

文章编号:1000-0550(2025)04-1199-14

鄂尔多斯盆地西部奥陶纪乌拉力克期岩相古地理特征

闫伟^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 郭玮^{1,2}, 周黎霞^{1,2}, 蔡郑红^{1,2}, 黄正良^{1,2}

1. 中国石油长庆油田勘探开发研究院, 西安 710018

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地西部中上奥陶统乌拉力克组发育一套黑色海相页岩。近年来多口乌拉力克组海相页岩气探井获得工业油气流, 展现出良好的油气勘探潜力, 研究盆地西部奥陶纪岩相古地理有利于明确页岩气烃源岩、储层的展布及海相页岩气下步勘探方向。【方法】通过大量野外露头、钻井岩心、岩石薄片、元素地球化学等资料, 综合研究了乌拉力克组岩石学特征、沉积相类型及沉积演化特征。【结果】(1) 乌拉力克组发育硅质页岩、钙质页岩、黏土质页岩、混合页岩、颗粒石灰岩等岩石类型, 其中纹层型硅质页岩是最有利于页岩气勘探的岩石类型; (2) 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克期水体西深东浅, 自西向东依次发育盆地相、广海陆棚相、斜坡相、碳酸盐岩台地相等四种沉积相类型; (3) 鄂尔多斯盆地西部在乌拉力克期经历了多次海侵海退过程, 水体逐渐变浅, 沉积环境由深水向浅水过渡。【结论】鄂尔多斯盆地西部乌拉力克期发育一套碳酸盐岩台地边缘沉积, 其中广海陆棚相、斜坡相和颗粒滩亚相是下一步天然气有利的勘探相带。

关键词 鄂尔多斯盆地; 乌拉力克组; 海相页岩; 岩相古地理; 沉积模式

第一作者简介 闫伟, 男, 1987年出生, 博士, 工程师, 海相页岩及碳酸盐岩油气地质综合研究, E-mail: yanw539_cq@petrochina.com.cn

通信作者 刘洋, 男, 海相页岩及碳酸盐岩油气地质综合研究, E-mail: liuyang_upc@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.096

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.096

0 引言

鄂尔多斯盆地处于华北板块西南部, 横跨陕西、内蒙古、甘肃、宁夏和山西五省区, 幅员辽阔, 油气资源丰富。盆地西部奥陶系乌拉力克组发育一套优质海相页岩^[1], 近年来多口乌拉力克组海相页岩探井试气获得工业油气流, 有望成为国内页岩气勘探开发的北方战略领域^[2]。岩相古地理对海相页岩气藏的形成与分布规律具有控制作用^[3], 盆地西部奥陶纪乌拉力克期岩相古地理研究有利于指导优质页岩有利相带寻找及海相页岩气下步勘探方向。前人对鄂尔多斯盆地西部奥陶纪乌拉力克期岩相古地理做了大量研究^[4-6]。早在20世纪90年代初, 有学者结合野外代表剖面 and 少量钻井资料将盆地西部奥陶纪中晚期大部分地区统称为西部开阔海^[3]; 此后, 随着研究的深入,

奥陶纪中晚期盆地西部被进一步细化为碳酸盐岩台地—碳酸盐岩斜坡—海槽等沉积相单元^[4,7]。然而, 盆地西部奥陶系绝大部分深埋地下, 前期盆地西部乌拉力克期沉积相带研究缺乏钻井资料精细控制, 学者们对盆地西部乌拉力克期古地理格局的认识尚不统一。一些学者认为盆地西部乌拉力克期发育台地、台地前缘斜坡、深水斜坡—海槽沉积相带^[8-10], 而陈小炜等^[11]认为盆地西部乌拉力克期整体为弧后盆地沉积环境, 自东向西发育开阔台地、陆棚相、碳酸盐岩缓坡、斜坡相、盆地相。此外, 学者们对盆地西部乌拉力克组沉积期的优势相带持不同观点。部分观点认为盆地西部隆洼相间, 自东向西发育深水斜坡相—广海陆棚相—盆地相沉积体系, 其中斜坡相、广海陆棚相为优势沉积相带^[2,12-14], 而孙华丽等^[15]认为乌拉力克组沉积期以深水盆地相沉积为主, 主要发育笔石页岩盆地相,

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-08-16; 录用日期: 2024-10-08 网络出版日期: 2024-10-08

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(2021DJ1904); 中国石油长庆油田公司重大科技专项(ZDZX2021) [Foundation: “14th Five-Year Plan” forward-looking and fundamental major science and technology projects of PetroChina, No. 2021DJ1904; Major Science and Technology Special Projects of Changqing Oilfield Company, PetroChina, No. ZDZX2021]

发育重力流垮塌沉积角砾灰岩^[23,27-28],乌拉力克组呈大面积近南北向条带状分布,东西宽介于50~200 km,南北长达600 km,面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。整体上,盆地西部乌拉力克组表现出“西厚东薄、北厚南薄”的分布特征(图2)。鄂尔多斯盆地西部北段棋盘井地区乌拉力克组地层厚度大,厚度介于100~140 m,向东受加里东期鄂尔多斯盆地中东部差异抬升的影响,乌拉力克组开始变薄;中段马家滩地区乌拉力克组厚度介于40~100 m,西侧乌拉力克组厚度较稳定,约100 m,向东变薄至约40 m;南段银洞子地区乌拉力克组厚度稳定,约100 m。

2 页岩岩石学特征

乌拉力克组整体上发育一套黑色的海相页岩,富含笔石(图3a~c),具有“高脆性、富纹层”的特点(图3d),夹颗粒灰岩(图3e)和角砾灰岩(图3f)。根

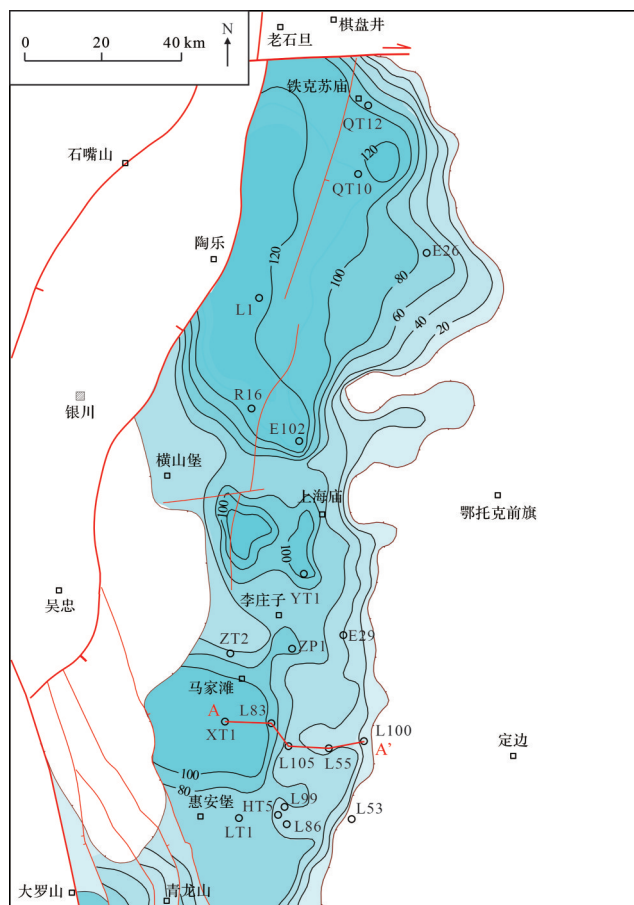


图2 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组地层厚度图
(据文献[2])

Fig.2 Isopach map of the Wulalike Formation,
western Ordos Basin (after reference [2])

据页岩、角砾灰岩和颗粒灰岩的纵向组合占比,将乌拉力克组分为纹层状页岩型、页岩夹灰岩型、灰岩夹页岩型三类岩性组合,其中纹层型页岩组合为海相页岩气最有利勘探岩相。相对扬子板块下古生界五峰组—龙马溪组页岩,华北板块奥陶系乌拉力克组页岩脆性矿物含量更高^[29],脆性矿物含量高达75%,其中长英质矿物含量为54.6%,碳酸盐岩矿物含量为20.4%,而黏土矿物含量相对较少(图4),黏土矿物以伊利石和伊/蒙间层为主,其次为绿泥石和高岭石,含有少量黄铁矿和菱铁矿,不含蒙脱石。

利用长英质矿物(长石+石英)、碳酸盐岩矿物(方解石+白云石)和黏土矿物岩矿三端元分类法(图5),将乌拉力克组页岩划分为6个页岩岩相(表1),包含硅质页岩相(图6a)、钙质页岩相(图6b)、黏土质页岩相(图6c)和混合页岩(图6d)等页岩相,其中混合页岩进一步分为钙质硅质混合页岩、钙质黏土质混合页岩、黏土质硅质混合页岩。乌拉力克组页岩中主要发育硅质页岩、钙质硅质混合页岩、黏土质硅质混合页岩、钙质页岩(图4,6),整体表现为“高脆性”的特征。此外,乌拉力克组页岩纹层极为发育,通过全直径岩心双能谱CT扫描成像技术,识别乌拉力克组页岩主要层段纹层密度介于60~132条/m(图7)。页岩纹层主要发育硅质纹层、灰质纹层两类,其中硅质纹层以长英质矿物为主,其次为伊利石、钠长石等;灰质纹层矿物以方解石、白云石为主,含少量石英、黏土矿物。

3 沉积相特征

3.1 沉积相标志

研究区岩石类型包括硅质页岩、钙质页岩、黏土质页岩、混合页岩、石灰岩、颗粒石灰岩等岩石类型。

硅质页岩以灰黑色为主,硅质含量 $\geq 50\%$,自然伽马(GR)值在95~140 API之间,在乌拉力克组页岩中GR值相对较低,富含有机质,主要分布在乌拉力克组底部(图1)。页岩中硅质以生物硅为主,富含放射虫、海绵骨针、笔石等生物化石(图3a),常见黄铁矿,呈细粒散点状分布。硅质页岩水平纹层发育,岩心观察可见明显页理构造,反映了水体较深、安静贫氧的广海陆棚沉积环境(图8)。

钙质页岩以浅灰色、灰绿色为主,页岩中钙质含量高(图3b),碳酸盐矿物含量通常大于50%,GR值在85~120 API之间,有机质含量较低,主要分布于乌拉力克组中上部(图1)。钙质矿物呈纹层状或分散

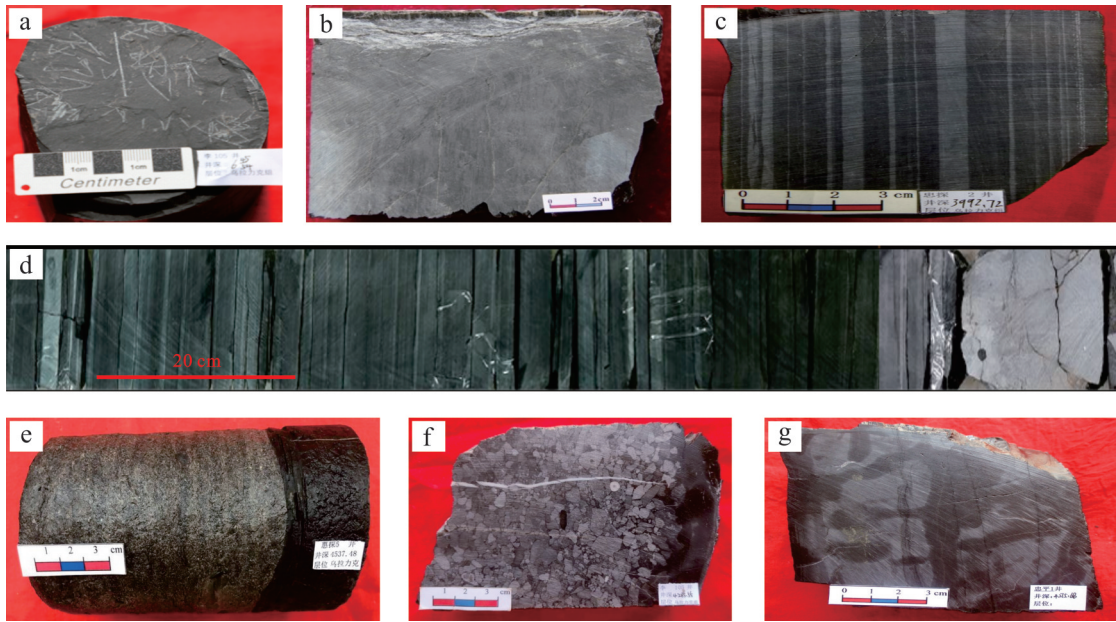


图3 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组岩心照片

(a)L105井,4 283.81 m,黑色页岩,富含笔石;(b)ZP1井,4 193.24 m,浅灰色钙质页岩;(c)ZT2井,3 992.72 m,纹层状钙质硅质混合页岩;(d)L99井,4 423.15~4 424.20 m,黑色纹层状页岩;(e)HT5井,4 537.48 m,砂屑灰岩;(f)L105井,4 286.55 m,垮塌角砾岩;(g)ZP1井,4 275.68 m,泥晶灰岩,见泥裂构造

Fig.3 Photographs of cores from the Wulalike Formation, western Ordos Basin

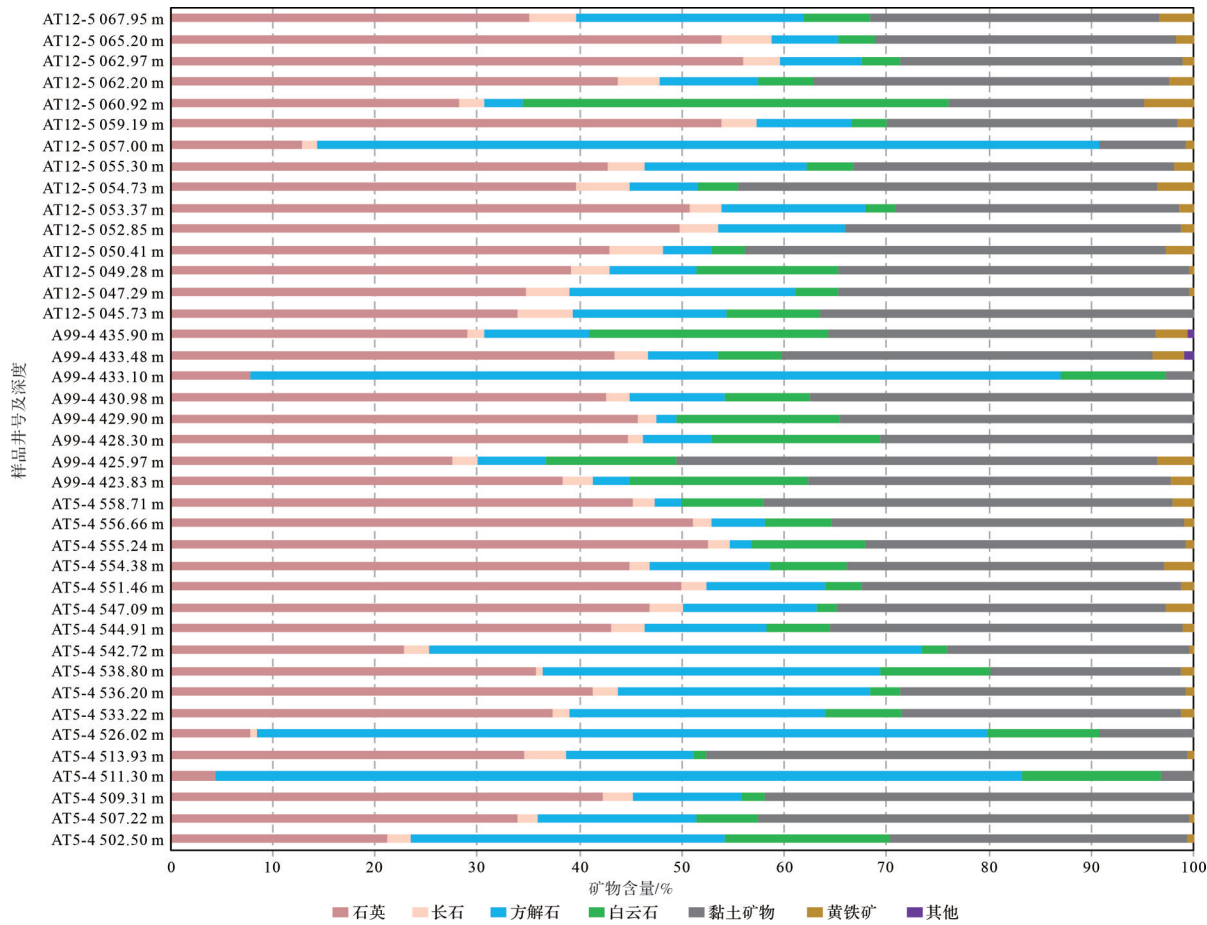


图4 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组矿物相对含量分布

Fig.4 Distribution of mineral content in the Wulalike Formation, western Ordos Basin

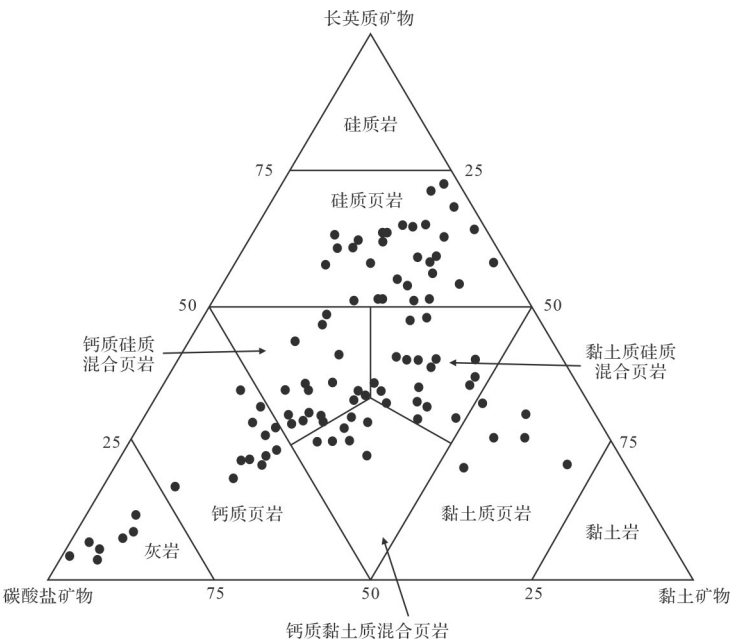


图 5 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组矿物三端元岩相分类
Fig.5 Ternary diagram of mineral facies, Wulalike Formation, western Ordos Basin

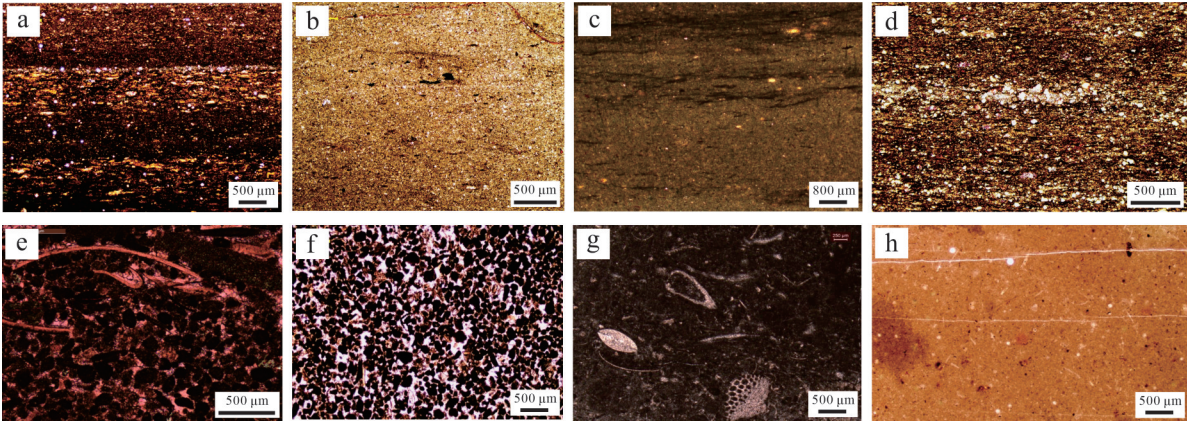


图 6 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组岩心镜下薄片
(a)ZP1井,4 261.59 m,纹层状富有机质硅质页岩;(b)ZP1井,4 197.92 m,钙质页岩;(c)E102井,3 635.60 m,黏土质页岩;(d)ZP1井,4 220.54 m,纹层状钙质硅质混合页岩;(e)HT5井,4 542.34 m,砂屑灰岩;(f)ZP1井,4 266.42 m,亮晶球粒灰岩;(g)E26井,4 115.91 m,含生屑泥晶灰岩;(h)ZP1井,4 275.81 m,泥晶灰岩,见鸟眼构造

Fig.6 Photomicrographs of thin sections, Wulalike Formation, western Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地乌拉力克组页岩岩相类型
Table 1 Lithofacies in the Wulalike Formation, Ordos Basin

岩相	矿物成分/%		
	石英+长石	方解石+白云石	黏土矿物
硅质页岩	50~75	<50	<50
钙质页岩	<50	50~75	<50
黏土质页岩	<50	<50	50~75
混合页岩	钙质硅质混合页岩	25~50	<33
	钙质黏土质混合页岩	25~50	25~50
	黏土质硅质混合页岩	<33	25~50
灰岩	<25	>75	<25

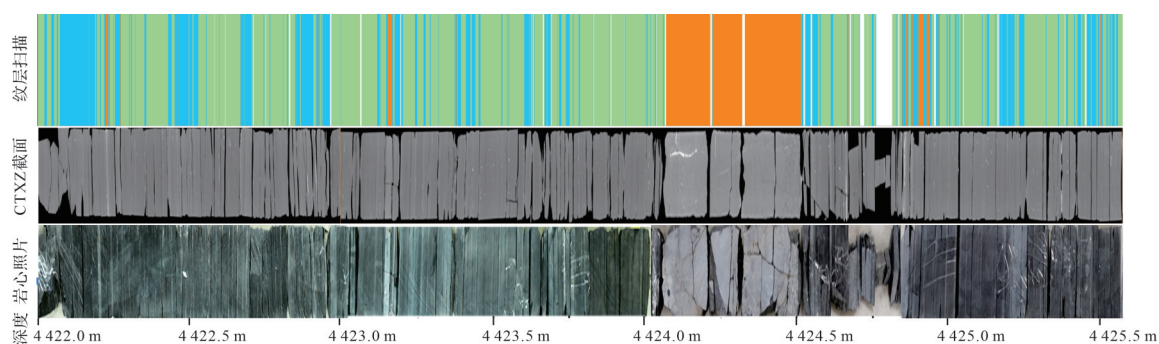


图7 L99井乌拉力克组(4 422.0~4 425.5 m)纹层特征、CT扫描及岩心照片

Fig.7 laminae, CT scan and core photographs, Wulalike Formation, in well L99 (4 422.0-4 425.5 m)

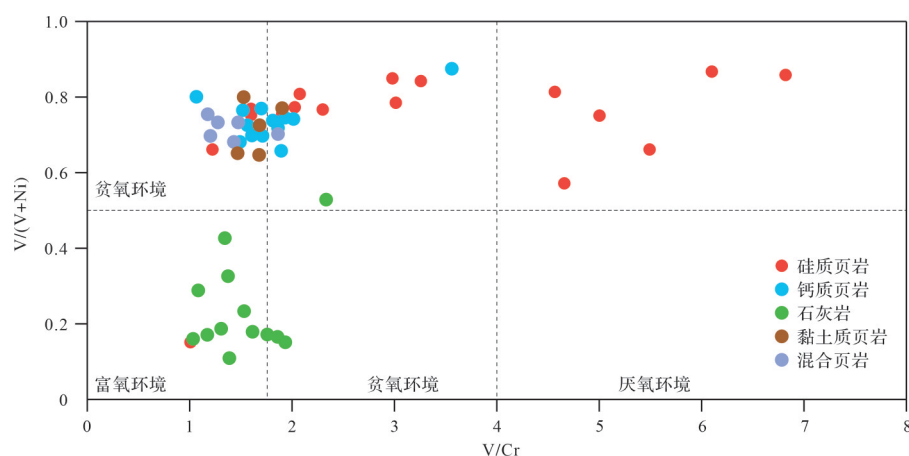


图8 鄂尔多斯盆地乌拉力克组氧化还原指标交会图

Fig.8 Intersection plot of redox indicators in the Wulalike Formation, Ordos Basin

状分布,并可见腕足、珊瑚、三叶虫、棘皮类、双壳类等化石,反映了相对较深水的、贫氧的沉积环境^[30](图8)。

黏土质页岩以深灰色、灰黑色为主,主要分布于乌拉力克组上部。黏土矿物含量通常 $\geq 50\%$,GR值在110~145 API之间,在乌拉力克组页岩中GR值相对最高(图1)。矿物以伊利石、绿泥石和伊/蒙混层为主。黏土质页岩也含有石英颗粒,分析表明,该石英颗粒为陆源碎屑成因^[31],反映了沉积期较深水的还原环境(图8)。

混合页岩中硅质、碳酸盐、黏土等矿物含量相近(图3c),以灰色、灰绿色为主,包括钙质硅质混合页岩、黏土质硅质页岩、黏土质钙质混合页岩等岩石类型,自然伽马曲线介于最高的黏土质页岩和最低的硅质页岩之间,是硅质页岩、钙质页岩和黏土质页岩的过渡岩性。

石灰岩以灰色和灰黑色为主,主要为灰泥石灰岩,GR值5~20 API之间,常具有滑塌构造(图3f)。

平面分布范围局限,沿古海岸线南北带状展布,表明其沉积环境位于深水斜坡,沉积范围狭窄。

颗粒石灰岩以灰色和深灰色为主(图3e),GR值在5~20 API之间,颗粒以生物碎屑、球粒等为主(图6e,f),部分具有保存较好的交错层理。颗粒灰岩中生物化石丰富,表明沉积环境光照充足、营养丰富、生物繁盛,且沉积水体能量高,为台地边缘的颗粒滩沉积环境。

3.2 沉积相类型

根据测井、岩心岩屑及镜下薄片分析,结合分析化验等资料,将鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组划分为盆地相、广海陆棚相、斜坡相、碳酸盐岩台地相4类,其中碳酸盐岩台地相可进一步划分为台地边缘亚相、开阔台地亚相、潮坪亚相,各类沉积相特征及沉积物特征如下。

3.2.1 盆地相

乌拉力克组盆地相沉积主要分布在贺兰山—牛首山—罗山一带以西的地区。沉积期该地区地形平

坦、水体深,沉积厚度大,一般超过1 000 m。沉积物普遍较细,主要通过细粒浊流搬运而来,以浅灰色泥页岩与砂岩互层形成的复理石建造为主,结合前人研究,物源主要来自阿拉善古陆^[12]。泥页岩的颜色较浅,不含碳酸盐岩矿物,有机质含量低,缺乏底栖生物化石,水平层理发育,反映盆地水体过深,不利于生物生存。

3.2.2 广海陆棚相

广海陆棚相位于浅海陆棚靠近广海一侧的深水沉积环境。其水深位于氧化还原界面(缺氧线)之下,水体安静、环境能量低,属于强还原的沉积环境。广海陆棚相主要发育纹层状页岩,岩性以灰黑色—黑色的厚层页岩为主,普遍含黄铁矿晶粒,常呈星点状或纹层状分布。页岩硅质含量高,次为黏土矿物,碳酸盐矿物含量低,为硅质页岩。生物化石以笔石为主,并可见硅质的放射虫和海绵骨针。在广海陆棚相沉积物中还可可见透镜状角砾灰岩,为同沉积构造活动引起的块体搬运作用产物,这种小规模垮塌角砾岩非斜坡相的标志^[23,27,32]。

3.2.3 斜坡相

斜坡相位于碳酸盐岩台地与广海陆棚的过渡区,水深位于风暴浪基面以下,较广海陆棚水体稍浅。斜坡相沉积物岩性以页岩夹灰岩型岩性组合为主,碳酸盐矿物含量明显增加,并有角砾灰岩发育,常具有滑塌构造(图3f),为碳酸盐岩水下块体搬运沉积产物^[23]。页岩呈灰黑色,多为钙质页岩、钙质硅质混合页岩或钙质黏土质混合页岩,水平层理极为发育,表明水体整体比较安静。镜下研究表明,页岩纹层呈明暗交替变化,主要是由于页岩矿物成分差异引起的。亮色纹层矿物以方解石、石英为主,含少量白云石;暗色纹层主要由石英组成,其次为伊利石、钠长石(图3c、图6a,d)。

3.2.4 碳酸盐岩台地相

浅海台地相以碳酸盐岩沉积为主,是相对浅水且富氧的沉积环境,生物繁盛,沉积物中可见生物碎屑。碳酸盐岩台地相可进一步划分为台地边缘亚相、开阔台地亚相、潮坪亚相。

台地边缘亚相位于斜坡相向陆地一侧的相对浅水环境,其沉积物中灰质含量较斜坡相明显提高。以灰岩夹页岩型岩性组合为主,灰岩为泥晶灰岩、亮晶颗粒灰岩,页岩为薄层钙质、黏土质页岩。台地边缘水动力强,发育颗粒滩,其沉积地貌相对较高且风

浪作用较强,海水往复冲洗,形成颗粒相对均一的沉积物堆积。颗粒以腕足类、珊瑚、三叶虫、棘皮类、双壳类等生物碎屑和球粒为主。

开阔台地亚相以灰色和灰黑色灰泥石灰岩沉积为主。其平面分布范围局限,呈与陆地平行的南北带状展布,沉积范围狭窄。石灰岩中可见含生屑泥晶灰岩,以灰色、深灰色为主,见生屑颗粒(图5g),表明其形成于碳酸盐岩台地的环境。此外,地层中可见含球粒石灰岩,以及鸟眼(图5h)与泥裂(图3g)共生的泥晶灰岩,显示潮坪相的沉积环境。因研究区东侧受华北地台在加里东期构造抬升的影响,地层几乎被剥蚀殆尽,开阔台地亚相和潮坪相仅局部存在,故本文不再对此详述。

4 沉积相演化

乌拉力克期,鄂尔多斯盆地受加里东构造运动的不断影响,华北地台及盆地本部进一步构造抬升,成为剥蚀古陆,盆地西部差异沉降,成为陆缘海。盆地西部属于祁连海域沉积,是华北地台与祁连海槽的过渡部位,沉积相带受海岸地形影响,呈南北带状展布。研究区以广海陆棚相和深水斜坡相沉积为主,水体西深东浅。

4.1 纵向演化

微量元素分析表明,V/Cr比值、Ni/Co比值、U/Th比值均呈现自下而上变小的趋势(图9)^[2],表明水体逐渐变浅^[33-35]。奥陶纪克里摩里末期,盆地西部呈碳酸盐岩台地沉积,主要发育石灰岩(图9);进入乌拉力克期,盆地西部发生了快速海侵,由克里摩里期的碳酸盐岩台地相沉积,突变为陆缘海深水沉积^[36],沉积了黑色硅质页岩(图9),并在局部地区发育;随后缓慢海退,生物硅质含量逐渐降低,碳酸盐岩含量逐渐增加(图10)。进入乌拉力克中期,水体快速变浅,北部棋盘井地区以浅水碳酸盐岩沉积为主,南部马家滩地区仍以深水页岩沉积为主,主要发育广海陆棚相和斜坡相(图10)。乌拉力克末期,水体再次快速加深,形成以黏土质页岩、混合页岩为主的沉积。生物硅质含量与孔隙度、TOC呈现正比例的关系^[37],而乌拉力克组下部硅质含量相对较高,因此乌拉力克组的优质页岩段(即页岩气甜点段)主要位于乌拉力克组下部^[38-39]。

4.2 横向演化

鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组探井地层厚度、

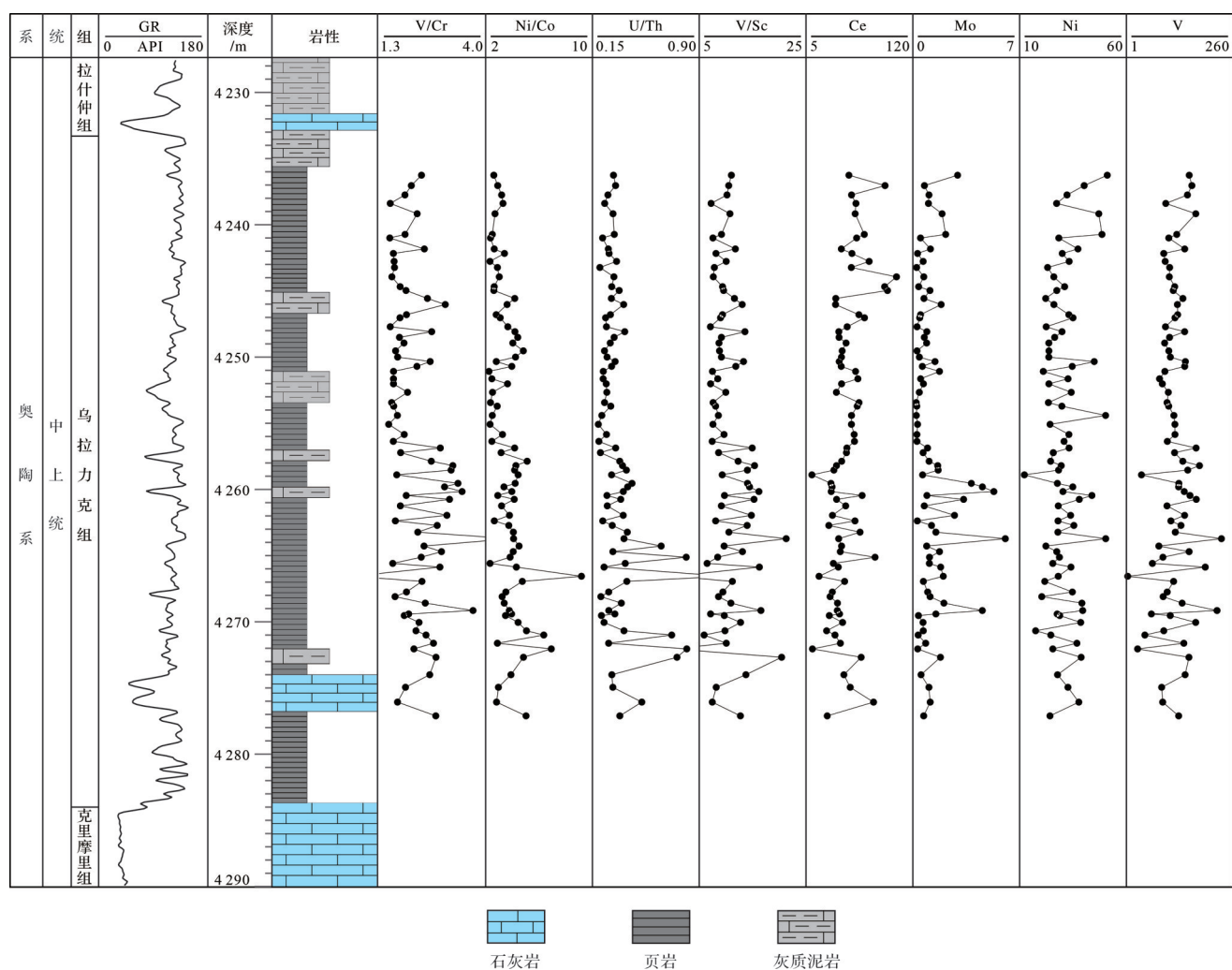


图9 鄂尔多斯盆地ZP1井乌拉力克组古环境参数变化图(井号位置见图2,数据来源文献[2])

Fig.9 Paleoenvironmental variation in well ZP1, Wulalike Formation, Ordos Basin
(well location shown in Fig.2, data from reference [2])

岩性组合特征及岩心矿物组成分析资料表明,自西向东,沉积地层厚度变薄,岩性组合由沉积深水陆棚纹层状页岩向页岩夹灰岩岩性组合过渡,且岩石矿物组成中硅质含量降低,碳酸盐岩含量增加,表明水体逐渐变浅(图10,11)。此外,乌拉力克组探井岩心V/Cr比值自西向东降低,表明水体自西向东水体变浅(图11)。整体上,乌拉力克组自西向东依次发育盆地相、广海陆棚相、台地边缘斜坡相、碳酸盐岩台地相等沉积(图10,12)。研究区东侧地层由于受加里东期构造运动影响隆升剥蚀,无法确定剥蚀区的古环境。根据现代海洋沉积环境沉积序列推测,认为研究区东侧靠近鄂尔多斯古陆,为浅海台地相的沉积。

4.3 沉积模式

鄂尔多斯盆地西部中晚奥陶世乌拉力克期地势东高西低,盆地本部处于剥蚀古陆的环境,向西依次

发育潮坪相、碳酸盐岩台地相、斜坡相、广海陆棚相和盆地相(图13),沉积水体逐渐变深。其中,潮坪相和碳酸盐岩台地相为浅水、富氧的沉积环境,在台地边缘发育颗粒滩亚相,是有利的储集层发育相带。斜坡相和广海陆棚相页岩发育,页岩硅质含量高,且TOC较高,纹层及水平缝发育^[40-41],是有利的烃源岩和储集层。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组发育硅质页岩、钙质页岩、黏土质页岩、混合页岩、石灰岩、颗粒石灰岩等岩石类型。结合沉积相标志分析,识别出了盆地相、广海陆棚相、斜坡相、碳酸盐岩台地相等四个沉积相类型。

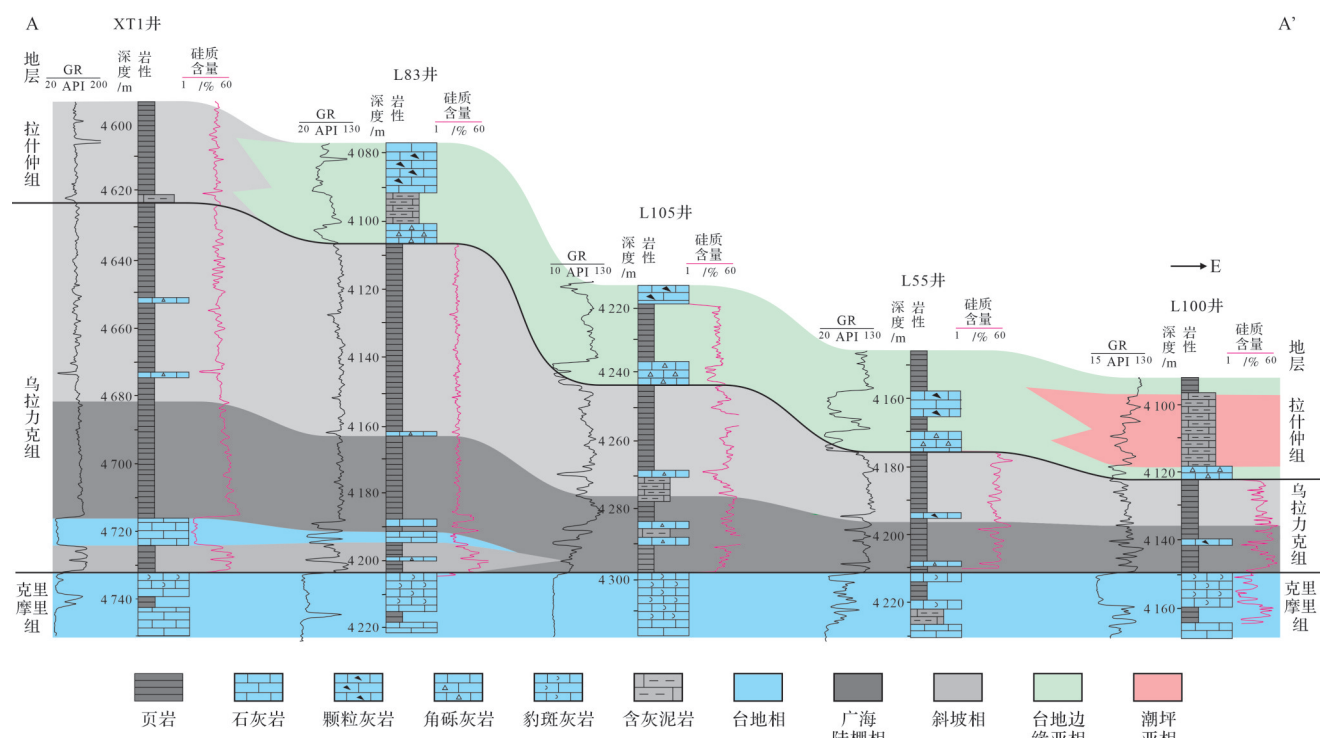


图 10 XT1 井—L83 井—L105 井—L55 井—L100 井奥陶系乌拉力克组地层与沉积相连井剖面图(井号位置见图 2)

Fig.10 Stratigraphic and sedimentary profile of wells XT1-L83-L105-L55-L100, Ordovician Wulalike Formation (well locations shown in Fig.2)

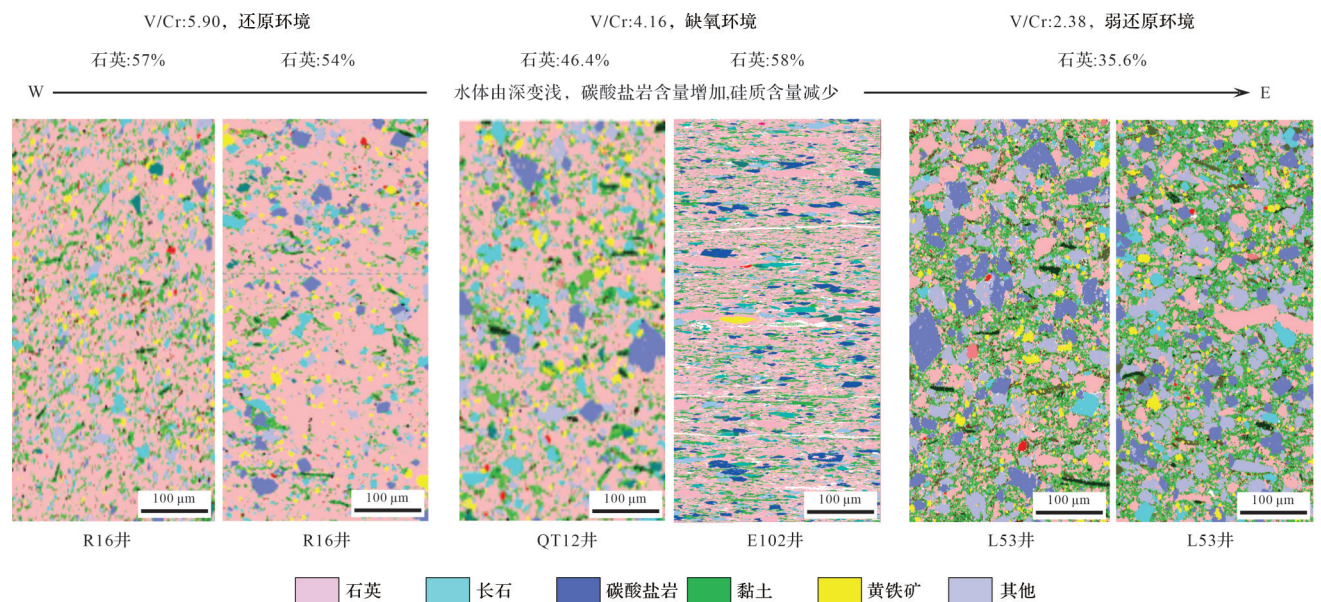


图 11 鄂尔多斯盆地乌拉力克组岩性横向变化趋势(井号位置见图 2)

Fig.11 Photomicrographs showing lateral lithological variation trend in the Wulalike Formation, Ordos Basin (well locations shown in Fig.2)

(2) 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克期发育碳酸盐岩台地边缘沉积模式,研究区沉积相带受海岸地形影响,呈南北带状展布,并以广海陆棚相和深水斜坡相沉积为主,水体西深东浅。

(3) 结合储层孔隙度和有机碳丰度,明确了斜坡相、广海陆棚相、颗粒滩亚相是有利的烃源岩和储集层发育相带;在纵向上,乌拉力克组底部纹层状硅质页岩发育,是海相页岩气有利的勘探层段。

参考文献(References)

- [1] 付金华,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶纪北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 2001, 3(4): 25-34. [Fu Jinhua, Zheng Congbin. Evolution between North China Sea and Qilian Sea of the Ordovician and the characteristics of lithofacies palaeogeography in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(4): 25-34.]
- [2] 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.]
- [3] 冯增昭,鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Lithofacies palaeogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 1-8.]
- [4] 林畅松,杨起,李思田,等. 贺兰奥拉槽早古生代深水重力流体系的沉积特征和充填样式[J]. 现代地质, 1991, 5(3): 252-262. [Lin Changsong, Yang Qi, Li Sitian, et al. Sedimentary characters of the Early Paleozoic deepwater gravity flow systems and basin filling style in the Helan Aulacogen, Northwest China[J]. Geoscience, 1991, 5(3): 252-262.]
- [5] 侯方浩,方少仙,董兆雄,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 106-112. [Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxiong, et al. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 106-112.]
- [6] 席胜利,郑聪斌,李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 196-206. [Xi Shengli, Zheng Congbin, Li Zhenhong. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 196-206.]
- [7] 杨华,付金华,包洪平. 鄂尔多斯地区西部和南部奥陶纪海槽边缘沉积特征与天然气成藏潜力分析[J]. 海相油气地质, 2010, 15(2): 1-13. [Yang Hua, Fu Jinhua, Bao Hongping. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential along margin of Ordovician trough in western and southern parts of Ordos[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(2): 1-13.]
- [8] 陈强,张慧元,李文厚,等. 鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 117-124. [Chen Qiang, Zhang Huiyuan, Li Wenhui, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 117-124.]
- [9] 李文厚,陈强,李智超,等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 85-100. [Li Wenhui, Chen Qiang, Li Zhichao, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 85-100.]
- [10] 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.]
- [11] 陈小伟,牟传龙,周恩恩,等. 鄂尔多斯西缘中晚奥陶世大坪阶—艾家山阶岩相古地理[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.]
- [12] 吴东旭,周进高,吴兴宁,等. 鄂尔多斯盆地西缘早中奥陶世岩相古地理研究[J]. 高校地质学报, 2018, 24(5): 747-760. [Wu Dongxu, Zhou Jingao, Wu Xingning, et al. Lithofacies and palaeogeography of the Early-Middle Ordovician in the western Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(5): 747-760.]
- [13] 黄军平,黄正良,刘立航,等. 鄂尔多斯盆地乌拉力克组页岩储层孔径表征及其主控因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3418-3433. [Huang Junping, Huang Zhengliang, Liu Lihang, et al. Pore size characterization and their mainly controlling factors in Wulalike Formation shale, Ordos Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3418-3433.]
- [14] 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.]
- [15] 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.]
- [16] 杨华,陶家庆,欧阳征健,等. 鄂尔多斯盆地西缘构造特征及其成因机制[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 863-868. [Yang Hua, Tao Jiaqing, Ouyang Zhengjian, et al. Structural characteristics and forming mechanism in the western margin of the Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(5): 863-868.]

- [17] 何登发,邵东波,开百泽,等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报, 2019, 40(1): 219-235. [He Dengfa, Shao Dongbo, Kai Baize, et al. Structural style and trap distribution in Majiatan area on the western margin of Ordos Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019, 40(1): 219-235.]
- [18] 张进,马宗晋,任文军. 鄂尔多斯西缘逆冲褶皱带构造特征及其南北差异的形成机制[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 600-611. [Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. Tectonic characteristics of the western Ordos thrust-fold belt and the causes for its north-south segmentation[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 600-611.]
- [19] 赵红格,刘池洋,王峰,等. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 27(2): 173-179. [Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Feng, et al. Structural division and characteristics in western edge of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 27(2): 173-179.]
- [20] 席胜利,莫午零,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉拉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.]
- [21] 陈小炜,牟传龙,周恩恩,等. 华北地区奥陶纪岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(4): 1-11. [Chen Xiaowei, Mou Chuanlong, Zhou Kenen, et al. Sedimentary facies and palaeogeography of the North China region during the Ordovician[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2015, 35(4): 1-11.]
- [22] 徐诗奇,张梦忆. 鄂尔多斯盆地西缘地质构造特征及勘探走向研究[J]. 石化技术, 2020, 27(4): 181, 183. [Xu Shiqi, Zhang Mengyi. Structural characteristics and exploration direction in the western margin of the Ordos Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(4): 181, 183.]
- [23] Li W J, Chen J T, Hakim A J, et al. Middle Ordovician mass-transport deposits from western Inner Mongolia, China: Mechanisms and implications for basin evolution[J]. Sedimentology, 2022, 69(3): 1301-1338.
- [24] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学:内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.]
- [25] 王跃,桂和荣,苏尚国,等. 滇黔北五峰组—龙马溪组页岩沉积环境和古气候地球化学特征[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 653-666. [Wang Yue, Gui Herong, Su Shangguo, et al. Sedimentary environment and paleoclimate geochemical characteristics of shale in the Wufeng and Longmaxi Formations, northern Yunnan-Guizhou area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 653-666.]
- [26] 于洲,黄正良,李维岭,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉拉克组海相页岩岩相类型及优质储层发育特征[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 23-33. [Yu Zhou, Huang Zhengliang, Li Weiling, et al. Lithofacies types and high-quality reservoir development characteristics of marine shale in the Middle Ordovician Wulalike Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 23-33.]
- [27] 李华,何明薇,邱春光,等. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000—2022年)研究进展[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 18-36. [Li Hua, He Mingwei, Qiu Chunguang, et al. Research processes on deep-water interaction between contour current and gravity flow deposits, 2000 to 2022[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 18-36.]
- [28] 王振涛,周洪瑞,王训练,等. 鄂尔多斯盆地西缘北部奥陶纪盆地原型:来自贺兰山和桌子山地区奥陶系的沉积响应[J]. 地质论评, 2016, 62(4): 1041-1061. [Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. The Ordovician basin prototype in the northwest Ordos Basin: Constraint from the Ordovician sedimentary respond in the Helan-Zhuozhi mountains[J]. Geological Review, 2016, 62(4): 1041-1061.]
- [29] 施振生,周天琪,郭伟,等. 海相页岩定量古地理编图及深水陆棚沉积微相划分:以川南泸州地区五峰组—龙马溪组龙一¹⁻⁴小层为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1728-1744. [Shi Zhensheng, Zhou Tianqi, Guo Wei, et al. Quantitative paleogeographic mapping and sedimentary microfacies division in a deep-water marine shale shelf: Case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1728-1744.]
- [30] 刘子铭,付斯一,魏柳斌,等. 鄂尔多斯盆地西缘中—晚奥陶世沉积演化特征及古环境分析[J]. 矿物岩石, 2024, 44(2): 177-193. [Liu Ziming, Fu Siyi, Wei Liubin, et al. Sedimentary evolution characteristics and paleoenvironmental analysis of the Ordovician in the western margin of the Ordos Basin[J]. Mineralogy and Petrology, 2024, 44(2): 177-193.]
- [31] 张艳妮,李荣西,席胜利,等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉拉克组页岩沉积环境及有机质富集机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3401-3417. [Zhang Yanni, Li Rongxi, Xi Shengli, et al. Sedimentary environments and organic matter enrichment mechanism of Ordovician Wulalike Formation shale, western Ordos Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3401-3417.]
- [32] 李向东,陈海燕,陈洪达. 鄂尔多斯盆地西缘桌子山地区上奥陶统拉什仲组深水复合流沉积[J]. 地球科学进展, 2019, 34(12): 1301-1315. [Li Xiangdong, Chen Haiyan, Chen Hongda. Deep-water combined-flow deposits of the Upper Ordovician Lashenzhong Formation in Zhuozishan area, western Margin of Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(12): 1301-1315.]

- [33] 樊秋爽,夏国清,李高杰,等. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1151-1171. [Fan Qiushuang, Xia Guoqing, Li Gaojie, et al. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1151-1171.]
- [34] 蒋苏扬,黄文辉,张永生. 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统地球化学特征及古环境意义[J]. 现代地质, 2020, 34(3): 545-553. [Jiang Suyang, Huang Wenhui, Zhang Yongsheng. Geochemical characteristics of Middle Ordovician in western margin of Ordos Basin and its implication on paleoenvironment[J]. Geoscience, 2020, 34(3): 545-553.]
- [35] 李福奇,王晓锋,刘文汇,等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气地球化学特征与成因[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(9): 1626-1637. [Li Fuqi, Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics and genesis of shale gas in the Ordovician Wulalik Formation in the western, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(9): 1626-1637.]
- [36] 吴东旭,孙六一,周进高,等. 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层特征及成因[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 51-62. [Wu Dongxu, Sun Liuyi, Zhou Jingao, et al. Characteristics and genesis of the Ordovician Kelimoli dolomite reservoirs in the western edge of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 51-62.]
- [37] 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.]
- [38] 席胜利,魏嘉怡,张才利,等. 鄂尔多斯盆地海相页岩油勘探发现及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 253-269. [Xi Shengli, Wei Jiayi, Zhang Caili, et al. Discovery and significance of marine shale oil exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 253-269.]
- [39] 席胜利,闫伟,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 33-51, 132. [Xi Shengli, Yan Wei, Liu Xinshe, et al. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 33-51, 132.]
- [40] 王玉满,周尚文,黄正良,等. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系乌拉力克组裂缝孔隙表征[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(7): 1146-1162. [Wang Yuman, Zhou Shangwen, Huang Zhengliang, et al. Fracture pore characterization of the Ordovician Wulalike Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(7): 1146-1162.]
- [41] 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 western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Hebei GEO University, 2023, 46(3): 48-54.]

Lithofacies Paleogeography of the Ordovician Wulalike Formation, Western Margin of the Ordos Basin

YAN Wei^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, ZHOU LiXia^{1,2}, CAI ZhengHong^{1,2}, HUANG ZhengLiang^{1,2}

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Shaanxi Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] The western part of the Ordos Basin was located in the Qilian Sea area during the middle-late Ordovician Wulalike period, when a thick layer of black marine shale developed in the region. Many exploration wells in the Ordos Basin have produced industrial-level oil and gas flows from the Wulalike Formation in recent years, indicating a high potential for further exploration and development of marine shale oil and gas. The study of the Ordovician paleogeography in the western part of the basin is conducive to clarifying the distribution of hydrocarbon source rocks and reservoirs and directing exploration for marine shale gas. [Methods] This paper describes a comprehensive study of the petrological characteristics, sedimentary facies types and sedimentary evolution of the Wulalike Formation, involving field observation of a large number of outcrops and analyses of drill cores, rock thin sections and elemental geochemical data. [Results] (1) The Wulalike Formation comprises a range of rock types: siliceous shale, calcareous shale, clay shale, mixed shale and granular limestone. Of these, laminated siliceous shale was identified as the most favorable lithofacies for shale gas exploration. (2) Four sedimentary facies types from west to east were identified and analyzed: basin facies, broad sea-shelf facies, slope facies and carbonate platform facies. (3) During the Wulalike period, the western Ordos Basin underwent multiple transgression/regressions, and gradual shallowing of the water modified the sedimentary environment. [Conclusions] A model of the carbonate platform margin sedimentation established for the western Ordos Basin in the Wulalike period indicates that the broad sea-shelf facies, slope facies and granular shoal facies favor natural gas exploration in the next step.

Key words: Ordos Basin; Wulalike Formation; marine shale; lithofacies paleogeography; depositional model