

鄂尔多斯盆地西缘冲断带中段奥陶系克里摩里组 高能滩隐伏构造成藏潜力

时保宏^{1,2}, 蔺嘉昊^{1,2,3}, 张涛⁴, 王红伟⁵, 张雷⁵, 魏嘉怡⁵, 李涵⁵, 刘刚⁵, 王蓉^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油长庆油田分公司 采气三厂, 内蒙古 鄂尔多斯 017300; 4. 中国石油长庆油田分公司 勘探事业部, 陕西 西安 710018; 5. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

摘要:近年来,少数探井在鄂尔多斯盆地西缘冲断带上古生界石盒子组8段和山西组1段隐伏构造发现了低产天然气。推覆体下盘隐伏构造研究对天然气勘探具有重要的意义。基于最新钻探成果、地震资料、岩石薄片和有机地球化学等资料,研究了西缘中段逆冲推覆构造下盘上古生界隐伏构造特征,分析了奥陶系克里摩里组油气成藏地质条件和勘探潜力,提出了隐伏构造带有利勘探方向。研究结果表明:①受侏罗世—白垩世燕山期自西向东强烈推覆应力作用影响,研究区推覆体下盘地层被动挤压褶皱变形,广泛发育南北向呈排状展布的隐伏构造,隐伏构造圈闭规模较大,断层不发育,封闭性较好。②奥陶系克里摩里组发育缓坡高能滩相储层,主要为中-粗晶白云岩,储集空间以晶间孔、晶间溶孔及裂缝为主,储层孔隙度介于3%~6%,渗透率在 $(1\sim8)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。③发育乌拉力克组和克里摩里组2套海相优质烃源岩,干酪根以I型和II₁型为主,镜质体反射率(R_o)在1.50%~1.90%。④天然气垂向和侧向双向供烃,源-储配置关系良好,隐伏构造圈闭形成与烃源岩主生、排烃期匹配性好。低幅度隐伏构造带与高能滩的叠加区是天然气的富集区。初步预测滩相白云岩与隐伏构造叠合有利面积为300 km²。马家滩段烟墩山、惠安堡和马家滩3个隐伏构造带是下一步克里摩里组天然气勘探的有利区域。

关键词:高能滩带;隐伏构造;成藏潜力;乌拉力克组;克里摩里组;奥陶系;鄂尔多斯盆地西缘

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation potential of concealed structures in the high-energy shoals of the Ordovician Kelimoli Formation in the central section of the thrust zone along the western margin of the Ordos Basin

SHI Baohong^{1,2}, LIN Jiahao^{1,2,3}, ZHANG Tao⁴, WANG Hongwei⁵, ZHANG Lei⁵, WEI Jiayi⁵, LI Han⁵,
LIU Gang⁵, WANG Rong^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. The Third Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Ordos, Inner Mongolia Autonomous Region 017300, China; 4. Exploration Division of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: In recent years, several exploration wells have revealed low-yield natural gas in the concealed structures of the 8th member of the Upper Paleozoic Shihezi Formation and the 1st member of the Upper Paleozoic Shanxi Formation in the thrust zone along the western margin of the Ordos Basin. Hence, investigating the concealed structures in the footwall of nappes is significant for natural gas exploration in the study area. Using the latest drilling results, seismic data, observations of petrographic thin sections, and organic geochemical data, we explore the characteristics of the Paleozoic concealed structures in the footwall of thrust nappes within the central section of the western margin of the Ordos Basin.

收稿日期:2024-05-11;修回日期:2024-10-02。

第一作者简介:时保宏(1970—),男,教授,石油与天然气地质。E-mail:bb.sh@163.com。

通信作者简介:王红伟(1968—),男,高级工程师,石油与天然气地质。E-mail:whwei_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05039-001);中国石油天然气股份有限公司科技专项(2023YQX10105)。

Accordingly, the geological conditions for hydrocarbon accumulation and hydrocarbon exploration potential of the Ordovician Kelimoli Formation is analyzed and favorable exploration targets are proposed in the concealed structural zone. The results indicate that, under the influence of intense W-E-oriented stress of nappes during the Yanshanian movement (Jurassic to Cretaceous), strata in the footwall of nappes in the study area deformed under passive compression and folding, resulting in the extensive development of SN-oriented concealed structures distributed in rows. These concealed structures exhibit large-scale traps and underdeveloped faults, suggesting favorable sealing performance. The Ordovician Kelimoli Formation contains high-energy ramp shoal reservoirs consisting primarily of medium-to-coarse-crystalline dolomites. These reservoirs exhibit storage spaces dominated by intercrystalline pores, intercrystalline dissolution pores, and fractures, with porosity ranging from 3 % to 6 % and permeability from 1×10^{-3} to $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Two suites of high-quality marine source rocks occur in the Wulalike and Kelimoli formations, with kerogen dominated by Types I and III and vitrinite reflectance (R_o) ranging from 1.50 % to 1.90 %. The study area exhibits both vertical and lateral hydrocarbon supply, a favorable source rock-reservoir configuration, and the formation of the concealed structure traps is well matched with the main hydrocarbon generation and expulsion period of source rocks. The superimposed areas of low-amplitude concealed structural zones and high-energy shoals serve as natural gas enrichment areas, with the favorable superimposed areas of 300 km² from preliminary prediction. Additionally, the Yandunshan, Huianbu, and Majiatan concealed structural zones in the Majiatan section along the western margin of the Ordos Basin are identified as favorable areas for future natural gas exploration in the Kelimoli Formation.

Key words: high-energy shoal zone, concealed structure, hydrocarbon accumulation potential, Wulalike Formation, Kelimoli Formation, Ordovician, western margin of the Ordos Basin

引用格式:时保宏,蔺嘉昊,张涛,等. 鄂尔多斯盆地西缘冲断带中段奥陶系克里摩里组高能滩隐伏构造成藏潜力[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 78-90. DOI: 10. 11743/ogg20250106.

SHI Baohong, LIN Jiahao, ZHANG Tao, et al. Hydrocarbon accumulation potential of concealed structures in the high-energy shoals of the Ordovician Kelimoli Formation in the central section of the thrust zone along the western margin of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 78-90. DOI: 10. 11743/ogg20250106.

随着鄂尔多斯盆地北部苏里格、东部古生界多个整装气田的发现,以及南部上古生界天然气勘探的规模展开,鄂尔多斯盆地已经具有较高的天然气勘探程度。为了持续稳产、增储,迫切需要寻找新的接替区带。西缘冲断带作为盆地最早的油气勘探区域^[1],由于其晚期构造活动性强、圈闭成藏条件复杂,天然气勘探一直未取得实质性突破。近年来,长庆油田加强了对盆地西部的攻关研究和勘探部署,持续探索奥陶系台缘相带,QT3井和GT1井等10余口探井相继在奥陶系克里摩里组钻遇了高能滩相碳酸盐岩储层,其中12口井试气获低产天然气流,高能滩相展现了较好的勘探前景。但这些井大多位于盆地西部天环坳陷,属台内滩相带,其西侧的西缘冲断带克里摩里组虽发育较厚层的台缘相带高能滩相白云岩储层,但由于前期勘探及研究程度整体均较低,对其断裂发育及圈闭保存条件认识不够。区内LT1井虽钻遇了较厚层的台缘相白云岩储层,但其处于冲断构造前缘带,断裂活动性较强,保存条件相对较差,试气产水,因此在后期的勘探部署中寻找有效圈闭是关键。2017—2019年,YT1井

和Z5井上古生界低幅度隐伏构造出气关的突破(试气分获 $0.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $1.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 低产天然气流)给西缘下古生界克里摩里组台缘相高能滩白云岩气藏的勘探提供了一定的启示,在后续勘探工作中可以尝试将其与隐伏构造有机联系,综合考虑寻找勘探新发现。

用隐伏构造模式寻找含油气构造,早已在多个油田得到应用并取得了较好的勘探效果^[2-4],说明隐伏构造可以构成良好的油气圈闭。鄂尔多斯盆地西缘马家滩段上古生界隐伏构造钻探成效也证实隐伏构造作为圈闭具有一定的有效性,蕴藏较大的勘探潜力,有望形成盆地西缘天然气勘探新领域。鉴此,笔者以鄂尔多斯盆地西缘冲断带隐伏构造为目标,以奥陶系克里摩里组高能滩相白云岩储层为研究对象,对二者间的构造-成藏耦合关系进行分析,以期对盆地西缘复杂构造区下古生界天然气勘探新发现提供一定的地质依据。

1 隐伏构造特征及勘探概况

西缘冲断带是鄂尔多斯盆地6大构造单元^[5-7]之

一,为一南北长约600 km,东西宽50~100 km的狭长条带,处于秦祁加里东褶皱带和华北克拉通2个性质截然不同的构造单元结合部位,构造活动十分强烈,发育以上古生界石炭系-二叠系煤系为主要滑脱层的逆冲推覆构造^[8-11],由滑脱层上部的逆冲推覆构造体系与下部的原地岩体垂向叠置而成,具有“东西分带、南北分段”的构造模式^[8,12]。根据构造走向、发育程度和结晶基底卷入情况等差异,将西缘冲断带自北向南划分为3区(北区、中区和南区)7段(桌子山段、铁克苏庙段、横山堡段、马家滩段、甜水堡段、沙井子段和彭阳段)(图1a),分别发育不同的构造样式。

本次研究的聚焦点为西缘冲断带中区马家滩段,其西临青铜峡-固原大断裂,东部紧邻天环坳陷,地理位置位于马家滩-甜水堡一带,发育完整的逆掩推覆构造体系^[13-14],被惠安堡-沙井子、青龙山等4条主断

裂分切为韦州、石沟驿等4个冲断席^[10,13,15](图1b)。马家滩段先后经历了加里东期、海西期、印支期-燕山期以及喜马拉雅期等多期构造运动^[10,16],主体构造为中生代中晚期形成的逆掩推覆构造。以上古生界石炭系煤系滑脱层为界,地层构造变形表现为明显的“深、浅双层”构造特征。

“浅层”构造(推覆体上盘)主要由中生界-上古生界组成,变形比较强烈,由一系列似等间距分布、断面西倾、南北方向上延伸距离长、向深层趋于水平并归于石炭系滑脱层的中-大型冲断层组成,发育由断裂作用形成的断层传播褶皱。如图2所示,马家滩段大型冲断层将推覆体上盘切割成叠瓦状排列的冲断席,由于后期构造挤压作用,造成冲断席多发育与主冲断层反向的调节断裂,构成“Y”字型组合,从而破坏了冲断席的完整性,使得滑脱层的上盘构造变形更为复杂,传

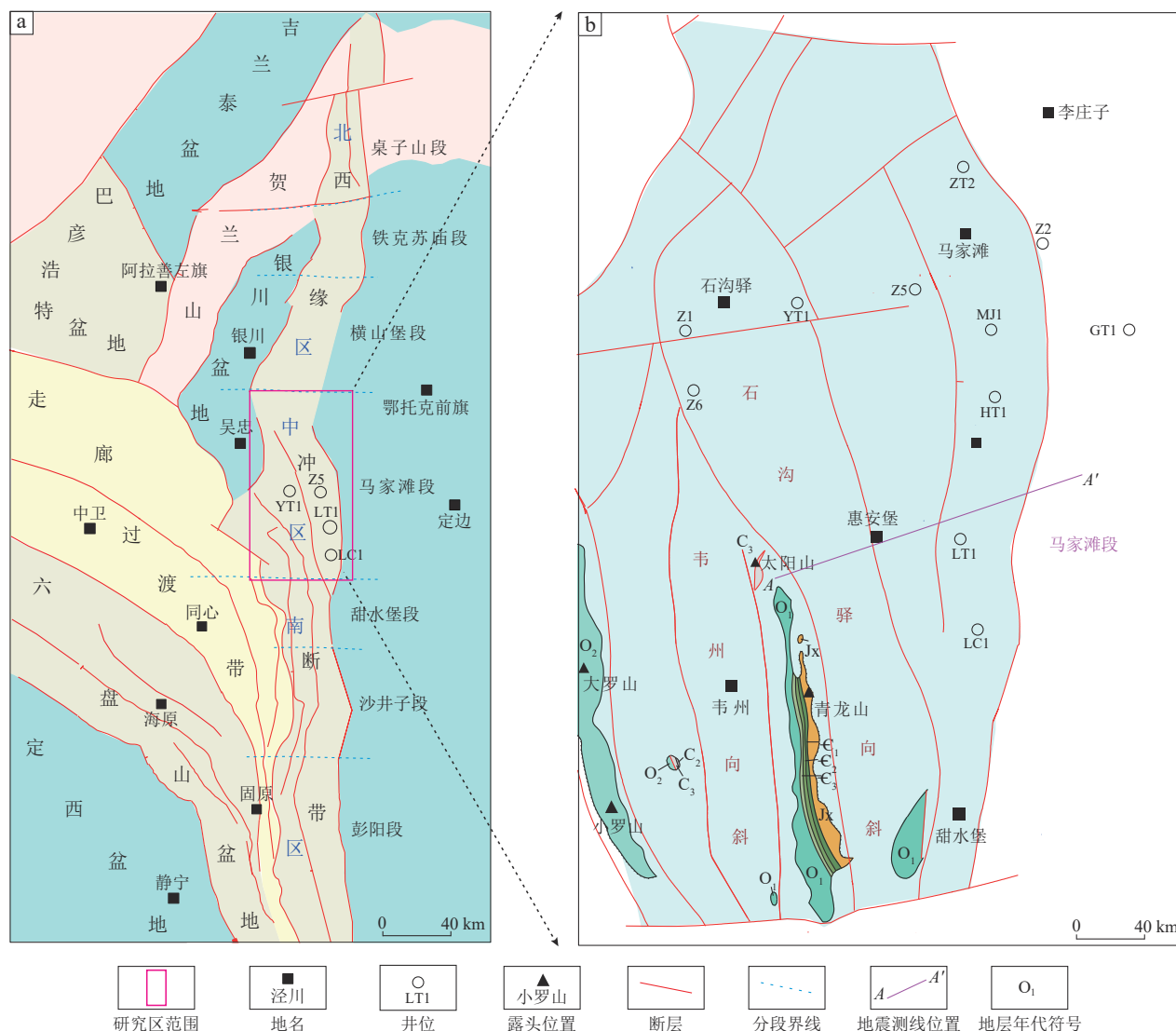


图1 鄂尔多斯盆地西缘马家滩段构造位置(a)及构造分区(b)

Fig. 1 Maps showing the location (a) and structural division (b) of the Majiatan section along the western margin of the Ordos Basin

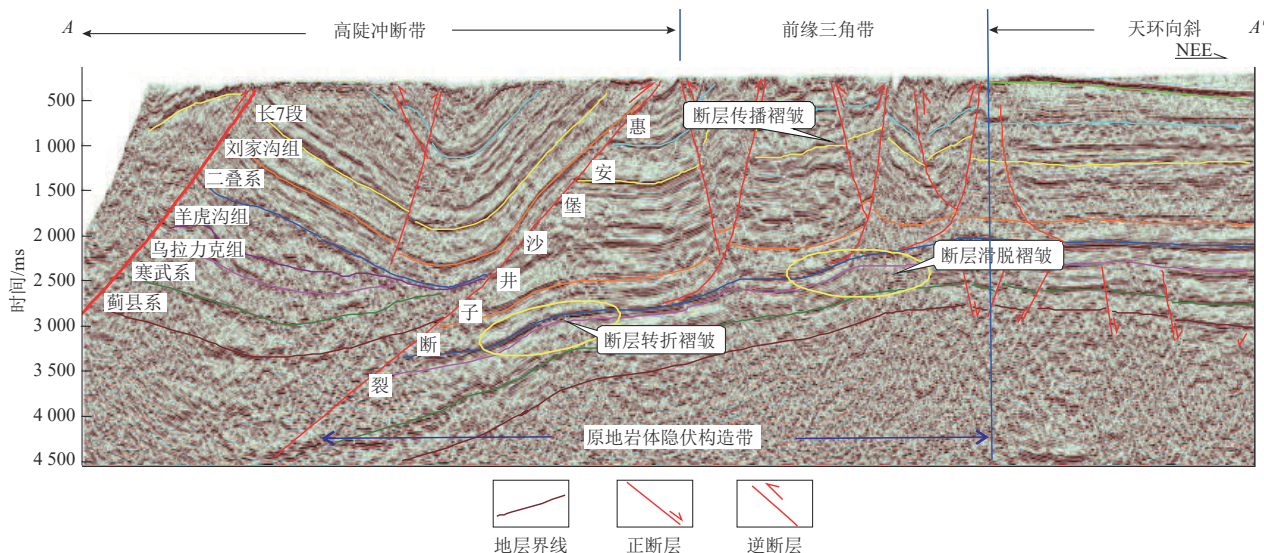


图2 鄂尔多斯盆地西缘马家滩段H186503+H146581测线叠前深度偏移剖面(测线位置见图1b)

Fig. 2 Prestack depth migration profile of seismic lines H186503 and H146581 in the Majiatan section along the western margin of the Ordos Basin (see Fig. 1 for the survey line locations)

播褶皱相对破碎,多表现为半背斜和断块等形态,规模小、完整性差、埋藏较浅、油气聚集条件差。区内中生界除了在G2井延长组3段发现油藏、Y48井延长组6段发现气藏外,推覆体上盘的勘探一直未获规模发现。

相对而言,“深层”构造(推覆体下盘原地岩体)主要由古生界组成。受燕山期(侏罗世—白垩世)自西向东强烈的挤压应力作用影响^[10,13],推覆体下盘原地岩体被动挤压,发生低幅度隆起褶皱变形,发育顺软弱层滑脱形成的宽缓滑脱褶皱和传播褶皱等隐伏构造(图2)。研究区隐伏构造由赋存天然气的古生界组成,是寻找油气的有利目标,但前期由于钻井资料少,二维地震资料品相较差,对推覆体下盘古生界展布和隐伏构造特征研究程度都较低。近年来,长庆油田针对盆地西部构造复杂区开展的基础地质研究与地震勘探攻关,尤其是三维地震的部署实施,可进一步精细刻画地层展布特征,提高隐伏构造圈闭的落实程度,为研究区多层系立体成藏勘探研究工作提供强有力的支撑。根据新的地震和钻井地质资料综合解释,发现研究区推覆体下盘古生界隐伏构造规模较大,具有较好的勘探前景。以克里摩里组为例,沿惠沙断裂自西向东发育3条呈台阶状、南北向成排展布的低幅度隐伏构造带(图3)。其走向与南北向主冲断裂方向一致,在地震解释剖面中可见其受后期冲断破坏作用影响弱,断裂不发育,变形较弱,保存条件较好(图2),能够聚集上覆乌拉力克组及自身海相烃源岩生成的油气,可形成“上生下储”和“自生自储”的油气藏,相较于上古生界石盒子组8段(盒8段)和山西

组1段(山1段)砂岩气藏而言,马家滩段下古生界隐伏构造可能更具潜力。

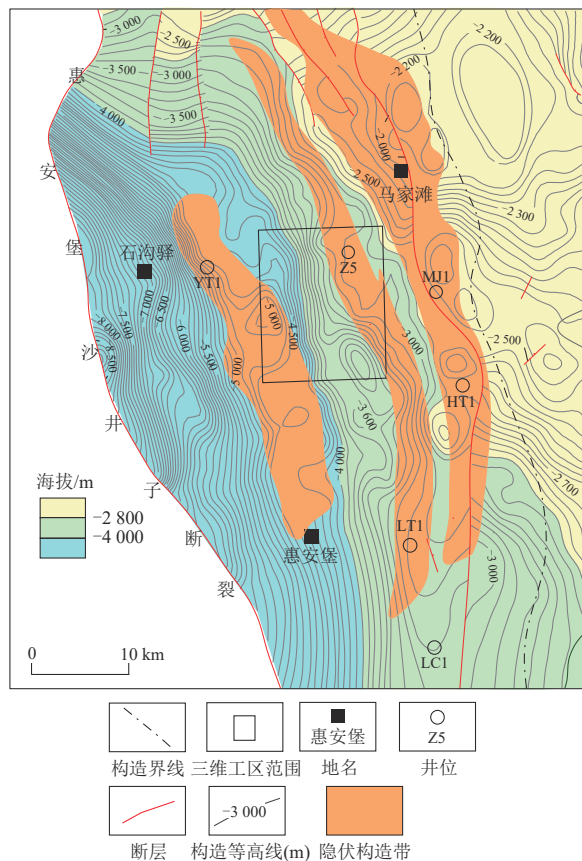


图3 鄂尔多斯盆地西缘中段克里摩里组顶面构造

Fig. 3 Structural map of the top of the Kelimoli Formation in the central section along the western margin of the Ordos Basin

2 克里摩里组成藏条件

2.1 沉积条件

奥陶纪,中央古隆起将鄂尔多斯地区分为东、西2个海域,以西为秦祁海域,以东为华北海域。受中央古隆起控制,在早奥陶世三道坎期,秦祁海向古隆起区发生海侵,鄂尔多斯盆地西部由东向西依次分布潮上云坪、滨岸砂坝及开阔海缓坡相带,发育混积陆棚沉积;至桌子山期,由于贺兰拗拉槽的进一步扩张,盆地西部沉降加大,海侵规模增大,沉积环境由三道坎期的潮坪-缓坡转换为广泛的开阔台地滩相沉积,由东向

西分布开阔台地鲕粒滩、台缘砂屑颗粒滩及开阔海缓坡相带^[17-20]。

克里摩里期,扬子板块向华北板块俯冲,华北板块南缘由被动大陆边缘转化为活动大陆边缘,南、北秦岭和兴蒙洋壳的俯冲挤压以及贺兰海槽的扩张,导致盆地西部加速下沉,发生了重要的构造转换。盆地西部古地形与鄂尔多斯台地具有明显的差异,形成台地与海槽之间的过渡带-斜坡带,具有承上启下的沉积特征,由东向西分布浅水颗粒滩、灰质洼地、礁滩体、广海陆棚及深水斜坡相沉积^[17,21-22](图4a)。西缘冲断带处于台缘斜坡相带,发育台缘礁滩相沉积。礁滩体具有较高的原始孔渗性能,易于发生回流渗透白云岩化作用,而克里摩里期末的加里东运动引发构造抬升,又为

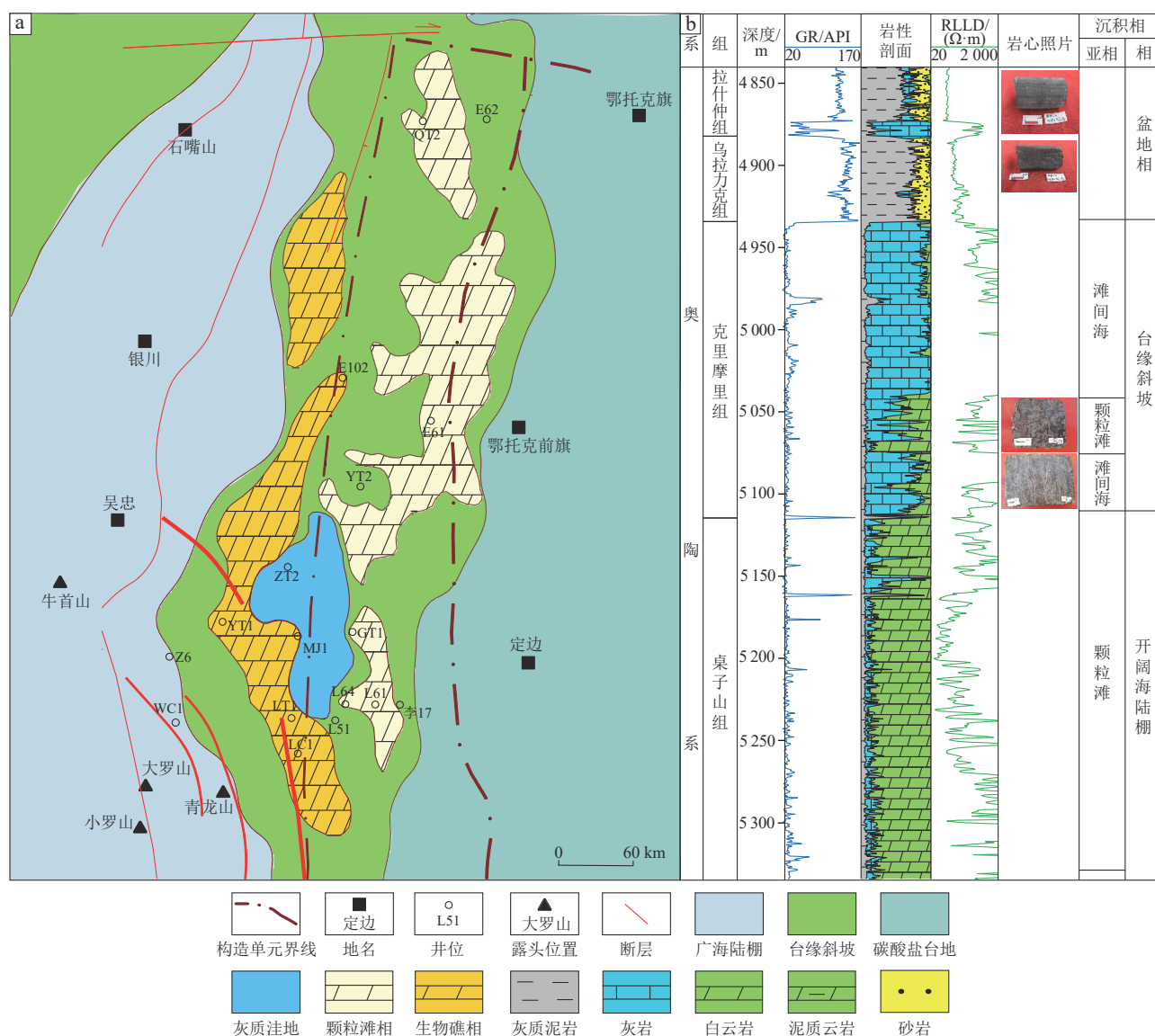


图4 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里期沉积相(a)与LT1井奥陶系综合柱状图(b)

Fig. 4 Map showing the sedimentary facies during the deposition of the Kelimoli Formation (a) and composite stratigraphic column of the Ordovician system in well LT1 (b) on the western margin of the Ordos Basin

白云岩储层溶孔和溶洞的形成提供了条件^[22]。

到中奥陶世乌拉力克-拉什仲期,受加里东构造运动影响^[20,23],鄂尔多斯整体处于隆升状态,而盆地西部地区开始差异沉降,由东向西发育深水斜坡、广海陆棚及深水盆地相沉积。

由以上奥陶纪各期构造演化及沉积特征来看,盆地西缘冲断带在桌子山期处于开阔台地沉积环境,海侵范围大,广泛发育颗粒滩相沉积。克里摩里期处于台缘斜坡相带,西侧面向广海的迎风带,发育台缘隆起礁滩相沉积,东侧发育台内颗粒滩体。至中、晚奥陶世,以深水斜坡-广海陆棚相沉积为主,发育有效的海相烃源岩,与下伏克里摩里组白云岩储层能形成较好的源-储配置(图4b),为天然气成藏提供了有利条件。

2.2 烃源岩条件

前人研究证实,鄂尔多斯盆地西部存在上古生界石炭系-二叠系海-陆过渡相煤系和下古生界奥陶系海相页岩/灰质泥岩2套烃源岩^[24-26]。上古生界煤系烃源岩主要为煤层和暗色泥岩,生烃强度大,分布范围广,气源供给充足,属于好-较好的气源岩类型^[27-28]。西部天环坳陷由于受加里东运动影响,下奥陶统克里摩里组-桌子山组碳酸盐岩地层遭受抬升和剥蚀,直接与上古生界烃源岩接触,接受煤系气源的供给,天然气碳同位素组成偏重,如S127井下古生界天然气样品甲烷碳同位素值 $[\delta^{13}C_1(PDB)=-30.55\text{‰}]$,与上古生界山1段天然气样品甲烷碳同位素值 $[\delta^{13}C_1(PDB)=-29.41\text{‰}]$ 接近,天然气显示煤成气特征,说明气源来自上古生界煤系烃源岩。西缘冲断带复杂构造区奥陶系发育较全,埋藏深,沉积厚度大。上古生界煤系地层与下古生界中奥陶统乌拉力克组和拉什仲组直接接触,与下奥陶统克里摩里组主力储层相隔较远。上古生界煤系烃源岩因受到阻隔导致向下提供气源的可能性变小,而克里摩里组白云岩储层与乌拉力克组海相烃源岩相邻,形成上生下储的成藏组合。由于研究区暂无克里摩里组试气井,邻井下古生界乌拉力克组和克里摩里组天然气碳同位素较上古生界煤系气偏轻,ZT1和QT2等井天然气甲烷碳同位素值介于 $-38.92\text{‰} \sim -36.40\text{‰}$,表现为较明显的油型气特征(图5)。

下古生界海相烃源岩主要发育于中奥陶统乌拉力克组,岩性主要为灰黑色页岩和含灰泥岩。其分布范围广、厚度大,含丰富的笔石化石,由北向南发育棋盘井、上海庙、马家滩和银洞子^[29-30]4个沉积中心

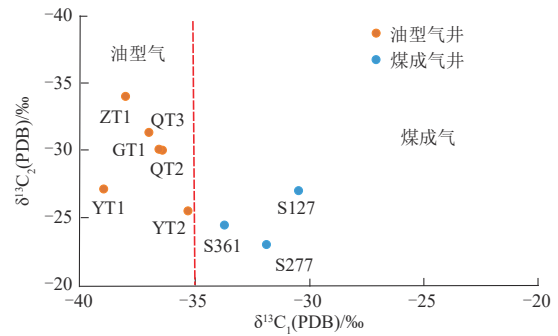


图5 鄂尔多斯盆地西缘古生界天然气碳同位素分布特征
Fig. 5 Carbon isotope distribution of natural gas in the Upper and Lower Paleozoic strata on the western margin of the Ordos Basin

(图6a)。乌拉力克组海相烃源岩有机质组分以腐泥组为主,含少量惰质组和镜质组^[30],干酪根类型以I型和Ⅱ₁型干酪根为主,镜质体反射率(R_o)一般介于 $1.50\% \sim 1.90\%$ ^[30],整体达到了有效生气阶段。研究区位于马家滩沉积中心,烃源岩厚度大于50 m(图6a-c)。区内Z5,HT2和LT1井在乌拉力克组均钻遇较厚层烃源岩。Z5井乌拉力克组泥岩总有机碳含量(TOC)最大值为0.61%,最小值为0.24%,平均值为0.50%;LT1井乌拉力克组底部灰黑色页岩TOC最大值为0.74%,最小值为0.11%,平均值为0.50%,最高热解峰温(T_{max})在 $520 \sim 570\text{℃}$,有利于有机质的裂解生烃(图6d)。由此说明乌拉力克组烃源岩有机质丰度较高,具有较好的生烃潜力,这为研究区克里摩里组气藏的形成提供了有利的物质基础。

近年来,通过GT1,ZT1和Z3等区域探井的部署实施,发现研究区奥陶系克里摩里组局部发育泥岩,且TOC较高,平均值为0.67%,生烃强度达 $(5 \sim 6) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,这可能为克里摩里组内幕成藏提供有利烃源条件,在今后的勘探研究工作中可特别关注。

2.3 高能滩储层特征及展布

2.3.1 储层特征

据LT1,LC1和XT1等井岩心观察、镜下薄片资料和储层物性数据统计结果,克里摩里组白云岩储层岩性一般为粉-细晶白云岩,较好的高能滩相储层则主要为中-粗晶白云岩,储集空间以晶间孔、晶间溶孔及裂缝为主(图7)。储层孔隙度介于 $3\% \sim 6\%$,渗透率在 $(1 \sim 8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于裂缝+晶间溶孔型储层。

2.3.2 展布特征

由于研究区勘探程度较低,钻井资料较少,仅靠现

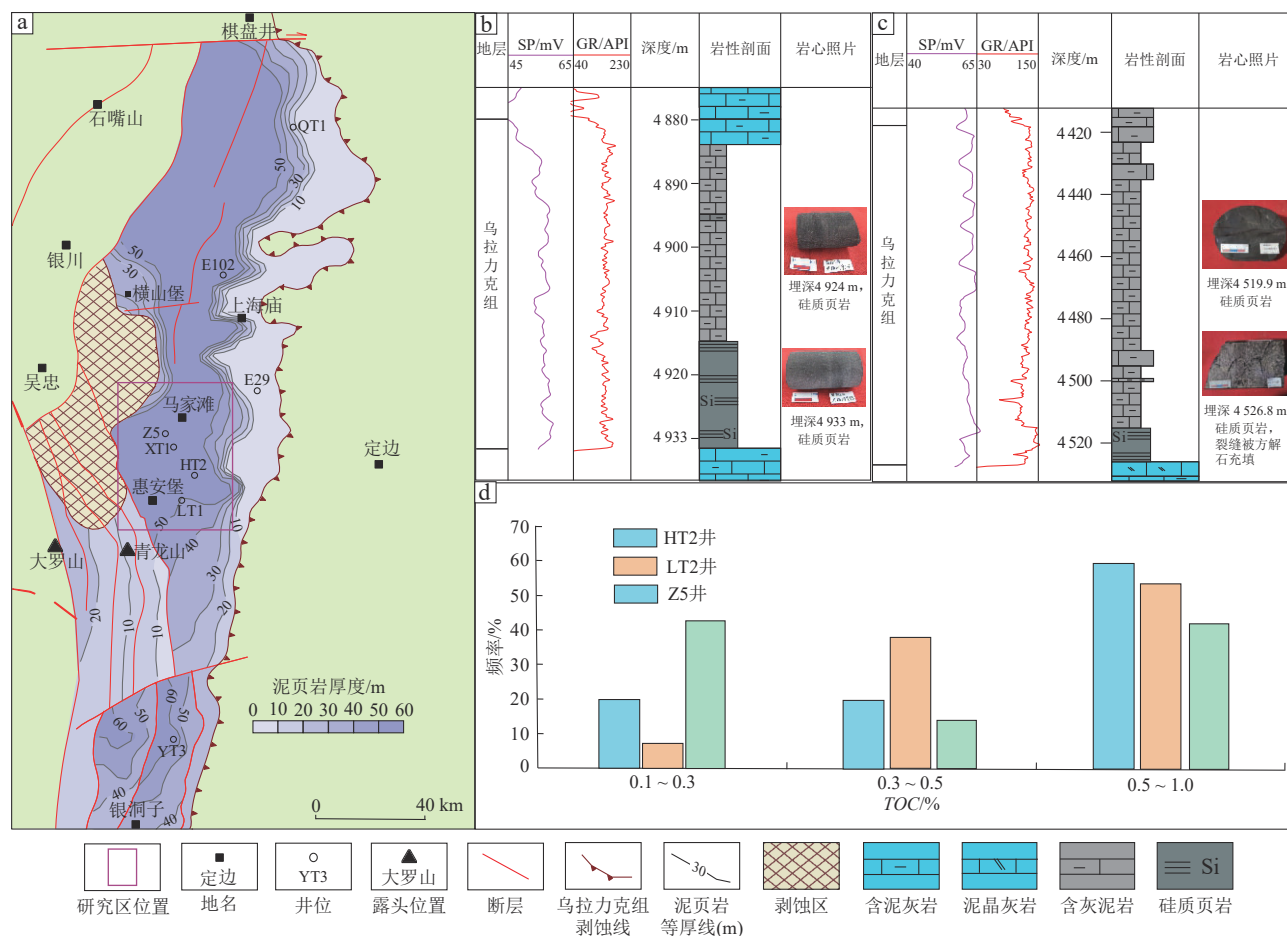


图6 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组烃源岩厚度和分布

Fig. 6 Isopach map of source rocks for the Wulalike Formation on the western margin of the Ordos Basin

a. 乌拉力克组烃源岩厚度; b. LT1井乌拉力克组岩性剖面; c. HT2井乌拉力克组岩性剖面; d. 乌拉力克组泥页岩TOC分布频率直方图

有钻井资料难以开展高能滩平面展布特征研究。本次借助高精度地震资料,以井-震解释的滩体地震响应特征作为参照,利用地震反射层二叠系底层拉平技术及中-上奥陶统厚度变化规律^[31],精细刻画并预测了鄂尔多斯盆地西部克里摩里组滩相白云岩的平面展布。

从井-震解释来看,灰质洼地地层薄,两侧的滩体带地层厚。灰岩发育区地震相特征以弱反射为主,表现为层状反射,中-强振幅,连续性较好;滩体发育区地震相则表现为丘状或透镜状杂乱反射特征,振幅较弱,连续性较差(图8)。

地震资料预测及勘探成果综合显示,鄂尔多斯盆地西部克里摩里组高能滩相储层呈南北向、带状展布格局,厚度10~40 m,表现为明显的东、西分带性(图9a)。其中,东侧的白云岩为开阔台地颗粒滩相,主要分布在天环坳陷,勘探程度相对较高,具有厚度大、分布范围广的特点;厚度20~40 m,岩性以粉-细晶白云岩为主;因靠近古隆起区,处于相对高能的水动

力区,储层孔隙类型以晶间孔和溶孔为主(图9b),裂缝发育程度较低,储层孔隙度介于2.5%~5.5%,渗透率 $(0.5 \sim 2.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。西侧台地边缘隆起颗粒滩白云岩勘探程度低,是本次隐伏构造气藏研究的主要区域。岩性以细-中晶白云岩为主,储集空间主要为晶间孔(图9b);其分布范围及厚度较东部而言明显减小,厚度一般10~30 m,但局部存在较厚丘状带,最厚可达40~60 m(图9a),初步预测高能相带白云岩储层分布面积为2 700 m²,为天然气聚集提供了良好的储集体系,奠定了规模成储的区带基础。

2.4 圈闭条件和圈闭有效性

2.4.1 圈闭条件

上述研究揭示,早奥陶世克里摩里期盆地西部自东向西依次发育台内浅滩、灰质洼地、台缘隆起、广海陆棚和深水斜坡相等沉积相带。其中,台缘隆起带因礁、滩体发育,具较高的原始孔、渗性能,短期海平面下

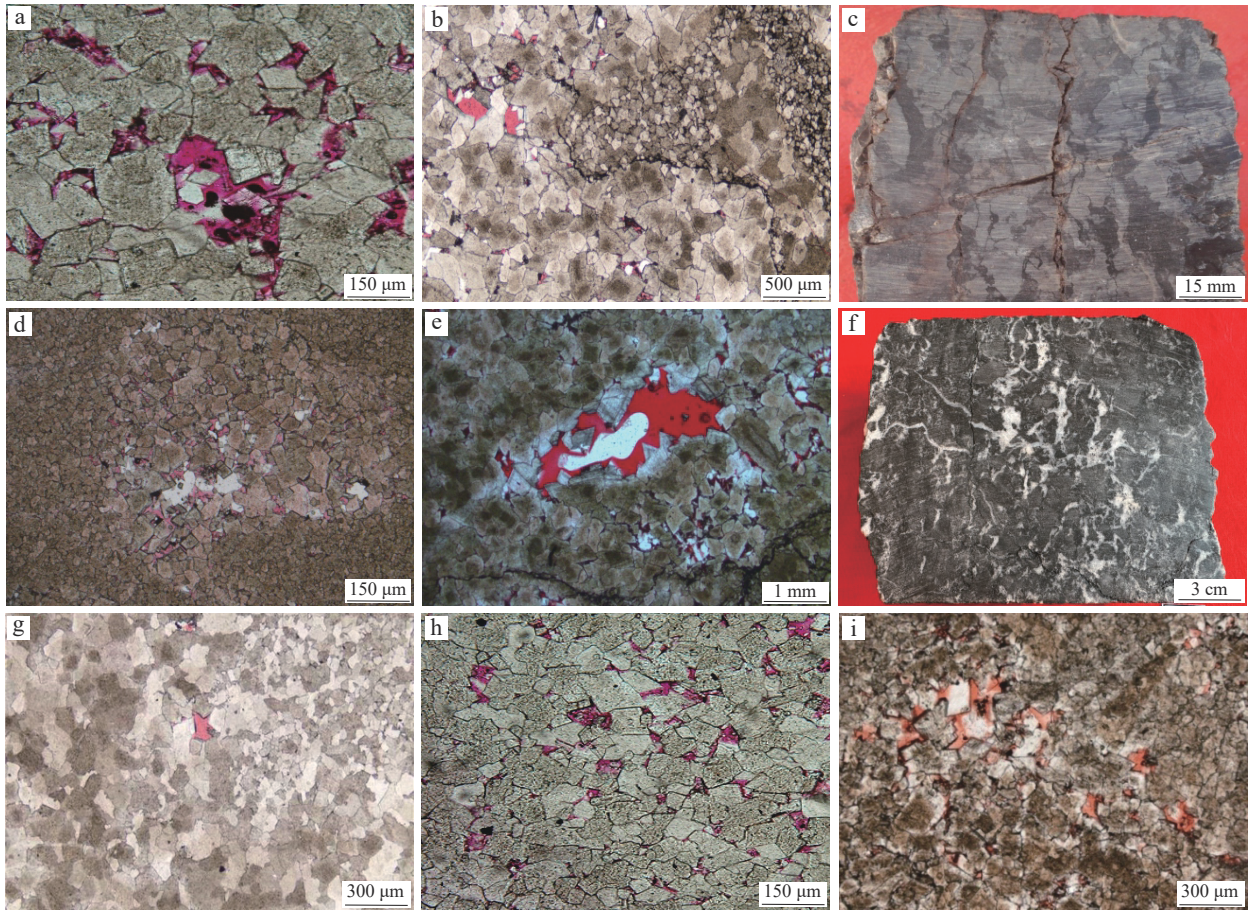


图7 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层及孔隙微观特征照片

Fig. 7 Microscopic characteristics of dolomite reservoirs and their pores in the Kelimoli Formation on the western margin of the Ordos Basin
a. LC1井,埋深5 141.00 m,克里摩里组,粉-细晶白云岩,铸体薄片;b. XT1井,埋深4 831.74 m,克里摩里组,中-粗晶晶粒结构,白云石呈半自形-它形晶不均匀分布,铸体薄片;c. LT1井,埋深5 061.19 m,克里摩里组,粉晶白云岩,岩心;d. LT1井,埋深5 069.32 m,克里摩里组,细晶白云岩,发育晶间孔,铸体薄片;e. XT1井,埋深4 832.35 m,克里摩里组,粗晶白云岩,晶间孔,铸体薄片;f. XT1井,埋深4 833.30 m,克里摩里组,粗晶白云岩,岩心;g. XT1井,克里摩里组,埋深4 834.40 m,中-粗晶晶粒结构,见少量晶间孔,铸体薄片;h. LC1井,埋深5 091.00 m(岩屑),克里摩里组,粉-细晶白云岩,铸体薄片;i. LT1井,埋深5 071.96 m,克里摩里组,晶间孔、溶孔,铸体薄片

降时,导致部分层段差异白云石化而发育高能滩白云岩储集体^[21,23],多呈夹层状或透镜状产出,其东、西两侧大面积发育灰质洼地及深水斜坡相致密灰岩,横向上岩性相变明显,易于形成规模的岩性相变遮挡。上覆的乌拉力克组-拉什仲组灰质泥岩和页岩对克里摩里组滩相气藏形成区域盖层,对岩性圈闭的形成较为有利。乌拉力克组泥质烃源岩披覆在高能滩带白云岩圈闭两侧形成垂向和侧向双向供烃(图10),有利于规模岩性圈闭的成藏,其与隐伏构造可构成有效构造-岩性复合圈闭条件。

2.4.2 圈闭有效性

鄂尔多斯盆地西缘马家滩段逆冲推覆构造形成于三叠纪晚期,晚侏罗世—早白垩世期发生的燕山运动(Ⅲ幕)对研究区影响最为深远,奠定了现今构造格局,

是逆冲推覆作用的重要发展阶段,是主构造期^[32-33],故研究区隐伏构造圈闭的形成时间亦不迟于该时期。前人对研究区构造和热演化史分析认为,西缘冲断带发育的下古生界奥陶系海相烃源岩和上古生界煤系烃源岩具有相似的热演化过程^[34-35]。中-晚三叠世开始进入生烃门限,晚侏罗世达到第一次生烃高峰阶段;早白垩世,由于受燕山运动影响,研究区发生了大规模沉降,使得烃源岩埋深加大,在早白垩世达到最大埋深,进入了研究区最重要的生烃阶段,即研究区烃源岩主生、排烃期为晚侏罗世—早白垩世。由此可见,西缘马家滩段隐伏构造形成期与主生、排烃期大致同步,圈闭形成期与烃源岩主生、排烃期的时空吻合程度高,源-储配置良好,后期构造调整对断层下盘影响相对较小,利于油气聚集保存。地震和地质分析显示,研究区克里摩里组滩相圈闭内断裂未切穿二叠系底界(图2),

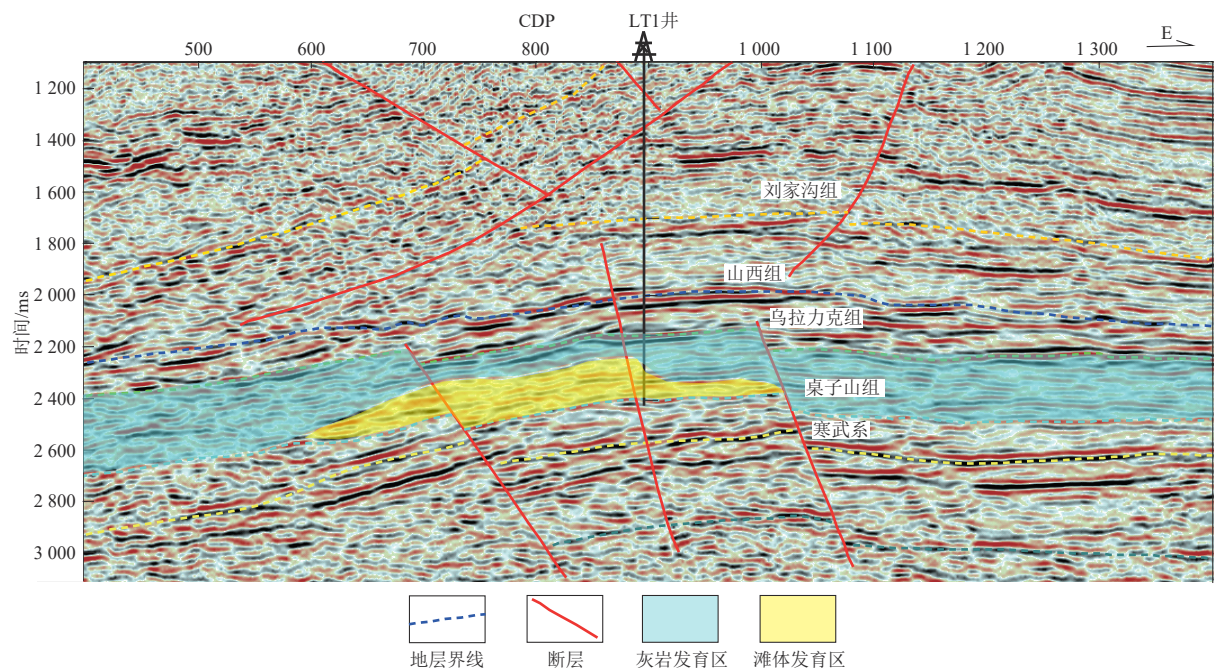


图8 鄂尔多斯盆地西缘过LT1井克里摩里组灰岩和滩体地震反射特征

Fig. 8 Seismic reflection profile of limestones and shoals in the Kelimoli Formation in well LT1 on the western margin of the Ordos Basin

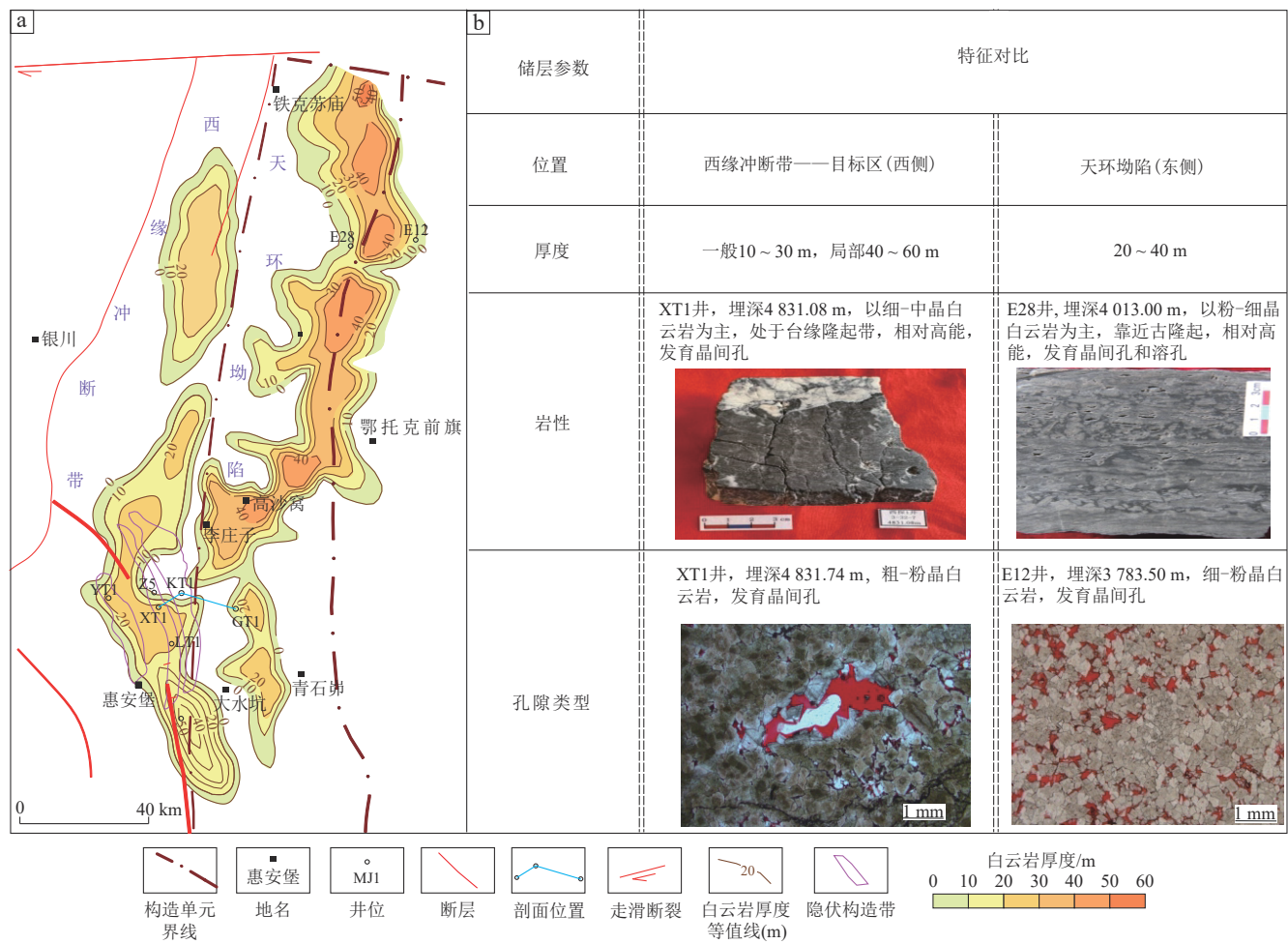


图9 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层分布(a)和特征对比(b)

Fig. 9 Distribution (a) and feature comparison (b) of dolomite reservoirs in the Kelimoli Formation on the western margin of the Ordos Basin

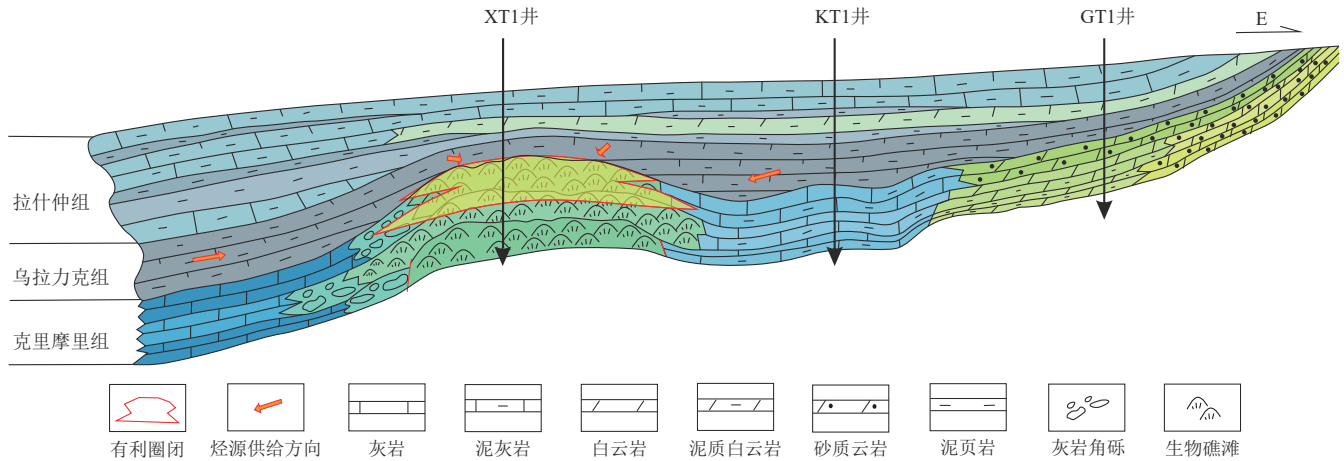


图10 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组缓坡高能带成藏模式(剖面位置见图9a)

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model of the high-energy ramp zone in the Kelimoli Formation on the western margin of the Ordos Basin

确保了太原组—石盒子组泥岩区域盖层及圈闭自身的完整性,对克里摩里组气藏圈闭起到了有效的保存作用。

3 高能滩勘探方向

通过上述隐伏构造特征和克里摩里组成藏条件综合分析,认为西缘马家滩段下古生界克里摩里组隐伏构造带内生—储—圈匹配有利,具有较好的成藏条件,白云岩厚度分布区与隐伏构造带叠合有利面积为300 km²(图9a),是西缘马家滩段克里摩里组高能滩相气藏下一步勘探的有利区域。

基于区内高精度三维地震资料的处理解释成果,本次重点对惠安堡隐伏构造带下古生界克里摩里组成藏潜力进行解剖分析。惠安堡隐伏构造带(图3)南北长约59 km,与下古生界克里摩里组高能滩有利叠合勘探面积约170 km²。该隐伏构造带位于乌拉力克组海相烃源岩生烃中心,生烃强度大($5 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8$ m³/km²),气源供给充足。区内滩相白云岩储层发育,厚度9~32 m,物性较好(LT1井白云岩储层平均孔隙度4.37%,平均渗透率 1.38×10^{-3} μm²),发育晶间孔,储集条件有利。

通过三维区地震叠前时间和深度偏移剖面对比分析发现,惠安堡隐伏构造发育一个有利的构造—岩性圈闭(图11a)。依据地震剖面反射特征,预测该圈闭内发育南北向滩相白云岩,与上覆及侧翼乌拉力克组烃源岩具有侧向对接供烃条件及上倾方向遮挡条件,成藏条件有利。圈闭内仅发育少量断裂,而且断裂只切穿至二叠系底界(图11b,c),使得上覆的太原组—石盒子组泥岩区域盖层对克里摩里组气藏圈闭起到保

存作用,利于气藏圈闭的保存,这是确保勘探取得成功的关键条件之一。针对该目标区部署实施的重点探井XT1井的实钻结果显示,该井下古生界奥陶系不但在乌拉力克组钻遇了厚层硅质泥页岩,同样在克里摩里组钻遇较厚层中—粗晶白云岩,并见生物扰动构造,晶间孔较发育,且目的层克里摩里组气测活跃,全烃气测含量峰值11.2%。相较邻井来说,气测明显偏高,钻探结果充分证实了目标区发育优质烃源岩和高能滩相白云岩储层,隐伏构造作为圈闭有效性较好,具有较大的勘探潜力。限于三维地震资料和探井较少,对隐伏构造带的勘探和研究尚处于探索阶段。随着鄂尔多斯盆地西缘后续勘探力度的不断加大,相信一定会在隐伏构造带勘探新领域取得更大的突破和发现。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地中区马家滩段发育完整的逆冲推覆构造体系,其滑脱面之下的原地岩体变形较弱,发育成排分布的低幅度的隐伏构造。

2) 受奥陶系克里摩里期隆洼相间的古构造格局影响,马家滩段发育规模的高能滩相储集体、富集的厚层海相烃源岩,横向上灰岩的侧向遮挡等有利条件,发育的低幅度隐伏构造带与高能滩的叠加利于形成天然气的富集区。

3) 马家滩段烟墩山、惠安堡和马家滩3个隐伏构造带圈闭具有良好构造背景,是下一步克里摩里组天然气勘探的有利区域。圈闭内发育规模滩相白云岩,厚度在10~30 m,初步预测滩相白云岩与隐伏构造叠合有利面积为300 km²。

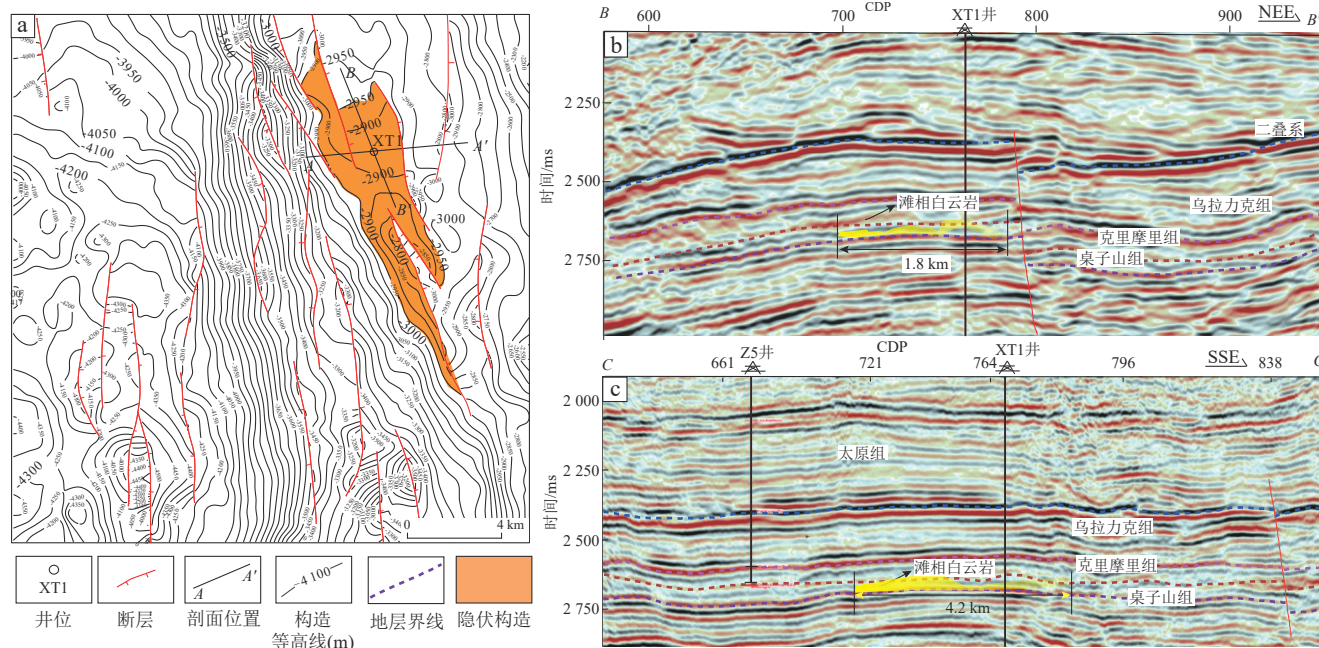


图11 鄂尔多斯盆地西缘中段惠安堡三维工区克里摩里组顶面构造和时间偏移剖面(三维工区范围见图3)

Fig. 11 Structural map of the top and prestack time migration profiles for the Kelimoli Formation in the 3D seismic acreage of Huianbu structural zone in the central section of the western margin of the Ordos Basin (see Fig. 3 for the 3D seismic acreage)

a. 顶面构造; b. B—B'时间偏移剖面; c. C—C'时间偏移剖面

参 考 文 献

- [1] 郭忠铭, 张军. 从逆冲推覆构造特征讨论鄂尔多斯西缘的油气前景[J]. 石油学报, 1989, 10(2): 31-38.
GUO Zhongming, ZHANG Jun. A discussion on the oil and gas potential of the structural belt in the west margin of the Ordos massif viewed from the thrust nappe tectonics [J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(2): 31-38.
- [2] 陈竹新, 王丽宁, 杨光, 等. 川西南冲断带深层地质构造与潜在油气勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 653-667.
CHEN Zhuxin, WANG Lining, YANG Guang, et al. Geological structures and potential petroleum exploration areas in the southwestern Sichuan fold-thrust belt, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 653-667.
- [3] 杨庚, 陈竹新, 王晓波. 塔西南逆冲带前缘英吉莎背斜的多期变形[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(6): 656-665.
YANG Geng, CHEN Zhuxin, WANG Xiaobo. Multistage deformation of Yingjisha anticline in the front of southwestern Tarim thrust belt, northwestern China [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 656-665.
- [4] 朱明, 汪新, 肖立新. 准噶尔盆地南缘构造特征与演化[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 9-17.
ZHU Ming, WANG Xin, XIAO Lixin. Structural characteristics and evolution in the southern margin of Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 9-17.
- [5] 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.
- [6] 夏辉, 王龙, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1397-1412, 1488.
XIA Hui, WANG Long, ZHANG Daofeng, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1397-1412, 1488.
- [7] 吴伟涛, 冯炎松, 费世祥, 等. 鄂尔多斯盆地神木气田二叠系石千峰组5段致密气富集因素及有利区预测[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 739-751.
WU Weitao, FENG Yansong, FEI Shixiang, et al. Enrichment factors and play fairway mapping for tight gas in the 5th member of the Permian Shiqianfeng Formation, Shenmu Gas Field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 739-751.
- [8] 汤锡元, 郭忠铭, 王定一. 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带特征及其演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(1): 1-10.
TANG Xiyuan, GUO Zhongming, WANG Dingyi. The characteristics and evolution of the thrust nappe tectonic belt and its petroleum

- potential in the west Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, 9(1): 1-10.
- [9] 张进, 马宗晋, 任文军. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南北差异的形成机制[J]. *大地构造与成矿学*, 2000, 24(2): 124-133.
ZHANG Jin, MA Zongjin, REN Wenjun. The mechanism of the difference between the northern part and the southern part of the fold and thrust belt on the western edge of the Ordos Basin, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2000, 24(2): 124-133.
- [10] 何登发, 邵东波, 崔永平, 等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩古隆起的厘定、成因及地质意义[J]. *石油学报*, 2018, 39(6): 609-619.
HE Dengfa, SHAO Dongbo, CUI Yongping, et al. Delineation, formation, and geological significance of Majiatan paleo-uplift at the western margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(6): 609-619.
- [11] 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*, 2006, 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*, 2006, 27(2): 173-179.
- [12] 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.
- [13] 李继宏, 李荣西, 韩天佑, 等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区地层水与油气成藏关系研究[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(3): 253-257.
LI Jihong, LI Rongxi, HAN Tianyou, et al. Study of stratum water and oil and gas accumulation relations of Majiatan area in the western Ordos basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2009, 31(3): 253-257.
- [14] 罗群. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区冲断带断裂特征及其控藏模式[J]. *地球学报*, 2008, 29(5): 619-627.
LUO Qun. Characteristics of faults in majiatan area of west Ordos Basin and their petroleum reservoir controlling model [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(5): 619-627.
- [15] 何登发, 孙方源, 翟咏荷, 等. 鄂尔多斯盆地西缘石沟驿向斜的形成演化与致密砂岩气成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 370-390.
HE Dengfa, SUN Fangyuan, ZHAI Yonghe, et al. Syncline development and tight sandstone gas accumulation model in Shigouyi area at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 370-390.
- [16] 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 Geoscientica Sinica*, 2019, 40(1): 219-235.
- [17] 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 (Chinese Edition)*, 2013, 15(6): 751-764.
- [18] 张道锋, 刘新社, 高星, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系海相碳酸盐岩地质特征与成藏模式研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 92-101.
ZHANG Daofeng, LIU Xinshe, GAO Xing, et al. Geological characteristics and accumulation model of Ordovician marine carbonate in western Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 92-101.
- [19] 王大兴, 曾令帮, 张盟勃, 等. 鄂尔多斯盆地台缘带下古生界碳酸盐岩储层预测与综合评价[J]. *中国石油勘探*, 2011, 16(增刊1): 89-94, 110, 173, 174.
WANG Daxing, ZENG Lingbang, ZHANG Mengbo, et al. Carbonate reservoir prediction and estimation about Lower Paleozoic platform margin belt in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2011, 16(S1): 89-94, 110, 173, 174.
- [20] 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.
- [21] 潘博, 张成弓, 陈安清, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘克里摩里组沉积微相特征[J]. *天然气勘探与开发*, 2016, 39(3): 6-10.
PAN Bo, ZHANG Chenggong, CHEN Anqing, et al. Sedimentary microfacies characteristics of Kelimoli Formation, northwestern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2016, 39(3): 6-10.
- [22] 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.
- [23] 何发岐, 张威, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 276-291.

- HE Faqi, ZHANG Wei, DING Xiaoqi, et al. Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 276-291.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张月巧, 郭彦如, 侯伟, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中上奥陶统烃源岩特征及勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 894-904.
- ZHANG Yueqiao, GUO Yanru, HOU Wei, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of the Middle-Upper Ordovician source rocks on the western and southern margin of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 894-904.
- [27] 胡安平, 李剑, 张文正, 等. 鄂尔多斯盆地上、下古生界和中生界天然气地球化学特征及成因类型对比[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(增刊2): 157-166.
- HU Anping, LI Jian, ZHANG Wenzheng, et al. Chemical characteristics and origin of gases from the Upper, Lower Paleozoic and the Mesozoic reservoirs in the Ordos Basin, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2007, 37(S2): 157-166.
- [28] 杨华, 张文正, 咎川莉, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系盐下天然气地球化学特征及其对靖边气田气源再认识[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1): 8-14.
- YANG Hua, ZHANG Wenzheng, ZAN Chuanli, et al. Geochemical characteristics of Ordovician subsalt gas reservoir and their significance for reunderstanding the gas source of Jingbian Gasfield, East Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 8-14.
- [29] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌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.
- [30] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉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.
- [31] 黄诚, 张盟勃, 刘峰, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组礁滩体储层预测与研究[C]//2023油气田勘探与开发国际会议(2023IFEDC)论文集, 武汉, 2023. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023: 1-8.
- HUANG Cheng, ZHANG Mengbo, LIU Feng, et al. Prediction and study of reef and beach reservoirs in the western margin of the Ordos Basin, Ordovician system [C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (2023IFEDC), Wuhan, 2023. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2023: 1-8.
- [32] 任战利, 祁凯, 刘润川, 等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 1213-1234.
- REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [33] 彭恒, 刘显阳, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景[J]. *地质学报*, 2022, 96(2): 387-402.
- PENG Heng, LIU Xianyang, LIU Chiyang, et al. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos Basin margin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 387-402.
- [34] 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.
- [35] 黄志刚, 任战利, 陈玉林, 等. 鄂尔多斯盆地天环坳陷北段奥陶系烃源岩特征及成熟演化史[J]. *地质学报*, 2022, 96(11): 3967-3976.
- HUANG Zhigang, REN Zhanli, CHEN Yulin, et al. The geochemical characteristics and thermal evolution of Ordovician source rocks in the north of Tianhuan Depression, Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(11): 3967-3976.

(编辑 张玉银)