

鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪构造—岩相古地理及其控源控储效应

吴东旭^{1,2,3}, 范立勇⁴, 李维岭¹, 钟建伟⁵, 张雷⁴, 师平平⁴, 朱文博¹, 鲁慧丽¹, 吴兴宁¹

1 中国石油杭州地质研究院; 2 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室; 3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室;

4 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院; 5 中国石油长庆油田页岩油开发分公司

摘要 鄂尔多斯盆地的海相油气勘探对象从早期的奥陶系马家沟组风化壳储层逐渐转变为不整合面以下的内幕碳酸盐岩储层。然而,盆地深层的寒武系和奥陶系研究程度相对较低,源储盖整体特征及配置关系不清。基于最新的钻井和地震资料,开展野外剖面踏勘、化验分析、岩心和薄片观察等基础地质工作,编制寒武纪—奥陶纪构造—岩相古地理图、烃源岩和有利沉积相带分布图,明确了寒武系—奥陶系的源储盖发育特征和配置关系:鄂尔多斯盆地寒武纪具有台内发育继承性隆起、台缘发育继承性裂陷的构造格局。受盆地西南部、东北部裂陷控制,中下寒武统烃源岩主要发育在海槽和海湾内;受乌审旗古隆起和庆阳古隆起控制,颗粒滩和风化壳储层主要发育在古隆起周缘和台缘带。奥陶纪具有台内多隆多坳的沉积格局,沉积古地貌和海平面变化共同控制了沉积相的纵横向差异分布。2个台内洼地控制了海相烃源岩的展布,3个台内隆起带控制了颗粒滩和膏云坪等有利微相的展布。寒武纪台缘裂陷型和奥陶纪台内坳陷型构造—沉积模式控制了烃源岩和储层的发育,并形成了3套优良的源储盖组合。寒武系—奥陶系具有较大的天然气成藏潜力,是鄂尔多斯盆地未来风险勘探的重要领域。

关键词 岩相古地理; 烃源岩; 颗粒滩; 储层; 奥陶纪; 寒武纪; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

引用: 吴东旭, 范立勇, 李维岭, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪构造—岩相古地理及其控源控储效应[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 348-360

WU Dongxu, FAN Liyong, LI Weiling, et al. Evolution and controlling effects on source rock and reservoir of tectonics-lithofacies paleogeography of Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(4): 348-360

0 前言

鄂尔多斯盆地油气储量、产量呈现出持续快速增长的势头,为了巩固增长势头并在将来保持稳产,对新的油气勘探后备接替领域的需求更为迫切。目前,盆地碳酸盐岩勘探领域从以往的奥陶系顶部不整合面岩溶储层拓展至不整合面以下的内幕^[1],但深层海相领域的地质认识程度较低,勘探难度大,亟需加大研究投入^[2]。前人针对鄂尔多斯盆地早古生代的构造—岩相古地理作了大量研究。寒武纪的沉积格局与中新元古代具有继承性,呈现“三槽二陆一洼”的特征^[3],总体表现为由清水与浑水交替出现的碳酸盐缓坡向清水碳酸盐镶边台地演变的过程^[4]。王龙等^[5]认为华北地台寒武纪沉积的潮坪、鲕粒滩和竹叶状灰岩,以及频繁出现的台

地淹没事件,为典型的陆表海和淹没台地的实例。邵东波等^[6]认为奥陶纪总体呈现为“三隆两坳一古陆”的古构造分布格局。在岩相古地理和沉积体系研究的基础上,前人建立了鄂尔多斯盆地中寒武统张夏组镶边台地沉积模式和下奥陶统马家沟组障壁台地沉积模式^[7-8]。李文厚等^[9]将鄂尔多斯地区下古生界划分为海岸、碳酸盐台地、台地边缘和深水斜坡海槽等4类沉积体系,并绘制了基于华北大区的鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪沉积相图。对于鄂尔多斯盆地内部的古隆起发育演化特征及其控储控藏作用:何发岐等^[10]研究了乌审旗古隆起的形成与演化,认为其对下古生界成储和成藏具有明显的控制作用;魏柳斌等^[11]认为乌审旗—靖边古隆起对寒武系和奥陶系有利微相和储层的发育至关重要,是天然气勘探的有利区带。近期,对于华北

收稿日期:2024-02-19;改回日期:2024-04-24;网络出版日期:2024-09-25

本文受中国石油天然气集团有限公司科技项目“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(编号:2023ZZ16YJ01)和中国石油长庆油田公司重大专项“鄂尔多斯盆地中元古界—奥陶系构造沉积演化、成源机制与勘探新领域”(编号:ZDZX2021)联合资助

第一作者: 吴东旭, 硕士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩油气地质综合研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: wudx_hz@petrochina.com.cn

地区的元古宇—寒武系烃源岩发育特征也有相关研究。王欣等^[12]、欧阳征健等^[13]认为华北克拉通西南缘—南缘广泛分布的新元古代末期—寒武纪早期的海相碎屑岩具有良好的有机碳富集条件。总体看来,鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系发育规模烃源岩和储层,但烃源岩和储层的分布特征、差异性及其主控因素目前尚不清晰。本文在调研前人成果认识的基础上,应用近几年最新的钻井和地震资料,通过相关的野外调查、岩心观察、薄片观察和分析化验,对鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪构造—岩相古地理演化进行了重新厘定,重点针对烃源岩和储层发育层段进行刻画,明确其分布特征及主控因素,明确源储盖组合关系,为下一步风险勘探领域的优选提供支撑和参考。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个大型多旋回克拉通盆地,面积约为 $37\times 10^4\text{ km}^2$,被划分为6个一级构造单元,即伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带,其中伊陕斜坡是本文研究的重点地区(图1)。盆地发育在太古宙—古元古代结晶基底之上,经历了中元古代坳拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代近海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷等五大构造—沉积演化阶段^[14]。早古生代,鄂尔多斯地块进入了克拉通盆地稳定发育时期,经历了多期的海侵、海退演化过程,沉积了一套全区稳定发育、可追踪对比的寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩夹碎屑岩地层,其中,海相碳酸盐岩主要发育在中寒武统张夏组、上寒武统三山子组、下奥陶统马家沟组。寒武纪岩相古地理以开阔海台地—局限台地为特征,发育一系列海相丘滩和潮坪沉积。奥陶纪表现为隆—坳相间的岩相古地理格局,特别是马家沟组沉积期,盆地中东部的坳陷区发育3套碳酸盐岩—蒸发岩旋回^[15]。

寒武系在盆地本部及西缘、南缘自下而上划分为:下统辛集组(三道幢组)、朱砂洞组、馒头组,中统毛庄组、徐庄组、张夏组和上统三山子组(图2)。辛集组主要为一套含磷钙质碎屑岩沉积,岩性为褐灰色、灰黄色砂岩、含磷长石石英砂岩,局部夹钙质白云岩、生物碎屑灰岩及页岩。朱砂洞组在西缘主要为一套灰黑色、深灰色中厚层白云岩、白云质灰岩,偶夹薄—中厚层灰岩;在南缘以发育豹皮状、角砾状白云岩和含藻白云岩为主要特征。张夏组主要

为深灰色、褐灰色厚层块状(局部中层)鲕粒灰岩、竹叶状灰岩和白云岩,夹钙质页岩。三山子组下段为黄灰色、灰黄色夹紫灰色中薄层粉细晶白云岩、竹叶状砾屑粉细晶白云岩及土黄绿色薄层泥质粉晶白云岩,上段为浅灰色中厚层含燧石结核细晶白云岩。

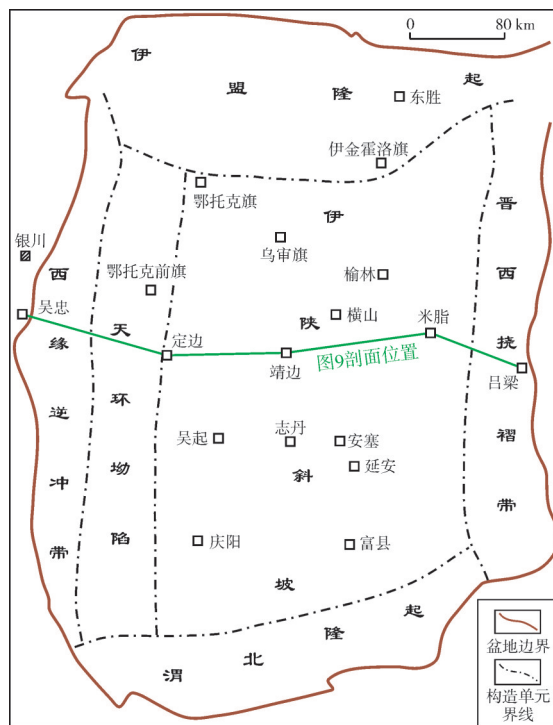


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分
Fig. 1 Division of tectonic units in the Ordos Basin

奥陶系由下到上发育冶里组、亮甲山组、马家沟组(图2),在盆地南缘可见到少量背锅山组。冶里组—亮甲山组为一套含燧石条带及团块的中厚层白云岩,主要分布于南缘岐山、礼泉、韩城等地,在西缘及盆地本部缺失。受怀远运动影响,寒武系顶部和奥陶系底部的冶里组、亮甲山组遭受不同程度的剥蚀。马家沟组与下伏亮甲山组、冶里组及寒武系不同层位接触,岩性多为白云岩、膏盐岩,局部夹石灰岩。马家沟组自下而上依次划分为马一段到马五段,马五段细分为10个亚段。在盆地中东部,马家沟组顶部经历了长达130 Ma的剥蚀,与上覆石炭系呈不整合接触。区域上马家沟组为夹持于底、顶两个不整合面之间的一套旋回式地层。在盆地西部,奥陶系自下而上划分为三道坎组、桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组、蛇山组及公乌素组。

鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系发育多套烃源岩和储层,可以形成有利的源储配置关系(图2)。

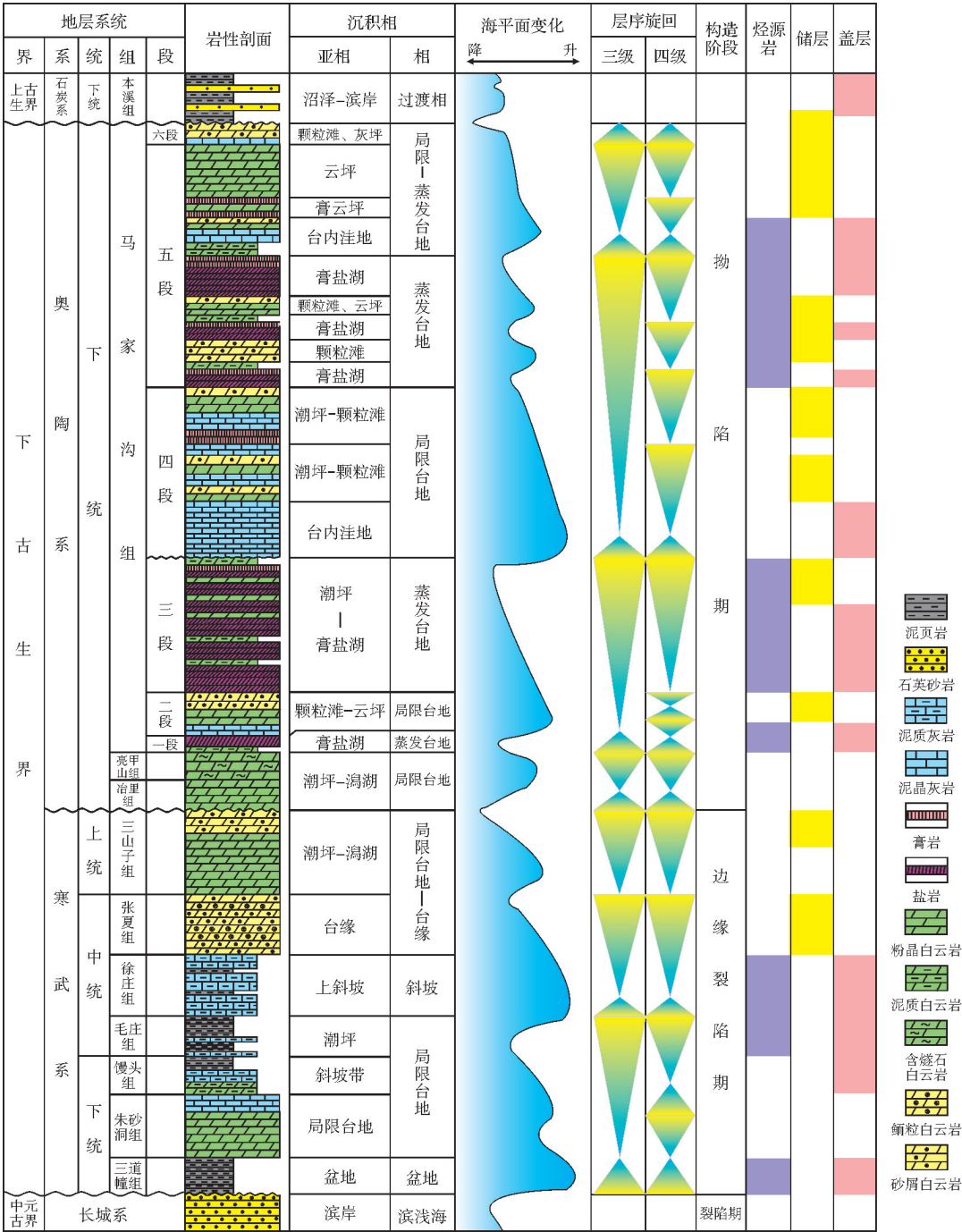


图2 鄂尔多斯盆地中东部寒武系—奥陶系地层综合柱状图
Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Cambrian-Ordovician in the central and eastern part of the Ordos Basin

2 寒武纪—奥陶纪构造-岩相古地理

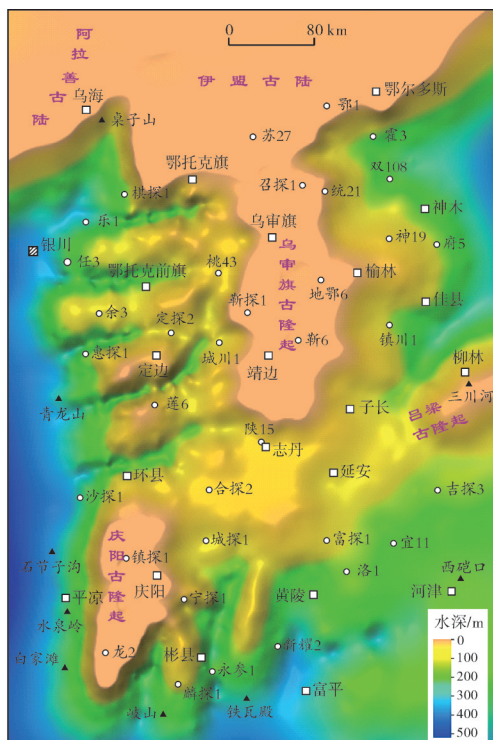
鄂尔多斯盆地的基底由不同岩性岩相的变质岩类构成。中元古代长城纪,相对统一的变质岩基底裂解,形成规模、尺度不一的伸展型断陷,盆地主体区域显示陆内裂陷的特性,整体构成“堑-垒”式的北东走向的裂陷带,正断裂对长城系的沉积与分布制约作用

强。前人研究表明,长城系发育多条裂陷槽,现今鄂尔多斯盆地范围内的晋陕、甘陕及贺兰裂陷槽整体呈北东—南西向延伸^[16]。新元古代,受周缘裂谷系汇聚影响,盆地发生区域性隆升。陆内裂陷的聚敛隆升活动导致长城系、蓟县系的剥蚀,上覆寒武系自西南向东北依次超覆于蓟县系、长城系及太古宇基岩等地层之上,构成与下伏层系的超覆不整合。

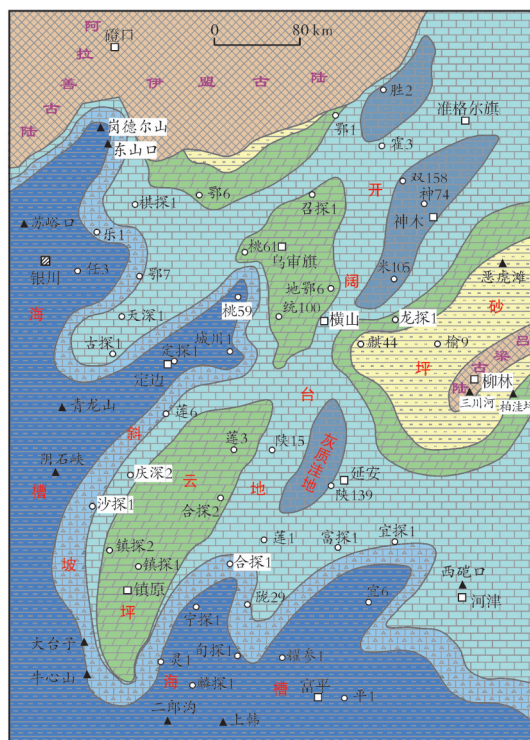
2.1 寒武纪台缘裂陷型构造-岩相古地理格局

寒武纪, 盆地中部继承性发育乌审旗古隆起,

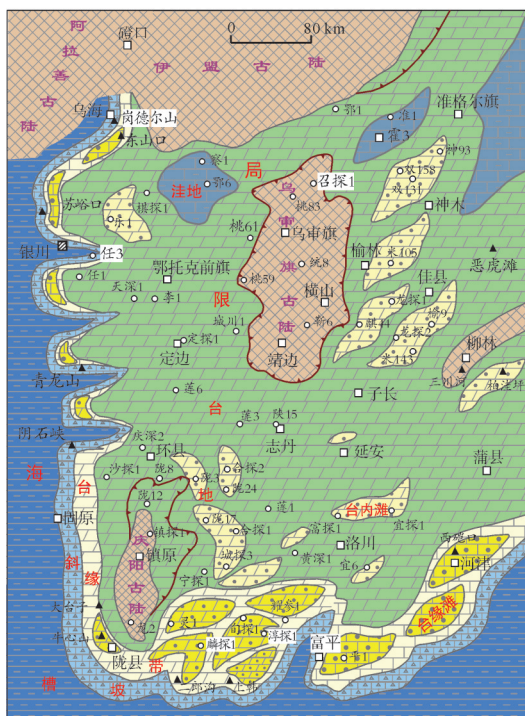
并向北与伊盟古陆连通, 两侧地层向古隆超覆沉积 (图 3a); 盆地西南部发育庆阳古隆起, 古隆起东侧发育多个残余裂陷, 即边(盆)缘裂陷。



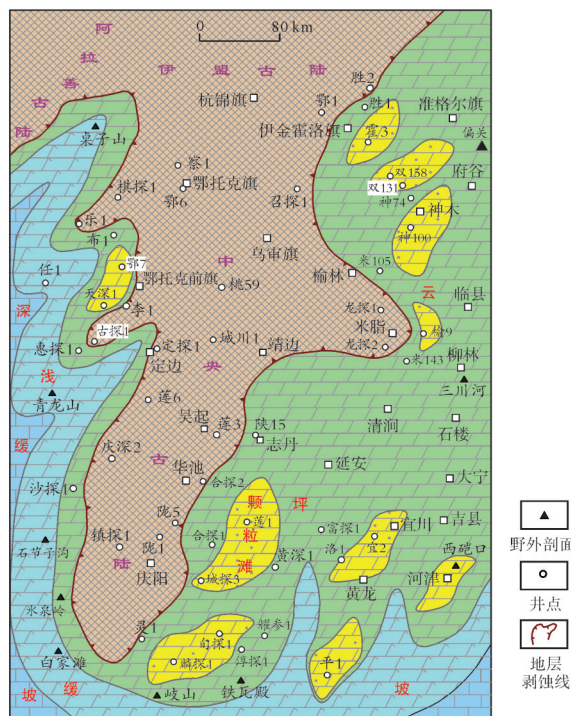
(a) 中寒武世古地貌图



(b) 中寒武世徐庄期岩相古地理图



(c) 中寒武世张夏期岩相古地理图



(d) 晚寒武世三山子期岩相古地理图

图3 鄂尔多斯盆地中寒武世古地貌及岩相古地理

Fig. 3 Maps of paleogeography and lithofacies of Middle Cambrian in the Ordos Basin

寒武纪早期发生震旦纪末期海退事件之后的第一次海侵,最大海泛期在徐庄期,沉积范围由西缘、南缘海槽向盆地内部逐渐扩大,接受了下寒武统辛集组—中寒武统徐庄组的沉积。受中新元古代继承性裂陷槽影响,沿盆地西缘、南缘形成了隆凹相间的沉积格局,发育了多个深水海湾(图3b)。如贺兰海湾与铜川海湾围绕庆阳古陆外围呈“L”形分布,并发育了一套早寒武世含磷碎屑岩建造;早寒武世晚期海侵有所扩大,在盆地西南缘环陆发育了泥砂坪、泥云坪等滨岸沉积。

中寒武世海侵持续扩大,广大的鄂尔多斯盆地中东部逐渐由砂泥坪发展为局限—开阔台地沉积(图3c),在其西南缘发展为台地边缘—深水海槽沉积。张夏期古地理平面上呈现出盆地南部与西部为斜坡相带状分布,盆地中东部广泛分布局限台地潮坪,西部、南部环局限台地边缘发育台缘鲕粒滩带的沉积格局^[17]。值得注意的是,西部苏峪口、青龙山一带,以及南部礼泉—铜川等地区发育多个向台内延伸的裂陷槽,控制了深水海槽向台内的延伸以及台缘带的展布。庆阳古陆和乌审旗古陆的张夏组完全被剥蚀,推测原来有可能覆盖泥云坪沉积;斜坡位于盆地西部银川—固原一带以及盆地南部;台缘鲕粒滩带发育在盆地西缘、南缘,其中南部鲕粒滩较为发育,台缘带分布较宽;局限台地潮坪在盆地中东部广泛发育,分布在环乌审旗古陆及庆阳古陆周围,内部发育台内鲕粒滩。盆地东南部潮坪白云石化程度较低或未发生白云石化,其余地区皆大面积白云石化(图3c)。

晚寒武世开始海退,中东部主体演变为局限台地云坪,而西南缘则演变为深缓坡(图3d)。三山子组沉积期,海退加剧,南北两个古陆连通形成中央古陆,范围进一步扩大。围绕中央古陆主要发育局限台地—浅缓坡—深缓坡沉积。局限台地以云坪为主,在原来的乌审旗古陆东部发育台内滩,在南部铜川裂陷两侧发育台缘滩,岩性以鲕粒白云岩为主。浅缓坡主要分布在局限台地外围,岩性以灰质白云岩为主。深缓坡岩性以石灰岩为主。整体看来,寒武系台内裂陷的规模明显呈缩小趋势,只在台地的西缘和南缘发育萎缩型台缘裂陷,控制了滩体的展布。

2.2 奥陶纪台内坳陷型构造-岩相古地理格局

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组烃源岩、储层的

发育分别主要受台内洼地、颗粒滩的控制,而沉积古地貌是沉积分异的最主要影响因素,因此,恢复目的层的沉积古地貌,分析沉积期地貌特征,是刻画岩相古地理及有利源储发育区的关键^[18]。本次古地貌研究主要基于马四段—马五段残余地层厚度和马一段—马三段残余地层厚度。利用残余地层厚度,结合研究区不同岩性或岩相组合的地震响应、野外露头或单井典型沉积相、连井沉积相对比等特征,对鄂尔多斯盆地早奥陶世马一期—马三期和马四期—马五期沉积古地貌进行综合恢复,编制了马三段沉积前古地貌(图4a)、马五₁₀亚段沉积前古地貌图(图4b)。

对比两张沉积古地貌图,可见二者在平面展布特征上具有一定相似性,这表明马家沟组下组合沉积古地貌具有一定继承性,但在古地貌形态细节上有一定的变化。盆地在马一期—马三期和马四期—马五期都具有隆洼相间的古沉积格局特征,且受祁连海和華北海两个海域的共同控制,其中西南缘主要受祁连海控制,中东部主要受華北海控制,中央古隆起(鄂托克旗—定边—环县)为两个海域的转换带^[19]。盆地存在两个沉积中心,分别为盆地西南缘和盆地东部米脂洼地,盆地中部发育乌审旗西部次洼。盆地发育两个古陆、两个古隆:古陆分别为阿拉善古陆、伊盟古陆,古隆分别为中央古隆起(庆阳古隆起)和乌审旗古隆起。中央古隆起并非一个连续的古隆,其在定边附近区域明显存在一个鞍部;乌审旗古隆起呈北东向展布,且在靖边和榆林之间存在一个较为明显的鞍部。这些构造低部位恰好是台内洼地与祁连海和華北海海水沟通的渠道,对沉积环境与沉积物分异具有明显的控制作用。对于碳酸盐沉积,沉积古地貌对沉积相平面展布有明显的控制作用,从钻井揭示的盆地内颗粒滩发育程度来看,古隆起区高部位颗粒滩更发育^[20]。

马二期为马家沟期的首次海侵,发育一套以海侵为主的震荡型海侵—海退沉积组合。在盆地东部以石灰岩、白云岩为主,间夹膏质白云岩或石膏薄层;在盆地西部中央古隆起周缘为一套白云岩和泥质白云岩交互的岩性组合(图4c)。相对于马一期,该期沉积水体较深,海水总体循环通畅,在研究区佳县—子长—延安以东地区为灰质洼地,岩性以泥晶灰岩为主;向西到神木—佳县—志丹—延安地

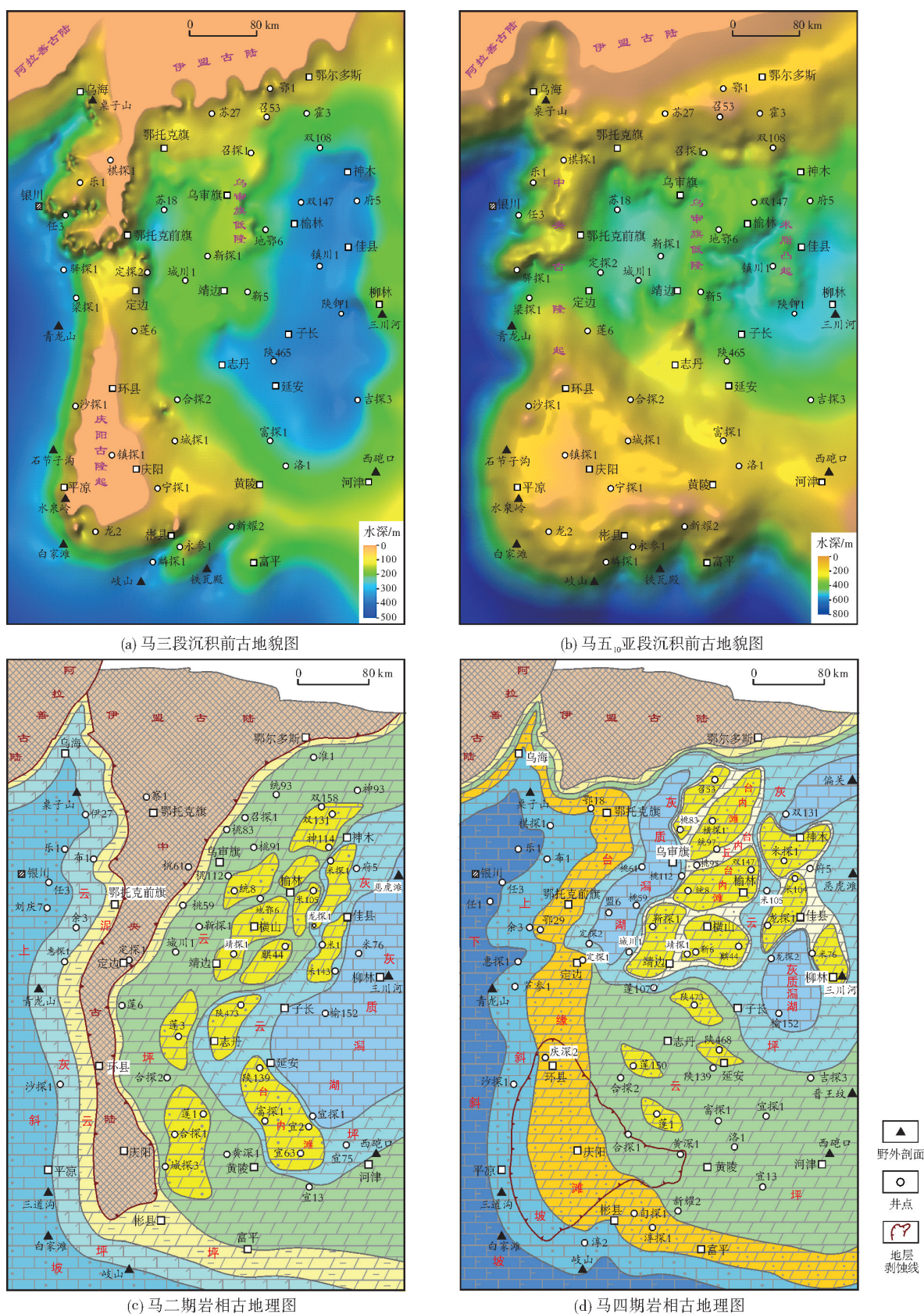


图4 鄂尔多斯盆地早奥陶世古地貌及岩相古地理图

Fig. 4 Maps of paleogeomorphology and lithofacies of Early Ordovician in the Ordos Basin

区,过渡为灰云坪,岩性以灰质白云岩为主,夹白云岩薄层;向西至古隆起一线发育云坪,岩性以泥粉晶白云岩为主,局部地区水动力较强,发育颗粒滩,岩性以砂屑、鲕粒白云岩为主。

马四期为奥陶纪最大海侵期,沉积水体较深,盆地东部基本淹没于水下,沉积相展布受东部吕梁隆起的障壁效应较弱,呈现东西向分异、南北条带状分布的特征(图4d)。在乌审旗—榆林—柳林地区广泛发育灰云坪,岩性以泥晶灰岩和含云斑泥晶灰岩为主,或者以白云岩和石灰岩薄互层状产出,并向西南依次相变为云坪,岩性以粉晶白云岩为主。在西部中央古隆起处发育颗粒滩带,岩性包含颗粒白云岩和含颗粒残余结构的晶粒白云岩。除中央古隆起为高部位外,在乌审旗东部发育一个继承性的乌审旗水下隆起带。此外,在盆地东部的神木—米脂—佳县地区还发育一个米脂低凸起。由于海平面升高,盆地东部洼地与华北广海连通性进一步增强,两个高部位隆起(凸起)带水体较浅,水动力较强,广泛发育颗粒滩,且沿古地貌呈断续条带状分布,岩性以砂屑白云岩和粉—细晶白云岩为主,含少量鲕粒白云岩。乌审旗西部洼地水体较深,岩性以泥晶灰岩和含云斑泥晶灰岩为主;神木以北和佳县以南地区水体也逐渐加深,发育灰质洼地,岩性以泥晶灰岩为主。

3 岩相古地理控源效应

3.1 寒武系烃源岩发育

下寒武统三道幢组、中寒武统的毛庄组与徐庄组在海湾内发育规模烃源岩^[21]。对秦岭中段洛南地区野外剖面的观测表明,三道幢组厚度介于2~70 m,岩性主要为黑色、灰黑色泥页岩夹泥质板岩(图5a),局部为灰黑色薄层粉砂质板岩与灰黑色中薄层砂岩。泥质岩 TOC 为 0.10%~13.75%。毛庄组、徐庄组烃源岩主要沉积在盆地西缘、南缘以及盆地东北部的海湾内。在盆地西缘,下部由页岩、石灰岩、砂岩组合构成若干韵律层,夹有鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩;上部由页岩与薄层泥质条带灰岩夹鲕粒灰岩和竹叶状灰岩构成,夹数层含生物碎屑灰岩,生物丰富。在盆地南缘,以发育紫红色页岩为主要特征,岩性为紫红色、紫褐色页岩、粉砂质页岩夹泥质白云岩、白云岩、鲕粒灰岩和砂岩。由盆地东北部海湾内双158井、双131井等井的岩心观察可知,徐庄组发育深灰色、灰黑色泥质条带夹层(图5b,5c)。泥质岩 TOC 为 0.13%~0.41%,平均值为 0.23%。徐庄组烃源岩厚度为 10~120 m,平均值为 40 m,主要分布于西南缘的海槽向盆内延伸的海湾内,以及盆地东北部的海湾内(图6a)。总体看来,寒武系盆缘裂陷对于烃源岩的分布具有重要的控制作用。



图5 寒武系—奥陶系烃源岩发育特征

Fig. 5 Development characteristics of Cambrian-Ordovician source rocks

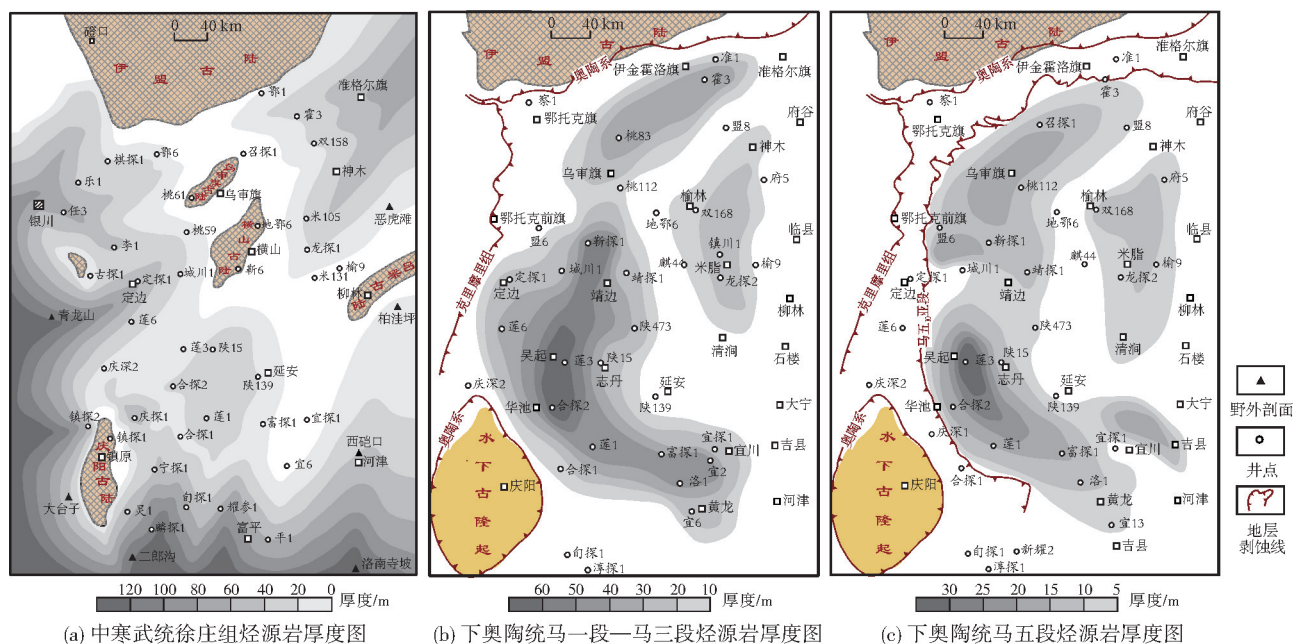


图6 鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶系烃源岩厚度图

Fig. 6 Thickness map of Cambrian-Ordovician source rocks in the Ordos Basin

3.2 奥陶系烃源岩发育

前人认为,鄂尔多斯盆地存在2套向马家沟组供烃的烃源岩^[22]:第1套是奥陶系马家沟组海相烃源岩,有效烃源岩大多为富有机质纹层泥质岩或者藻团块、藻白云岩,具备较好的供烃潜力;第2套为石炭系—二叠系煤系烃源岩。本文认为:盆地中部马四段紧邻奥陶系顶部风化壳剥蚀窗口,与石炭系—二叠系煤系烃源岩直接接触,具备“上源下储、侧向供烃、近距离运移”的成藏条件;盆地东部马四段、马二段距离风化壳剥蚀窗口较远,不具备上述条件,但盆地东部马一段—马三段发育的海相烃源岩分别与马四段、马二段储层构成“下源上储”的天然气成藏配置。受奥陶纪盆地内部隆坳格局控制,烃源岩主要发育在相对海退期的马一段、马三段和马五段(图2),烃源岩常与硬石膏、膏质白云岩等蒸发岩伴生,岩性为深灰色—黑灰色泥质白云岩或白云质泥岩(图5d—5f)。该套烃源岩TOC介于0.22%~1.61%,平均值为0.40%,最大值可达3.24%;有机质以腐泥无定形为主,生烃母质主要为浮游藻类,为腐泥型干酪根; R_o 介于1.7%~2.5%,已达到高成熟、过成熟阶段。烃源岩受沉积相控制,主要沿地势相对较低的乌审旗西部洼地和米脂洼地周缘规模分布,单层厚度介于0.1~1.0 cm,最大厚度可达50 cm,累计厚度可达40~80 m(图6b,6c)。

4 岩相古地理控储效应

4.1 寒武系储层发育

通过野外剖面、钻井岩心、薄片观察,发现寒武系储层主要分布在张夏组和三山子组,包括颗粒滩孔隙型、溶蚀缝洞型2大类。孔隙型储层主要发育于颗粒滩(台缘滩,台内滩),主要分布于张夏组,三山子组局部分布。储层岩性以鲕粒白云岩为主,后期重结晶改造后可呈白云石嵌晶状。孔隙以粒间孔、粒间溶孔、晶间孔和晶间溶孔为主(图7a—7d)。储层物性统计表明:台缘滩孔隙度分布于1.00%~9.45%,平均值为3.46%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为22.2%;台内滩孔隙度分布于1.00%~12.00%,平均值为3.17%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为59.8%。溶蚀缝洞型储层主要分布于寒武系顶部的三山子组,张夏组局部亦有分布,主要为不规则状的溶蚀孔洞(图7e,7f)和裂缝,大小为厘米级到分米级,较少见到米级的大型溶洞,野外剖面可见沿层序界面顺层分布的特点(图7f)。

从张夏组储层厚度图(图8a)可知,储层的发育明显受台缘裂陷和台内隆起的控制。在盆地南缘庆阳古陆东侧到河津一线发育台缘滩储层,最厚可达150 m,平均值为60 m,整体沿盆缘裂陷两侧和庆阳古陆东缘分布,面积合计 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

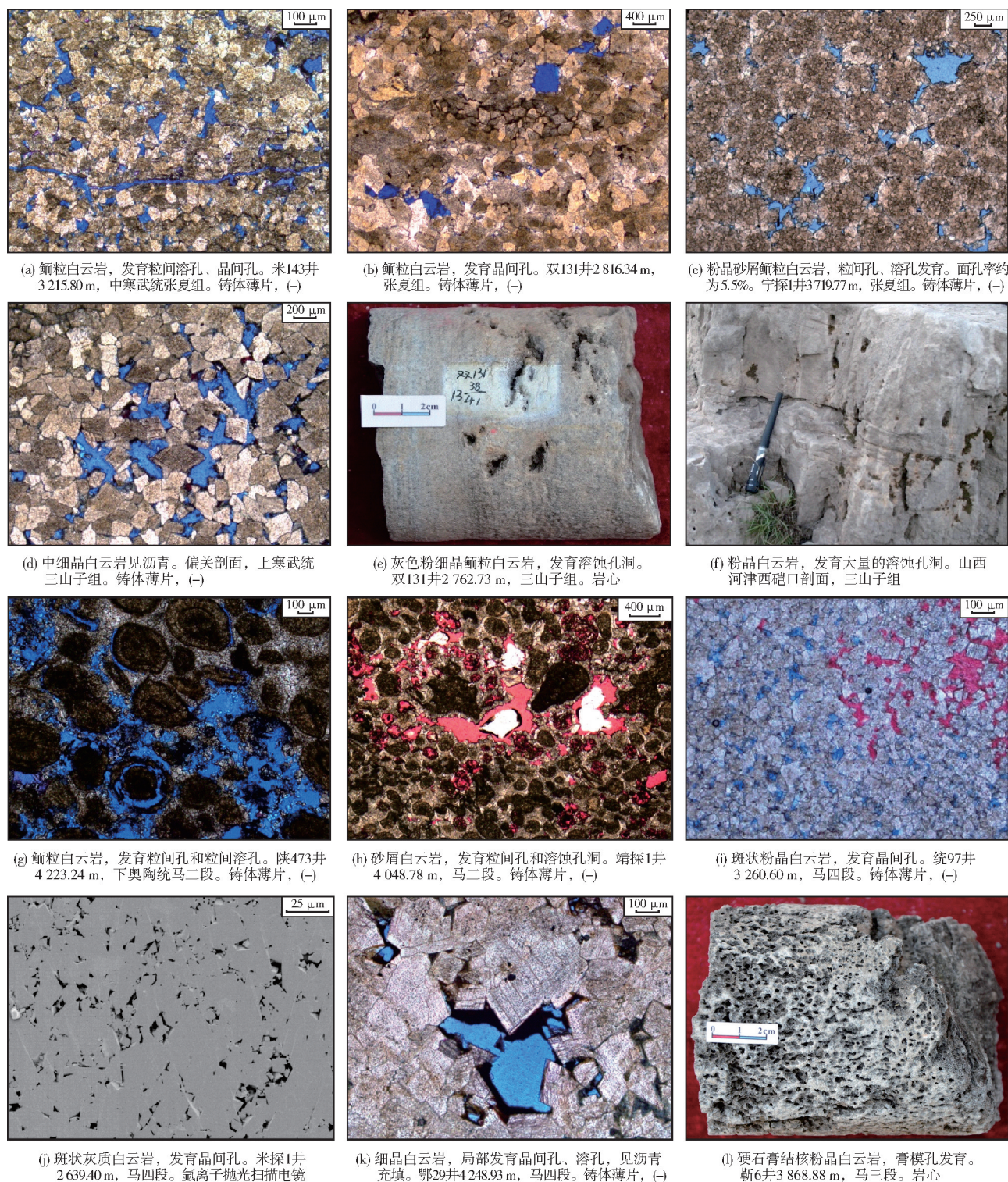


图7 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系储层发育特征

Fig. 7 Development characteristics of Cambrian-Ordovician reservoirs in the Ordos Basin

在北部乌审旗古陆的东侧发育台内滩储层,位于准格尔旗到子长之间,最厚可达80 m,平均值为50 m,3个较大厚度的发育区呈北东向雁列分布,面积合

计 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。此外,在盆地西北部地区发育小面积的台缘滩储层,以乐1井和棋探1井为代表,最厚可达100 m。

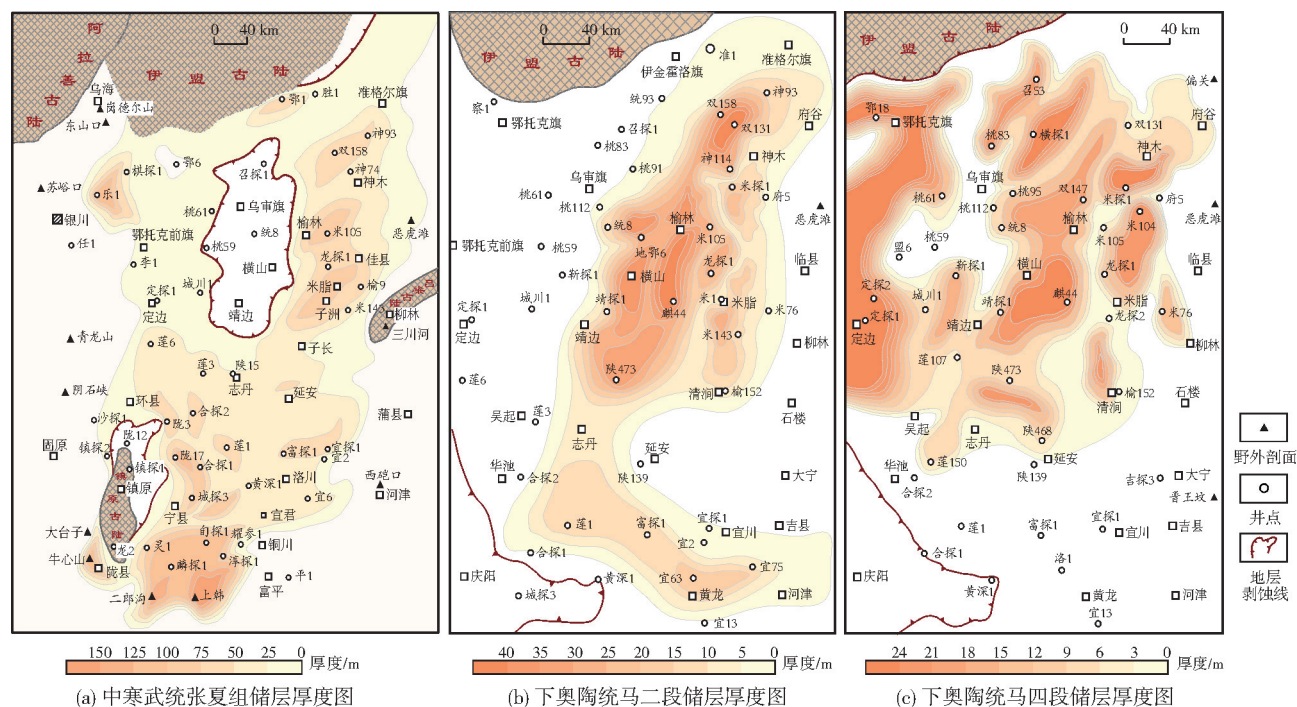


图8 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系储层厚度图

Fig. 8 Thickness maps of Cambrian-Ordovician reservoirs in the Ordos Basin

4.2 奥陶系储层发育

岩心、薄片观察表明,奥陶系主要发育3种储层类型:丘滩型、斑状白云岩型、膏模孔型。丘滩型储层岩性主要为砂屑和鲕粒白云岩,发育粒间孔和粒间溶孔(图7g,7h),主要分布于马二段、马四段,马三₁亚段有少量分布;单层厚度介于1~15 m,累计厚度达10~40 m;储层孔隙度主要分布于2%~6%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为71%。斑状白云岩型储层岩性主要为灰质白云岩和白云质灰岩,孔隙为非均质的斑状白云岩晶间孔和晶间微孔,有时在显微镜下较难识别,可通过扫描电镜进行观察(图7i,7j);主要分布于马四段,马二段局部分布,单层厚度介于1~5 m,累计厚度达10~25 m;储层孔隙度主要分布于2%~6%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为41%。膏模孔型储层岩性主要为含膏和膏质白云岩,孔隙为硬石膏结核溶蚀后的圆形或椭圆形铸模孔,一般为毫米级(图7k,7l);主要分布于马三段,马二段局部分布;单层厚度介于0.5~3 m,累计厚度达5~15 m;储层孔隙度主要分布于2%~4%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为56%。

从马二段、马四段储层厚度图(图8)可知,奥陶系储层分布主要受台内隆坳格局的控制。马二段

储层整体呈北东向条带状分布,有2个厚值区:中部的榆林—志丹条带,主要沿乌审旗古隆分布,厚度介于5~40 m,平均厚度为25 m;东部的神木—清涧条带,沿米脂低凸起分布,厚度介于5~25 m,平均厚度为15 m。马四段储层受古隆起控制,整体呈南北向条带状分布,存在3个厚值区:西部的鄂托克旗—定边条带,主要沿中央古隆起分布,厚度介于0~30 m,平均厚度为20 m;中部的乌审旗—志丹条带,主要沿乌审旗台内古隆分布,厚度介于0~24 m,平均厚度为15 m;东部的神木—清涧条带,厚度介于0~24 m,平均厚度为10 m。

5 寒武系—奥陶系源储配置及勘探领域

从鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系的构造—沉积演化过程来看,其主要经历了寒武纪的盆缘裂陷期和奥陶纪的盆内拗陷期。寒武纪台缘裂陷型和奥陶纪台内拗陷型构造—沉积模式控制了烃源岩和储层的发育,形成了3套良好的源储盖配置关系(图9)。

第1套为寒武系台缘滩的源储盖组合:烃源岩为下中寒武统三道幢组、毛庄组和徐庄组发育的海相页岩和泥岩,主要分布在盆地西南缘的海槽内。储层为张夏组、三山子组发育的台缘滩储层,以及

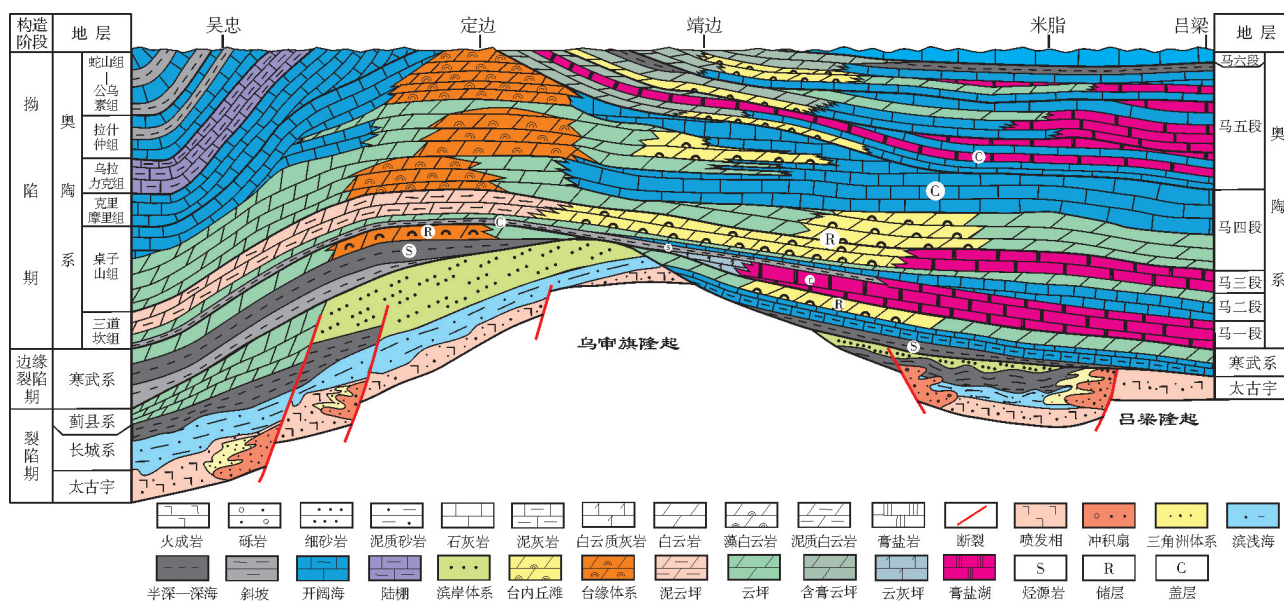


图9 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系源储盖配置关系图(顶界为加里东不整合面。剖面位置见图1)

Fig. 9 Source-reservoir-cover configuration relationship of Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin
(Flattening the Caledonian unconformity. The section location is shown in Fig. 1)

与怀远运动面相关的风化壳储层。台缘滩储层平面上主要位于庆阳古隆的东侧以及盆地南部的台缘带。风化壳储层主要受控于寒武纪末期的古地貌,主要发育在从古隆起向洼地过渡的区域,并且与颗粒滩储层部分叠合,叠合区是储层发育的有利区带。盖层主要为下奥陶统马一段的泥质白云岩,在盆地西部叠加三道坎组的泥质白云岩,形成有效封盖。纵向上,中下寒武统的烃源岩与中上寒武统的储层可以形成下生上储的良好组合;平面上,裂隙内的烃源岩与周缘的颗粒滩及风化壳储层可以形成良好的侧向接触配置关系。

第2套为寒武系台内滩的源储盖组合:烃源岩为下中寒武统毛庄组和徐庄组发育的海相页岩和泥岩,主要分布在盆地东北部的海湾内。储层为张夏组台内滩储层以及三山子组风化壳储层。台内滩储层平面上主要位于乌审旗古隆的东侧,风化壳储层发育在古地貌斜坡部位。盖层以马一段的泥质白云岩和膏盐岩为主,具备优良的封堵性能。该套组合总体为下生上储、顶部封盖的组合类型。

第3套为盆地中东部奥陶系盐下源储盖组合:烃源岩为马家沟组相对海退期发育的高频薄层型海相烃源岩,主要分布在马一段、马三段、马五段,平面上主要分布于台内洼地,呈“C”形绕东部盐盆发育。储层主要为马二段、马四段的丘滩型储层,以及马三段少量海退期发育的膏模孔储层。丘滩型储层主要分布在台内相对高部位,以继承性的古

隆起和台内凸起为主。纵向上,海退期烃源岩与海侵期颗粒滩呈交互发育,可形成良好的源储叠置关系^[23];平面上,洼地内的烃源岩与隆起带上的颗粒滩储层具备良好的侧向对接配置关系,局部发育的断裂对沟通源储有重要作用。上部的马四段灰岩作为直接盖层,马五₁₀和马五₂段的膏盐岩作为区域盖层,可形成有效的封盖。

6 结论

(1)鄂尔多斯盆地寒武纪具有台内发育继承性隆起、西南部台缘发育继承性裂隙的构造格局,中下寒武统三道坎组、毛庄组和徐庄组烃源岩主要发育在海槽和海湾内,颗粒滩、风化壳储层主要发育在乌审旗古隆起、庆阳古隆起周缘及南部台缘带。

(2)奥陶纪具有台内多隆多坳的沉积格局,早期和晚期演化具有一定的继承性和差异性,沉积古地貌和海平面变化共同控制了沉积相的差异分布。中央古隆起、乌审旗低隆和米脂凸起等3个台内隆起带控制了颗粒滩和膏云坪的展布,米脂洼地和乌审旗西部洼地则控制了烃源岩的展布。

(3)寒武纪台缘裂陷型和奥陶纪台内坳陷型构造-沉积模式控制了规模烃源岩和储层的发育,并形成了3套优良的源储盖组合,具有较大的天然气成藏潜力。其中,寒武系张夏组、三山子组台缘滩及台内滩,奥陶系马二段和马四段台内丘滩是鄂尔多斯盆地未来风险勘探的重要领域。

参考文献

- [1] 陈安清, 杨帅, 陈洪德, 等. 陆表海台地沉积充填模式及内克拉通碳酸盐岩勘探新启示[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1243–1256.
CHEN Anqing, YANG Shuai, CHEN Hongde, et al. The sedimentary filling model of epeiric platform and new inspiration of innercratonic carbonate for oil and gas exploration[J]. Acta petrologica sinica, 2017, 33(4): 1243–1256.
- [2] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007–1020.
MA Yongsheng, HE Dengfa, CAI Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta petrologica sinica, 2017, 33(4): 1007–1020.
- [3] 张春林, 张福东, 朱秋影, 等. 鄂尔多斯克拉通盆地寒武纪古构造与岩相古地理再认识[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 281–291.
ZHANG Chunlin, ZHANG Fudong, ZHU Qiying, et al. New understanding of the Cambrian palaeotectonic and lithofacies palaeogeography in the Ordos craton basin[J]. Oil & gas geology, 2017, 38(2): 281–291.
- [4] 陈启林, 白云来, 黄勇, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 82–94.
CHEN Qilin, BAI Yunlai, HUANG Yong, et al. Sequence lithofacies palaeogeography of the Cambrian in Ordos Basin, China[J]. Acta petrologica sinica, 2012, 33(S2): 82–94.
- [5] 王龙, 吴海, 张瑞, 等. 碳酸盐台地的类型、特征和沉积模式: 兼论华北地台寒武纪陆表海—淹没台地的沉积样式[J]. 地质论评, 2018, 64(1): 62–76.
WANG Long, WU Hai, ZHANG Rui, et al. The types, characteristics and depositional models of carbonate platform: implications for Cambrian sedimentary patterns of epeiric-drowned carbonate platform in North China[J]. Geological review, 2018, 64(1): 62–76.
- [6] 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.
- [7] 苏中堂, 陈洪德, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 623–633.
SU Zhongtang, CHEN Hongde, OUYANG Zhengjian, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 623–633.
- [8] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 41–53.
ZHOU Jingao, XI Shengli, DENG Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian–Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2020, 40(2): 41–53.
- [9] 李文厚, 张倩, 陈强, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区早古生代沉积演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 456–479.
LI Wenhui, ZHANG Qian, CHEN Qiang, et al. Sedimentary evolution of Early Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Northwest University (natural science edition), 2020, 50(3): 456–479.
- [10] 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.
- [11] 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗—靖边古隆起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 391–400, 521.
WEI Liubin, CHEN Hongde, GUO Wei, et al. Wushen–Jingbian paleo-uplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin[J]. Oil & gas geology, 2021, 42(2): 391–400, 521.
- [12] 王欣, 高晓峰, 查显锋. 华北克拉通东坡组形成时代及其油气资源潜力[J]. 地球科学, 2023, 48(12): 4613–4627.
WANG Xin, GAO Xiaofeng, ZHA Xianfeng. Age and potential petroleum resources of Dongpo Formation in North China craton[J]. Earth science, 2023, 48(12): 4613–4627.
- [13] 欧阳征健, 冯娟萍, 姚韦卓, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘寒武系烃源岩地质特征及有利区带优选[J]. 地质科学, 2023, 58(4): 1291–1308.
OUYANG Zhengjian, FENG Juanping, YAO Weizhuo, et al. Characteristics and favorable areas of Cambrian natural gas reservoirs in Ordos Basin and its periphery areas[J]. Chinese journal of geology, 2023, 58(4): 1291–1308.
- [14] 付金华, 赵会涛, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地新领域油气勘探发现与前景展望[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(8): 1289–1304.
FU Jinhua, ZHAO Huitao, DONG Guodong, et al. Discovery and prospect of oil and gas exploration in new areas of Ordos Basin[J]. Natural gas geoscience, 2023, 34(8): 1289–1304.
- [15] 张涛, 张亚雄, 金晓辉, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩—蒸发岩层序地层模式及其对源—储的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 110–124.
ZHANG Tao, ZHANG Yaxiong, JIN Xiaohui, et al. Sequence stratigraphy models of carbonate–evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & gas geology, 2023, 44(1): 110–124.
- [16] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 820–835.
DU Jinhu, LI Xiangbo, BAO Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(5): 820–835.
- [17] 李维岭, 周进高, 吴兴宁, 等. 鄂尔多斯盆地南缘中寒武统张夏组鲕粒滩相储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 25–34.
LI Weiling, ZHOU Jingao, WU Xingning, et al. Characteristics of oolitic shoal reservoir and its main controlling factors of Zhangxia Formation in the southern margin of Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(1): 25–34.

- [18] 左洛滔, 胡忠贵, 杨威, 等. 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组盐下构造-沉积响应特征[J]. 海相油气地质, 2021, 26(2): 141-149.
- ZUO Mingtao, HU Zhonggui, YANG Wei, et al. Characteristics of structural-sedimentary response of the subsalt reservoir of Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(2): 141-149.
- [19] 周进高, 李明瑞, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统马家沟组盐下含气系统特征与勘探潜力[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 34-45.
- ZHOU Jingao, LI Mingrui, WU Dongxu, et al. Characteristics and exploration potential of subsalt gas-bearing system in Majiagou Formation of Low Ordovician in the eastern Ordos Basin [J]. Natural gas industry, 2023, 43(3): 34-45.
- [20] 于洲, 张道锋, 王维斌, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积特征与有利储集相带[J]. 海相油气地质, 2022, 27(4): 371-382.
- YU Zhou, ZHANG Daofeng, WANG Weibin, et al. Sedimentary characteristics and favorable facies of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(4): 371-382.
- [21] 黄军平, 李相博, 何文祥, 等. 鄂尔多斯盆地南缘下寒武统高丰度烃源岩发育特征与油气勘探方向[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 319-326.
- HUANG Junping, LI Xiangbo, HE Wenxiang, et al. Development characteristics of high abundance source rocks of the Lower Cambrian and direction of oil and gas exploration in southern margin of Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4): 319-326.
- [22] 徐旺林, 李建忠, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系下组合天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 549-561.
- XU Wanglin, LI Jianzhong, LIU Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration directions of Ordovician lower assemblage natural gas, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(3): 549-561.
- [23] 吴东旭, 周进高, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 553-567.
- WU Dongxu, ZHOU Jingao, REN Junfeng, et al. Reconstruction of depositional environment and source-reservoir configuration relationship of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Earth science, 2023, 48(2): 553-567.

编辑:董庸

Evolution and controlling effects on source rock and reservoir of tectonics-lithofacies paleogeography of Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin

WU Dongxu^{1,2,3}, FAN Liyong⁴, LI Weiling¹, ZHONG Jianwei⁵, ZAHNG Lei⁴,
SHI Pingping⁴, ZHU Wenbo¹, LU Huili¹, WU Xingning¹

1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 2. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas;
3. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company; 5. Shale Oil Development Branch, PetroChina Changqing Oilfield Company

Abstract: The exploration targets for marine oil and gas in the Ordos Basin have gradually shifted from the early weathering crust reservoirs of the Majiagou Formation to the inner carbonate reservoirs below the unconformity at the top of Ordovician. However, the research level of deep Cambrian and Ordovician in the basin is relatively low, and the overall characteristics and configuration relationship of the source, reservoir, and cap rock are unclear. Based on the latest drilling and seismic data, combined with basic geological work such as field outcrop investigation, laboratory analysis, core and thin section observation, the author has compiled a series of maps of tectonics-lithofacies paleogeography, maps of hydrocarbon source rocks and favorable sedimentary facies zones, to clarify the development characteristics and configuration relationship of source, reservoir, and cap rocks of the Cambrian-Ordovician. The Cambrian system in the Ordos Basin has a structural pattern of inherited uplifts developing within the platform and inherited rifts developing at the platform edge. The southwestern and northeastern rifts of the basin control the development of Middle and Lower Cambrian source rocks mainly in the sea troughs and bays, while the Wushenqi and Qingyang ancient uplifts control the development of granular shoals and weathered crust reservoirs mainly in the periphery and platform edge zones of the ancient uplifts. The Ordovician has a sedimentary pattern of multiple uplifts and depressions developing within the platform, and the differential distribution of sedimentary facies is jointly controlled by sedimentary paleogeomorphology and sea level changes. The three uplift zones within the platform control the distribution of favorable microfacies such as granular shoal and gypsum dolomite tidal flat, while the two depression zones within the platform control the distribution of marine source rocks. Tectonic-sedimentary models of the platform margin rift in Cambrian and the platform inner depression in Ordovician control the development of source rocks and reservoirs, and form three sets of excellent source-storage-cap combinations, which have great potential for natural gas accumulation and are important areas for future risk exploration in the Ordos Basin.

Key words: paleogeography; source rock; granular shoal; reservoir; Ordovician; Cambrian; Ordos Basin

WU Dongxu, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas geology on carbonate rock. Add: No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: wudx_hz@petrochina.com.cn