

鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系盐下丘滩体白云岩储层发育特征及分布规律

于洲^{1,2,3,4}, 范立勇⁵, 罗晓容^{1,2}, 魏柳斌⁵, 鲁慧丽^{3,4}, 师平平⁵, 李欣阳⁶

(1. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学 陕西 西安 710069; 2. 西北大学 地质学系 陕西 西安 710069; 3. 中国石油 杭州地质研究院 浙江 杭州 310023; 4. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室 浙江 杭州 310023; 5. 中国石油 长庆油田公司 勘探开发研究院 陕西 西安 710018; 6. 西安石油大学 地球科学与工程学院 陕西 西安 710065)

摘要:鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系盐下丘滩体白云岩储层是天然气勘探的重要目标。针对该类储层系统研究较少、发育特征及分布规律认识不清制约勘探进程的问题,综合利用岩心、薄片、测井、物性及地球化学等资料,对其开展了系统研究。结果表明:①储层岩性主要为藻纹层白云岩、砂屑(粉晶)白云岩、鲕粒白云岩和晶粒化颗粒白云岩;储集空间包括溶蚀孔洞、晶间(溶)孔、粒间(溶)孔、粒内溶孔和微裂缝,平均孔隙度为5.79%。②储层发育受沉积微相、溶蚀作用和生物扰动作用共同控制。其中,微生物丘和颗粒滩沉积为储层发育提供了物质基础,溶蚀作用是形成溶蚀孔洞的关键,生物扰动形成的潜穴进一步改善了储层物性。③储层分布具有明显的层控性和区位性。纵向上,主要发育于三级层序海侵半旋回内高频向上变浅旋回的中、上部,呈层状分布;平面上,主要分布于古隆起高部位、古隆起侧翼和坳陷边缘。综合评价认为,在奥陶纪马(马家沟组)二段、马四段、马五⁹亚段和马五⁷亚段沉积期,神木—吴起地区地势相对较高、水动力强,微生物丘和颗粒滩呈带状分布且易发生准同生溶蚀作用,具备多层系丘滩体白云岩储层规模发育的地质条件,为有利储层分布区。

关键词:溶蚀作用;生物扰动作用;沉积微相;丘滩体白云岩储层;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Development characteristics and distribution patterns of sub-salt mound-shoal dolomite reservoirs of the Ordovician, central-eastern Ordos Basin

YU Zhou^{1,2,3,4}, FAN Liyong⁵, LUO Xiaorong^{1,2}, WEI Liubin⁵, LU Huili^{3,4}, SHI Pingping⁵, LI Xinyang⁶

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 4. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 6. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The Ordovician sub-salt mound-shoal dolomite reservoirs in the central-eastern Ordos Basin are important targets for natural gas exploration. However, systematic research on such reservoirs is limited, and unclear understanding of their development characteristics and distribution patterns have constrained exploration progress. To address these issues, a systematic investigation was conducted based on integrated core, thin-section, well log, petrophysical, and geochemical data. As indicated by the research results, (1) the reservoir lithology is mainly of the algal-laminated dolomite, intraclastic grainstone (very fine-crystalline) dolomite, oolitic dolomite, and recrystallized granular dolomite types. The reservoir spaces include dissolution vugs, intercrystalline (dissolution) pores, intergranular (dissolution) pores, intragranular dissolution pores, and microfractures, with an average porosity of 5.79%. (2) The development of mound-shoal dolomite reservoirs is jointly controlled by sedimentary

收稿日期:2026-03-15;修回日期:2026-05-18。

第一作者简介:于洲(1986—),男,博士研究生、高级工程师,碳酸盐岩沉积储层。E-mail: yuz_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:罗晓容(1959—),男,研究员,石油地质学基础和应用、油气成藏动力学。E-mail: luoxr@mail.iggcas.ac.cn。

基金项目:中国石油长庆油田公司科技项目(2024D1JC06);中国石油集团公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ16YJ01)。

microfacies, dissolution, and bioturbation. Microbial mounds and grain-shoal deposits serve as the material basis for reservoir development. Dissolution acts as the key process responsible for the formation of dissolution vugs, and burrows formed by bioturbation further improve their physical properties. (3) The reservoir distribution exhibits distinct stratigraphic and geographic controls. Vertically, the reservoirs are layered within the middle-to-upper part of high-frequency shallowing-upward cycles in transgressive hemicycles of third-order sequences, exhibiting a layered distribution. Laterally, they are predominantly distributed in paleohigh crests, paleohigh flanks, and on depression margins. The conclusion is that the Shenmu-Wuqi area is characterized by relatively high paleotopography and strong hydrodynamic conditions during deposition of the 2nd and 4th member, as well as the 9th and 7th sub-members of the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation. Microbial mounds and grain shoals are distributed in belts and prone to penecontemporaneous dissolution, providing favorable geological conditions for the large-scale development of multi-layer mound-shoal dolomite reservoirs. Therefore, this area represents a favorable zone for reservoir development.

Key words: dissolution, bioturbation, sedimentary microfacies, mound-shoal dolomite reservoir, Ordovician, Ordos Basin

引用格式: 于洲, 范立勇, 罗晓容等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系盐下丘滩体白云岩储层发育特征及分布规律[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10.11743/oggXXXXXX01.

YU Zhou, FAN Liyong, LUO Xiaorong, et al. Development characteristics and distribution patterns of sub-salt mound-shoal dolomite reservoirs of the Ordovician, central-eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10.11743/oggXXXXXX01.

鄂尔多斯盆地是中国陆上第二大克拉通盆地,其下古生界奥陶系广泛发育的海相碳酸盐岩是重要的天然气储集层^[1]。1989年,陕参1井在下古生界奥陶系马(马家沟组)五¹⁺²亚段岩溶风化壳白云岩储层获 $28.30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,实现了奥陶系马家沟组天然气勘探的重大突破^[2]。此后,得益于上古生界煤系烃源岩侧向供烃的优越条件^[3-5],围绕奥陶系顶部马五¹亚段—马五⁵亚段岩溶型白云岩储层的勘探不断取得新发现,勘探区域由靖边地区向靖西和东部米脂地区不断拓展,累计探明天然气储量近万亿立方米^[2]。在岩溶风化壳储层取得勘探突破的同时,中国石油、中国石化及相关科研院所不断深化奥陶系盐下马五⁶亚段—马一段的成藏地质条件研究。研究认为,这些远离岩溶风化壳的深部地层具备规模发育台内丘滩体及其白云岩储层的地质背景,且符合“上、下古生界双源供烃、构造—岩性或岩性圈闭富集天然气”的成藏地质条件^[4,6-9]。自2011年以来,在这一成藏新认识的指导下,桃38、统74、莲92和靳41等井在盆地中、东部奥陶系马五⁶—马五¹⁰亚段相继钻遇优质丘滩体白云岩储层,并测试获日产几十至上百万立方米的高产工业气流;统106和双168等多口钻井在马四段及马二段丘滩体白云岩储层也获得工业气流或低产气流。这证实了盆地奥陶系丘滩体白云岩储层具有良好的勘探潜力,有望成为继岩溶风化壳白云岩储层之后的又一勘探新领域。

截至目前,前人对奥陶系马家沟组全段或部分层段的丘滩体储层已开展了大量研究。例如,付金华和

包洪平等认为马家沟组颗粒滩白云岩储层受颗粒滩相和混合水白云石化作用或渗透—回流白云石化作用控制,有利储层分布于中央古隆起及其周缘,而盆地东部继承性发育的米脂坳陷因水体较深,丘滩体储层不发育^[10-11];周进高等认为该储层由微生物丘和颗粒滩叠加准同生白云石化作用形成,优质白云岩储层沿中央古隆起和横山凸起分布^[12];丁振纯和于洲等认为鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马五⁶亚段—马五¹⁰亚段丘滩体储层发育主要受丘滩相和溶蚀作用控制,有利储层主要沿横山隆起分布^[13-14];苏文杰认为马四段丘滩体白云岩储层主要受微生物丘、颗粒滩和白云石化作用共同控制,主要分布于中央古隆起和神木—志丹低隆起^[15]。

综上所述,前人研究的核心争议主要集中于丘滩体储层发育的主控因素(如白云石化作用类型、溶蚀作用强度)及其有利分布区(如中央古隆起、横山凸起、横山隆起和神木—志丹低隆起等)。造成上述分歧的原因主要有两点:①奥陶纪构造古地理格局及其控制下的丘滩体有利储集相带展布特征认识不一;②控制丘滩体储层发育的关键成岩作用认识存在分歧。为此,本文基于露头、岩心、钻井、微观薄片、物性和地球化学分析等基础资料,结合盆地奥陶纪关键构造期古地理格局研究的新进展^[16-20],对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组不同层段丘滩体白云岩储层特征及成因机制开展系统研究,明确了丘滩体储层发育的主控因素及分布规律,以期为该领域的下一步勘探部署提供理论依据和技术支撑。

1 储层发育背景

鄂尔多斯盆地是在太古宇-古元古界结晶基底之上发育起来的一个多旋回克拉通盆地^[1,21]。在奥陶系马家沟组沉积前,受构造应力作用,盆地演化为“二陆、二隆、二坳”的古构造格局。其中,“二陆”指阿拉善古陆和伊盟古陆,“二隆”指中央古隆起(横山隆起)和离石隆起,“二坳”指西南边缘坳陷和米脂坳陷(图1a)。受中央古隆起阻隔,鄂尔多斯盆地分别属于秦祁和华北两大海域。其中,中、东部地区属于华北海域沉积体系,纵向发育一套蒸发岩与碳酸盐岩互层的岩性组合,

由下至上划分为马一段—马六段共6个岩性段^[22-25]。具体而言,马一段、马三段和马五段为海退沉积,岩性以泥质白云岩、膏质白云岩、硬石膏岩和盐岩为主,局部夹石灰岩和白云岩薄层;马二段和马四段为海侵沉积,岩性以石灰岩和白云岩为主,局部夹少量泥质白云岩、硬石膏岩和盐岩薄层(图1b)。马六段与马二段和马四段虽同为海侵沉积,但因处于马家沟组顶部,受加里东末期岩溶作用影响而被严重剥蚀,现今盆地中、东部残余地层岩性主要为石灰岩。基于层序旋回特征,马五段自下而上被划分为马五¹⁰亚段—马五¹亚段共10个亚段。其中,马五¹⁰亚段、马五⁸亚段、马五⁶亚段以及马五⁴亚段—马五¹亚段形成于相对海退期,沉积

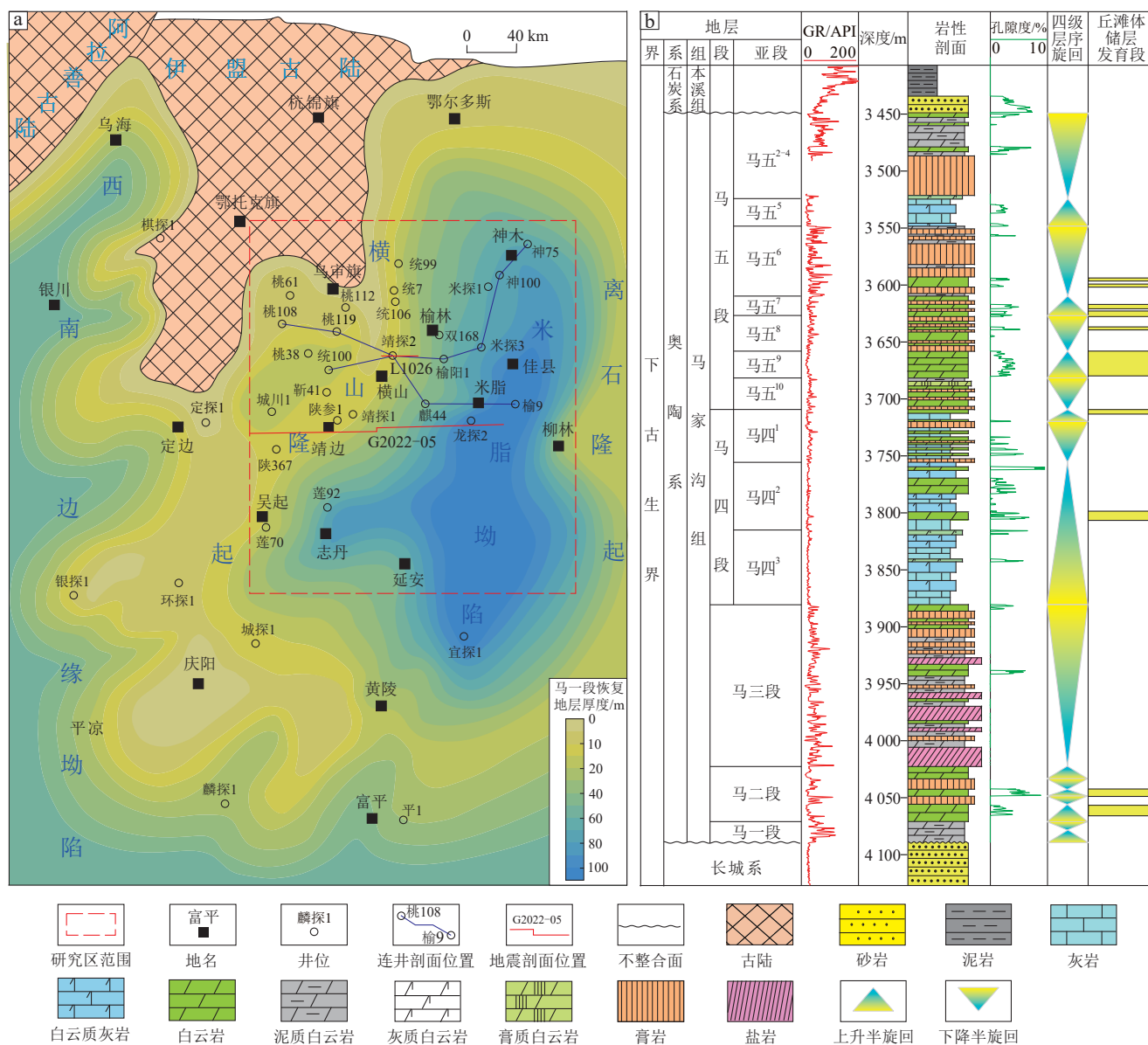


图1 鄂尔多斯盆地前奥陶纪构造古地理格局(a)与靖探1井奥陶系马家沟组储层综合柱状图(b)

Fig. 1 Pre-Ordovician tectonic paleogeographic map of the Ordos Basin (a) and composite stratigraphic column of the Ordovician Majiagou Formation reservoirs in well Jingtian-1 (b)

物以硬石膏岩、盐岩、膏质白云岩和白云岩为主;马五⁹亚段、马五⁷亚段和马五⁵亚段则形成于次级相对海侵期,沉积物以白云岩和灰岩为主。根据烃源岩、储集体及成藏特征的差异,前人以膏盐岩厚度最大、沉积范围最广的马五⁶亚段为界,将马家沟组划分为两大含油气系统:上部(马五¹亚段—马五⁵亚段)为盐上风化壳含气系统,中、下部(马五⁶亚段—马一段)为盐下含气系统^[7]。鉴于马五⁶亚段已提交控制储量且勘探程度相对较高。本次研究选择以奥陶系盐下层系马一段—马五⁷亚段为研究对象。研究工区位于盆地中、东部,北起鄂尔多斯,南到延安,东达柳林,西至吴起,总面积约15 000 km²。

2 丘滩体白云岩储层特征

基于钻井岩心观察和微观薄片鉴定,查明鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组纵向叠置发育多期丘滩体白云岩储层。储层岩性主要包括藻纹层白云岩、砂屑(粉晶)白云岩、鲕粒白云岩以及晶粒化颗粒白云岩。

2.1 岩石学特征

2.1.1 藻纹层白云岩

宏观上具纹层状构造,由暗色纹层和亮色纹层交替组成,纹层多呈近水平状和微波状(图2a)。暗色纹层主要由泥晶白云石组成,岩性致密,孔隙不发育;亮色纹层由细粉晶白云石组成,白云石晶体粒径一般为5~30 μm,晶体间呈点接触或线接触,发育晶间孔(图2b)。

2.1.2 颗粒白云岩

颗粒白云岩主要包括砂屑白云岩、砂屑粉晶白云岩和鲕粒白云岩。宏观上多呈均质块状或溶蚀花斑状,呈灰色—灰褐色(图2c—1)。砂屑白云岩主要由白云石砂屑组成,含少量白云石砾屑,发育粒间孔和粒间溶孔(图2c);砂屑粉晶白云岩由白云石砂屑和粉晶白云石组成,发育粒间孔、粒间溶孔及少量生物钻孔(图2d—i);鲕粒白云岩由白云石鲕粒和细粉晶白云石组成,其中细粉晶白云石常呈等厚环边状分布于白云石鲕粒边缘,或充填于鲕粒之间(图2j—1),发育粒间孔、粒内溶孔和溶蚀孔。

2.1.3 晶粒化颗粒白云岩

晶粒化颗粒白云岩为经历过埋藏白云石化作用改造的砂屑白云岩,主要包括粗粉晶白云岩(图2m,n)和

细晶白云岩(图2o,p)两类,部分白云岩可见残余颗粒结构。粗粉晶白云岩由粗粉晶白云石和少量细晶白云石组成,晶体粒径一般为50~100 μm,晶体间呈点接触或线接触,主要发育晶间孔,而溶蚀孔洞与晶间溶孔欠发育(图2m,n)。细晶白云岩多呈浅灰色,具块状构造,主要由细晶白云石组成,含少量粉晶白云石,晶体粒径一般为100~250 μm,呈点接触或线接触,发育溶蚀孔洞、晶间溶孔和晶间孔,溶蚀孔洞内常见白色鞍状白云石充填(图2o,p)。

2.2 储集空间类型

2.2.1 粒间(溶)孔和粒内溶孔

粒间(溶)孔和粒内溶孔主要发育于砂屑白云岩、砂屑粉晶白云岩和鲕粒白云岩中,主要由白云石砂屑或白云石鲕粒间残留的原生孔隙及其经溶蚀扩大形成的次生孔隙组成(图2c,d,i—1)。原生粒间孔形态多不规则,孔径一般为0.05~0.30 mm,砂屑或鲕粒间常见粉晶白云石胶结物(图2d,j—1),阴极发光下呈红色(图2l);粒间溶孔由粒间孔经溶蚀作用扩大而成,孔径一般为0.05~0.50 mm,部分粒间(溶)孔被硬石膏、细晶白云石和中晶白云石胶结物半充填。

2.2.2 晶间(溶)孔

晶间(溶)孔主要发育于藻纹层白云岩、粗粉晶白云岩和细晶白云岩中,孔隙形态多呈三角形或不规则多边形,孔径介于0.03~0.20 mm(图2a,b,m—p)。晶间孔径随白云石晶粒尺寸的增大而逐渐增加:藻纹层白云岩的晶间孔径一般为0.03~0.05 mm(图2a,b);粗粉晶白云岩的晶间孔径一般为0.05~0.10 mm;细晶白云岩的晶间孔径一般为0.05~0.20 mm。

2.2.3 生物潜穴

生物潜穴主要发育于砂屑粉晶白云岩中(图2e—i)。其横截面多呈椭圆形,长轴长度一般为0.2~2.0 mm,短轴长度一般为0.2~0.8 mm;纵截面呈肠状,长度一般为1.0~3.0 cm。生物潜穴中虽见少量晚期细晶和中晶白云石充填,但仍残留较多孔隙空间,构成有效的储集空间(图2e—i)。

2.2.4 溶蚀孔洞

溶蚀孔洞在砂屑白云岩、鲕粒白云岩和细晶白云岩中均匀发育,孔径一般为2~5 mm。孔洞形态多呈不规则囊状,常见巨晶或鞍状白云石半充填至全充填

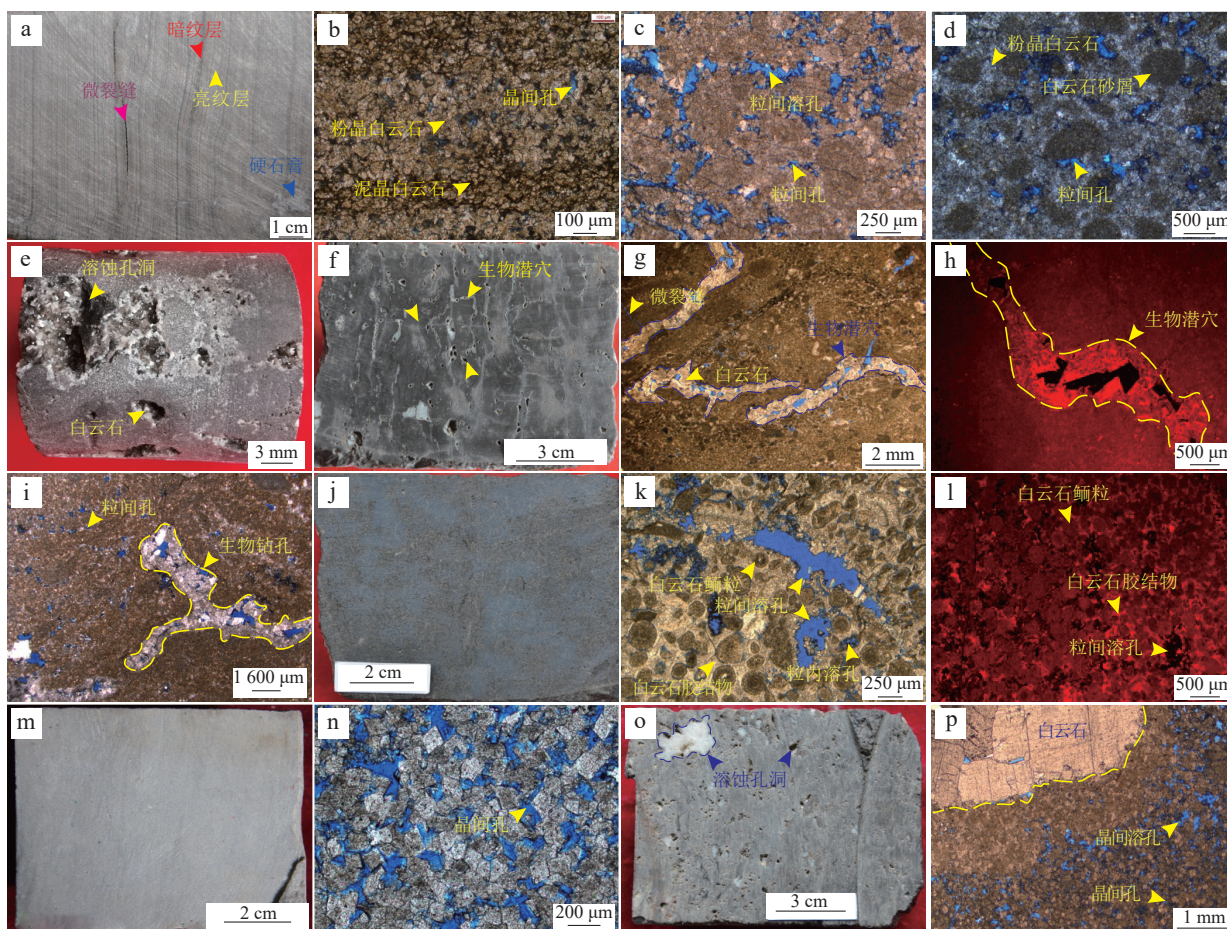


图2 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组盐下丘滩体白云岩储层岩石学特征显微照片

Fig. 2 Images showing petrological characteristics of the Ordovician Majiagou Formation sub-salt mound-shoal dolomite reservoirs in the central-eastern Ordos Basin

a. 榆阳1井,埋深3 121.91 m,马四²亚段,藻纹层白云岩,发育水平微裂缝,岩心;b. 榆阳1井,埋深3 121.91 m,马四²亚段,藻纹层白云岩,亮色粉晶白云石纹层发育晶间孔,铸体薄片,单偏光;c. 陕367井,埋深3 955.30 m,马五⁷亚段,砂屑白云岩,发育粒间孔、粒间溶孔,铸体薄片,单偏光;d. 莲70井,埋深4 149.40 m,马五⁹亚段,砂屑粉晶白云岩,发育晶间(溶)孔,铸体薄片,单偏光;e. 靳41井,埋深3 620.96 m,马五⁷亚段,砂屑粉晶白云岩,发育生物潜穴和少量粒间孔,岩心;f. 靳41井,埋深3 621.72 m,马五⁷亚段,砂屑粉晶白云岩,发育生物潜穴和少量粒间孔,铸体薄片,单偏光;g. 靳41井,埋深3 620.96 m,马五⁷亚段,砂屑粉晶白云岩,发育生物潜穴和少量粒间孔,铸体薄片,单偏光;h. 靳41井,埋深3 620.96 m,马五⁷亚段,砂屑粉晶白云岩,发育生物潜穴和少量粒间孔,围岩发育暗红色光、白云石充填物发亮色光,岩心,阴极发光;i. 统7井,埋深3 161.15 m,马五⁷亚段,粉晶白云石斑块,发育粒间孔和生物潜穴,生物浅穴充填中晶白云石,岩心;j. 靖探1井,埋深4 053.98 m,马二段,鲕粒白云岩,发育粒内溶孔、粒间孔、粒间溶孔和溶蚀孔隙,铸体薄片,单偏光;k. 靖探1井,埋深4 053.98 m,马二段,鲕粒白云岩,发育粒内溶孔、粒间孔、粒间溶孔和溶蚀孔隙,铸体薄片,单偏光;l. 靖探1井,埋深4 053.98 m,马二段,鲕粒白云岩,发育粒内孔、粒间孔和溶蚀孔隙,白云石鲕粒发暗红色光、粒间白云石胶结物发红色光;m. 统99井,埋深3 157.65 m,马五⁹亚段,粗粉晶白云岩,发育晶间孔,岩心;n. 统99井,埋深3 157.65 m,马五⁹亚段,粗粉晶白云岩,发育晶间孔,铸体薄片,单偏光;o. 桃38井,埋深3 630.63 m,马五⁷亚段,细晶白云岩,发育溶蚀孔洞、晶间(溶)孔,溶蚀孔、洞中充填巨晶白云石,岩心;p. 桃38井,埋深3 630.11 m,马五⁷亚段,细晶白云岩,发育溶蚀孔洞、晶间(溶)孔,溶蚀孔、洞中充填巨晶白云石,铸体薄片,单偏光

(图2e,o,p)。其中,细晶白云岩中的溶蚀孔洞多被白云石全充填,且溶蚀孔洞边缘的细晶白云石多呈他形晶,洞中充填巨晶白云石(图2p)。

2.2.5 微裂缝

微裂缝在鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组丘滩体白云岩储层中普遍发育,主要包括水平微裂缝(图2a)与高角度微裂缝(图2g)。这些微裂缝对改善储层渗透

率具有显著的建设性作用。

2.3 储层物性特征

基于18口井206块丘滩体储层样品的物性统计分析,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组盐下丘滩体白云岩储层的孔隙度分布范围为1.02%~13.13%,平均值为5.79%;渗透率分布范围为(0.002 1~172.827 9)×10⁻³ μm²,平均值为2.630 0×10⁻³ μm²。

藻纹层白云岩的孔隙度分布范围为 1.02% ~ 8.94%, 平均值为 3.70%; 渗透率分布范围为 $(0.0061 \sim 0.2378) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.0426 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。频率分布特征显示, 藻纹层白云岩的孔隙度主要分布于 2% ~ 4% (占比 33.3%), 孔隙度大于 4% 的样品占 40.7% (图 3a); 渗透率主要分布在 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (占比 56.0%), 大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品仅占 16.0% (图 3b)。

颗粒白云岩的孔隙度分布范围为 1.27% ~ 12.72%, 平均值为 5.26%; 渗透率分布范围为 $(0.0021 \sim 45.3808) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $4.6505 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。频率分布特征表明, 颗粒白云岩孔隙度主要分布于 2% ~ 4% (占比 34.4%), 孔隙度大于 4% 的样品占 59.4% (图 3a); 渗透率主要分布在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (占比 44.4%), 渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 7.4% (图 3b)。

晶粒化颗粒白云岩的孔隙度分布范围为 2.13% ~ 13.13%, 平均值为 6.30%; 渗透率分布范围为 $(0.0040 \sim 172.8279) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $7.9120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。频率分布特征显示, 晶粒化颗粒白云岩的孔隙度主要分布于 4% ~ 6% (占比 34.9%), 孔隙度大于 4% 的样品占比高达 84.9% (图 3a); 渗透率主要分布在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (占比 45.9%), 渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 15.8% (图 3b)。

综合对比马家沟组盐下丘滩体不同岩性的储层物性可知: 藻纹层白云岩的孔、渗平均值最低 (孔隙度 3.70%、渗透率 $0.0426 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 储集性能相对较差; 颗粒白云岩物性有所改善 (孔隙度平均值为 5.26%、渗透率平均值为 $4.6505 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 储集性相对较好; 而晶粒化颗粒白云岩不仅孔、渗平均值最高 (孔隙度 6.30%、渗透率 $7.9120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 且孔隙度大于

4% 的样品占比高达 84.9%, 渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占绝对主导, 展现出最优的储集性能。因此, 晶粒化颗粒白云岩是该区最有利的储集岩性。

3 储层发育主控因素

储层成因分析表明, 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下丘滩体白云岩储层的发育主要受沉积微相、溶蚀作用、生物扰动作用及晚期埋藏白云石化作用控制。其中, 微生物丘与颗粒滩微相是储层发育的物质基础; 溶蚀作用是改善储层储集物性的关键; 生物扰动作用是砂屑粉晶白云岩形成有效储层空间的重要因素; 晚期埋藏白云石化作用则对优质储层的形成具有控制作用。

3.1 有利微相

沉积微相是海相碳酸盐岩储层形成的物质基础与先决条件, 并控制着优质储层的发育及分布^[10-15, 22]。在马二段、马四段、马五⁹亚段和马五⁷亚段沉积期等相对海侵期, 横山隆起和神木-志丹低隆起等古地貌相对较高地区水动力作用较强, 为微生物丘和颗粒滩的发育提供了有利场所, 主要沉积了叠层石白云岩、砂屑白云岩、砂屑粉晶白云岩和鲕粒白云岩等。研究表明, 马五⁷亚段—马一段的丘滩体以颗粒滩为主, 见少量微生物丘, 主要发育以下 3 种类型: ①台内颗粒滩单独发育 (图 4a), 以砂屑滩与鲕粒滩为主, 单期滩体厚度约为 1 ~ 3 m, 纵向上多期叠置, 累计厚度可达 10 m, 该类型在马五⁷亚段与马五⁹亚段较为发育; ②台内颗粒滩与潮坪相纵向交互发育 (图 4b), 单期滩体厚度约为 1 ~ 3 m, 主要发育于马二段; ③微生物丘与颗粒滩组合发育 (图 4c, d), 纵向上常构成“下部丘滩间海、上部颗粒滩”或“下部丘滩间海、中部颗粒滩与上部微生物丘”

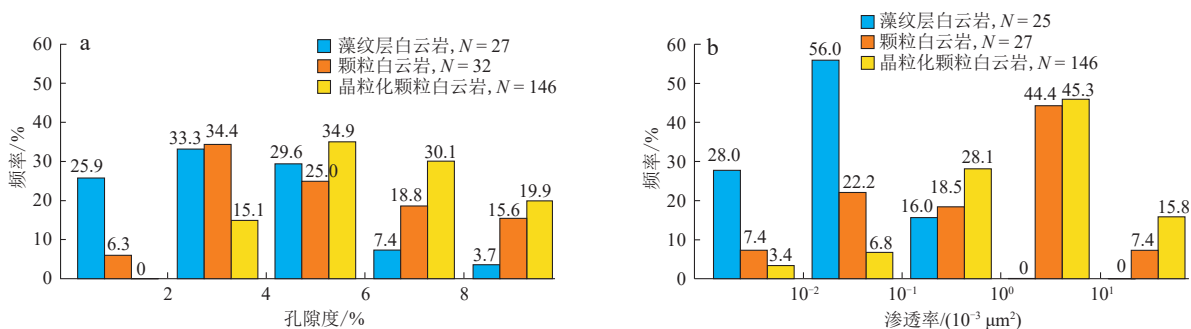


图3 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组盐下丘滩体白云岩储层物性特征

Fig. 3 Petrophysical characteristics of the Ordovician Majiagou Formation sub-salt mound-shoal dolomite reservoirs in the central-eastern Ordos Basin

a. 孔隙度频率分布直方图; b. 渗透率频率分布直方图

(N为样品个数。)

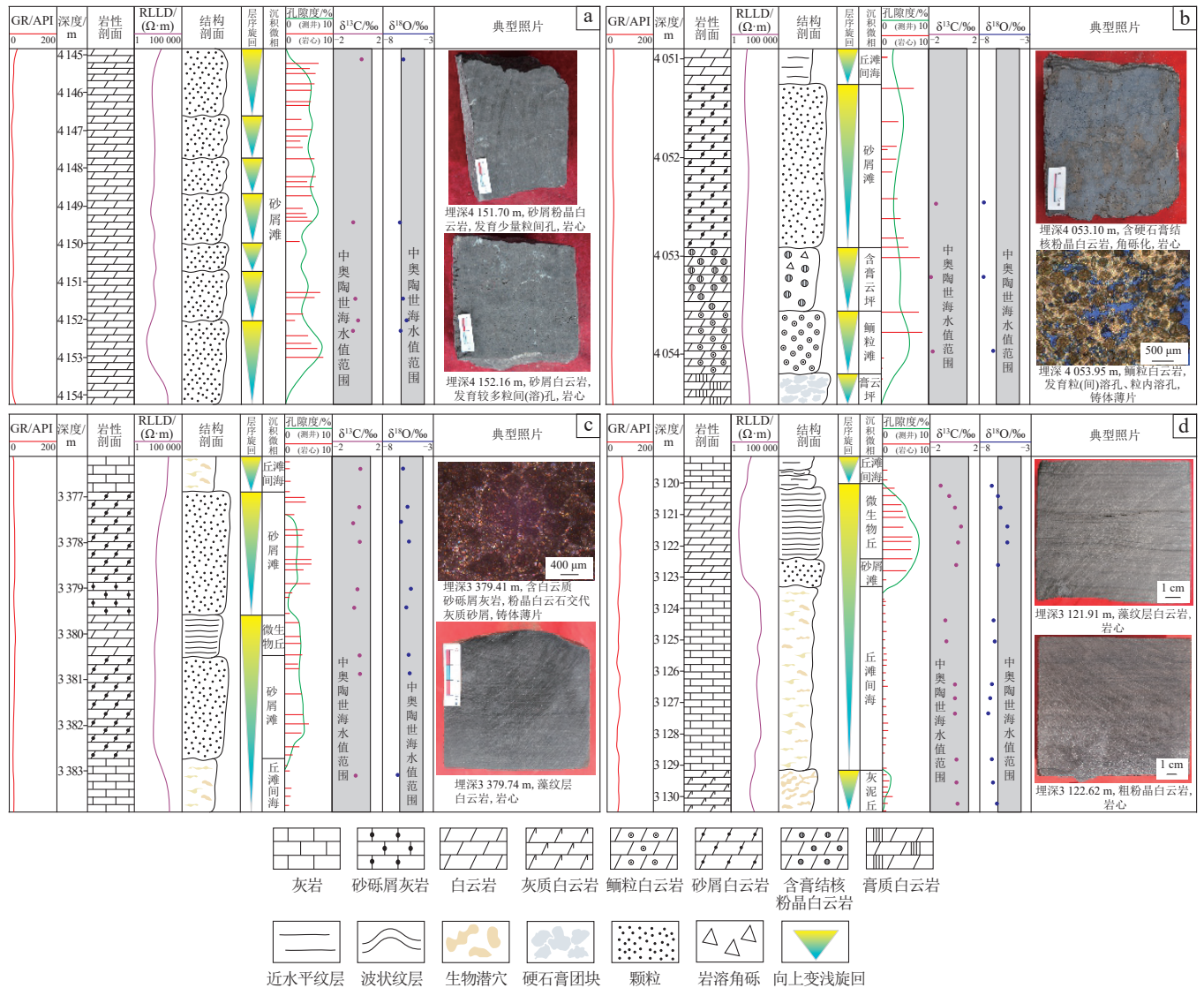


图4 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组盐下典型向上变浅高频沉积旋回及储层发育特征

Fig. 4 Typical shallowing-upward high-frequency cycles and reservoir development characteristics of the sub-salt interval of the Ordovician

Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin

a. 莲70井, 马五⁹亚段; b. 靖探1井, 马二段; c. 靖探2井, 马四段; d. 榆阳1井, 马四段

的向上变浅高频旋回组合。其中,微生物丘厚度一般为1~2 m,砂屑滩厚度一般为0.5~3.0 m。该类丘滩复合体组合在盆地东部马四²亚段与马四³亚段分界面附近普遍发育(图4c,d)。相比之下,米脂坳陷、桃利庙坳陷和柳林坳陷等地势相对较低,水动力较弱,主要发育局限潟湖相,沉积的灰质粉晶白云岩、豹斑灰岩和泥晶灰岩等沉积物岩性致密,孔隙不发育。前人研究表明,在沉积过程中,鲕粒或砂屑的机械堆积可使颗粒间保留40%~60%的原生孔隙;而微生物黏结形成的凝块,再由凝块颗粒造架可形成较多孔隙^[12]。因此,这些由颗粒堆积或微生物黏结过程中产生的原生孔隙,构成了丘滩体白云岩储层的先存孔隙,为地质历史时期储层孔隙的形成及演化奠定了基础条件。

3.2 溶蚀作用

研究区奥陶系盐下丘滩体白云岩储层主要经历了准同生溶蚀作用和埋藏溶蚀作用,两者有效改善了储层的储集性能。准同生溶蚀作用受古地貌与海平面变化控制。伴随海平面下降,发育于向上变浅旋回中、上部的颗粒滩或微生物丘易于发育暴露溶蚀作用,导致靠近高频层序界面(短暂暴露间断面)的丘滩体储层易于发育溶蚀孔洞和粒间(溶)孔,孔隙度和渗透率显著提高,且白云岩的氧同位素值较同期海水偏负(图4a,b)。而未经准同生岩溶改造的丘滩体溶蚀孔隙不发育,储集空间以基质孔隙为主,其氧同位素值位于同期海水范围内(图4c,d)。准同生溶蚀形成的孔隙具有

典型的组构选择性,主要表现为粒间胶结物或颗粒被溶蚀,进而形成粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔(图2k,图4b);埋藏溶蚀作用与断裂活动和深部热液密切相关。该类溶蚀不具明显的组构选择性,深部热液沿断裂运移并侵入早期储集体进行溶蚀改造,形成溶蚀孔洞(图2e,o)。由于发生在埋藏封闭环境中,该类溶蚀作用在形成孔洞的同时,常伴随着晚期粗晶、巨晶和鞍状白云石等矿物的充填(图2e—i,o,p)。

3.3 生物扰动作用

生物扰动作用是指由三叶虫等造迹生物在沉积物中活动而产生的成岩现象,在鄂尔多斯盆地、塔里木盆地以及北美、瑞典等国内外海相盆地奥陶系地层中普遍发育^[26-31]。在鄂尔多斯盆地,生物扰动作用主要发育于盆地东部米脂坳陷奥陶系马二段、马四段、马五⁹亚段和马五⁷亚段的白云质潟湖和灰质潟湖相带中,主要赋存于斑状白云岩和云斑灰岩等低能环境沉积物内^[15,17,26]。近年来的钻探揭示,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组发育一类以生物潜穴为主要储集空间、且具有良好储集性能的砂屑粉晶白云岩(图2e—i)。钻井岩心和微观薄片观察表明,此类白云岩主要由粉晶白云石基质和少量白云石颗粒组成。由于颗粒含量较砂屑白云岩和鲕粒白云岩含量少,岩石多呈粉晶基质支撑结构,导致原生粒间孔隙不发育或欠发育,仅在颗粒局部富集区可见少量粒间孔隙。沉积相分析认为,砂屑粉晶白云岩主要发育于颗粒滩边缘向滩间海过渡的低能相带。尽管其粒间孔隙不发育或欠发育,但这种弱水动力环境为底栖造迹生物繁衍与活动提供了适宜条件。迫于大型捕食动物的生存压力,这些造迹生物在沉积物中爬行、觅食或居住,从而形成各式各样的生物潜穴^[31]。这些生物潜穴在空间上呈树枝状分布,潜穴覆盖或破坏的沉积物百分比一般为6%~30%,根据Taylor和Goldring建立生物扰动指数(Bioturbation Index, BI)六级分类方案^[32],可判识该区域砂屑粉晶白云岩的BI值为2级。在后期埋藏成岩过程中,部分潜穴被晚期细晶和中晶白云石充填,但整体充填程度较低,保留了较多的残留孔隙。这些未被充填的生物潜穴构成了砂屑粉晶白云岩最为重要的有效储集空间(图2f—i)。

3.4 埋藏白云石化作用

岩石学与地球化学特征表明,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组丘滩体白云岩储层主要经历了2期白云石化作用。第一期为准同生白云石化作用,发生时间约

为476~436 Ma^[26,33]。该期白云石化作用形成的白云岩仍保留了原始沉积结构,如藻纹层白云岩、鲕粒白云岩和砂屑白云岩,其储集空间的发育受原始组构控制。第二期为埋藏白云石化作用,发生时间约为350~342 Ma^[26]。岩石学和物性分析结果表明(图3),研究区晶粒化颗粒白云岩的储集物性明显优于保留原始沉积结构的藻纹层白云岩和颗粒白云岩。研究表明,晚期埋藏白云石化作用有助于改善孔喉结构,促使岩石结构向晶粒结构转化,接触关系由线接触变为点接触,从而有效提升了储层的储集性能和渗流能力。由此可见,晚期埋藏白云石化作用具有控制优质储层发育的作用。

4 储层分布规律

国内外勘探实践证实,丘滩体白云岩储层主要分布于古地貌高部位,主要原因包括:①古地貌高部位水动力作用强,利于丘滩体沉积,为储层发育奠定了物质基础^[19-20,34-35];②近地表的颗粒白云岩在蒸发海水回流过程中易于优先发生白云石化^[19,23],且未白云石化的浅海海侵泥岩或粒泥岩层可作为隔挡层限制流体向下流动^[36];③古地貌高地的丘滩体易受海平面变化影响而发生准同生溶蚀,有利于溶蚀孔隙的形成^[12,15,17]。研究区储层成因分析表明,鄂尔多斯盆地奥陶系盐下丘滩体白云岩储层发育同样与丘滩体微相、溶蚀作用和白云石化作用相关。其中,丘滩体微相控制“有无”储层发育及分布,溶蚀作用和埋藏白云石化作用具有“控优”作用。基于此,奥陶系盐下丘滩体储层的分布预测可转化为对丘滩体微相的预测。与丘滩体多分布于古地貌高部位的普遍规律相比,鄂尔多斯盆地奥陶系盐下丘滩体白云岩储层并不完全发育于古地貌高部位,其分布受层序旋回和构造古地理格局的共同控制,具有显著的“层控性”和“区位性”。

4.1 层序旋回控制丘滩体白云岩储层纵向分布

基于前人对马家沟组层序地层的划分成果^[37],编制了过桃108井、桃119井、靖探2井、麒44井和榆9井的东西向层序地层对比剖面(图5)。结果显示,丘滩体白云岩储层在纵向上主要发育于四级层序的海侵半旋回中(如马二段、马四段、马五⁹亚段和马五⁷亚段),具有明显的“层控性”。分析表明,丘滩体储层“层控性”分布特征与海平面变化引起的沉积环境演变密切相关。海平面的升降导致古隆起被淹没或暴露于地表,进而引起台地内部水体深度、盐度和水动力条件的

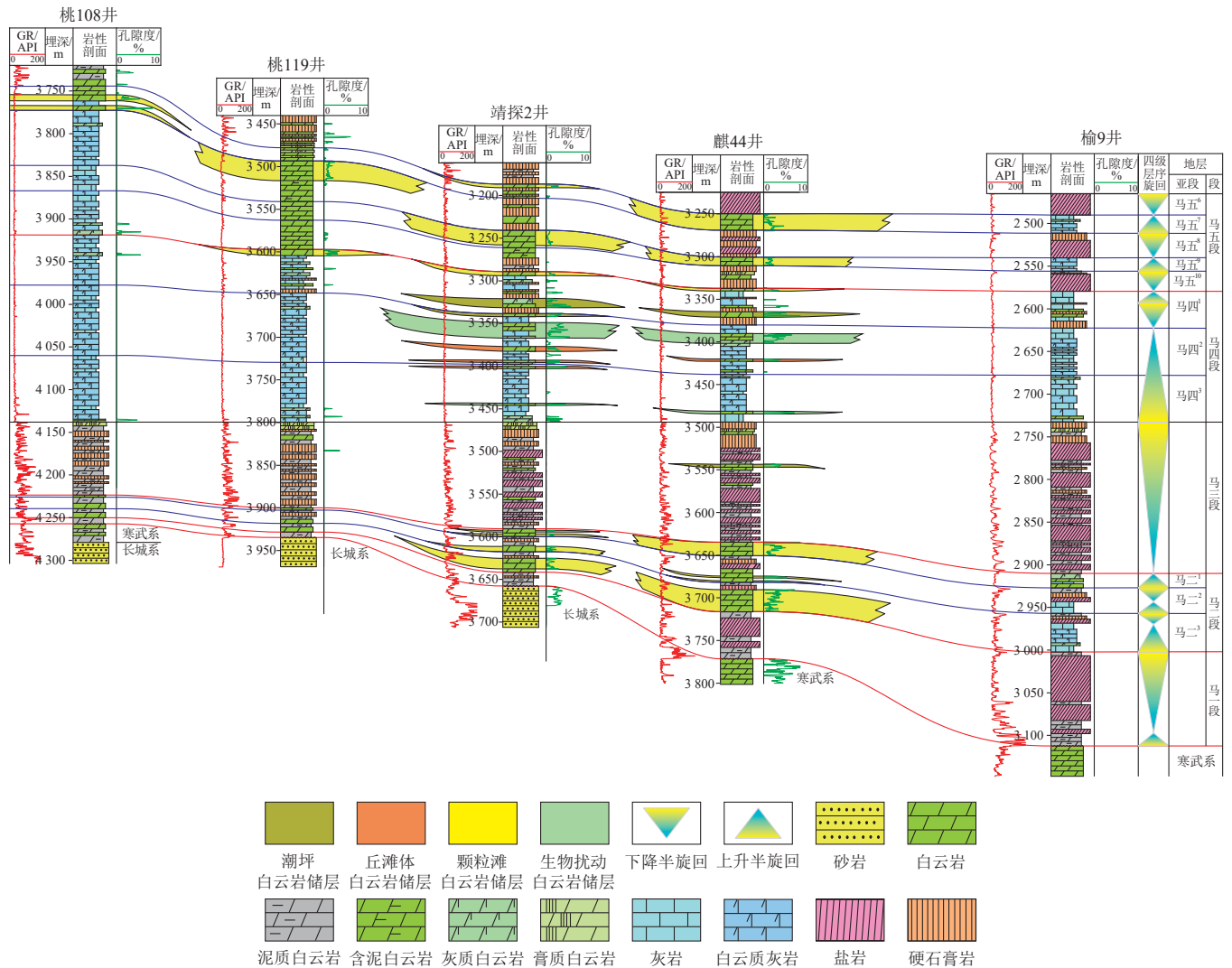


图5 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组丘滩体白云岩储层连井对比剖面(过桃108井—桃119井—靖探2井—麒44井—榆9井)
Fig. 5 Cross-well correlation section of the Majiagou Formation mound-shoal dolomite reservoirs, central-eastern Ordos Basin (across wells Tao-108, Tao-119, Jingtan-2, Qi-44, and Yu-9)
(剖面位置见图1a)

变化,最终控制了不同岩石类型的沉积。在海侵期,随着水体加深,盆地周缘古隆起被淹没,盆地中、东部与华北广海及祁连海域重新连通;此时海水循环通畅,水动力增强,有利于微生物丘和颗粒滩的堆积。而在海退期,海平面快速下降致使水体变浅,周缘古隆起出露地表,盆地东部与广海隔绝,海水循环受阻,易形成相对封闭的沉积环境。加之奥陶纪时期鄂尔多斯盆地位于赤道附近,气候干旱炎热,蒸发作用强烈(蒸发量大于补给量),易于沉积硬石膏岩、盐岩和泥质白云岩,不利于规模丘滩体储层的发育。此外,对海侵半旋回内部的向上变浅高频旋回进行剖析发现,丘滩体白云岩储层(尤其是优质储层)在纵向上主要发育于高频旋回的中、上部(图4,图6)。这一分布特征与相对海平面下降引起的沉积相变及伴随的准同生溶蚀作用密切相

关。在单个高频向上变浅旋回中,自下而上常呈现出泥晶灰岩、白云质泥晶灰岩、灰质粉晶白云岩、砂屑(鲕粒)白云岩至微生物白云岩的岩性组合序列。旋回顶部易发生准同生暴露溶蚀,孔隙发育;而下部沉积物岩性致密,孔隙不发育。综上所述,层序旋回控制了储层的纵向旋回性分布,使得鄂尔多斯盆地奥陶系盐下丘滩体白云岩储层表现出显著的“层控性”特征(图5,图6)。

4.2 构造古地理格局和海平面变化对丘滩体白云岩储层区分布的控制作用

综合连井剖面(图5,图6)、地震骨架剖面(图7a)、三维地震资料(图7b)及前人研究成果^[16-20]表明,鄂尔多斯盆地中、东部在奥陶纪马一段—马五⁷亚段沉积期,经历了“西高东低”与“东高西低”的构造古地理格

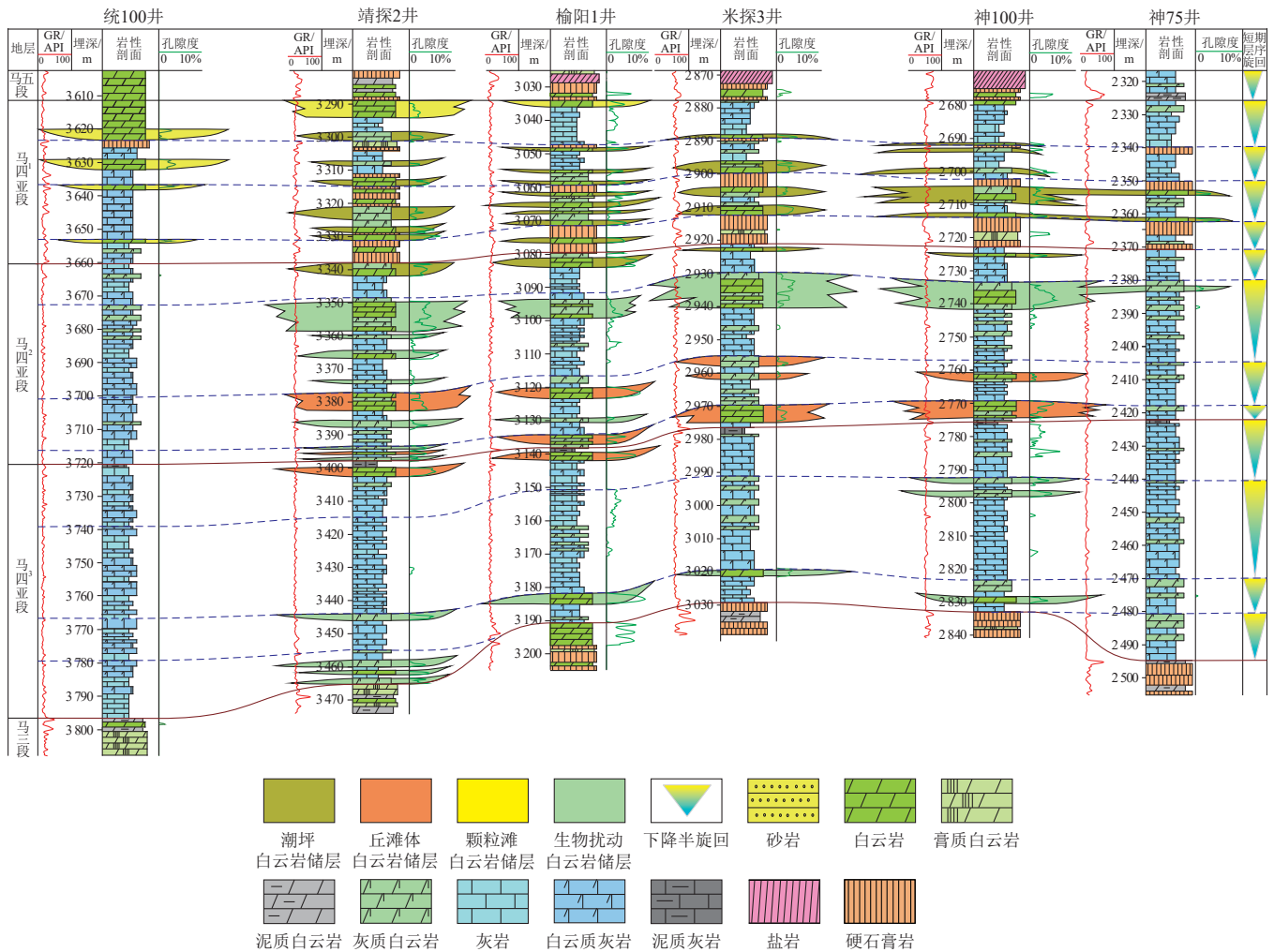


图6 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马四段白云岩储层连井对比剖面(过统100井—靖探2井—榆阳1井—米探3井—神100井—神75井)

Fig. 6 Cross-well correlation section of dolomite reservoirs in the 4th member of the Ordovician Majiagou Formation (Ma 4 Member), central-eastern Ordos Basin (across wells Tong-100, Jingtan-2, Yuyang-1, Mitian-3, Shen-100, and Shen-75) (剖面位置见图 1a)

局反转(图 1a,图 8)。具体而言:马一段—马三段沉积期,研究区呈现“西高东低”格局^[16-17],自西向东发育横山隆起与米脂坳陷(图 1a,图 7),沉积地层厚度自隆起向坳陷逐渐增厚(图 5);至马四段沉积期海侵阶段,盆地中、东部构造格局发生反转^[19-20],转变为“东高西低”,自西向东依次演变为桃利庙坳陷、神木—志丹低隆起与柳林坳陷(图 5,图 7a),其隆起沉积响应特征与同为海侵期的马二段沉积期较为相似;进入马五¹⁰亚段—马五⁷亚段沉积期,研究区进一步演化为“两坳夹一隆”的古地理格局^[14,18],自西向东依次为桃利庙坳陷、横山隆起与米脂坳陷(图 5,图 7a),且受区域挤压作用影响,横山隆起逐渐向西迁移(图 5)。这种频繁的隆—坳转换与海平面升、降相耦合,控制了台内微地貌高地的发育,进而决定了丘滩体白云岩储层的空间展布与有利区位。

综合储层发育特征(图 4—图 6)与构造古地理格局(图 8)研究表明,构造古地理演化与海平面升降耦合控制了丘滩体白云岩储层的空间展布,主要呈现两种分布模式:①“古地貌高地(隆起高部位)”发育模式,以马四段和马五⁹亚段沉积期为代表。以马四段沉积期为例,该期处于马家沟组沉积期最大海侵期,古隆起高部位水体相对较浅且水动力较强,为丘滩体发育提供了有利条件。因此,丘滩体白云岩储层主要沿神木—志丹低隆起高部位呈带状分布(图 5,图 9a),并向坳陷区逐渐减薄尖灭(图 5,图 9b)。②“隆起翼部—坳陷边缘过渡带”发育模式,以马二段(图 1a)和马五⁷亚段沉积期(图 9c,d)为代表。以马五⁷亚段沉积期为例,该期属于夹在蒸发岩层间的短期相对海侵沉积,海平面上升幅度较马四段沉积期小,水体相对较浅。这导致横山隆起高部位处于强蒸发环境,主要发育膏云坪;而隆

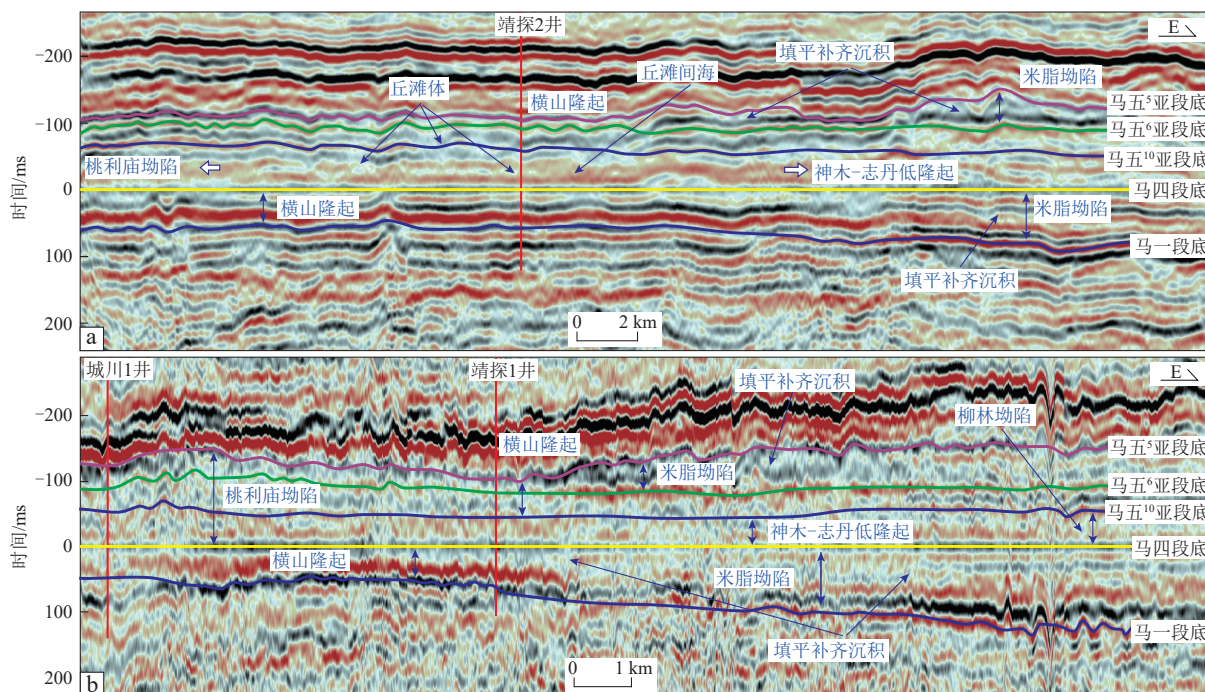


图7 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组东西向地震剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 7 East-west seismic section of the Ordovician Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin (see Fig. 1a for the section location)

a. 横山北 L1026 测线; b. G2022-05 测线

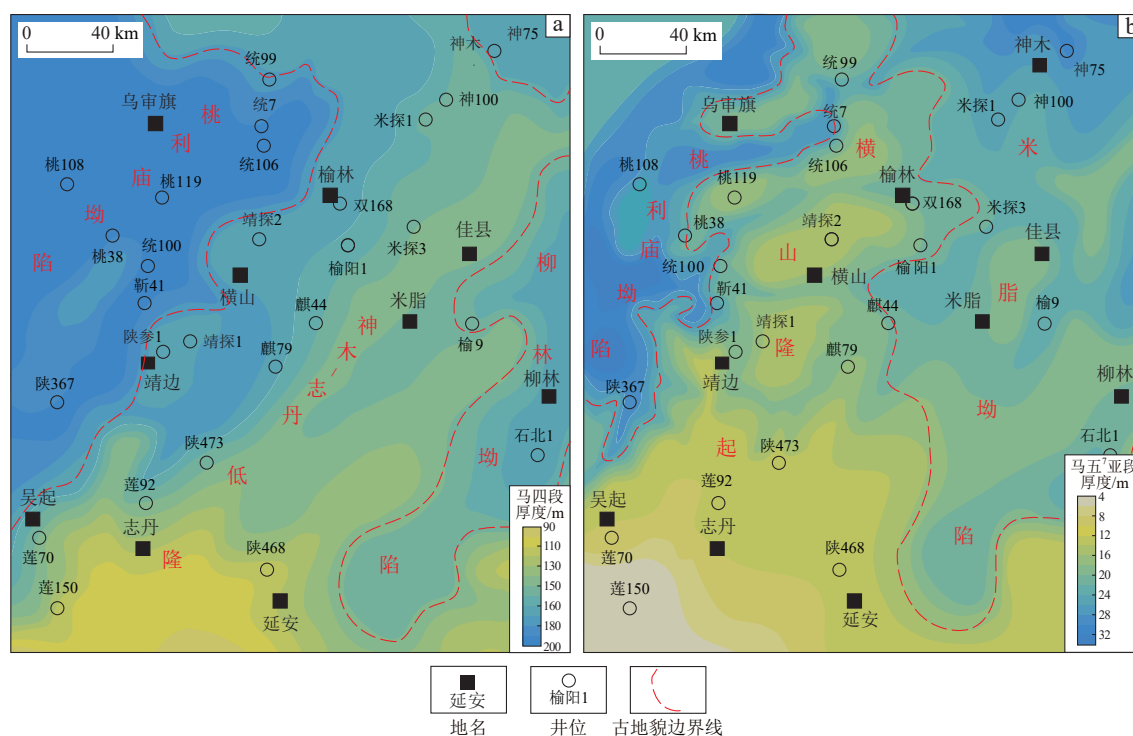


图8 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马四段(a)和马五⁷亚段(b)沉积期构造古地理格局

Fig. 8 Tectonic paleogeographic maps of the Ma 4 Member (a) and Ma 5⁷ Submember (b) of the Ordovician Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin

起两侧(翼部)水动力相对较强,更易发育颗粒滩(图9c)。因此,颗粒滩白云岩储层主要沿横山隆起低部位(翼部)分布,并向隆起高部位逐渐减薄(图5,图9d),

整体受控于隆起侧翼与坳陷边缘的过渡带(图9d)。相比之下,在上述两种模式中,坳陷中心或古地貌低部位水体相对较深、水动力弱且盐度正常,主要发育低能滩

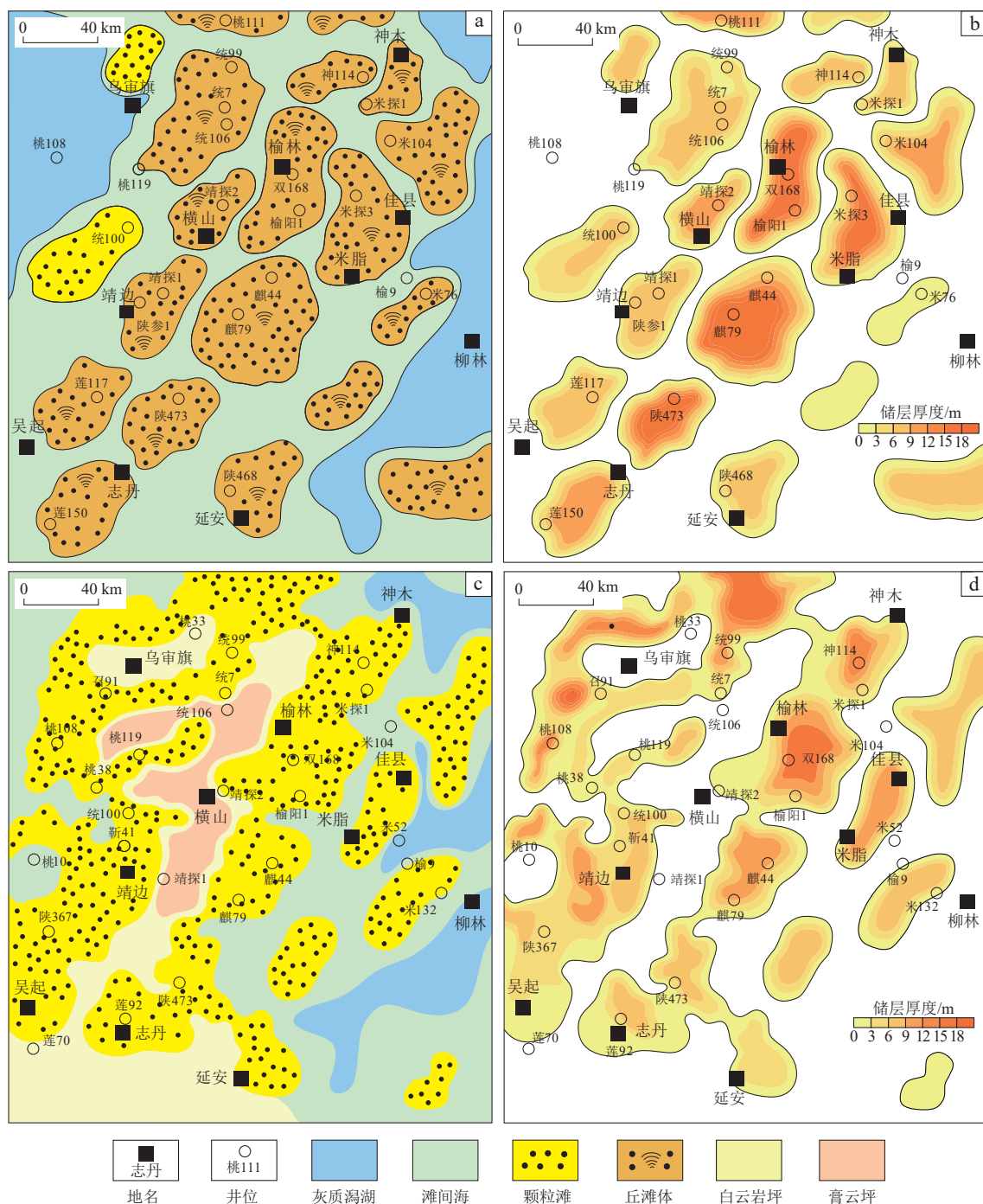


图9 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马四段丘滩体(a)和丘滩体白云岩(b)以及马五⁷亚段颗粒滩(c)和颗粒滩白云岩(b)储层平面分布
Fig. 9 Distribution maps of mound-shoal complexes (a) and mound-shoal dolomite reservoirs (b) in the Ma 4 Member, and grain shoals (c) and grain-shoal dolomite reservoirs (d) in the Ma 5⁷ Submember, central-eastern Ordos Basin

间海和灰质潟湖沉积。其岩性以云斑灰岩、泥晶灰岩和泥质灰岩为主,储集性能较差,多构成非储层或隔夹层(图4c,d,图5,图6)。综合构造古地理背景与储层成因机制可知,神木—吴起地区在奥陶纪马二段、马四段、马五⁹亚段及马五⁷亚段沉积期,长期处于古地貌相对高部位,水动力条件优越。该区域微生物丘与颗粒滩呈带状规模发育,且易于遭受准同生期溶蚀改造,具备多层系

丘滩体白云岩储层叠合发育的地质条件,是研究区下一步勘探的有利储层分布区。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组丘滩体白云岩储层岩性以藻纹层白云岩、砂屑(粉晶)白云岩、鲕粒白

云岩和晶粒化颗粒白云岩为主。储集空间类型多样,主要包括溶蚀孔洞、晶间(溶)孔、粒间(溶)孔和微裂缝。储层物性整体较好,孔隙度介于1.02%~13.13%,平均孔隙度为5.79%。

2) 丘滩体白云岩储层的发育主要受沉积微相、溶蚀作用和生物扰动作用共同控制。其中,微生物丘和颗粒滩等有利微相为储层发育奠定了物质基础;后期溶蚀作用促进了溶蚀孔洞的规模发育,是形成优质储层的关键因素;生物扰动作用多发育于颗粒滩边缘,有效改善了低能颗粒滩中基质孔隙不发育、欠发育的状况,是此类储层孔隙发育的关键。

3) 丘滩体白云岩储层分布受控于构造古地理格局和海平面升降变化。纵向上,储层具有显著的“层控性”,主要发育于四级层序的海侵半旋回及其内部高频旋回的中、上部,集中分布于马二段、马四段、马五⁹亚段和马五⁷亚段。平面上,分布于古隆起高部位、隆起带和坳陷边缘过渡带,具有明显的区位性,如马四段和马五⁹亚段分布于古隆起高部位,而马二段和马五⁷亚段分布于隆起带和坳陷边缘过渡带。

参 考 文 献

- [1] 付金华,孙六一,冯强汉,等. 鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2018.
FU Jinhua, SUN Liuyi, FENG Qianghan, et al. Petroleum geology and exploration of Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [2] 张才利,刘新社,杨亚娟,等. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 253-263.
ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42 (3) : 253-263.
- [3] 牛小兵,喻健,徐旺林,等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 33-50.
NIU Xiaobing, YU Jian, XU Wanglin, et al. Reservoir-forming geological conditions and exploration directions of Upper Paleozoic coal-rock gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 33-50.
- [4] 于洲,范立勇,任军峰,等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系天然气成藏模式及有利勘探区[J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 44-57.
YU Zhou, FAN Liyong, REN Junfeng, et al. Natural gas accumulation models and favorable exploration areas of the Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 44-57.
- [5] 杨华,包洪平,马占荣. 侧向供烃成藏—鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 19-26.
YANG Hua, BAO Hongping, MA Zhanrong. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: A new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 19-26.
- [6] 杨华,刘新社,张道锋. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 1-12.
YANG Hua, LIU Xinshe, ZHANG Daofeng. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 1-12.
- [7] 任军峰,师平平,张涛,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下含气系统及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(3): 435-448.
REN Junfeng, SHI Pingping, ZHANG Tao, et al. Characteristics and exploration potential of Ordovician subsalt gas-bearing system in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(3) : 435-448.
- [8] 付金华,于洲,李程善,等. 鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 17-27.
FU Jinhua, YU Zhou, LI Chengshan, et al. New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 17-27.
- [9] 万俊雨,朱建辉,姚素平,等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组成烃生物及烃源岩地球生物学评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 393-405.
WAN Junyu, ZHU Jianhui, YAO Suping, et al. Geobiological evaluation of hydrocarbon-generating organisms and source rocks in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 393-405.
- [10] 付金华,白海峰,孙六一,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 110-117.
FU Jinhua, BAI Haifeng, SUN Liuyi, et al. Types and characteristics of the Ordovician carbonate reservoirs in Ordos Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 110-117.
- [11] 包洪平,杨帆,蔡郑红,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 32-45.
BAO Hongping, YANG Fan, CAI Zhenghong, et al. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 32-45.
- [12] 周进高,付金华,于洲,等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要

- 储层类型及其形成机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 20-30.
- ZHOU Jingao, FU Jinhua, YU Zhou, et al. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 20-30.
- [13] 丁振纯, 高星, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层特征、成因及分布[J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 16-24.
- DING Zhenchun, GAO Xing, DONG Guodong, et al. Characteristics, genesis and distribution of the Ordovician pre-salt dolomite reservoirs in Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(1): 16-24.
- [14] 于洲, 丁振纯, 王利花, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1213-1224.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WANG Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1213-1224.
- [15] 苏文杰, 鲁慧丽, 乔德民, 等. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 125-135.
- SU Wenjie, LU Huili, QIAO Demin, et al. Characteristics and main controlling factors of dolomite reservoir in the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation in the Northeast of Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2024, 29(2): 125-135.
- [16] 钟寿康, 谭秀成, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组一段一三段构造沉积演化及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 1040-1052.
- ZHONG Shoukang, TAN Xiucheng, WEI Liubin, et al. Tectono-sedimentary evolution and oil-gas geological significance of first to third member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 1040-1052.
- [17] 于洲, 罗晓容, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组二段白云岩储层成因及发育模式[J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3552-3566.
- YU Zhou, LUO Xiaorong, WEI Liubin, et al. Genetic mechanism and development model of dolostone reservoirs of the second member of the Ordovician Majiagou Formation in the central-eastern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(12): 3552-3566.
- [18] 魏柳斌, 任军峰, 王前平, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶纪志丹-横山古隆起厘定及勘探意义[J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3619-3629.
- WEI Liubin, REN Junfeng, WANG Qianping, et al. Distribution, evolution and gas exploration significance of Zhidan-Hengshan paleo-uplift in Ordos basin, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(12): 3619-3629.
- [19] 于洲, 周进高, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组四段神木-志丹低古隆起的发现及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1383-1399.
- YU Zhou, ZHOU Jingao, LUO Xiaorong, et al. Discovery and implications for hydrocarbon exploration of the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift in the 4th member of the Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1383-1399.
- [20] 于洲, 王维斌, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段构造-岩相古地理新认识及勘探意义[J]. 地质学报, 2023, 97(8): 2645-2658.
- YU Zhou, WANG Weibin, WEI Liubin, et al. Tectonic paleogeographic framework of the fourth Member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(8): 2645-2658.
- [21] 包洪平, 邵东波, 郝松立, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 33-43.
- BAO Hongping, SHAO Dongbo, HAO Songli, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 33-43.
- [22] 牛小兵, 吴东旭, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中-下组合岩相古地理演化及储层分布规律[J]. 地质科学, 2024, 59(3): 625-636.
- NIU Xiaobing, WU Dongxu, LIU Xinshe, et al. Paleogeographic evolution of the middle and lower assemblages of the Majiagou Formation in the Ordos Basin and the pattern of reservoir distribution[J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(3): 625-636.
- [23] 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.
- [24] 郭彦如, 赵振宇, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 95-109.
- GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, FU Jinhua, et al. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 95-109.
- [25] 冯增昭, 鲍志东, 张永生, 等. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-142.
- FENG Zengzhao, BAO Zhidong, ZHANG Yongsheng, et al.

- Stratigraphy petrology lithofacies paleogeography of Ordovician in Ordos[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-142.
- [26] 于洲, 罗晓容, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段优质白云岩储层发育特征及成因机制[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 30-39.
- YU Zhou, LUO Xiaorong, ZHOU Jingao, et al. Development characteristics and genetic mechanisms of high-quality dolomite reservoirs in the 4th member of Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 30-39.
- [27] NIU Yongbin, CHENG Mengyuan, ZHANG Lijun, et al. Bioturbation enhanced petrophysical properties in the Ordovician carbonate reservoir of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 11(1): 31-51.
- [28] 牛永斌, 赵佳如, 钟建华, 等. 基于神经网络模型的生物扰动碳酸盐岩储集层识别与孔隙度预测——以塔里木盆地塔河油田奥陶系生物扰动碳酸盐岩储集层为例[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1898-1909.
- NIU Yongbin, ZHAO Jiaru, ZHONG Jianhua, et al. Identification of the bioturbated carbonate reservoir and their porosity prediction based on conventional well logging data using artificial neural networks——Take the Ordovician bioturbated carbonate reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin, as an example [J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1898-1909.
- [29] NIU Yongbin, MARSHALL J D, SONG Huibo, et al. Ichnofabrics and their roles in the modification of petrophysical properties: A case study of the Ordovician Majiagou Formation, northwest Henan Province, China [J]. Sedimentary Geology, 2020, 409: 105773.
- [30] JIN Jisuo, HARPER D A T, RASMUSSEN J A, et al. Late ordovician massive-bedded thalassinoides ichnofacies along the palaeoequator of laurentia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 367/368: 73-88.
- [31] CHERNS L, WHEELLEY J R, KARIS L. Tunneling trilobites: Habitual infaunalism in an Ordovician carbonate seafloor [J]. Geology, 2006, 34(8): 657-660.
- [32] TAYLOR A M, GOLDRING R. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric [J]. Journal of the Geological Society, 1993, 150(1): 141-148.
- [33] 周进高, 于洲, 吴东旭, 等. 基于激光 U-Pb 定年技术的白云岩储集层形成过程恢复——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 285-295.
- ZHOU Jingao, YU Zhou, WU Dongxu, et al. Restoration of formation processes of dolomite reservoirs based on laser U-Pb dating: A case study of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 285-295.
- [34] 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 884-897.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, CHEN Zhiyong, et al. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle-upper Yangtze region, South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47 (5) : 884-897.
- [35] 李斐, 陈平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起演化特征及其油气控制作用[J]. 天然气工业, 2025, 45(10): 209-219.
- LI Fei, CHEN Ping, REN Junfeng, et al. Evolution characteristics and hydrocarbon controlling action of Wushenqi palaeo-uplift in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(10): 209-219.
- [36] GAIROLA G S, THIELE S T, KHANNA P, et al. Near surface generation, burial recrystallization, and structural overprinting of carbonate platform dolomites [J]. Scientific Reports, 2026, 16 (1): 5029.
- [37] 黄正良, 武春英, 马占荣, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积层序及其对储层发育的控制作用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(5): 20-29.
- HUANG Zhengliang, WU Chunying, MA Zhanrong, et al. Sedimentary sequence of Ordovician Majiagou Formation in central and eastern part of Ordos Basin and its control over reservoir development [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20 (5) : 20-29.

(编辑 刘格云)