

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

于洲^{1,2},丁振纯^{1,2},王利花³,张道峰⁴,罗超⁵,魏源⁴,郭玮⁴,魏柳斌⁴

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023; 3. 中国石油 长庆油田分公司 第五采气厂, 内蒙古自治区 鄂尔多斯 017300; 4. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 5. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331)

摘要: 近期勘探实践表明, 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩具有良好的天然气勘探开发潜力。为此, 综合岩心观察、薄片鉴定、物性分析及地球化学特征等资料, 对其岩石学、储集空间和孔渗特征等开展了系统研究。结果表明, 鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐下储集层为孔隙型白云岩储层, 纵向上分布在马五6亚段、马五7亚段和马五9亚段。马五6亚段储集层岩性主要为颗粒白云岩和斑状粉晶白云岩, 马五7亚段和马五9亚段储集层岩性主要为颗粒白云岩和粉-细晶白云岩。三个储集层段储集空间均以溶蚀孔洞为主, 次为残余粒间孔、晶间溶孔、晶间孔和微裂缝, 平均孔隙度分别为5.84%、6.81%和7.03%。沉积古地貌、海平面变化和准同生期大气淡水溶蚀作用等因素共同控制膏盐下白云岩储集层的发育与分布。研究认为位于盐岩边界线外侧的中央古隆起带和榆林-横山隆起带地势相对较高, 颗粒难沉积厚度大, 在准同生期和浅埋藏期易于发生大气淡水溶蚀作用, 其内部赋存的孔隙不易被膏盐岩充填, 是盆地内膏盐下有利白云岩储集层的发育区。

关键词: 海平面; 溶蚀作用; 古地貌; 膏盐; 白云岩; 马家沟组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

Yu Zhou^{1,2}, Ding Zhenchun^{1,2}, Wang Lihua³, Zhang Daofeng⁴, Luo Chao⁵, Wei Yuan⁴, Guo Wei⁴, Wei Liubin⁴

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. No. 5 Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Erdos, Inner Mongolia 017300, China; 4. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The dolomite underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin proves to be of great gas potential by latest exploration practice. Thus we conducted systematic study on its petrological features, reservoir space, porosity and permeability by core observation, thin section identification, physical property analysis and geochemical analysis. The results show that the reservoirs underlying the gypsum-salt layer in the Ordovician are of porous dolomite type in the Ordos Basin, and they occur vertically in O₁m₅⁶, O₁m₅⁷ and O₁m₅⁹. The lithologies of the O₁m₅⁶ reservoirs are mainly granular dolomite and porphyritic dolomite with very fine-crystalline, while the lithologies of O₁m₅⁷ and O₁m₅⁹ reservoirs are dominated by granular dolomite and dolomite with very fine-to fine-crystalline. The reservoir spaces for the three reservoir intervals are primarily dissolved pores or cavities, with residual intergranular pores, intercrystalline dissolved pores, intercrystalline pores and micro cracks ranked second. The average porosity for each is 5.84%, 6.81% and 7.03%. Sedimentary paleo-geomorphology, sea level eustacy and penecontemporaneous meteoric water dissolution collectively control the development and distribution of the dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer. It is concluded that the central paleo-uplift belt and Yulin-Hengshan uplift belt, located outside the boundary of

收稿日期: 2017-06-30; 修订日期: 2018-06-15。

第一作者简介: 于洲(1986—), 男, 工程师, 地质工程。E-mail: yuz_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05008-005); 中国石油股份公司重大专项(2016E-0502); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1713346)。

the gypsum-salt layer, are relatively higher in topography, and the deposits of grain shoal facies are relatively thicker, so they are prone to undergo meteoric water dissolution during penecontemporaneous and shallow burial stages. Its internal pores are not easily subject to filling of gypsum salt. All in all, they are the favorable areas for the growth of dolomite reservoirs underlying the gypsum-salt layers inside the basin.

Key words: sea level, dissolution, paleo-geomorphology, gypsum-salt layer, dolomite, Majiagou Formation, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国主要的产气盆地,纵向上有多个产气层系^[1-5]。位于其下古生界的马家沟组海相碳酸盐岩经过近几十年来的勘探,先后发现了以硬石膏结核溶模孔为主要储集空间的靖边气田马五¹⁻⁴亚段风化壳岩溶气藏^[2-4]和以晶间孔、晶间溶孔为主要储集空间的靖西地区马五⁵亚段白云岩岩性气藏^[5]。近年来通过钻井在盆地东部的桃38井、统75井和统74井膏盐下马五⁶亚段、马五⁷亚段和马五⁹亚段白云岩储层段获得了高产工业气流,显示出膏盐下白云岩型岩性气藏具有较大的勘探潜力。而目前对该区域储集层的研究较少,对白云岩储层类型、孔隙结构特征及储层形成的主控因素及分布规律缺乏系统的认识。为此,本文基于古地貌背景,综合岩心观察、薄片鉴定、物性分析及地球化学特征等资料,对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组膏盐下白云岩储层特征进行研究,明确了优质白云岩储层形成的主控因素,指出了白云岩储层分布的有利区带,为研究区的进一步勘探部署提供了支持。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组是一套蒸发岩和碳酸盐岩交互沉积地层^[6-10],其中马一段、马三段和马五段为海退沉积,沉积物岩性以蒸发岩类为主;马二段、马四段和马六段为海侵沉积,沉积岩性以碳酸盐岩类为主(图1a)。位于马家沟组上部的马五段受次一级海平面变化控制,纵向上又发育多个膏盐岩层段:马五³⁺⁴亚段、马五⁶亚段、马五⁸亚段和马五¹⁰亚段。以马五⁶亚段的膏盐岩沉积范围最为广泛,且累计厚度大,局部可达200 m。因而通常以该亚段为界,把该亚段及以下的马五段统称为膏盐下地层^[11]。亚段地层厚度^[9-11]及累计厚度(图1b,c)均显示,鄂尔多斯盆地中东部在奥陶世马五¹⁰—马五⁶亚期为“隆坳相间型”碳酸盐岩台地(图1c,g),并且沉积古地形变化趋势以靖边县为界,存在明显的差异。北部地区存在“多隆多坳”的沉积古地形特征,由西向东依次为中央古隆起、乌审旗—定边坳陷、榆林—横山隆起和米脂坳陷,其中乌审旗—定边坳陷又可进一步细分多个次级凹陷和凸起(图1c,e);而南部地区沉积古地形变化趋势相对单一,

由中央古隆起逐渐演变为米脂坳陷(图1c,e)。基于上述地质背景,本次研究选取马五⁶亚段膏岩边界线下部区域的马五⁶亚段、马五⁷亚段和马五⁹亚段为研究区域和研究目标(图1b,c)。

2 储层特征

2.1 马五⁶亚段

马五⁶亚段形成于海退背景(图1a),储层岩性主要为颗粒白云岩和斑状粉晶白云岩;储集空间以溶蚀孔洞为主,次为残余粒间孔、晶间孔和微裂缝。溶蚀孔洞由残余粒间孔扩溶或藻屑溶蚀而来,由残余粒间孔、晶间孔和微裂缝沟通,直径介于0.2~20 mm,以6~10 mm为主,少数孔隙内被晚期细—中晶白云石和石英充填(图2a—c);残余粒间孔发育在颗粒白云岩中,孔径大小一般为0.02~0.2 mm,粒间可见犬牙状白云石、方解石和硬石膏等胶结物(图2d—f)。物性统计表明,该亚段储集层的孔隙度为2%~18.03%,平均孔隙度为5.84%,渗透率分布于 $(0.002 \sim 60.16) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $5.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图3a,b)。

2.2 马五⁷亚段与马五⁹亚段

马五⁷亚段与马五⁹亚段同为夹在蒸发岩中的短周期海侵沉积(图1a),储层岩性均以粉—细晶白云岩为主,含少量的颗粒白云岩和残余砂屑粉晶白云岩;储集空间类型以溶蚀孔洞为主,次为晶间溶孔、晶间孔、残余粒间孔和微裂缝,可见岩盐和晚期白云石等充填物(图2g—i)。物性统计表明,马五⁷亚段储集层的孔隙度为2%~18.03%,平均孔隙度为6.16%,渗透率分布于 $(0.002 \sim 203.15) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $6.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图3c,d)。马五⁹亚段储集层的孔隙度为2%~15.01%,平均孔隙度为7.03%,渗透率分布于 $(0.004 \sim 30.54) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $4.55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图3e,f)。

3 影响储层形成的主控因素

古地貌、沉积相及成岩作用研究表明,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组膏盐下白云岩储集层主要分布在中

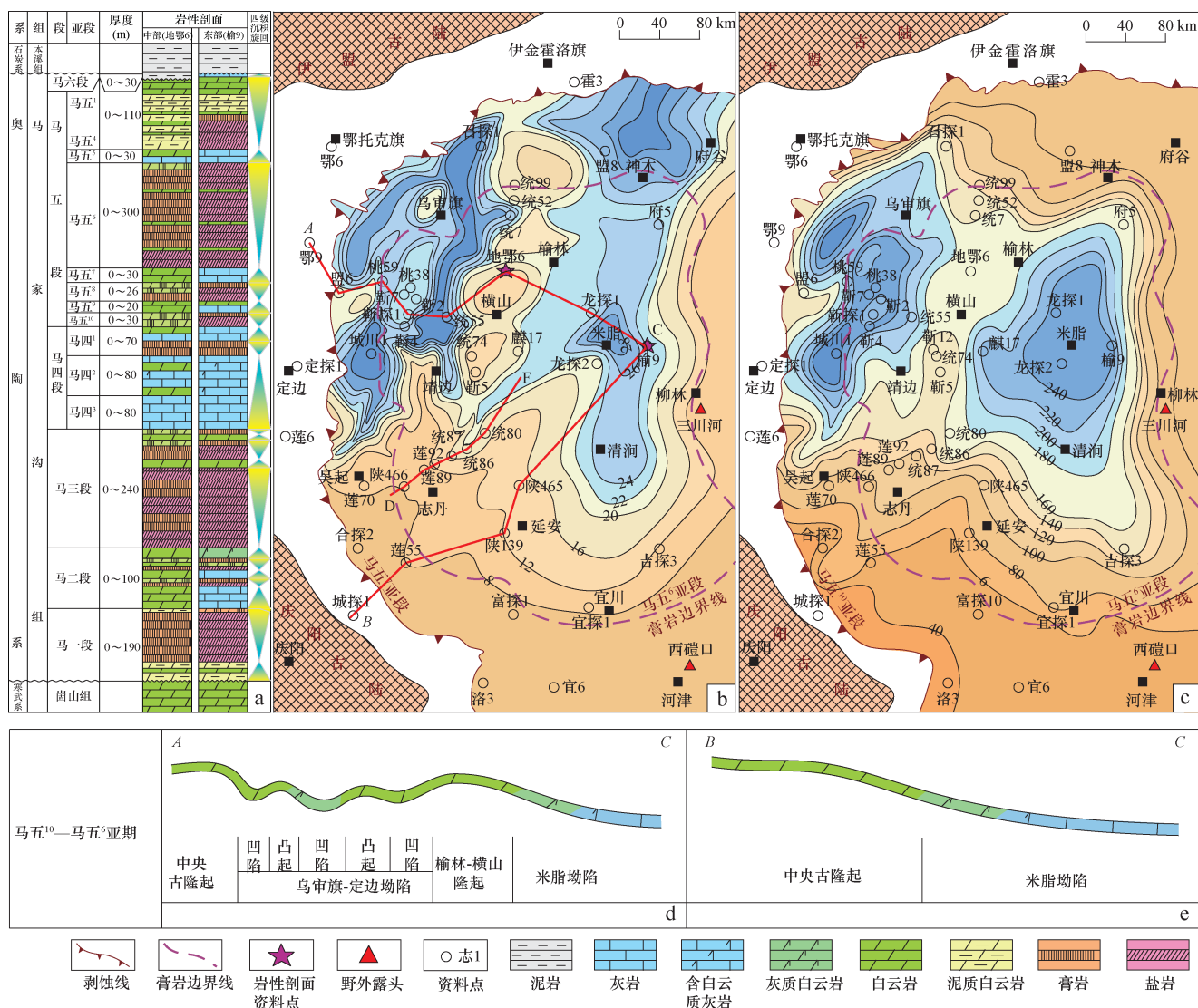


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组柱状图、地层厚度及古地貌剖面

Fig. 1 Column, stratigraphic thickness and paleo-geomorphological profile of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin

a. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组地层综合柱状图(位置见b); b. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五⁷亚段残余地层厚度; c. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五⁶—马五¹⁰亚段残余地层厚度; d. 马五¹⁰—马五⁶亚期多隆坳型古地貌(剖面位置见b); e. 马五¹⁰—马五⁶亚期单一隆坳型古地貌(剖面位置见b)

央古隆起、榆林—横山隆起与乌审旗—定边坳陷中的凸起等古地貌高地上,并受准同生期和浅埋藏期大气淡水溶蚀作用、浅埋藏期膏盐岩充填作用、晚表生岩溶期和晚埋藏期形成的方解石、石英与白云石等矿物充填作用共同控制。

3.1 古地貌高地

鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐下白云岩常整段发育或呈现灰/云岩多次叠加组合的特征,具有明显的层控性。白云岩氧同位素组成绝大部分分布在 -6.53% ~ -4.51% ,碳同位素组成分布在 -1.2% ~ 0.29% ,均落在同期奥陶世海水的稳定同位素组成内($\delta^{13}\text{C} = -2.0\%$ ~ 0.5% ; $\delta^{18}\text{O} = -6.6\%$ ~ -4.0%)^[12-13]。绝

大多数Sr同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.7088\sim0.7091$,平均值为 0.7090 ,与中奥陶世古海水Sr同位素分布区间($0.7087\sim0.7092$)相当^[14](图4)。颗粒结构及残余颗粒结构等岩石学特征、层控性特征与地球化学特征综合表明,鄂尔多斯盆地奥陶系马五段膏盐下白云石化作用发生的时间早于埋藏压实期,与同期海水相关,具有准同生白云岩化作用的特征;部分白云岩地球化学特征异常与后期经历了大气淡水溶蚀作用和埋藏白云石化作用等成岩改造相关。

鄂尔多斯盆地在奥陶世位于赤道附近,气候干旱炎热,蒸发作用强^[15-17]。在马五¹⁰亚期—马五⁶亚期,盆地内沉积格局具有“隆坳相间”的特征。除中央古隆起之外,盆地东部榆林—横山隆起也水体较浅,易于

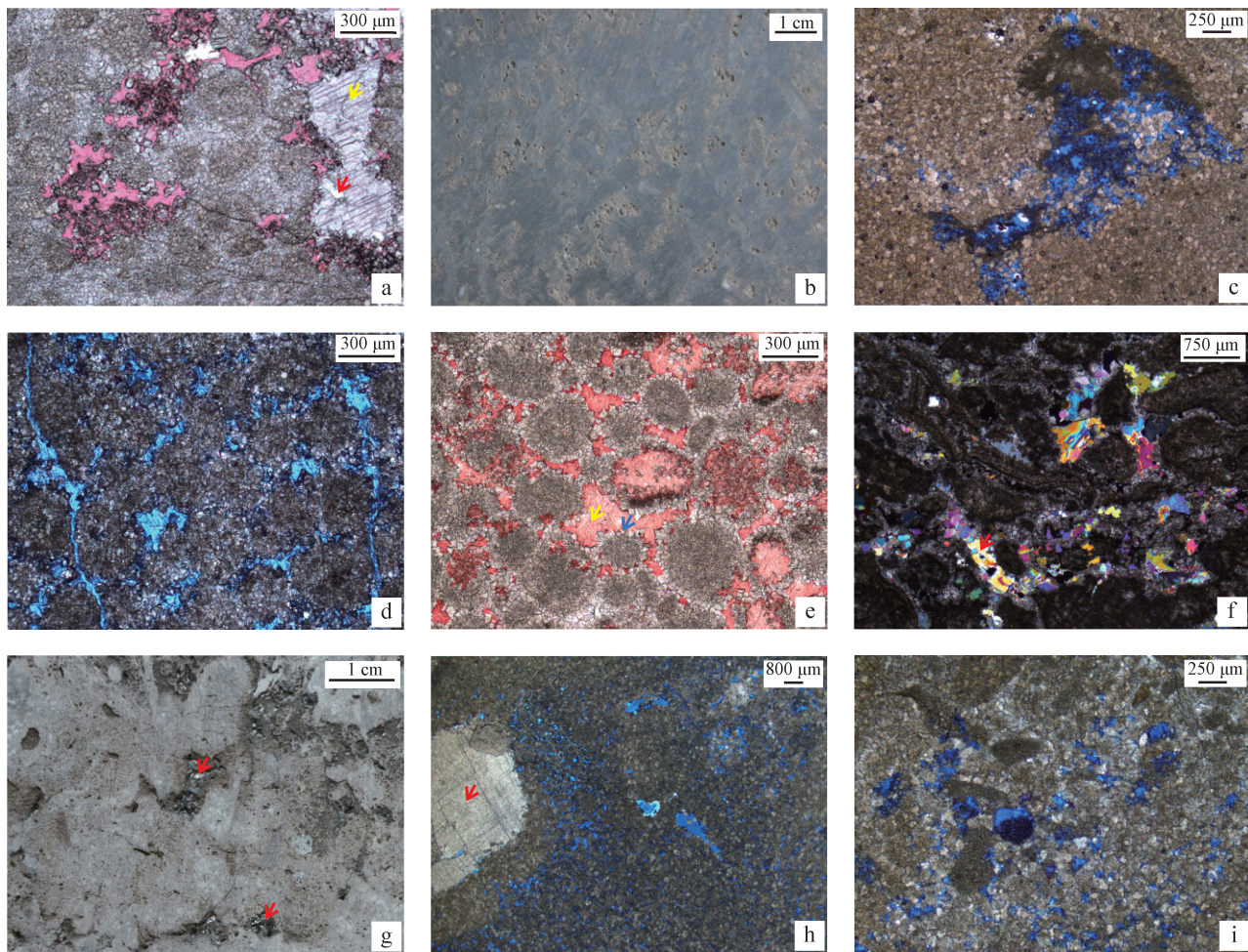


图2 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段膏盐下储集层岩性及储集空间特征

Fig. 2 Lithology and reservoir space features of the reservoirs underlying the gypsum-salt layers in the 5th member of Majiagou Fm in the Ordovician, Ordos Basin

a. 靳8井,埋深3 663.79 m,马五⁶亚段,砂屑白云岩,残余粒间孔、溶蚀孔洞发育,孔内充填少量石英(红色箭头)和白云石(黄色箭头),红色铸体,单偏光;b. 靳探1井,埋深3 656.95 m,马五⁶亚段,斑状粉晶白云岩,晶间孔、溶孔不均匀发育,孔隙内残留少量藻屑和粉晶白云石,岩心照片;c. 靳探1井,埋深3 656.95 m,马五⁶亚段,斑状粉晶白云岩,晶间孔、溶孔不均匀发育,孔隙内残留少量藻屑和粉晶白云石,蓝色铸体片,单偏光;d. 靳2井,埋深3 587.75 m,马五⁶亚段,鲕粒白云岩,残余粒间孔发育,2条微裂缝未充填,蓝色铸体,单偏光;e. 靳7井,埋深3 581.1 m,马五⁶亚段,鲕粒白云岩,残余粒间孔发育,颗粒边缘见第一代犬牙状胶结物(蓝色箭头),局部边缘可见溶蚀现象,后期充填第二代方解石胶结物(黄色箭头),红色铸体,单偏光;f. 靳7井,埋深3 674.48 m,马五⁶亚段,砂屑白云岩,残余粒间孔发育,溶蚀孔洞内硬石膏充填(红色箭头),普通薄片,正交光;g. 统86井,埋深3 824.2 m,马五⁷亚段,粉-细晶白云岩,晶间孔、溶孔发育,溶蚀孔洞内盐岩充填(红色箭头),岩心照片;h. 桃38井,埋深3 630 m,马五⁷亚段,粉-细晶白云岩,溶蚀孔洞、晶间孔、晶间溶孔发育,局部见白云石充填(红色箭头),蓝色铸体,单偏光;i. 莲92井,3 987.7 m,马五⁹亚段,残余砂屑粉晶白云岩,发育溶孔和晶间孔,蓝色铸体,单偏光

蒸发浓缩形成富含 Mg^{2+} 的卤水。由于隆起带和坳陷之间存在明显的地势差和密度差,隆起带上过剩的卤水除云化下伏灰岩外,势必会向坳陷中心方向回流,且向着坳陷中心浓度值逐渐减小,沿途的灰岩则被依次云化为白云岩、灰质白云岩和白云质灰岩,造成了中央古隆起和榆林-横山隆起带上的白云岩厚度大,而向乌审旗-定边坳陷和米脂坳陷中心方向,白云岩厚度逐渐减薄甚至不发育白云岩(图1,图5;表1)。

近年来,随着国内外学者对白云岩的沉入研究,对

白云石化作用的增孔机制的认识产生了转变,认为在开放体系中,白云石化作用并不能产生增孔效应^[18],这也解释了隆起带向坳陷过渡区域的粉晶白云岩云化作用彻底却不发育孔隙的现象(图5)。研究表明,膏盐下储集层的发育与颗粒滩密切相关。沉积时期,古地貌高地水动力较强,是颗粒滩相发育的有利场所。如位于隆起带的靳5、统7等井在马五⁷亚段与马五⁹亚段均发育颗粒滩,累计厚度大,最高可达17 m;而坳陷区分布的桃38、榆9等井在马五⁷亚段与马五⁹亚段

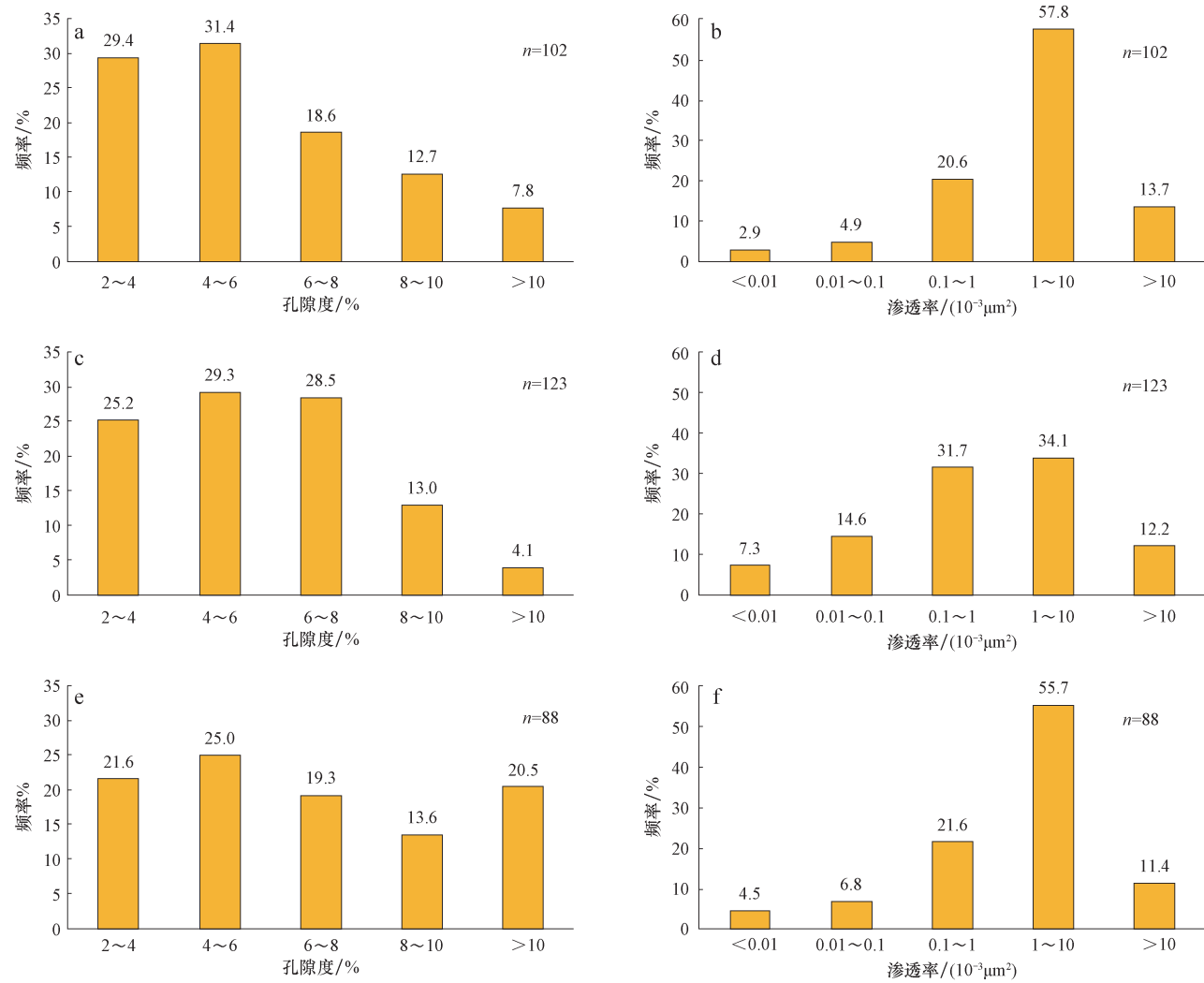


图 3 鄂尔多斯盆地奥陶系马五⁶ 亚段、马五⁷ 亚段和马五⁹ 亚段白云岩储层物性特征

Fig. 3 Physical properties of the dolomite reservoirs in the Ordovician O₁m₅⁶, O₁m₅⁷ and O₁m₅⁹, Ordos Basin

a. 马五⁶ 亚段孔隙度特征; b. 马五⁶ 亚段渗透率分布; c. 马五⁷ 亚段孔隙度特征; d. 马五⁷ 亚段渗透率分布;
e. 马五⁹ 亚段孔隙度特征; f. 马五⁹ 亚段渗透率分布

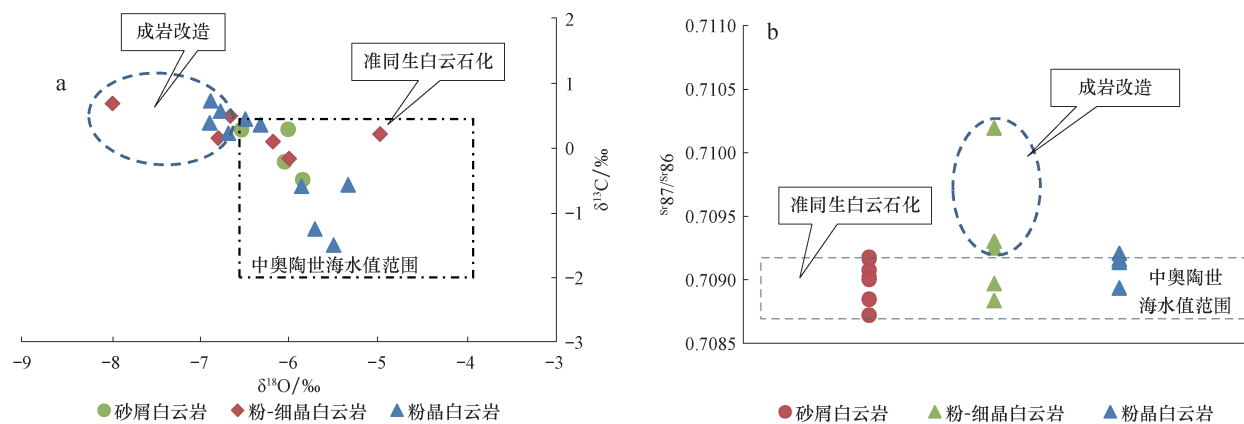


图 4 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段膏盐下白云岩 C、O 和 Sr 同位素组成

Fig. 4 C, O and Sr isotopic compositions of dolomite underlying the gypsum-salt layers in the 5th member of Majiagou Fm in the Ordovician, Ordos Basin

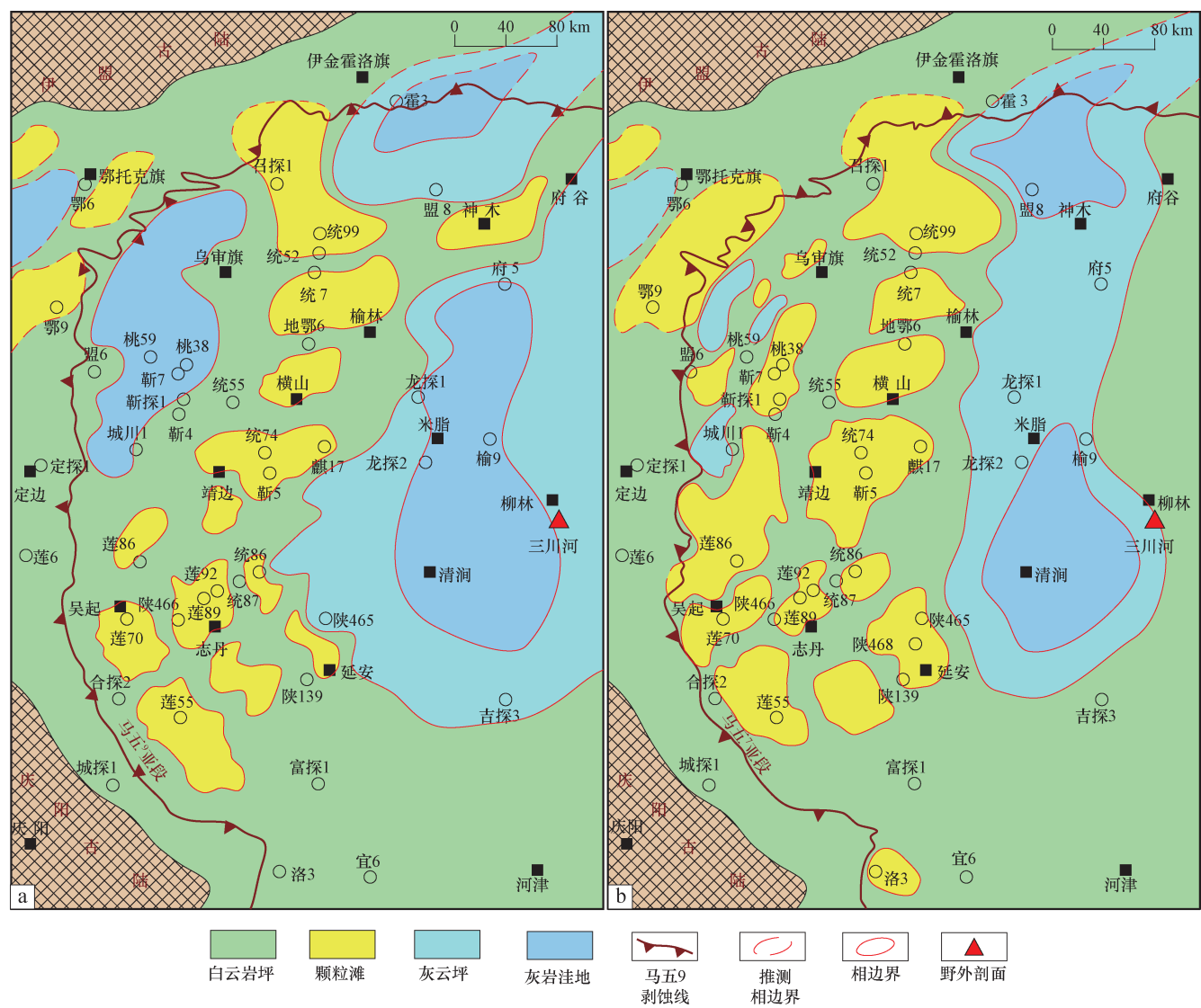
a. C、O 同位素组成; b. Sr 同位素组成

Fig. 5 Penecontemporaneous dolomitization and growth model of initial matrix pores in strata underlying the gypsum-salt layers in the 5th member of Majiagou Fm in the Ordovician, Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段膏盐下地层、白云岩与颗粒滩厚度统计

Table 1 Statistics for the thickness of strata, dolomites and deposits of grain shoal facies underlying the gypsum-salt layers in the 5th member of Majiagou Fm in the Ordovician, Ordos Basin

隆起带					坳陷区				
井	层位	厚度/m			井	层位	厚度/m		
		地层	白云岩	颗粒滩			地层	白云岩	颗粒滩
统74	马五 ⁷	24.4	17	16	桃38	马五 ⁷	34	32	4
统74	马五 ⁹	15.0	15	12	桃38	马五 ⁹	20	0	0
靳5	马五 ⁷	24.4	17	17	盟6	马五 ⁷	23	23	1
靳5	马五 ⁹	15.0	15	12	盟6	马五 ⁹	16	16	0
统7	马五 ⁷	30.0	30	13	榆9	马五 ⁷	21	0	0
统7	马五 ⁹	16.0	16	4.5	榆9	马五 ⁹	16	3	0
统99	马五 ⁷	24.0	24	14	桃59	马五 ⁷	34	34	0
统99	马五 ⁹	20.0	20	10	桃59	马五 ⁹	20	0	0



颗粒滩厚度薄,甚至不发育(表 1,图 6)。前人研究认为,颗粒滩的原始孔隙一般高达 40%~60%^[18],经过早期的准同生白云石化作用后,抗压能力较强,有利于颗粒滩储集层基质孔隙的保存^[19]。

3.2 海平面升降变化与准同生溶蚀作用

研究表明,该区域内白云岩储层的发育与分布,除与古地貌相关外,还与海平面变化和准同生期大气淡水溶蚀作用密切相关,且由大气淡水溶蚀作用形成的孔隙具有明显的组构选择性,常呈沿层面或顺层分布。

一方面,海平面变化与准同生溶蚀作用相互配合,控制优质储集层的纵向分布,在纵向上常与致密非储集层或差储层多次叠加(图 7)。位于沉积旋回顶部的颗粒滩,水体相对较浅,受大气淡水溶蚀影响较强,颗粒原始结构被破坏,储集层发育(图 7b,d)。位于沉积旋回下部的颗粒滩,沉积水体相对较深,颗粒含量少,受大气淡水溶蚀作用相对较弱,仍保持原岩结构,储层储集性能相对较差(图 7a,c,e)。这种组构选择性溶蚀特征体现准同生期大气淡水垂直淋滤的特征;另外一方面,海平面升降变化又和古地貌结合,控制储集层的时空分布。当海侵程度较高时,颗粒滩相储集

层仅在中央古隆起发育,而榆林-横山隆起水体相对较深,水动力较弱,颗粒滩不发育,并且海水浓缩程度较低,盐度值比正常海水值略高,仅发育岩性较为致密的粉晶白云岩,向坳陷中心逐渐递变为灰质粉晶白云岩、白云质泥晶灰岩和泥晶灰岩(图 5a);当海平面下降时,中央古隆起和榆林-横山隆起,甚至隆起带两翼侧水动力均较强,发育颗粒滩相沉积,经过白云石化作用和大气淡水溶蚀作用后可形成颗粒滩相白云岩储层(图 5b);当海平面进一步下降,且进入高位域极低水位时,盆地内为潟湖,沉积膏盐岩,而隆起带进入短暂暴露期,进一步促进的基质孔隙的发育(图 5c);但当海平面逐渐上升且仍处于高位域时,米脂坳陷仍然继续接受膏盐岩沉积。由于中央古隆起并非一个等高的隆起,其在定边存在一个地势相对较低的鞍部,此时,乌审旗-定边坳陷与祁连海域连通性好,凸起带水体能量较强,开始发育砂屑云岩或藻云岩沉积,并发生准同生溶蚀作用,形成优质白云岩储集层,但单层厚度往往较小,一般为 1~3 m(图 5e)。

3.3 浅埋藏期溶蚀作用与充填作用

由于古地貌的差异,在进入蒸发岩沉积期时,古地貌高部位存在短暂的暴露,而坳陷区域继续接受沉积,

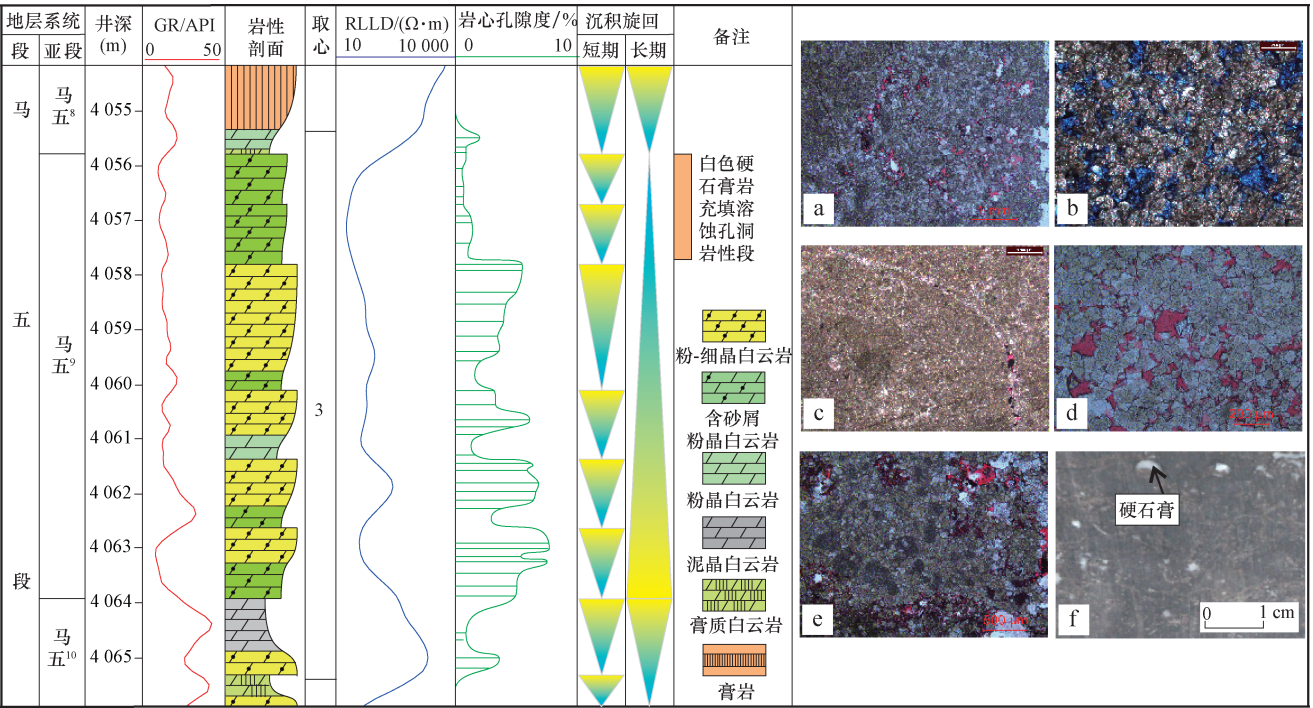


图 7 鄂尔多斯盆地莲 89 井奥陶系马五⁹ 亚段颗粒粒径、含量与储集层叠置样式的关系
Fig. 7 Relationship of the diameter and content of grains with the superimposition pattern of reservoirs in the Ordovician O₁m₅⁹ in Well Lian-89, Ordos Basin

a. 3-60/70 块, 4 063. 64 m, 砂屑粉晶白云岩; b. 3-54/70 块, 4 062. 75 m, 粉-细晶白云岩; c. 3-51/70 块, 4 062. 38 m, 砂屑粉晶白云岩; d. 3-44/70 块, 4 061. 22 m, 砂屑粉晶白云岩; e. 3-11/70 块, 4 056. 46 m, 砂屑粉晶白云岩; f. 3-9/70 块, 4 056. 13 m, 砂屑粉晶白云岩

因而导致坳陷区的亚段沉积厚度或累计厚度均大于隆起带(图1,图8)。当海平面位于高位体系域极低水位时,经过早期准同生溶蚀后的古地貌高部位颗粒滩体会继续接受大气淡水溶蚀,储集性能进一步增强(图8a)。但随着海平面逐渐上升且仍处于高位域时,位于盐岩潟湖周缘的高盐度卤水会渗入下伏白云岩储集层的孔隙空间,并结晶成岩半充填甚至完全充填前期形成的溶蚀孔洞,促进膏盐下白云岩储集层物性进一步扩大(图8b;表2)。为此,在乌审旗-定边坳陷区膏岩下储集层常见硬石膏充填孔隙(图2f),榆林-横山隆起带盐岩下统86井和靳5井马五⁷亚段和马五⁹亚段可见大量石盐充填孔隙(图2g)。

3.4 晚表生期至埋藏期充填作用

加里东末期,鄂尔多斯盆地中东部进入长达1.3

亿年的风化剥蚀期,盆地中央古隆起地层由西向东逐露剥蚀,邻近剥蚀窗口区的储集层在大气淡水溶蚀作用下,早期形成的残余粒间孔或晶间孔进一步扩溶,形成溶蚀孔洞或晶间溶孔^[5]。海西期,盆地本部再次接受沉积,马家沟组与上古生界本溪组煤系地层直接接触,随着埋藏深度增加,煤系地层释放酸性溶蚀水在重力作用下流入下伏储集层,沿途发生溶蚀作用^[20]。

虽然晚表生岩溶期大气淡水溶蚀作用和埋藏期酸性流体溶蚀作用,均在一定范围内改善了储集层的储集性能,如在中央古隆起处(图1d,e),但并不能增加膏盐下区域储集层的总规模,这与膏盐下储集层在加里东期和埋藏期所处的位置相关。因为,无论是在表生条件下和埋藏条件下,膏盐岩边界线内侧的储集层均位于下倾方向,上覆地层厚度较大,未直接暴露于地表,均处于一个封闭的空间,且位于岩性相变带上^[11]。

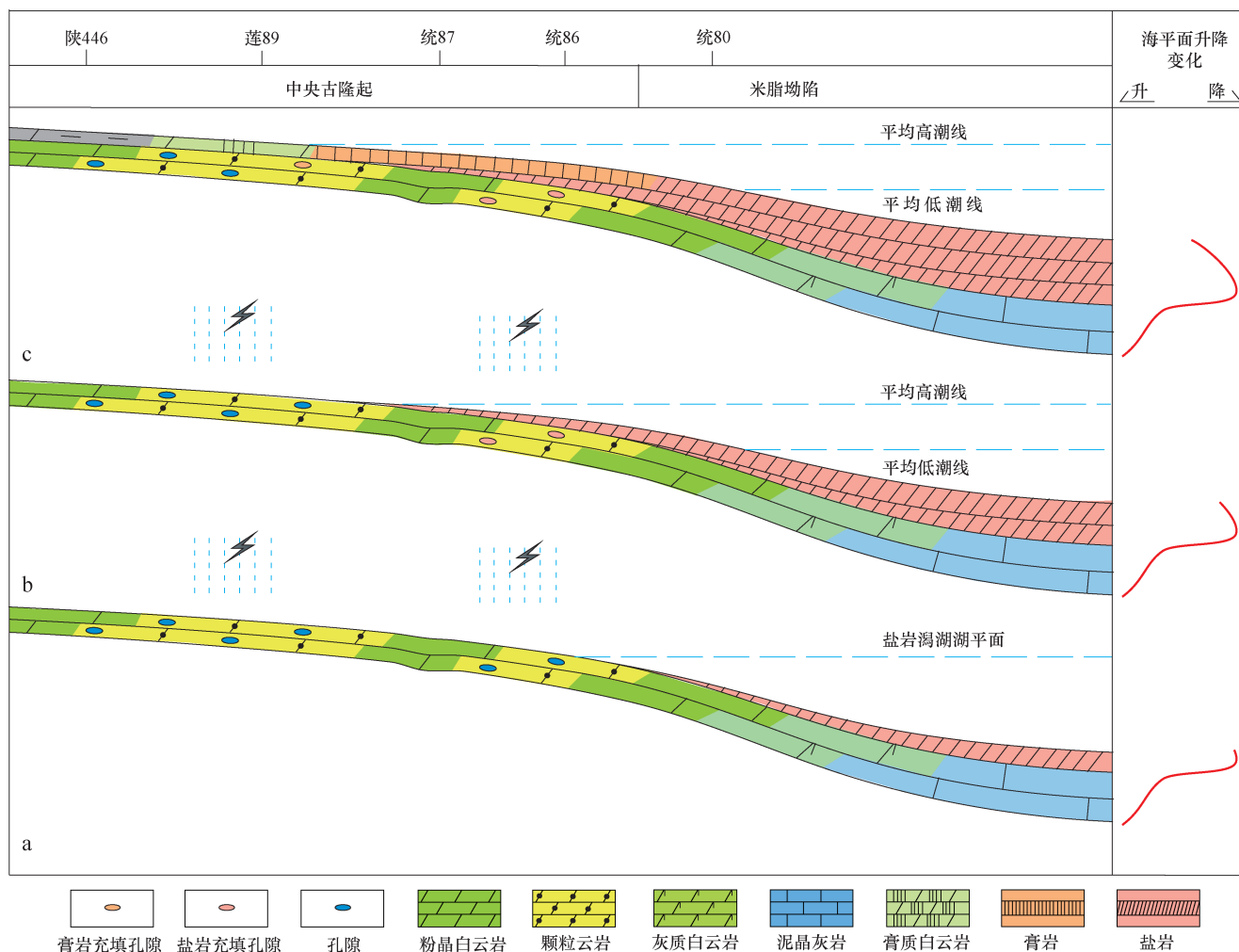


图8 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段浅埋藏期膏盐下白云岩储集层发育与盐岩充填孔隙模式(剖面位置见图1b)

Fig. 8 Growth model and pore filling patterns of rock salt of the dolomite reservoir underlying the gypsum-salt layers in the 5th member of Majiagou Fm in the Ordovician in shallow burial, and pore structures of saline rocks for charging, Ordos Basin(see Fig. 1b for the profile location)

a. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五⁹亚段有利储集层分布;b. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五⁶亚段—马五⁷亚段有利储集层分布

只有流体的进入,未有流体的排出,沿风化壳剥蚀窗口区进入的流体在中央古隆起处及其东侧的马五⁶亚段、马五⁷亚段与马五⁹亚段储集层发育溶蚀,也必将在其下倾方向的膏盐下储集层中发生沉淀或析出结晶矿物,如方解石。此外,岩心与薄片资料显示,研究区储集层孔隙空间内也常见含铁白云石、鞍状白云石、石英和萤石等热液矿物(图2),降低了储集层的储集性能(表2)。因此,该阶段发生的溶蚀作用对储层分布起调整作用,并不能增加储集层总规模。

4 有利发育区带预测

储集层发育主控因素分析认为,古地貌高地水动力较强,发育颗粒滩相,累计厚度大,且易于发生白云石化作用和准同生溶蚀作用,在浅埋藏期也易于暴露发生大气淡水溶蚀作用,是孔隙型白云岩储集层的有利发育区。但在浅埋藏期,位于盐岩潟湖边缘区域的白云岩储集层的孔隙空间易于被盐岩完全充填,无储集性能,可定义为非储集层;而位于隆起带上,且在盐岩边界线外的储集层基质孔隙发育,且充填程度低,保存条件相对较好,可划分为Ⅰ类储集层;位于乌审旗—定边坳陷次级凸起上的储集层颗粒滩厚度相对较薄,可划分为Ⅱ类储集层(表1,表2)。基于此,可以预测出Ⅰ类储集层分布于盐岩边界线之外的榆林—横山隆起带和中央古隆起带;Ⅱ类储集层分布在乌审旗—定边坳陷的凸起带上(图9)。目前靳探1井,靳5井,统86井,统74井和统75井的钻探也直接证实,位于盐岩边界线外围隆起带或凸起带上的储集层保存较好,累计厚度大,物性好,因而在靳探1井,桃38井,莲92井,统74井,统75井和统99井的马五⁶亚段、马五⁷亚段和马五⁹亚段获得高产工业气流;而位于盐岩边界线内侧颗粒滩带上的统86井在马五⁷亚段测试为干层。随着勘探的持续推进,位于盆地东部的榆林—横山有利区必将取得重大发现。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地马家沟组膏盐下白云岩储集层岩性由颗粒白云岩、粉—细晶白云岩和斑状粉晶白云岩组成;其储集空间类型以溶蚀孔洞、晶间孔和晶间溶孔为主,含少量的残余粒间孔和微裂缝。

2) 古地貌高地与海平面升降变化控制了颗粒滩

相的沉积和白云石化作用的发生场所,继而影响了白云岩储集层的时空分布;准同生期和浅埋藏期大气淡水溶蚀作用是形成主要储集空间的关键作用;浅埋藏期浓缩卤水对潟湖边缘的储集层进行充填破坏;表生岩溶期和埋藏期的方解石、热液等充填矿物对膏盐下储集层的起破坏作用,进一步降低了局部地区储集层的储集性能。

3) 可以预测出位于盐岩边界线外的吴起—志丹—延安一带、榆林—横山一带的高古地貌区是最为有利储集层发育区,可作为今后勘探的重点方向;而乌审旗—定边坳陷区中颗粒滩发育区可作为后备勘探目标。

参 考 文 献

- [1] 马新华. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 230-236.
Ma Xinhua. Discussion on characteristics and reservoiring mechanism of deep basin gas in upper Paleozoic in Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 230-236.
- [2] 马振芳, 陈安宁, 王景. 鄂尔多斯盆地中部古风化壳气藏成藏条件研究[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 9-13.
Ma Zhenfang, Chen Anning, Wang Jing. A study of the conditions of forming the fossil weathered residuum gas reservoir in the centre of Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(1): 9-13.
- [3] 杨华, 付金华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 5-8.
Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan. Characteristics of natural gas reservoir formation in Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(4): 5-8.
- [4] 马硕鹏, 何文渊. 鄂尔多斯盆地天然气勘探领域分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 5-7.
Ma Shuopeng, He Wenyuan. Major frontiers of gas exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 5-7.
- [5] 时保宏, 刘亚楠, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起东侧奥陶系马家沟组中组合成藏地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 610-618.
Shi Baohong, Liu Yanan, Wu Chunying, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation in middle reservoir-source rock combination of the Ordovician Majiagou Formation on the east side of the paleo-uplift in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 610-618.
- [6] 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, 1-144.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Zhang Yongsheng, et al. Stratigraphy and rocks and lithofacies palaeogeography of Ordovician in Ordos Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 1-144.
- [7] 侯方浩, 方少仙, 赵敬松, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. 海相油气地质, 2002, 7(01): 38-46.
Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Zhao Jingsong, et al. Depositional en-

- vironment model of middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2002, 7 (01): 38 - 46.
- [8] 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 (增刊2): 95 - 109.
- [9] 于洲, 丁振纯, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₄亚段沉积演化及岩相古地理 [J]. *古地理学报*, 2015, 17 (6): 787 - 796.
- Yu Zhou, Ding Zhenchun, Sun Liuyi, et al. Sedimentary evolution and lithofacies palaeogeography of the 4th sub-member of Member 5 of Majiagou Formation in Ordovician of central and eastern Ordos Basin [J]. *JOPC*, 2015, 17 (6): 787 - 796.
- [10] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯盆地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 Paleogeography of Majiagou Age of Ordovician in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (1): 1 - 8.
- [11] 姚涇利, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探 [J]. *中国石油勘探*, 2015, 20 (3): 1 - 12.
- Yao Jingli, Bao Hongping, Ren Junfeng, et al. Exploration of Ordovician Subsalt Natural Gas Reservoirs in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20 (3): 1 - 12.
- [12] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution [M]. *Amer Assn of Petroleum Geologists*, 1993.
- [13] Lohmann K C, Walker J C G. The $\delta^{18}\text{O}$ record of phanerozoic abiotic marine calcite cements [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16 (4): 319 - 322.
- [14] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161 (1): 59 - 88.
- [15] 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 等. 豫北地区早古生代古地磁研究的初步结果及其意义 [J]. *科学通报 (增刊)*, 1997, 42 (4): 401 - 406.
- Yang Zhenyu, Ma Xinghua, Sun Zhiming, et al. The preliminary results of Early Paleozoic paleomagnetic study in the northern Henan province and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42 (4): 401 - 406.
- [16] 吴汉宁, 常承法, 刘椿, 等. 依据古地磁资料探讨华北和华南块体运动及其对秦岭造山带构造演化的影响 [J]. *地质科学*, 1990, 25 (3): 201 - 214.
- Wu Manning, Chang Chengfa, Liu Chun, et al. Evolution of the Qinling Fold Belt and the movement of the North and South China blocks: the evidence of geology and paleomagnetis [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1990, 25 (3): 201 - 214.
- [17] 张永生, 郑绵平, 包洪平, 等. 陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积期构造分异对成钾凹陷的控制 [J]. *地质学报*, 2013, 87 (1): 101 - 109.
- Zhang Yongsheng, Zheng Mianping, Bao Hongping, et al. Tectonic differentiation of O_2m^{5-6} deposition stage in salt Basin, northern shaanxi, and Its control over the fomation of potassium sags [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87 (1): 101 - 109.
- [18] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54 (2): 207 - 250.
- [19] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42 (2): 158 - 166.
- Zhou Jingao, Xu Chunchun, Yao Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42 (2): 158 - 166.
- [20] 赵卫卫, 王宝清. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征 [J]. *地球学报*, 2011, 32 (6): 681 - 690.
- Zhao Weiwei, Wang Baoqing. Geochemical characteristics of dolomite from 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32 (6): 681 - 690.

(编辑 董立)