气流, 突破了混积岩的勘探禁区, 证实乌拉力克组混积岩具备油气成藏条件, 有望成为鄂尔多斯盆

收稿日期: 2024-07-08; **修回日期:** 2024-11-13; **录用日期:** 2025-04-01; **网络出版日期:** 2025-04-01

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2022KT0302) [Foundation: China National Petroleum Corporation Scientific Research and Technological Development Project, No. 2022KT0302]

地油气勘探的新领域。

目前,对于鄂尔多斯盆地乌拉力克组混积岩组合体系的岩相类型、沉积相展布特征及沉积模式尚缺乏明确而直观的认识。鉴于此,笔者依托于鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组典型钻井岩心、薄片、测井和相关地球化学资料,对岩相、沉积相展布规律及沉积模式进行初步探讨,以为鄂尔多斯盆地混积岩的油气勘探部署提供科学依据及理论支撑。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大含油气盆地,横跨陕、晋、蒙、宁、甘五个省区,属于多旋回叠合盆地^[24](图1a)。受早古生代基底构造活动影响,鄂尔多斯盆地在奥陶纪发育南北向“L”型中央古隆起,将海域分隔开来,东西沉积特征差异明显:以东为陆表海碳酸盐岩台地沉积,西缘则主要受秦祁贺三叉裂谷控

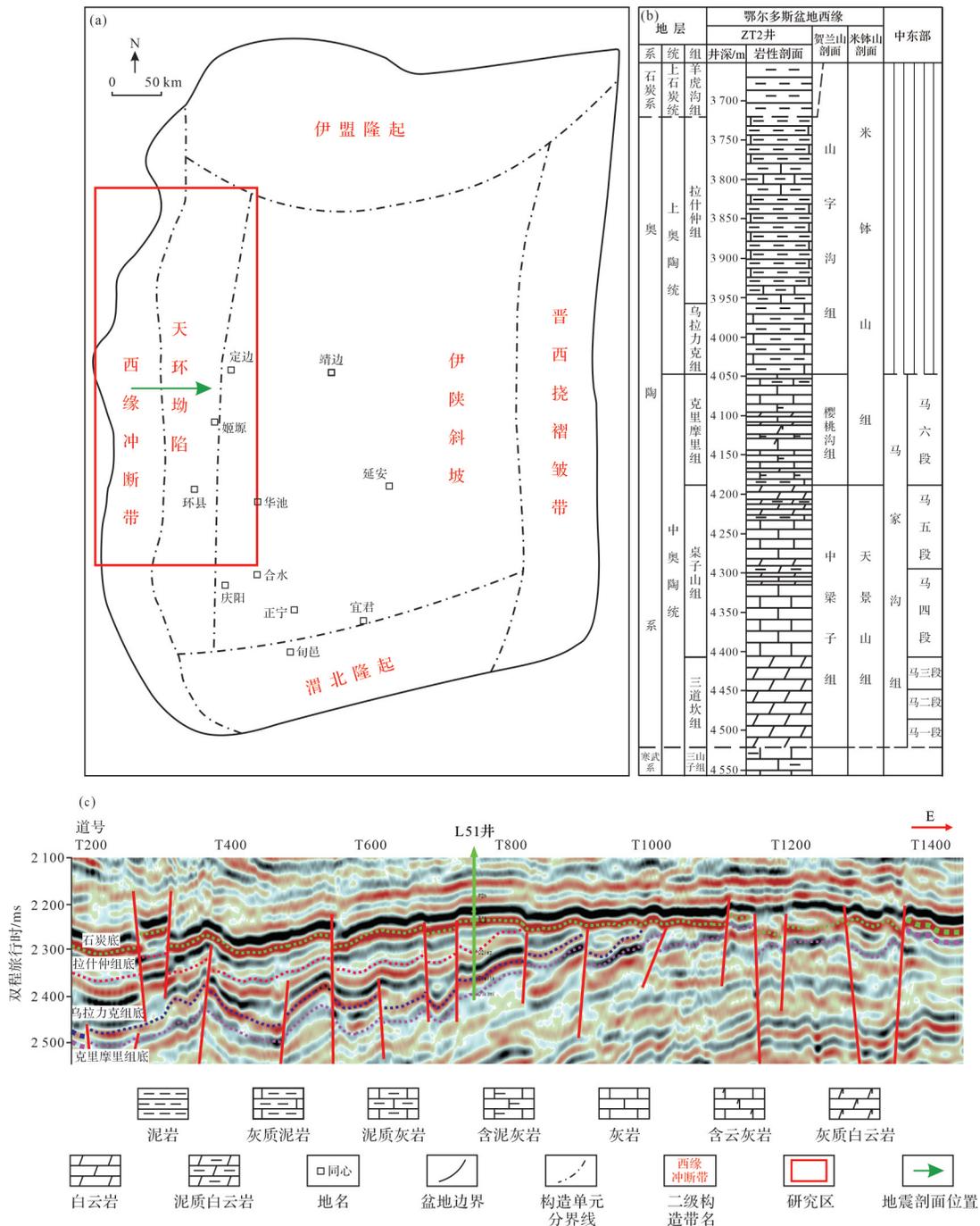


图1 鄂尔多斯盆地西缘地区位置(a),地层结构(b)和典型地震剖面特征(c)

Fig.1 Wulake Formation, western edge of the Ordos Basin: (a) location; (b) stratigraphic division; (c) seismic characteristics

制,具有被动大陆边缘性质,后期受逆冲推覆运动影响,变形较为复杂^[24-27]。

研究区位于鄂尔多斯盆地西缘北段及中段,普遍缺失下奥陶统,中奥陶统达瑞威尔阶直接覆盖于寒武系之上,包括三道坎组、桌子山组、克里摩里组,以浅海相—台地相为主;而上奥陶统桑比阶由乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组和蛇山组组成,以陆棚—斜坡相为主^[28-30](图1b)。宏观地层对比显示,残余的乌拉力克组主要分布在西缘北段及中段,厚度介于50~150 m,具有“东薄西厚”的展布特征和“西低东高”的古地理格局(图1c)。其底部为奥陶纪最大海侵面^[25,28,30],向上水体逐渐变浅,发育SQ1和SQ2两个完整的三级层序,可自下而上可划分为4个岩性段,分别为薄层泥质岩、薄—中层灰质岩、薄层泥质岩和中层灰质岩^[30]。

2 岩相序列及类型

2.1 垂向序列

通过对QT11井奥陶系进行岩心观察,认为乌拉力克组发育两个向上变浅的三级层序SQ1和SQ2,每个层序由海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。依据稳定分布的泥岩和岩性转换面将乌拉力克组进一步划分为6个四级层序(图2)。

四级层序3¹发育在层序SQ1界面之上,即奥陶系最大海侵面之上,对应自然伽马(GR)曲线突变界面,与自然电位(SP)曲线缓慢增高现象。该四级层序大致对应TST,岩相类型主要是泥页岩和含生屑/砾屑泥页岩,基本以水平纹层和正粒序层理为主,对应陆棚风暴平息期/高峰期间歇动荡沉积产物。四级层序3¹²和3¹³组成了HST,该段GR曲线呈钟形+漏斗形,SP曲线整体偏高。四级层序3¹²和3¹³沉积特征相

似,下部发育冲刷面和滞留沉积物,上部多见交错层理/水平层理,指示潮汐水道的迁移现象,顶部水体再次变浅,开始发育灰质滩。

四级层序3²¹发育在层序SQ2界面之上,对应GR曲线突变界面,与SP曲线缓慢增高现象。该四级层序大致位于TST下部,其岩相特征与3¹¹类似。四级层序3²²位于TST上部,发育大段泥岩,指示乌拉力克组内部的一期次级海侵现象,此时GR曲线呈齿状,SP曲线具有降低的趋势。四级层序3²³对应HST,发育波状—水平层理灰质泥页岩和低角度交错层理泥质灰岩等岩相,具反韵律结构,为典型的潮坪沉积产物。此时GR曲线呈箱状,SP曲线具有明显降低的趋势。

综上,乌拉力克组发育的两套垂向总体向上变浅的旋回是由两期海侵事件引起的,而次级层序和岩相变化则进一步受控于局部水动力条件。

2.2 岩相类型

结合样品薄片鉴定及X射线衍射结果(表1),依据董桂玉等^[12]的混积岩命名方案将鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组岩石划分为混积岩相、陆源碎屑岩相与碳酸盐岩相三类,并进一步结合沉积构造特征和古地理背景划分为22种岩相类型^[31-36]。

2.2.1 中灰色薄层状灰质泥页岩相(hyb1)

该混积岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ1和SQ2下降半旋回的顶部,横向连续性较好,单层厚度可达10 cm以上,多发育在冲刷沟槽之上(图3a),镜下亦可见显微冲刷面(图3b)。层序SQ1可见hyb1单层均厚约2~3 cm,具波状—水平层理(图3a)。镜下见显微韵律结构,底部为白云石、云化钙球与黄铁矿、泥质纹层伴生,向上泥质含量逐渐减少(图3c,d),指示间歇式安静水体环境^[37]。层序SQ2可见hyb1单层厚度可达2~5 cm(图3e),见羽状交错层理和撕裂状泥质

表1 鄂尔多斯盆地西缘地区碳酸盐岩、碎屑岩和混积岩X射线衍射鉴定结果表(%)

Table 1 X-ray diffraction identification of carbonate, clastic and hybrid rocks in the western margin area, Ordos Basin (%)

矿物 岩性	成分及其含量						
	方解石	白云石	石英	长石	黏土矿物	石膏/石盐	黄铁矿/菱铁矿
碳酸盐岩(9套)	71~85	2~19	4~9	0~2	2~7	0	0
	(79.4)	(8.6)	(6.4)	(0.8)	(4.8)	(0)	(0)
混积岩(12套)	4~56	2~19	16~55	5~9	15~29	0	0~2
	(30.5)	(10.8)	(32.5)	(6.7)	(20.7)	(0)	(0.7)
陆源碎屑岩(7套)	4~13	3~27	30~60	8~10	16~32	0	1~2
	(8.4)	(8.8)	(47.2)	(8.8)	(25.2)	(0)	(1.6)

注:部分陆源碎屑由成分复杂的岩屑组成,因此单纯依靠XRD不能反映岩石的真实物质组成,需要进一步依靠薄片鉴定结果,括号内为平均值。

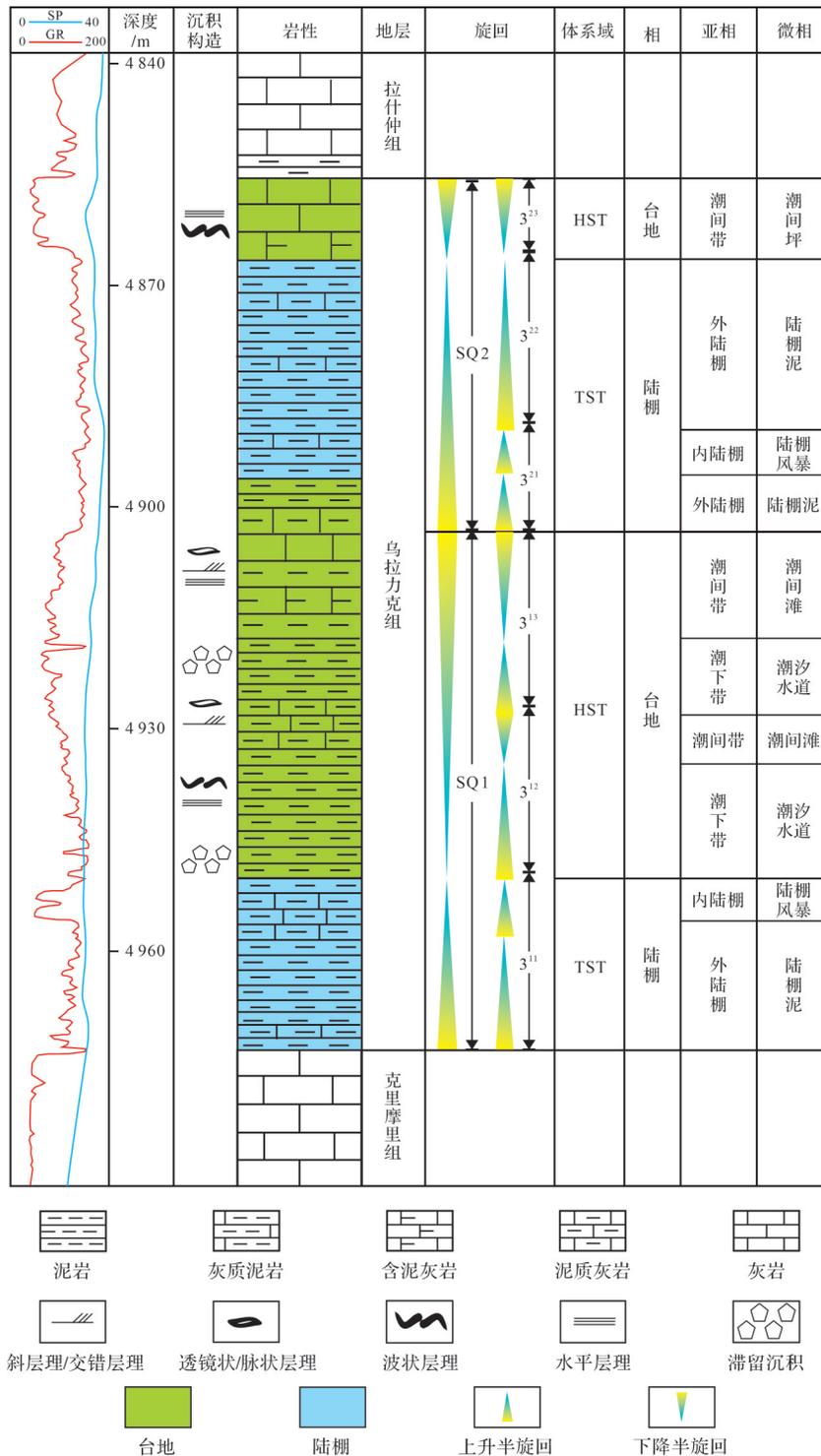


图2 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组QT11井单井综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of well QT11, Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

条带(图3f),亦可发育水平层理。粒度概率累积曲线为三段式,可包含滚动、跳跃及悬浮三组总体(图4),指示水动力略强,成分复杂的潮间带环境。

2.2.2 中灰色薄层状泥质灰岩相(hyb2)

该混积岩相多与hyb1伴生,多以冲刷沟槽/微剥

蚀面与其相隔(图3a, b, g),见撕裂状泥屑和小角度羽状交错层理(图3h),指示潮流的间歇性侵蚀/沉积作用^[37-40]。粒度曲线呈两段式,包括滚动和跳跃2个总体(图4),可能说明高能环境下细粒悬浮物易被水流带走,无法持续沉积。

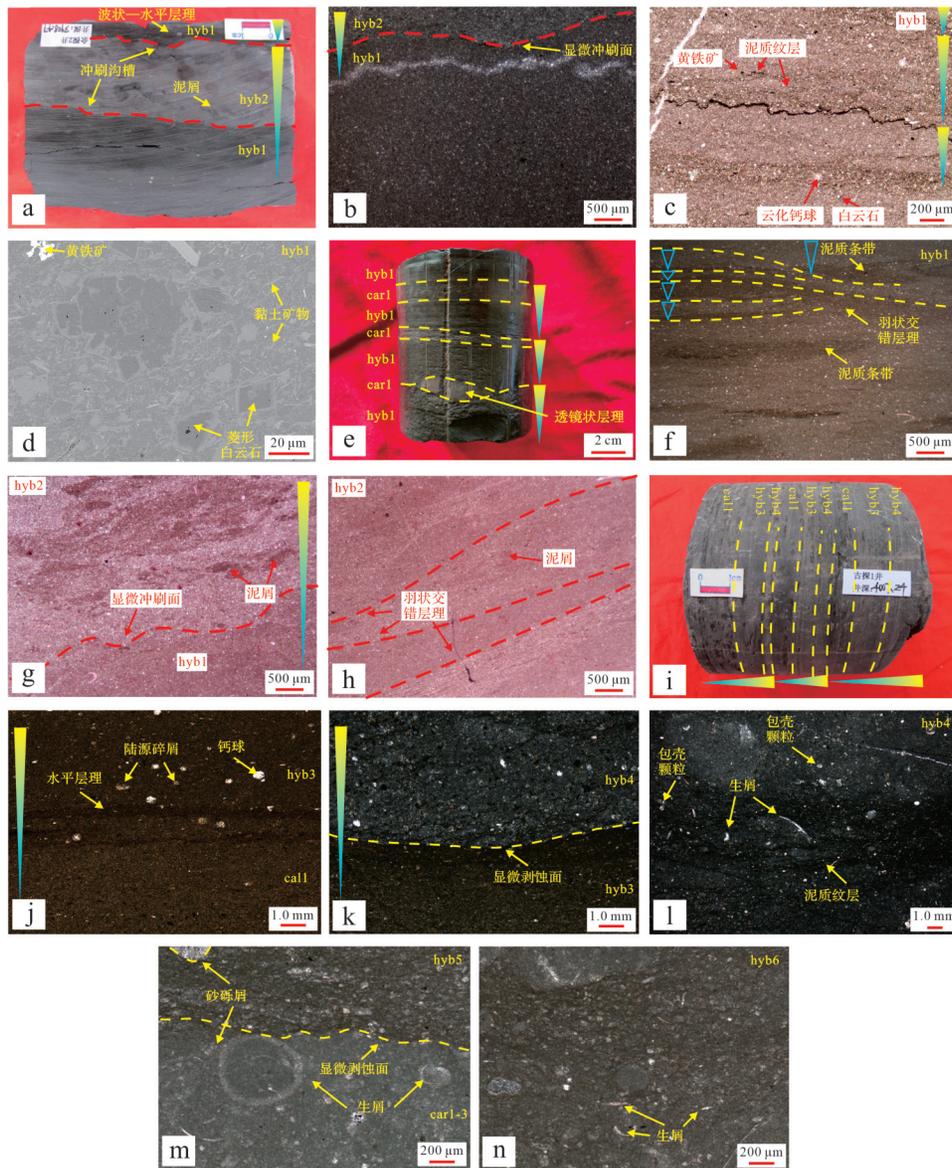


图3 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组浅水混积岩相沉积特征

(a)“hyb1→hyb2”旋回,hyb1与hyb2以冲刷沟槽相隔,岩心,YT2井,3 910.00 m;(b)hyb1,泥晶结构,正交偏光,LT1井,4 887.00 m;(c)hyb1,显微反韵律层理,单偏光,E108井,3 681.00 m;(d)图(c)韵律纹层底部,菱形白云石、黏土矿物与黄铁矿伴生,扫描电镜(SEM),E108井,3 681.00 m;(e)“hyb1→car1”旋回,见透镜状层理,岩心,QT11井,4 930.90 m;(f)hyb1,泥晶结构,见羽状交错层理和泥质条带,单偏光,QT11井,4 930.90 m;(g)“hyb1→hyb2”旋回,hyb2发育大量泥屑,茜素红染色显微照片,L50井,4 084.00 m;(h)hyb2,羽状交错层理与泥屑伴生,茜素红染色显微照片,L50井,4 086.00 m;(i)“cal1→hyb3→hyb4”旋回,岩心照片,GT1井,4 007.24 m;(j)“cal1→hyb3”旋回,cal1和hyb3以渐变状接触,单偏光,GT1井,4 006.40 m;(k)“hyb3→hyb4”旋回,hyb3和hyb4以一显微剥蚀面相隔,正交偏光,GT1井,4 007.80 m;(l)hyb4,见包壳颗粒和生屑,正交偏光,GT1井,4 007.80 m;(m)car1-3与hyb5以一显微剥蚀面相隔,单偏光,QT11井,4 928.40 m;(n)hyb6,见生屑,单偏光,QT11井,4 928.40 m

Fig.3 Sedimentary characteristics of the shallow-water migmatites lithofacies in the Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

(a) photograph of core showing hyb1→hyb2 sequence, with hyb1 and hyb2 separated by erosion grooves, core, well YT2, 3 910.00 m; (b) photomicrograph of hyb1 mud crystal structure, cross-polarized light (XPL), well LT1, 4 887.00 m; (c) photomicrograph of rhythmic bedding in hyb1, plane-polarized light (PPL), well E108, 3 681.00 m; (d) Scanning Electron Microscope (SEM) photomicrograph showing the bottom of the rhythmic layer in (c), with rhombic dolomite and associated clay minerals and pyrite, well E108, 3 681.00 m; (e) core photograph of hyb1→car1 sequence with lens-like bedding, well QT11, 4 930.90 m; (f) photomicrograph of mud crystal structure in hyb1 with feather-like cross-bedding and mud bands, PPL, well QT11, 4 930.90 m; (g) photomicrograph of Alizarin red stained hyb1→hyb2 sequence, with hyb2 containing a large amount of mud debris, well L50, 4 084.00 m; (h) photomicrograph of Alizarin red stained hyb2, showing feathered cross-bedding accompanied by mud debris, well L50, 4 086.00 m; (i) core photograph of cal1→hyb3→hyb4 sequence, well GT1, 4 007.24 m; (j) photomicrograph of cal1→hyb3 sequence, showing graded contact between cal1 and hyb3, PPL, well GT1, 4 006.40 m; (k) microphotograph of hyb3→hyb4 sequence, showing hyb3 and hyb4 separated by a microscopic erosion surface, XPL, well GT1, 4 007.80 m; (l) microphotograph of hyb4 showing shell particles and debris, XPL, well GT1, 4 007.80 m;(m) microphotograph of car1-3 and hyb5 separated by a microscopic erosion surface, PPL, well QT11, 4 928.40 m; (n) microphotograph of hyb6 showing debris, PPL, well QT11, 4 928.40 m

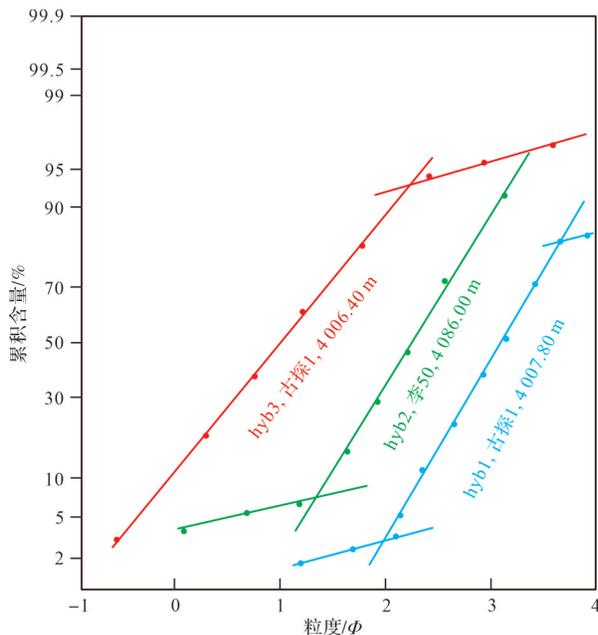


图4 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组
概率累积曲线

Fig.4 Probability cumulative curve, Wulalike Formation,
western edge of the Ordos Basin

2.2.3 浅灰色薄层状含砂屑灰质泥页岩相(hyb3)

该混积岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ1和SQ2下降半旋回的顶部和中部,横向连续性较好,单层厚度可达10 cm以上。hyb3具韵律结构,多以一显微剥蚀面/岩性转换面与其他岩相相隔,或呈渐变状接触(图3i~k),其底部发育水平层理,向上见钙球和陆源碎屑(图3j),亦可发育低角度交错层理,指示水动力逐渐增强。粒度曲线呈两段式,包括跳跃和悬浮2个总体(图4),可能说明不稳定的水体流速难以维持沉积物的持续滚动搬运。

2.2.4 薄层状砂屑灰质泥页岩相(hyb4)

该混积岩相多与hyb3伴生,岩心上以岩性转换面相隔(图3j),而镜下以显微剥蚀面为界,或以渐变状接触(图3j,k)。hyb4发育泥质纹层,大量内碎屑沉积在背景沉积物中,亦可组成脉状层理。部分内碎屑见明显包壳颗粒和生屑结构,可看作是打碎再沉积的产物(图3l)。

2.2.5 薄层状泥质砂屑灰岩相(hyb5)

该混积岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ1下降半旋回,具有一定连续性。hyb5底部以冲沟/显微剥蚀面与其他岩相相隔(图3m),含有大量砂屑。这些砂屑以中砂级别为主,多呈椭圆状—纺锤状,磨圆度中等,具定向性和叠瓦状分布特征,指示原地滞留沉积^[14,37]。砂屑屑之间的背景沉积物以泥质为主,

含有大量粉砂级碎屑,可看作间歇期的产物(图3m)。

2.2.6 浅灰色中—薄层状含砂屑灰质泥页岩相(hyb6)

该混积岩相多与hyb5伴生,宏观/微观方面以岩性转换面相隔。hyb6多发育水平层理或波状层理,与hyb5相比砂屑磨圆度较好,且呈悬浮状漂浮在背景泥质沉积物中(图3n),可能指示水动力条件整体减弱。

2.2.7 浅灰色薄层状灰质砂屑岩相(hyb7)

该类混积岩相多与hyb3-5伴生,横向连续性较差,具有两种不同的特征。第一种以YT1井为代表,岩相底部见明显的风暴削截面(图5a)。hyb7砾石呈棱角状—一次圆状,可能指示高峰期风暴涡流的改造作用^[38-39]。砾石间见大量破碎程度中等的介壳(图5b),具定向性与滞留沉积性质,其成分和hyb1类似,可能说明该套风暴岩源自风暴上部回流对浅层沉积物的改造,即风暴衰减期,风暴漫流和风暴潮流可再次冲蚀上覆砂坝^[40],在重力作用的影响下,砂坝碎屑与背景沉积物(图5c)发生事件突变沉积混合^[13]。第二种以N1井为代表,粒度明显较YT1井细,且不存在明显的风暴削截面以及岩相界面(图5d)。hyb7可发育波状层理,具不明显的韵律结构,其底部生物碎屑整体分选性较差,破碎严重,个别保存完整(图5e),上部泥质含量较多,可大致归为风暴减弱后的远端风暴浊流沉积^[40]。此时混积岩的成因则介于事件突变沉积混合和相缘渐变沉积混合之间^[3]。

2.2.8 深灰色薄层状含灰泥页岩相(hyb8)

该类混积岩相多与hyb7伴生,横向连续性一般,具有背景沉积物的性质。YT1井hyb8可见大量破碎严重的生屑碎片悬浮在泥质中,可能为风暴漫流和风暴潮流进一步衰减的产物(图5c)。N1井hyb8发育大量波状层理和砂质透镜体(图5f),可大致归为被潮水改造的远端风暴浊流沉积^[40]。整体来看混积岩的成因则介于事件突变沉积混合和相缘渐变沉积混合之间^[3]。

2.2.9 中灰色薄层状含砂屑泥质灰岩相(hyb9)

该混积岩相主要发育在西缘地区中西部,层序SQ1和SQ2上升半旋回,具有一定连续性。底部发育冲刷面,具有明显的正粒序结构,底部可见灰质砾屑和陆源碎屑成分,具有一定磨圆度(图5g),而上部可渐变为正常天气条件下受波浪作用改造的浅海砂质泥岩。

2.2.10 中灰色薄层状含灰泥页岩相(hyb10)

该混积岩相多与hyb9伴生。hyb10底部发育冲刷面,偶见波状层理,可见生屑定向分布(图5h),可能指示波浪作用较弱的区域。

2.2.11 中灰色薄层状含生屑泥页岩相(hyb11)

该混积岩相主要发育在西缘地区中西部,层序SQ1和SQ2上升半旋回中上部,整体连续性较差。hyb11可见生屑碎片与砾屑呈悬浮状沉积在背景泥质沉积物中(图5i),总体磨圆度较高,可能为风暴下部回流(风暴碎屑流)的直接产物,指示风暴高峰期死亡生物的异地埋藏现象,以及衰减期呈悬浮状态的颗粒在重力的作用下逐步下落^[40]。

2.2.12 深灰色薄层状含砾泥页岩相(hyb12)

该混积岩相多与hyb11伴生,镜下以显微冲刷面相隔,见大量撕裂状泥质条带(图5i),指示动荡的沉积水体环境。

2.2.13 深灰色薄层状含砾泥质灰岩相(hyb13)

该混积岩相主要发育在西缘地区西部层序SQ1,层序SQ2亦有少量分布,整体连续性较差。hyb13底部发育下切谷结构(图5j),荧光显微镜下可见淡黄色砾石漂浮于基质中,整体成分成熟度较高,分选度和磨圆度较好,反映了沉积物搬运较远,水动力较强等特点(图5k)。部分层段见混积岩和泥岩互层分布,可能说明水道具有迁移或溢岸特征^[41-44],因此混积岩多源自相缘渐变沉积混合。

2.2.14 深灰色薄层状灰质砂岩相(hyb14)

该混积岩相主要发育在西缘地区西部层序SQ1,另外层序SQ2亦有少量分布,整体连续性较差。hyb14底部发育下切谷结构(图5j),镜下见鲍马序列^[45],部分砂质纹层呈窄条带状/透镜状,与泥质条带共存(图5l),具有C段牵引流特征,可能指示浊流与深海洋流的共同改造作用。

2.2.15 深灰色薄层状含砂灰质泥页岩相(hyb15)

该混积岩相主要发育在西缘地区西部层序SQ1,层序SQ2亦有少量分布。剖面上连续性可达数米,单层厚约10 cm。镜下见hyb15发育鲍马序列D段,此时砂纹呈平直条带状分布(图5m),指示高能射流与边界层流的共同影响^[46-49]。

2.2.16 中灰色薄层状泥页岩相(cal1)

该碎屑岩相主要发育在西缘地区东部和中部,层序SQ1、SQ2中部和尖端附近。其中东部cal1可与hyb3/hyb4伴生,发育水平层理或波状层理(图3i,j),

而中部可见cal1与hyb8/hyb9伴生,偶见页理结构(图5g)。cal1整体横向连续性较好,主要以悬浮物质沉积为主,基本不含砂屑,与混积岩相整体呈渐变状接触(图3i)。

2.2.17 深灰色薄层状泥页岩相(cal2)

该碎屑岩相主要发育在西缘地区东部和中部,层序SQ1、SQ2中部和尖端附近。cal2整体横向连续性较好,含大量生物碎屑碎片,多发育泥质纹层,较深的颜色指示弱还原环境(图6a)。

2.2.18 灰黑色薄层状泥页岩相(cal3)

该碎屑岩相主要发育在西缘地区西部层序SQ1,受下切谷影响剖面上横向厚度变化较大,介于20 cm~1 m之间(图6b)^[47]。宏观上可与hyb15互层分布,或侧向对接,镜下见cal3发育泥质纹层和生屑/陆源碎屑,指示安静水体环境(图6c)。

2.2.19 黑色薄层状泥页岩相(cal4)

该碎屑岩相主要发育在西缘地区西部,以泥质结构为主,页理发育,可见大量钙球和黄铁矿沿页理层面分布(图6d)。扫描电镜下见大量草莓状黄铁矿集合体,单个黄铁矿粒径基本小于5 μm(图6e),可能指示极度缺氧的海洋环境,这种环境有利于有机质的保存。

2.2.20 浅灰色中层状泥晶生屑灰岩相(car1)

该碳酸盐岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ2下降半旋回的顶部。car1单层厚约1~2 cm,局部可达5 cm,部分以一冲刷面与下伏hyb1相隔(图6f),指示流水冲刷作用;部分呈透镜状(图3e,f)分散在hyb1之中,具有潮汐韵律层理特征。car1生屑种类丰富,磨圆度/破碎程度中等,主要包括骨针、有孔虫、介形虫、三叶虫、海绵和海百合(图6g,h)。部分生屑具有定向性,与低角度交错层理伴生(图6f),指示潮间带间歇性冲刷—静水沉积作用^[44]。

2.2.21 浅灰色中层状泥亮晶颗粒灰岩相(car2)

该碳酸盐岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ2下降半旋回的顶部。car2单层厚约5~10 cm,以一岩性转换面与下伏hyb1相接触(图6i,j)。car2以颗粒支撑为主,部分颗粒具包壳结构,可能为微生物包覆成因(图6k)^[40]。部分car2呈角砾状堆积在滩体侧翼,磨圆度较好,角砾间充填物为泥质或亮晶胶结物,可能指示滩体边缘受到了潮水的改造(图6l)。

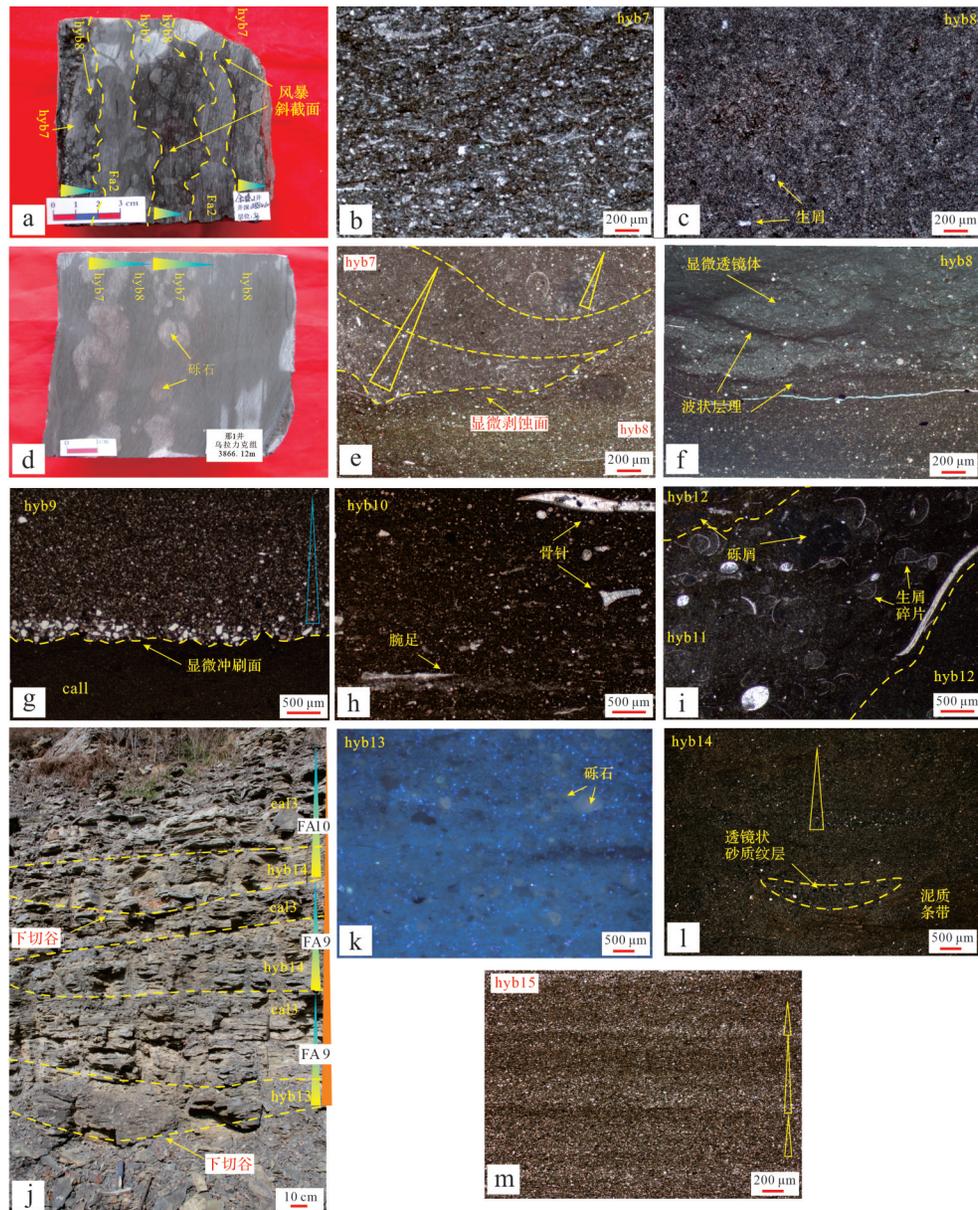


图5 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组深水混积岩相沉积特征

(a) 第一种“hyb7→hyb8”旋回与FA2伴生,以风暴斜截面相隔,岩心, YT1井, 3 884.60 m; (b) hyb7, 生屑长轴与水平方向平行, 正交偏光, YT1井, 3 888.12 m; (c) hyb8, 潮下带背景沉积物, 正交偏光, YT1井, 3 887.57 m; (d) 第二种“hyb7→hyb8”旋回, 岩心, N1井, 3 866.12 m; (e) 第二种“hyb7→hyb8”旋回, 镜下以一显微冲刷面相隔, 单偏光, N1井, 3 866.12 m; (f) hyb8, 见显微透镜体和波状层理, 正交偏光, N1井, 3 864.04 m; (g) “hyb9→cal1”旋回, 见显微冲刷面, 单偏光, Y3井, 3 920.00 m; (h) hyb10, 见生屑长轴与水平面平行, 单偏光, LT1井, 4 936.00 m; (i) hyb11与hyb12互层发育, 正交偏光, GT1井, 4 912.00 m; (j) FA9和FA10组合, FA10组合的hyb14和FA9组合的hyb13见下切谷结构, 桌子山剖面; (k) hyb13, 基质支撑结构, 显微荧光照片, 桌子山剖面; (l) hyb14, 鲍马序列, 见透镜状砂质纹层和泥质条带, 正交偏光, 乌海剖面; (m) hyb15, 鲍马序列上部, 单偏光, 乌海剖面

Fig.5 Sedimentary characteristics of the deep-water migmatites lithofacies in the Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

(a) core photograph showing first type of hyb7→hyb8 sequence associated with FA2, separated by storm cross-sections, well YT1, 3 884.60 m; (b) microphotograph of hyb7 with longitudinal axis of debris in horizontal direction, XPL, well YT1, 3 888.12 m; (c) microphotograph of hyb8 showing background sediment in the subtidal zone, XPL, well YT1, 3 887.57 m; (d) core photograph of second type of hyb7→hyb8 sequence showing indistinct lithofacies interface, well N1, 3 866.12 m; (e) microphotograph of second type of hyb7→hyb8 sequence separated by a microscopic erosion surface, PPL, well N1, 3 866.12 m; (f) microphotograph of hyb8 showing microscopic lens and wavy bedding, XPL, well N1, 3 864.04 m; (g) microphotograph of hyb9→cal1 sequence showing microscopic scouring surface, PPL, well Y3, 3 920.00 m; (h) microphotograph of hyb10 showing longitudinal axis of debris in the horizontal direction, PPL, well LT1, 4 936.00 m; (i) microphotograph of interbedded development of hyb11 and hyb12, XPL, well GT1, 4 912.00 m; (j) combinations of FA9 and FA10, hyb14 in FA10 and hyb13 in FA9, showing a downdraw valley structure, Zhuozishan section; (k) microfluorescence photograph of hyb13 matrix support structure, Zhuozishan section; (l) hyb14, Baoma sequence, with lenticular sandy layers and muddy bands, XPL, Wuhai section; (m) hyb15, upper part of Baoma sequence, PPL, Wuhai section

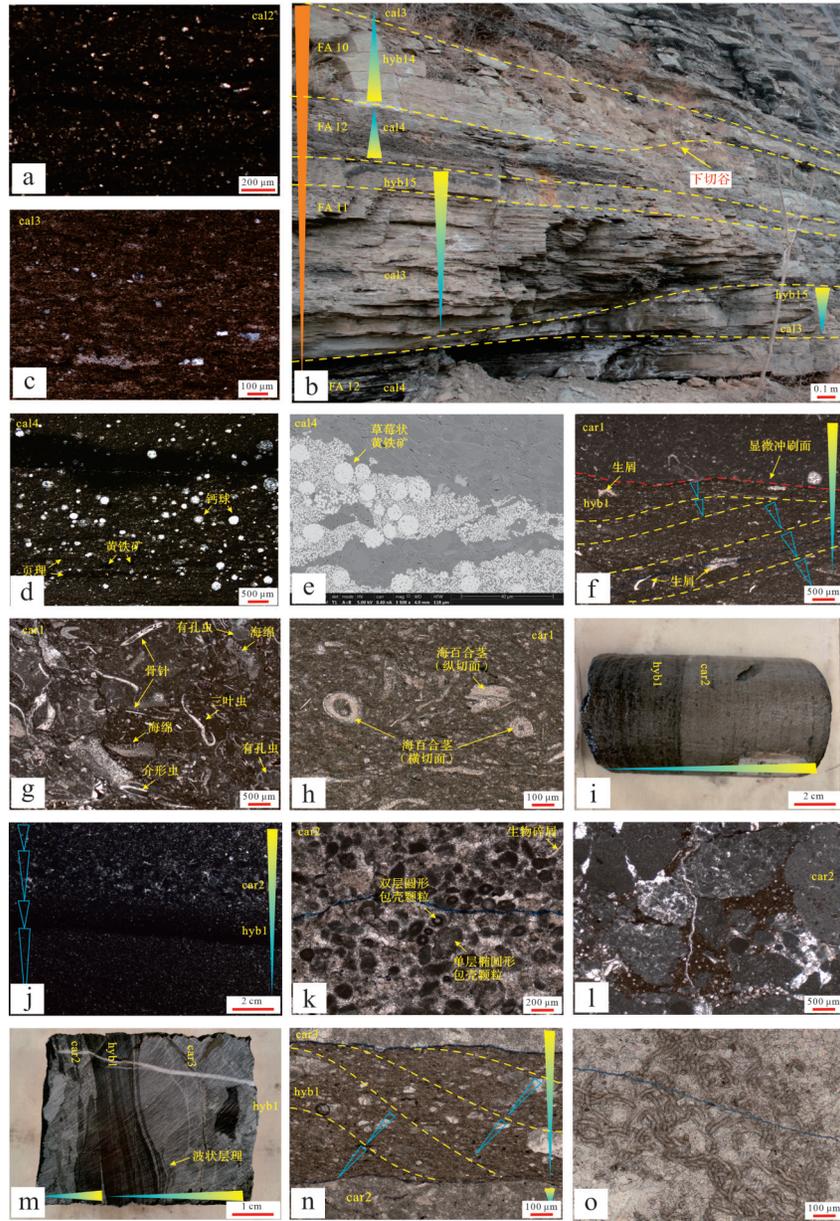


图6 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组碎屑岩相和碳酸盐岩相沉积特征

(a) cal2, 见生物碎屑, 正交偏光, 青龙山剖面; (b) FA12、FA11 和 FA10 组合, FA10 组合的 hyb14 见下切谷结构, 乌海剖面; (c) cal3, 见泥质纹层和生屑/陆源碎屑, 正交偏光, 桌子山剖面; (d) cal4, 见页理结构与黄铁矿和钙球伴生, 单偏光, 乌海剖面; (e) cal4, 见草莓状黄铁矿聚集而生, SEM, 乌海剖面; (f) car1 与 hyb1 以显微冲刷面相隔, hyb1 见低角度交错层理和生屑, 单偏光, QT11 井, 4 911.20 m; (g, h) car1, 见大量生屑, 单偏光, QT11 井, 4 902.20 m; (i) “hyb1→car2”旋回, hyb1 和 car2 以岩性转换面相接触, 岩心, HT5 井, 4 503.30 m; (j) “hyb1→car2”旋回, 正交偏光, GT1 井, 4 007.80 m; (k) car2, 见包壳颗粒和生物碎屑, 单偏光, HT5 井, 4 503.30 m; (l) 由 car2 组成的角砾岩, 单偏光, HT5, 4 514.40 m; (m) “hyb1→car3”旋回, hyb1 见波状层理, 岩心, HT5 井, 4 501.60 m; (n) “hyb1→car3”旋回, 见斜层理, 单偏光, HT5 井, 4 501.60 m; (o) car3, 见葛万菌, 单偏光, HT5 井, 4 502.00 m

Fig.6 Sedimentary characteristics of the detrital and carbonate lithofacies in the Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

(a) microphotograph of cal2 showing biological debris, XPL, Qinglongshan section; (b) FA12, FA11 and FA10 combination and hyb14 in FA10 combination, showing a downward-cut valley structure, Wuhai section; (c) microphotograph of cal3 with muddy layers and biogenic/terrestrial debris, XPL, Zhuozishan section; (d) microphotograph of cal4, showing page-like structure associated with pyrite and calcium spheres, Wuhai section; (e) SEM photomicrograph of cal4 showing accumulation of strawberry-shaped pyrite, Wuhai section; (f) photomicrograph of car1 and hyb1 separated by micro-erosion surfaces; hyb1 shows low-angle interlaced bedding and debris, PPL, well QT11, 4 911.20 m; (g, h) photomicrographs of car1 containing a large amount of debris, PPL, well QT11, 4 902.20 m; (i) core photograph of contact between hyb1 and car2 at lithological transition surfaces, well HT5, 4 503.30 m; (j) photomicrograph of hyb1→car2 cycle, XPL, well GT1, 4 007.80 m; (k) photomicrograph of car2, showing shell particles and biological debris, PPL, well HT5, 4 503.30 m; (l) photomicrograph of breccia composed of car2, PPL, well QT11, 4 514.40 m; (m) core photograph of hyb1→car3 sequence showing wavy bedding in hyb1, well HT5, 4 501.60 m; (n) photomicrograph of hyb1→car3 sequence showing oblique bedding, PPL, well HT5, 4 501.60 m; (o) photomicrographs of car3 showing Girvanella, PPL, well HT5, 4 502.00 m

2.2.22 浅灰色中层状亮晶葛万菌灰岩相(car3)

该碳酸盐岩相主要发育在西缘地区东部,层序SQ2下降半旋回的顶部。car3单层厚约2~5 cm,可与波状层理和斜层理伴生(图6m,n)。镜下见大量葛万菌化石(图6o),单个菌体由泥晶管壁和亮晶管腔组成,直径约10~50 μm,长度可达100 μm以上。菌体之间可相互缠绕构成微生物格架,具有一定的抗浪作用。

斜坡相可划分为上斜坡亚相和下斜坡亚相,盆地相则主要由浅盆亚相组成,并在相—亚相划分的基础上,进一步识别出12种沉积序列(表2、图7)。

3.1.1 潮间带:潮间坪序列(FA1)与潮间滩序列(FA2)

潮间带位于平均高潮面和平均低潮面之间,受潮汐水流双向流动影响^[37],潮间带沉积物可发生纵向—横向迁移,形成相缘渐变沉积混合物^[13],可进一步分为沉积物颗粒偏细的潮间坪微相和与微生物建造相关的潮间滩微相。

3 沉积相序及沉积模式

3.1 沉积相类型与沉积序列

依据岩相类型、垂向序列及地球化学特征,将西缘乌拉力克组划分为台地、陆棚、斜坡和盆地这四个相带,其中台地相可进一步划分为潮间带和潮下带两个亚相,陆棚相可分为内陆棚亚相和外来棚亚相,

潮间坪的SP曲线整体具有高负异常特征,GR曲线呈箱状至齿形箱状,下部可渐变为漏斗状,整体介于40~100 API(图2、图7a)。岩相类型主要包括两种,并构成了多个“中灰色薄层状灰质泥页岩相(hyb1)→中灰色薄层状泥质灰岩相(hyb2)”反韵律序列(图3a~c),旋回中未见潮上带盐沼沉积物,因此

表2 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组岩相特征及沉积相类型表

Table 2 Lithofacies characteristics and sedimentary facies types in the Wulalike Formation, western margin area, Ordos Basin

相	亚相	微相	岩相组合代号	岩相大类	岩相名称	沉积构造	代号	
潮间带	潮间坪	潮间坪微相	FA1	混积岩	中灰色薄层状泥质灰岩相	低角度羽状交错层理	hyb2	
					中灰色薄层状灰质泥页岩相	波状层理/水平层理	hyb1	
		浅灰色中层状亮晶葛万菌灰岩相	斜层理/波状层理	car3				
	潮间滩	潮间滩微相	FA2	碳酸盐岩	浅灰色中层状亮晶颗粒灰岩相			car2
					浅灰色中层状泥晶生屑灰岩相	低角度交错层理/水平层理/脉状层理		car1
		混积岩	中灰色薄层状灰质泥页岩相	高角度交错层理/羽状交错层理/水平层理		hyb1		
台地	潮下带	潮汐砂坝微相	FA3	混积岩	浅灰色中—薄层状砂屑灰质泥页岩相	脉状层理	hyb4	
					浅灰色薄层状含砂屑灰质泥页岩相	低角度交错层理	hyb3	
		碎屑岩	中灰色薄层状泥页岩相	水平层理/波状层理		cal1		
	潮汐水道	潮汐水道微相	FA4	混积岩	浅灰色中—薄层状含砂砾屑灰质泥页岩相	水平层理/波状层理		hyb6
					浅灰色中—薄层状泥质砂砾屑灰岩相	滞留沉积		hyb5
		深灰色薄层状含灰泥页岩相	波状层理/透镜状层理		hyb8			
浅灰色薄层状灰质砂砾岩相	波状层理/滞留沉积		hyb7					
陆棚	内陆棚	滨岸/浅海砂坝微相	FA6	碎屑岩	中灰色薄层状泥页岩相	水平层理/波状层理	cal1	
				混积岩	中灰色薄层状含砂砾泥质灰岩相/ 中灰色薄层状含灰泥页岩相	波状层理		hyb9/hyb10
		深灰色薄层状含砾泥页岩相			hyb12			
	中灰色薄层状含生屑泥页岩相			hyb11				
	外来棚	陆棚泥微相	FA8	碎屑岩	深灰色薄层状泥页岩相			cal2
	斜坡	上斜坡	峡谷水道间微相	FA9	碎屑岩	灰黑色薄层状泥页岩相		cal3
峡谷水道微相			混积岩	深灰色薄层状含砾泥质灰岩相			hyb13	
下斜坡		浊积扇水道间微相	FA10	碎屑岩	灰黑色薄层状泥页岩相		cal3	
		浊积扇水道微相	混积岩	深灰色薄层状灰质砂岩相	鲍马序列		hyb14	
		漫溢微相	混积岩	深灰色薄层状含砂灰质泥页岩相	鲍马序列		hyb15	
浊积扇堤坝微相	FA11	碎屑岩	灰黑色薄层状泥页岩相			cal3		
盆地	浅盆	盆泥微相	FA12	碎屑岩	黑色薄层状泥页岩相		cal4	

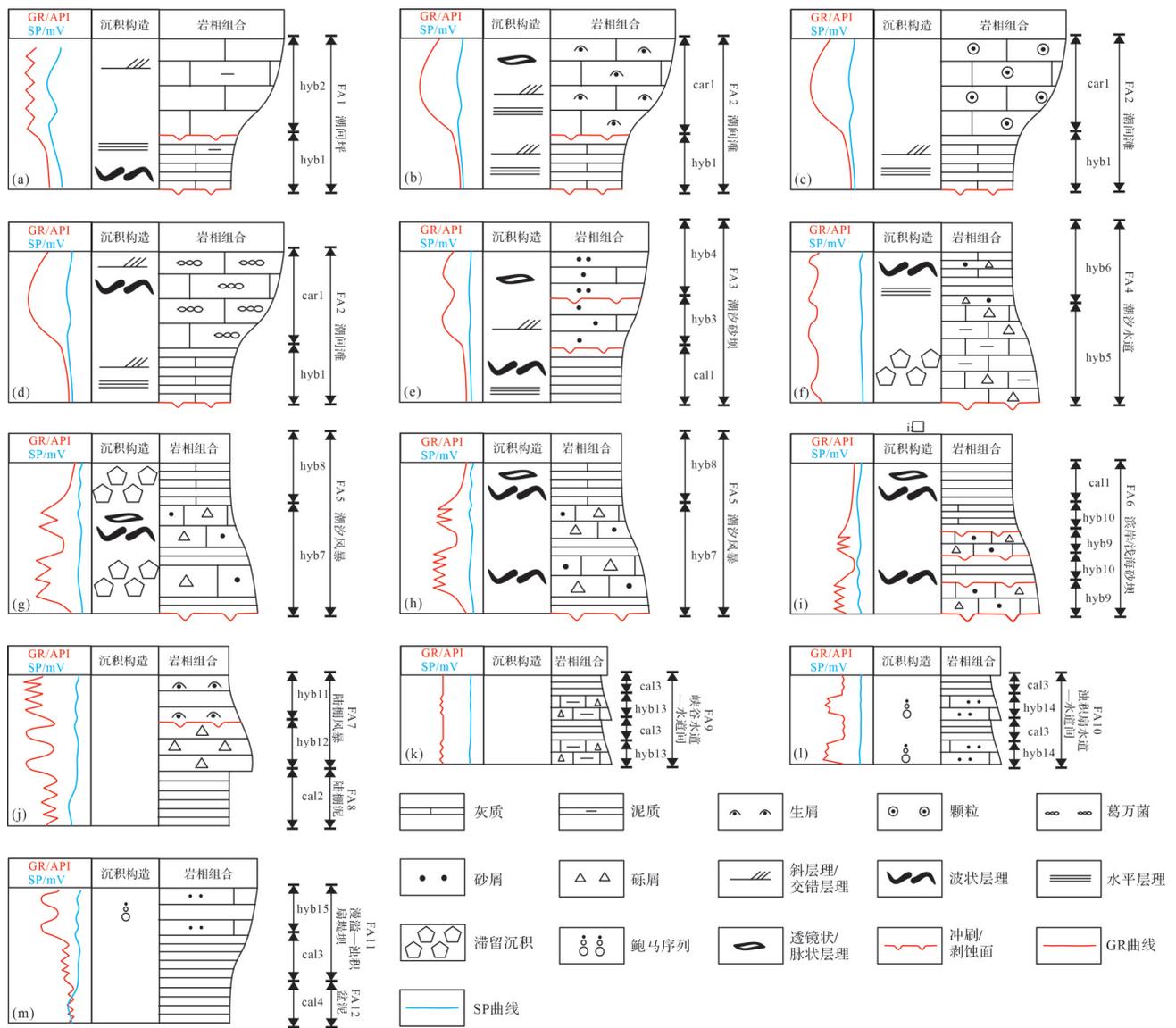


图7 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组岩相及沉积相特征

Fig.7 Lithofacies and sedimentary facies characteristics of Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

沉积环境较为开放。该序列下部为高潮线附近的低能泥坪,向上整体成分成熟度中等,常见交错层理、侵蚀面和泥质碎屑,为低潮线附近的高能砂坪。

潮间滩的SP曲线同样具有高负异常特征,GR曲线主要呈钟形+漏斗形组合,整体介于50~150 API(图2、图7b~d)。该序列主要由混积岩相和碳酸盐岩相组成,构成多个“中灰色薄层状灰质泥页岩相(hyb1)→浅灰色中层状泥晶生屑灰岩相(car1)/浅灰色中层状泥亮晶颗粒灰岩相(car2)/浅灰色中层状亮晶葛万菌灰岩相(car3)”反韵律序列。这三种序列可以横向上渐变,也可纵向上相伴而生。该序列底部与潮间坪相比,粉砂/细砂含量较多,且发育交错层理

和撕裂泥屑,具有低潮线与高潮线之间的混合坪性质,上部则为微生物建造。由于单层微生物建造基本小于10 cm,且不具明显正向凸起结构,因此更加符合滩的定义,即高能环境产生的碳酸盐岩颗粒沉积体^[51-52]。但与传统的机械成因滩相比,其由生屑、颗粒及葛万菌粘结而成的微骨架结构具有一定的抗浪性,如滩体附近可见被打碎的滩体。

3.1.2 潮下带:潮汐砂坝序列(FA3)、潮汐水道序列(FA4)与潮汐风暴序列(FA5)

潮下带位于平均低潮面和正常浪基面之间,受波浪、潮汐和风暴流的共同影响,整体水动力条件强于潮间带,因此潮下带沉积物易被改造,形成侵蚀再

沉积混合物,如潮汐砂坝微相;也易于迁移,形成相缘渐变沉积混合物,如发育在潮汐砂坝之间的潮汐水道微相;另外风暴流亦可形成事件突变沉积混合物^[13],如潮汐风暴微相。

潮汐砂坝的SP曲线具低正异常特征。GR曲线主要呈指状,介于120~160 API(图2、图7e)。该序列主要由混积岩相和碎屑岩相组成,构成多个“中灰色薄层状泥页岩相(cal1)→浅灰色薄层状含砂屑灰质泥页岩相(hyb3)→浅灰色中—薄层状砂屑灰质泥页岩相(hyb4)”反韵律序列。其下部可看作是潮下带背景沉积物,向上见被打碎的潮间滩碎片、泥质纹层与脉状层理,为开阔潮下带高流态产物。

潮汐水道的SP曲线具低正异常特征。GR曲线主要呈指状,多集中在60 API(图2、图7f)。该序列由多个“浅灰色中—薄层状泥质砂砾屑灰岩相(hyb5)→浅灰色中—薄层状含砂砾屑灰质泥页岩相(hyb6)”正韵律构成,也可互层发育。其底部通常发育粗砂/砾石,且具有侵蚀面和泥披层。但由于改道频繁且受风暴影响,该序列并未保留双向交错层理。其顶部为停潮期悬浮物质沉降的产物。

潮汐风暴的SP曲线具低正异常特征。GR曲线主要呈锯齿状,整体介于80~100 API(图2)。该序列由多个“浅灰色薄层状灰质砂砾岩相(hyb7)→深灰色薄层状含灰泥页岩相(hyb8)”正韵律构成。两个岩相分别指示了风暴高峰期(图7g)和风暴衰减期(图7h)的沉积特征。风暴高峰期风暴浪作用冲刷海底,形成侵蚀面,并将底层沉积物剥离开来,涡流过后这些具有撕扯结构的沉积物在底部迅速堆积。至风暴衰减期,尚未沉降的悬浮颗粒形成风暴下部回流和风暴上部回流,其中风暴上部回流以漫流和潮流的形式冲刷潮间带产物并将碎片物质带入潮下带,而风暴上部回流可进一步分为风暴碎屑流和风暴浊流,前者发育粒序结构,而后者则和海水充分混合后形成低密度流,形成纹层结构^[40]。

3.1.3 内陆棚:滨岸/浅海砂坝序列(FA6)和陆棚风暴序列(FA7)

内陆棚位于正常浪基面和风暴浪基面之间,可受波浪和风暴流的共同影响,整体水动力条件弱于潮汐带,形成的混积岩多为相缘渐变沉积混合与事件突变沉积混合^[3]。其中主要受波浪影响的区域发育滨岸/浅海砂坝微相,而主要受陆棚风暴影响的区域发育陆棚风暴微相。

滨岸/浅海砂坝具有SP低正异常特征,GR曲线主要呈锯齿状,整体介于120~160 API。该序列由多个“中灰色薄层状含砂砾泥质灰岩相(hyb9)/中灰色薄层状含灰泥页岩相(hyb10)→中灰色薄层状泥页岩相(cal1)”正韵律构成(图7i)。两种混积岩相通常相伴而生,而这三种岩相则分别代表滨岸/浅海砂坝形成的不同阶段:海平面上升引起滨岸后退,使得原本与滨岸相连的浅水砂坝被淹没。这些被淹没至滨岸底部的砂坝受到波浪侵蚀改造并将形成的沟槽保留下来,而在波浪作用减弱时被波浪卷起的沉积物则在重力和海浪的作用下逐渐沉积。至波浪平息期则进入悬浮物质沉积阶段^[53]。

陆棚风暴具有SP曲线低正异常特征,GR曲线主要呈锯齿状—指状,介于40~120 API。该序列由多个“中灰色薄层状含生屑泥页岩相(hyb11)→深灰色薄层状含砾泥页岩相(hyb12)”正韵律组成,亦可见hyb11与hyb12互层发育(图5i、图7j)。这两种混积岩指示了风暴碎屑流搬运至内陆棚而发生的沉积现象,其中hyb11为风暴碎屑流沉积的主体部分,而hyb12则为风暴碎屑流沉积后期,与波浪共同作用的产物。

3.1.4 外陆棚:陆棚泥序列(FA8)

外陆棚位于风暴浪基面之下,沉积环境相对稳定,水动力条件较弱,基本不发育混积岩,主要由深灰色薄层状泥页岩相组成(cal2),可看作是风暴浪基面下自然沉积的产物。cal2与cal1类似,较深的颜色指示弱还原环境(图6a)。SP曲线具有中负异常特征,GR曲线主要呈锯齿状,整体介于80~120 API(图7j)。

3.1.5 上斜坡:峡谷水道—水道间序列(FA9)

上斜坡亚相紧邻大陆架,普遍发育垂直斜坡走向的冲沟,是重力流沉积物的主要搬运通道。SP曲线具有低正异常特征,GR曲线呈低幅锯齿状,约100 API(图7k)。上斜坡亚相可由多个“深灰色薄层状含砾泥质灰岩相(hyb13)→灰黑色薄层状泥页岩相(cal3)”旋回组成(图5i),分别对应峡谷水道和峡谷水道间微相。在深水沉积环境中,富含砾石的水道多源自重力流的作用。由于重力流的流体厚度多大于水道深度,因此水道两侧常伴随重力流的溢岸作用,或直接发育天然堤—溢岸沉积。如果重力流的性质偏向低能紊流,则会发育高弯度水道,而这种水道极易改道、迁移^[54],如cal3基本不发育层理,且未观

察到溢岸沉积自水道边缘至远缘颗粒逐渐变细的现象,因此可能指示水道迁移改道后被泥质充填。

3.1.6 下斜坡:浊积扇水道—水道间序列(FA10)和浊积扇堤坝—漫溢序列(FA11)

下斜坡亚相位于大陆坡下部,其上下部可具有两种截然不同的岩性组合特征。亚相上部主要由多个“深灰色薄层状灰质砂岩相(hyb14)→灰黑色薄层状泥页岩相(cal3)”旋回组成(图5j,k、图7l),分别对应浊积扇水道微相和浊积扇水道间微相。浊积扇水道微相为近端浊流在重力影响下,向下侵蚀的产物^[44-47]。浊积扇水道间微相分布在水道之间,与峡谷水道间微相类似,亦可看作是下斜坡背景沉积物。GR曲线主要呈箱状齿化,整体介于80~140 API,SP曲线表现为低正异常特征。

亚相下部远离物源区,因此与之对应的远端浊流沉积以沉积卸载为主,此时开始发育非限制型水道^[44],即水道不具备下切谷形状,且侧向迁移频繁。岩相上主要由多个“灰黑色薄层状泥页岩相(cal3)→深灰色薄层状含砂灰质泥页岩相(hyb15)”反韵律组成(图6b),对应漫溢微相和浊积扇堤坝微相(图7m)^[45-47]。漫溢微相与浊积扇水道间微相特征类似,但具有更丰富的泥质纹层,指示水体进一步加深。浊积扇堤坝微相为低密度浊流产物,多在水道末端形成席状—朵叶体状沉积物^[48-50]。GR曲线主要呈指状,整体介于60~120 API,SP曲线表现为低正异常特征。

3.1.7 盆地:盆泥序列(FA12)

盆地相发育大段黑色薄层状泥页岩相(cal4)(图6b),对应盆泥微相。GR曲线主要呈锯齿状,整体介于100 API。SP曲线表现为中等负异常(图7m)。除

少数低密度浊流能通过海谷到达此处外,大部分为海洋生物持续沉淀所形成的均匀沉积层^[54]。

3.2 沉积相展布规律

通过对西缘乌拉力克组典型剖面、钻井进行岩性和厚度统计分析(表3),结合典型单井沉积相特征(图2),开展岩相和沉积相连井对比(图8)。结果表明,层序SQ1底部以一岩性转换面与下伏克里摩里组灰岩相隔^[30],其大致对应乌拉力克组下段。该套地层沉积时期水体整体较深,发育大段盆地—斜坡相泥页岩,其中R3井和R14井厚度可达60~70 m。向东混积岩的厚度逐渐增加,至E68井和E27井可发育5 m左右的碳酸盐岩,可能指示水体整体变浅,其中SQ1上升半旋回以陆棚相为主,而SQ1下降半旋回以台地相为主。层序SQ1和层序SQ2以一岩性转换面相隔,对应乌拉力克组内部的一期次级海侵现象,如E91井和E68井可见灰质泥页岩覆于灰岩/泥质灰岩之上(图8)。层序SQ2大致对应乌拉力克组上段,野外剖面可见其顶部以一岩性转换面与上覆拉什仲组深灰色泥灰岩/灰绿色黏土岩相隔^[10]。与层序SQ1相比,层序SQ2沉积时期水体整体变浅,虽然R3井和R4井仍然发育50 m左右泥页岩,但已有陆棚—斜坡相混积岩发育,至E68井陆棚相—台地相碳酸盐岩和混积岩的厚度均可达10 m。

在连井对比的基础上,结合区域古地理背景,明确了研究区奥陶系乌拉力克组三级层序内的平面沉积相展布规律(图9)。层序SQ1发育时期,东北部铁克苏庙—大水坑地区继承了克里摩里期“指状交叉、凸凹相间”的古地理格局,古地貌高处和低处分别发育潮汐砂坝和潮汐水道微相;东南部马家滩地区则具有平直的相边界,以潮间坪微相为主,纯碳酸盐岩

表3 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组岩性厚度单因素数据表

Table 3 Single-factor of strata thickness, Wulalike Formation, western margin area, Ordos Basin

	乌海剖面	任3井	任14井	鄂91井	鄂68井	鄂27井
SQ2下降半旋回	碎屑岩厚度:12 m	碎屑岩厚度:15 m	碎屑岩厚度:10 m	碎屑岩厚度:0 m	碎屑岩厚度:4 m	
	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:10 m	缺失
	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:7 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:24 m	混积岩厚度:0 m	
SQ2上升半旋回	碎屑岩厚度:25 m	碎屑岩厚度:40 m	碎屑岩厚度:42 m	碎屑岩厚度:5 m	碎屑岩厚度:3 m	
	碳酸盐岩厚度:0 m	缺失				
	混积岩厚度:5 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:25 m	混积岩厚度:10 m	
SQ1下降半旋回	碎屑岩厚度:5 m	碎屑岩厚度:40 m	碎屑岩厚度:46 m	碎屑岩厚度:0 m	碎屑岩厚度:3 m	
	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:5 m	缺失
	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:36 m	混积岩厚度:10 m	
SQ1上升半旋回	碎屑岩厚度:2 m	碎屑岩厚度:30 m	碎屑岩厚度:15 m	碎屑岩厚度:10 m	碎屑岩厚度:3 m	碎屑岩厚度:2 m
	碳酸盐岩厚度:0 m	碳酸盐岩厚度:6 m				
	混积岩厚度:5 m	混积岩厚度:0 m	混积岩厚度:8 m	混积岩厚度:10 m	混积岩厚度:12 m	混积岩厚度:5 m

整体较薄(约5 m),而混积岩厚度可达10 m,指示频繁的波浪、潮水改造。Y27井—Le1井—R14井—MJ1井—LT1井一带发育滨岸/浅海砂坝和陆棚泥微相,以混积岩和泥岩为主,厚度均约10 m;以西发育斜坡相泥页岩,至平罗—银川—青龙山一带相变为盆泥微相,厚度可达50 m以上。层序SQ2发育时期,东北部铁克苏庙—大水坑地区主要沉积生屑滩、颗粒滩,而东南部马家滩地区可发育由葛万菌构成的抗浪结构,纯碳酸盐岩和混积岩的厚度可达10~20 m以上,这也能从侧面说明微生物建造可扩大古地貌高差,并导致潮间带后退至Y27井—Le1井—R14井—MJ1井—LT1井一带,加之受中东部陆表海台地相连影响,华北海的高浓度卤水可向西流入祁连海^[18],斜坡相—陆棚相整体变窄且向西后退。

3.3 沉积模式

基于乌拉力克组典型钻井、剖面的岩相精细描述与横向对比结果,按照相序定律和优势相原则,建

立了鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组混积岩沉积模式(图10)。乌拉力克组下段沉积时期,受奥陶纪海侵事件以及研究区西部加里东期同沉积断裂影响^[24-25],西缘地区从高差较小的台地环境迅速转变为“东台西盆”的地理格局,此时位于研究区东部的中央古隆起是主要物源区,靠近物源的潮间带以间歇性潮水驱动力为主,相带内混积岩累计厚度可达20~30 m,粒度整体较细,且含有大量生屑;而受风暴、潮汐和波浪共同影响,潮下带发育砾级和砂级混积岩;远离物源的陆棚带混积岩粒度明显减小,相带内混积岩累计厚度基本小于10 m,驱动力以潮水和波浪为主(图10a)。乌拉力克组上段沉积时期水体整体变浅,此时位于中央古隆起附近的微生物建造扩大了西缘古地貌高差,而鄂尔多斯盆地中东部高盐度卤水亦越过中央古隆起加剧了碳酸盐岩台地的建造规模。这些更为充足的物源供给为斜坡区浊积岩的形成提供了物质基础(图10b)。因此,在重力作用和

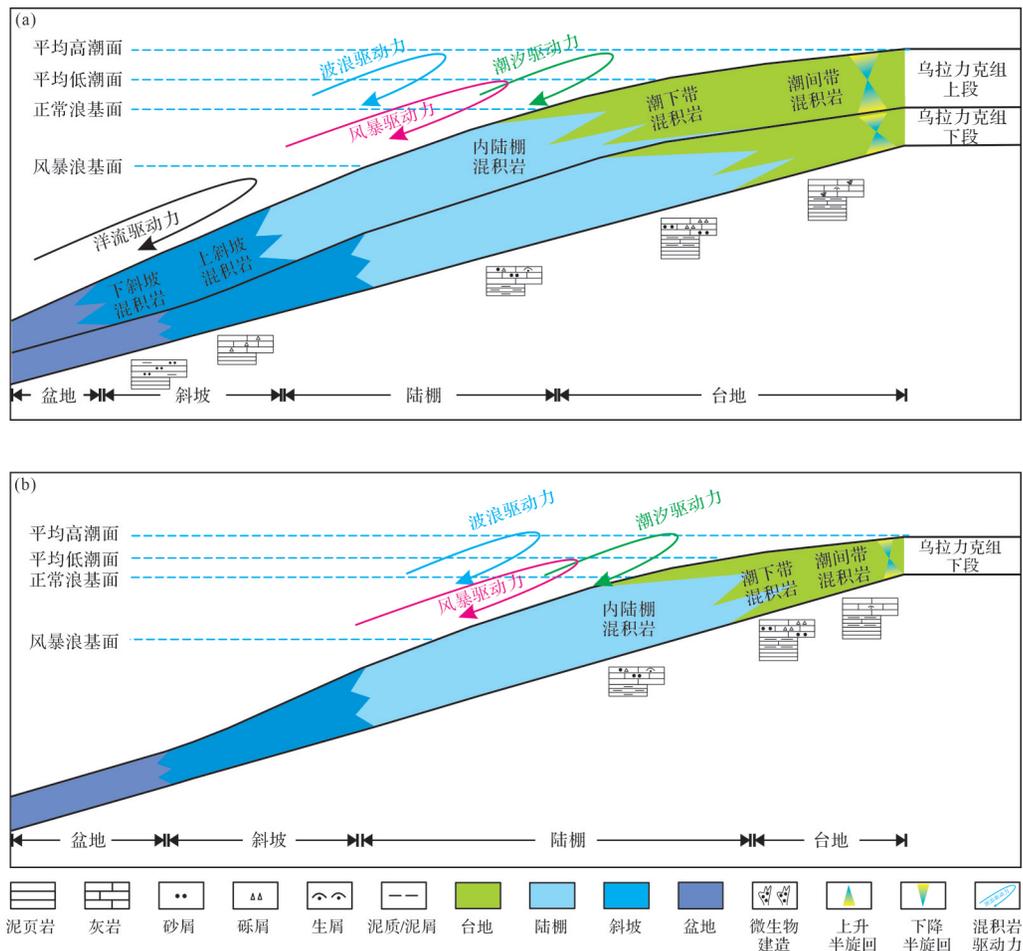


图10 鄂尔多斯盆地西缘地区乌拉力克组混积岩沉积模式
(a)乌拉力克组上段混积岩沉积时期;(b)乌拉力克组下段混积岩沉积时期

Fig.10 Sedimentary model of migmatites, Wulalike Formation, western edge of the Ordos Basin

深部洋流的影响下,浊流沉积物与背景沉积物发生混合。综上所述,乌拉力克组混积岩的岩石类型和沉积特征主要受物源供给,古地貌特征和水动力条件影响,其中充足的物源供给是西缘地区混合沉积的基本条件。

4 结论

(1) 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组可分为混积岩相、陆源碎屑岩相和碳酸盐岩相三类,并进一步划分为22种岩相类型和12种沉积序列;其垂向序列组合方式受控于两期海侵事件,而岩相变化则受控于局部水动力条件。

(2) 乌拉力克组发育台地、陆棚、斜坡和盆地四种相带,可进一步划分为7种亚相和15种微相。在东高西低的古地理背景下,东部台地相由潮间带和潮下带组成,分别发育“潮间滩—潮间坪”序列和“潮汐风暴—潮汐水道—潮汐砂坝”序列;中部陆棚相由内陆棚和外陆棚组成,分别发育“陆棚风暴—滨岸/浅海砂坝”序列和“陆棚泥”序列;西部斜坡相由上斜坡和下斜坡组成,以浊积扇和峡谷水道序列为主,而盆地相多发育盆泥序列。

(3) 层序SQ1形成时期水体整体较深,发育大段泥页岩,层序SQ2沉积时期水体整体变浅,加之受微生物建造和中东部陆表海台地相连影响,斜坡相—陆棚相整体变窄且向西后退。

(4) 乌拉力克组的岩石类型和沉积特征主要受物源供给、古地貌特征和水动力条件影响,其中充足的物源供给是西缘地区混合沉积的基本条件。

参考文献 (References)

- [1] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [2] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(2): 87-92. [Zhang Jinquan, Ye Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. *Journal of Chengdu College Geology*, 1989, 16(2): 87-92.]
- [3] 杨朝青,沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-66. [Yang Chaoqing, Sha Qingan. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan province: A kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(2): 59-66.]
- [4] 张世铭,张小军,王建功,等. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析:以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 160-173. [Zhang Shiming, Zhang Xiaojun, Wang Jianguo, et al. Characteristics and their controlling factors of mixed sediments in saline lakes: A case study of Lower Ganchaigou Formation in the western Qaidam Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 160-173.]
- [5] 王剑,袁波,刘金,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组混积岩成因及其孔隙发育特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 413-424. [Wang Jian, Yuan Bo, Liu Jin, et al. Genesis and pore development characteristics of Permian Lucaogou migmatites, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 413-424.]
- [6] 刘宝珺,余光明,王成善,等. 珠穆朗玛峰地区侏罗纪沉积环境[J]. 沉积学报, 1983, 1(2): 1-16. [Liu Baojun, Yu Guangming, Wang Chengshan, et al. Jurassic sedimentary environment in the Qomolangma Region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1983, 1(2): 1-16.]
- [7] 庞小军,牛成民,王冠民,等. 渤海海域深层沙一段混积岩优质储层成因:以渤中13-A构造为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 354-369. [Pang Xiaojun, Niu Chengmin, Wang Guanmin, et al. Genesis of high-quality reservoirs with deeply mixed rocks in the Es1 in BZ13-A structure, Bohai Sea[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 354-369.]
- [8] 肖佃师,高阳,彭寿昌,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷混积岩孔喉分类及控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 719-731. [Xiao Dianshi, Gao Yang, Peng Shouchang, et al. Classification and control factors of pore-throat systems in hybrid sedimentary rocks of Jinmusar Sag, Juggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 719-731.]
- [9] 王越,陈世悦,张关龙,等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征:以准噶尔盆地南缘芦草沟组与吐哈盆地西北缘塔朗组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 1021-1035. [Wang Yue, Chen Shiyue, Zhang Guanlong, et al. Classifications of mixed sedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin: Taking examples as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taerlang Formation in the northwest of Tuha Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 38(9): 1021-1035.]
- [10] 谭梦琪,刘自亮,沈芳,等. 四川盆地回龙地区下侏罗统自流井组大安寨段混积岩特征及模式[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 571-581. [Tan Mengqi, Liu Ziliang, Shen Fang, et al. Features and model of mixed sediments of Da'anzhai Member in Lower Jurassic Ziliujing Formation, Huilong area, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 571-581.]
- [11] 郭福生,严兆彬,杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 68. [Guo Fusheng, Yan Zhaobin, Du Yangsong. Discussion on mixed sediments, mixed rocks, and mixed layer series[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 68.]
- [12] 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 sediments[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 931-939.]
- [13] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 31-34. [Zhang Xionghua. Classification and origin of mixed-sedimentite[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(4): 31-34.]
- [14] 白莹, 徐安娜, 刘伟, 等. 塔里木盆地西北部中下寒武统混积岩沉积特征[J]. *天然气工业*, 2019, 39(12): 46-57. [Bai Ying, Xu Anna, Liu Wei, et al. Sedimentary characteristics of Lower and Middle Cambrian diamict in the northwestern Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12): 46-57.]
- [15] 叶子倩, 朱红涛, 杜晓峰, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系沙一段混积岩发育特征及沉积模式[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3731-3745. [Ye Ziqian, Zhu Hongtao, Du Xiaofeng, et al. Sedimentary characteristics and model of mixed siliciclastic-carbonates of member 1 of Paleogene Shahejie Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3731-3745.]
- [16] 宋光永, 朱超, 李森明, 等. 柴达木盆地英西地区湖相混积型碳酸盐岩储层成因及发育模式[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 1-12. [Song Guangyong, Zhu Chao, Li Senming, et al. Genetic mechanism and development model of lacustrine hybrid carbonate reservoirs in the western Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2022, 46(3): 1-12.]
- [17] Kuhn P P, Di Primio R, Hill R, et al. Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(10): 1867-1897.
- [18] Hentz T F, Ruppel S C. Regional lithostratigraphy of the Eagle Ford Shale: Maverick Basin to the east Texas Basin[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2010, 60: 325-337.
- [19] 于水, 文华国, 刘冉, 等. 下刚果盆地白垩统 Albian 阶段碳酸盐台地地震沉积学[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(4): 442-451. [Yu Shui, Wen Huaguo, Liu Ran, et al. Study on seismic sedimentology of the Lower Cretaceous Albian Stage carbonate platform in the Lower Congo Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2017, 44(4): 442-451.]
- [20] 李向东, 阙易, 郇雅棋, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1201-1212. [Li Xiangdong, Que Yi, Huan Yaqi, et al. Mixed carbonate-siliciclastic sequences of deep-water contour current overflow origin of Kelimoli Formation in Zhuozishan area, western margin of Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1201-1212.]
- [21] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 12-22. [Xi Shengli, Liu Xinshe, Huang Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 12-22.]
- [22] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(2): 33-44. [Fu Suotang, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(2): 33-44.]
- [23] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力: 以忠平 1 井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1235-1246. [Xi Shengli, Mo Wuling, Liu Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1235-1246.]
- [24] 周雁, 付斯一, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界构造—沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 264-275. [Zhou Yan, Fu Siyi, Zhang Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 264-275.]
- [25] 郭峰. 贺兰拗拉谷寒武—奥陶系层序地层及海相烃源岩研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007: 1-82. [Guo Feng. Sequence stratigraphy and marine source rocks of Cambrian and Ordovician, Helan Aulacoen[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007: 1-82.]
- [26] 毛小妮, 周立发, 杨甫, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系地球化学特征与沉积环境分析[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(3): 98-102. [Mao Xiaoni, Zhou Lifa, Yang Pu, et al. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(3): 98-102.]
- [27] 蒋苏扬, 张永生, 黄文辉, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系锶同位素地球化学特征[J]. *地质学报*, 2019, 93(11): 2889-2903. [Jiang Suyang, Zhang Yongsheng, Huang Wenhui, et al. Geochemical characteristics of Ordovician strontium isotope in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2889-2903.]
- [28] 孙华丽, 高建荣, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系古环境恢复及沉积体系分析[J]. *东北石油大学学报*, 2023, 47(1): 44-56, 69. [Sun Huali, Gao Jianrong, Fu Ling, et al. Restoration of Ordovician paleoenvironment and analysis of sedimentary system in the western margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023, 47(1): 44-56, 69.]
- [29] 孙华丽, 高建荣, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组储层特征及控制因素[J]. *河北地质大学学报*, 2023, 46(3): 48-54. [Sun Huali, Gao Jianrong, Zhang Tao, et al. Reservoir characteristics and control factors of Wulalike Formation in the west-

- ern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Hebei GEO University, 2023, 46(3): 48-54.]
- [30] 于洲,周进高,李程善,等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶纪克里摩里期—乌拉力克期构造—岩相古地理特征[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(6): 816-825. [Yu Zhou, Zhou Jingao, Li Chengshan, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Ordovician Kelimoli and Wulalike stages in the western edge of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(6): 816-825.]
- [31] 王集,王峰,赵伟波,等. 鄂尔多斯盆地西缘上石炭统羊虎沟组岩相类型及沉积模式[J]. 古地理学报, 2023, 25(3): 573-597. [Wang Ji, Wang Feng, Zhao Weibo, et al. Lithofacies types and sedimentary models of the Upper Carboniferous Yanghugou Formation in western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(3): 573-597.]
- [32] 张志杰,李伟,杨家静,等. 川中广安地区上三叠统须家河组岩相组合与沉积特征[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 296-305. [Zhang Zhijie, Li Wei, Yang Jiajing, et al. Lithofacies association and depositional characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Guang'an area, central Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 16(1): 296-305.]
- [33] 于兴河,王德发,孙志华. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型: 内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 48-58. [Yu Xinghe, Wang Defa, Sun Zhihua. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: The observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(1): 48-58.]
- [34] 包洪平,黄正良,郭玮,等. 鄂尔多斯盆地西缘中—上奥陶统烃源岩的形成环境、成烃生物及岩矿特征[J]. 地质科学, 2024, 59(3): 696-711. [Bao Hongping, Huang Zhengliang, Guo Wei, et al. The formation environment, hydrocarbon generating organisms, rock and mineral characteristics of the Middle-Upper Ordovician source rock layers in west margin of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(3): 696-711.]
- [35] 马占荣,白海峰,刘宝宪,等. 鄂尔多斯西部地区中—晚奥陶世克里摩里期—乌拉力克期岩相古地理[J]. 古地理学报, 2013, 15(6): 751-764. [Ma Zhanrong, Bai Haifeng, Liu Baoxian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Middle-Late Ordovician Kelimoli and Wulalike Ages in western Ordos area [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6): 751-764.]
- [36] 邵东波,包洪平,魏柳斌,等. 鄂尔多斯地区奥陶纪构造古地理演化与沉积充填特征[J]. 古地理学报, 2019, 21(4): 537-556. [Shao Dongbo, Bao Hongping, Wei Liubin, et al. Tectonic palaeogeography evolution and sedimentary filling characteristics of the Ordovician in the Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(4): 537-556.]
- [37] 贾进华. 古海岸带碎屑潮汐环境沉积微相与砂体分布: 以塔中地区志留系为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 110-123. [Jia Jinhua. Sedimentary microfacies and sandbody distribution in the clastic tidal environment of the ancient coastal zone: A case study of Silurian in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 110-123.]
- [38] 胡明毅,贺萍. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 391-395. [Hu Mingyi, He Ping. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 391-395.]
- [39] 严钦尚. 论滨岸和浅海的风暴沉积[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(1): 14-20. [Yan Qinshang. Overview of the storm-generated depositis on nearshore zone and open shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1984, 15(1): 14-20.]
- [40] 白莹,罗平,刘伟,等. 塔西北下寒武统风暴活动特征及其沉积学响应[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 565-578. [Bai Ying, Luo Ping, Liu Wei, et al. Storm activity characteristics and their sedimentary responses for the Xiaerbulak Formation, Lower Cambrian, NW Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 565-578.]
- [41] 沈骋,谭秀成,李凌,等. 川北早寒武世碳酸盐台缘斜坡沉积特征及变形构造形成机制探讨[J]. 古地理学报, 2015, 17(3): 321-334. [Shen Cheng, Tan Xiucheng, Li Ling, et al. Sedimentary characters of carbonate platform marginal slope of the Early Cambrian in northern Sichuan Basin and perspective of deformation structures[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3): 321-334.]
- [42] 余宽宏,金振奎,董晓东,等. 扬子地台北缘寒武纪同沉积断裂控制的斜坡沉积特征[J]. 古地理学报, 2013, 15(3): 401-412. [Yu Kuanhong, Jin Zhenkui, Dong Xiaodong, et al. Sedimentary characteristics of the Cambrian slope controlled by synsedimentary faults in northern margin of Yangtze platform [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(3): 401-412.]
- [43] 梁积伟,宗浩,冯昆明,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系平凉组深水沉积特征[J]. 古地理学报, 2023, 25(3): 554-572. [Liang Jiwei, Zong Hao, Feng Kunming, et al. Characteristics of deep water deposits of the Ordovician Pingliang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(3): 554-572.]
- [44] 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 western margin of Ordos Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(6): 2149-2159.]
- [45] 高红灿,郑荣才,魏钦廉,等. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 815-827. [Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Wei Qinlian, et al. Reviews on fluid properties and sedimentary characteristics of debris flows and turbidity currents[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 815-827.]
- [46] 李相博,卫平生,刘化清,等. 浅谈沉积物重力流分类与深水

- 沉积模式[J]. 地质论评, 2013, 59(4): 607-614. [Li Xiangbo, Wei Pingsheng, Liu Huaqing, et al. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model[J]. Geological Review, 2013, 59(4): 607-614.]
- [47] 赵晓明, 刘丽, 谭程鹏, 等. 海底水道体系沉积构型样式及控制因素: 以尼日尔三角洲盆地陆坡区为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 825-840. [Zhao Xiaoming, Liu Li, Tan Chengpeng, et al. Styles of submarine-channel architecture and its controlling factors: A case study from the Niger Delta Basin slope[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(5): 825-840.]
- [48] 陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 等. 东非鲁伍马盆地渐新统深水水道—朵体沉积特征及控制因素[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 1047-1058. [Chen Yuhang, Yao Genshun, Lü Fuliang, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of Oligocene deep-water channel-lobe in Rovuma Basin of the East Africa[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 1047-1058.]
- [49] 李志扬. 陆棚海泥岩的岩相特征及沉积过程: 以晚白垩世北美西部内陆海道为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 168-180. [Li Zhiyang. Facies characteristics and depositional processes of shelf mudstones: Examples from the Late Cretaceous western interior seaway of North America[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 168-180.]
- [50] 刘雨迪, 梁超, 操应长, 等. 川南五峰组—龙马溪页岩岩相特征及沉积作用[J]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1832-1848. [Liu Yudi, Liang Chao, Cao Yingchang, et al. Shale facies characteristics and sedimentation of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(5): 1832-1848.]
- [51] 白莹, 罗平, 王石, 等. 台缘微生物礁结构特点及储集层主控因素: 以塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 349-358. [Bai Ying, Luo Ping, Wang Shi, et al. Structure characteristics and major controlling factors of platform margin microbial reef reservoirs: A case study of Xiaerbulak Formation, Lower Cambrian, Aksu area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(3): 349-358.]
- [52] 周明, 罗平, 董琳, 等. 塔里木盆地柯坪地区奥陶系鹰山组台内滩沉积特征[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 951-962. [Zhou Ming, Luo Ping, Dong Lin, et al. Sedimentary characteristics of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation Carbonate intra-platform shoals in Keping area, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5): 951-962.]
- [53] 高志勇, 朱如凯, 郭宏莉, 等. 海侵背景下风暴控制的滨岸-陆棚砂体研究: 以塔中志留系下沥青砂岩段为例[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 468-475. [Gao Zhiyong, Zhu Rukai, Guo Hongli, et al. Study on transgressive storm-dominated shoreline-neritic shelf sandbody: A case of the lower bitumen-bearing sandstone member of Silurian in Tazhong area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 468-475.]
- [54] 王敏, 张佳佳, 王瑞峰, 等. 东非鲁伍马盆地深水海底扇储集层质量差异及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 491-501. [Wang Min, Zhang Jiajia, Wang Ruifeng, et al. Quality variations and controlling factors of deepwater submarine-fan reservoirs, Rovuma Basin, East Africa[J]. Petroleum exploration and development. 2022, 49(3): 491-501.]

Lithofacies and Sedimentary Model of Migmatites in the Ordovician Wulalike Formation, Western Edge of the Ordos Basin

BAI Ying¹, MA Zhanrong², HUANG Zhengliang³, YAN Wei³, GAO Jianrong¹, ZHAO Zhenyu¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. Exploration Department of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

3. Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] Several recent exploration wells in the Ordovician Wulalike Formation at the western edge of the Ordos Basin have obtained industrial gas flow, breaking through the largely unexplored migmatite zone. Understanding the lithofacies and sedimentary characteristics of migmatites can provide theoretical basis and practical data for future oil and gas exploration work in the western edge. [Methods] Based on typical drilling core and outcrop data, this study comprehensively utilizes thin sections, scanning electron microscopy, and logging to investigate the lithofacies, sedimentary facies, and distribution patterns of the Wulalike Formation in the western edge. [Results and Conclusions] The rocks of the Ordovician Wulalike Formation in the western edge of the Ordos Basin can be divided into three types: Migmatite lithofacies, terrigenous clastic lithofacies, and carbonate lithofacies. The vertical sequence combination is controlled by two periods of marine transgression events, while the lithofacies changes are further controlled by local hydrodynamic conditions. Lithofacies types, vertical sequences, logging, geochemistry and other facies indicators indicate that the Wulalike Formation can develop platforms, continental shelves, slopes, and basins, which can be further divided into 7 subfacies and 15 microfacies. The eastern platform facies feature "intertidal shoal-flat" sequence and the "tidal storm-channel-sand dam" sequence, and the sequence of "continental shelf storm shoreline/shallow sea sand bars" and "continental shelf mud" forms the central continental shelf facies. The western slope basin facies are dominated by turbidite fans, canyon channels, and basin mud. The distribution pattern of sedimentary facies within the third order sequence of the Wulalike Formation indicates that during the formation of sequence SQ1, the water body was generally deep and developed large sections of shale, while during the sedimentation of sequence SQ2, the water body became shallower as a whole. In addition, due to the influence of microbial construction and the connection between the western edge and the middle-east platform, the slope and shelf facies also became narrower overall and retreated westward. Sedimentary model displays that rock types and sedimentary characteristics of the Wulalike Formation are mainly influenced by the source supply, paleogeomorphological features, and hydrodynamic conditions, among which sufficient source supply is the basic condition for migmatites sedimentation in the western edge area.

Key words: Ordos Basin; Wulalike Formation; migmatites; lithofacies; sedimentary facies