

鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层特征、成因及分布

丁振纯¹, 高星², 董国栋², 唐瑾³, 惠江涛⁴, 王少依¹, 赵振宇⁴, 王慧¹

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院; 3 中国石油大学(北京);

4 中国石油青海油田公司采油五厂

摘要 奥陶系盐下白云岩储层是鄂尔多斯盆地中东部天然气勘探的重要接替领域。基于钻井岩心、微观薄片、物性分析及地球化学特征等资料,应用微区多参数实验分析方法,对奥陶系盐下白云岩储层特征、成因与分布开展了系统研究。结果表明:①奥陶系盐下主要发育颗粒滩白云岩和微生物白云岩储层,其中颗粒滩白云岩储层岩性为砂屑白云岩、鲕粒白云岩和粉—细晶白云岩,储集空间由溶蚀孔洞、粒间孔、晶间(溶)孔和裂缝组成,平均孔隙度为6.04%;微生物白云岩储层岩性为凝块石白云岩,储集空间为溶蚀孔洞和微裂缝,平均孔隙度为5.64%。②奥陶系盐下白云岩储层孔隙来源于对颗粒滩和微生物丘中原生孔隙的继承,并经历了溶蚀作用、白云石化作用,以及膏盐矿物、石英、细—中晶白云石与方解石等充填作用的改造。③有利储层主要分布于中央古隆起、横山隆起及乌审旗坳陷中的低凸起带上。

关键词 白云岩; 溶蚀作用; 充填作用; 盐下; 马家沟组; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 文献标识码:A

0 前言

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组海相碳酸盐岩是天然气勘探的重要领域,针对该领域的勘探始于1989年,并首先发现了以硬石膏结核溶模孔为主要储集空间的靖边大气田^[1]。2011年,通过深化沉积、储层及成藏认识,提出“中央古隆起东侧发育颗粒滩相白云岩岩性圈闭,上古生界煤系烃源岩侧向供烃成藏”等认识,并在靖边气田西侧奥陶系马五、亚段发现以晶间孔、晶间溶孔为主要储集空间的白云岩岩性气藏^[2]。

近年来,在盆地中部的苏322井和东部的统74井、莲92井奥陶系盐下白云岩储层段均获得了几十至上百万方的高产工业气流,展示出奥陶系盐下白云岩储层具有较大的勘探潜力。前人对盐下白云岩储层特征、发育主控因素、成岩作用类型及孔隙演化已做过一些研究,但仍存在较大争议^[2-6];有的学者认为奥陶系盐下白云岩储层主要为晶间孔型,

孔隙由颗粒滩经过埋藏白云石化或混合水白云石化作用形成^[2-4];有的学者认为奥陶系盐下白云岩储层主要形成于颗粒滩和微生物丘中^[5-6],并主要受到准同生溶蚀作用^[5-6]、埋藏重结晶作用^[5]和膏盐矿物充填作用^[6]的影响。此外,以往的研究区多集中于鄂尔多斯盆地中部^[2-5]或东部膏盐岩边界线内侧^[6],而对盆地中东部白云岩储层特征、成因及分布规律缺乏整体、系统的认识,这制约了下一步的勘探进程。为此,本文基于钻井岩心、微观薄片、物性数据及地球化学特征等资料(其中取心井20口,地球化学测试样品共计80块),应用微区多参数实验等方法对鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层进行研究,明确了优质白云岩储层特征及其成因机理,预测了有利白云岩储层的分布范围,为研究区下一步勘探部署提供了支持。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地中东部在奥陶纪马家沟期位于

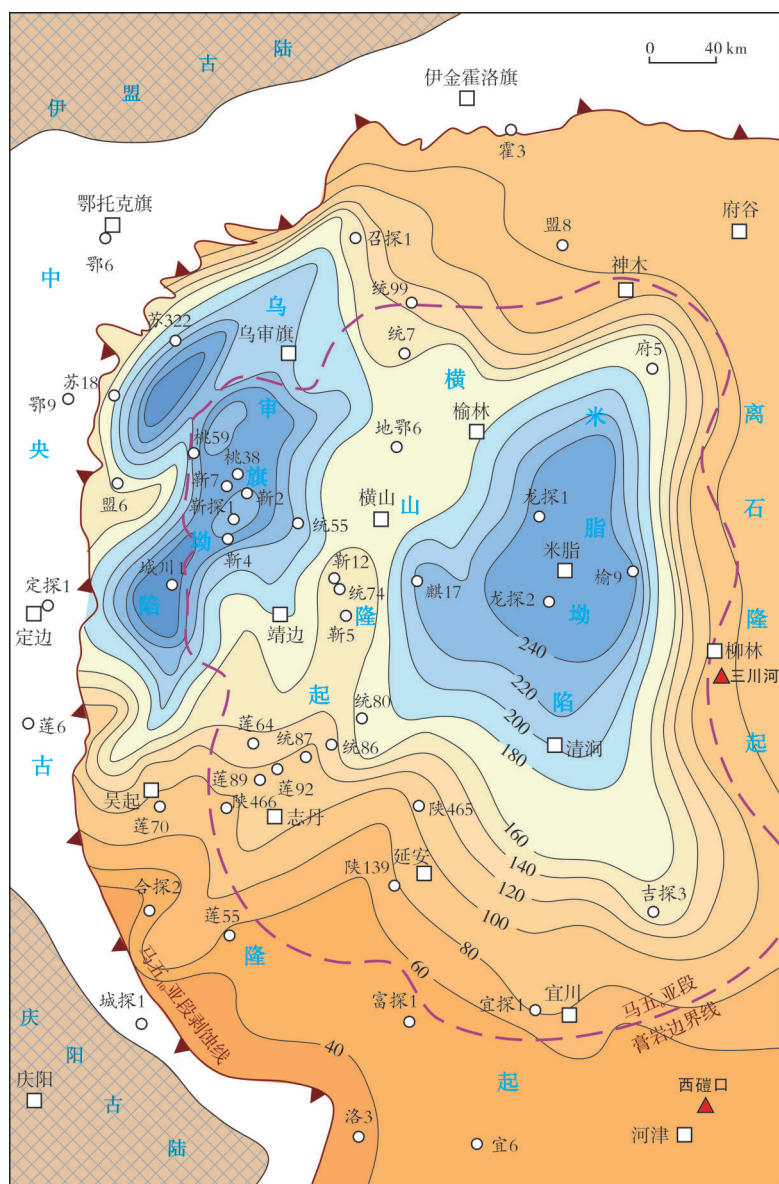
收稿日期:2020-04-20; 改回日期:2020-12-02

本文受中国石油科技重大项目“古老碳酸盐岩油气成藏分布规律与关键技术”(编号:2019B-0405,2019B-0406)、“深层油气储集层形成机理与分布规律”(编号:2018A-0103)和中国石油科技重大专项“长庆油田5000万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”所属课题(编号:2016E-0512,2016E-0514)联合资助。

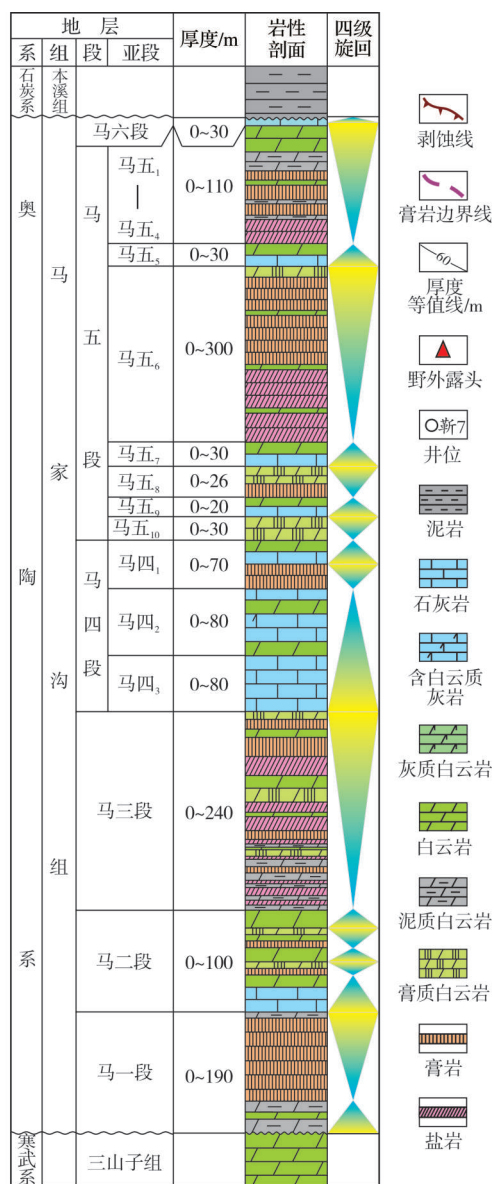
第一作者: 丁振纯,工程师,现从事海相碳酸盐岩储层成因研究及地震预测工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: dingzc_hz@petrochina.com.cn

赤道附近^[7-8],气候干旱炎热^[9],且具有“多隆多坳”的古地理格局^[10-11],由西向东依次为中央古隆起、乌审旗坳陷、横山隆起、米脂坳陷和离石隆起(图1a)。受古地貌、古气候和海平面升降变化控制,在纵向上发育了马一段、马三段和马五段3套膏盐岩层(图1b),其中马五段受次级海侵—海退旋回控制,马五₁₀、马五₈、马五₆和马五₁₋₄亚段以膏质白云岩和蒸发岩类为主;而马五₉、马五₇和马五₅亚段为相对海侵沉积,岩性以碳酸盐岩为主。前人根据勘探现状及沉积特征,将马家沟组分为上组合(马

五₄—马五₁亚段)、中组合(马五₁₀—马五₅亚段)和下组合(马一段—马四段)^[2]。由于中组合的马五₆亚段具有膏盐岩沉积厚度大、分布范围广的特征,又以该亚段为界,将中组合内部的马五₁₀—马五₆亚段简称为盐下地层^[3]。加里东末期,鄂尔多斯盆地发生构造抬升,并经历了140 Ma的风化暴露^[11],长期的大气淡水淋滤作用导致鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下地层在伊盟古陆东南侧、中央古隆起和庆阳古陆东北侧被完全剥蚀,形成一个“C形”剥蚀窗口(图1a)。



(a) 马五₁₀—马五₄亚段残余地层厚度图



(b) 马家沟组地层综合柱状图

图1 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下残余地层厚度图与马家沟组地层岩性柱状图

Fig. 1 Residual thickness map of pre-salt strata and stratigraphic-lithologic column of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin

2 白云岩储层特征

对钻井岩心与微观薄片的观察研究表明,鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下主要发育颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层(图2)。

2.1 颗粒滩白云岩储层

颗粒滩白云岩储层主要发育在马五₉、马五₇和马五₆亚段中,从岩性上可分为2类:颗粒白云岩和粉—细晶白云岩。

颗粒白云岩包含砂屑白云岩(图2a—2c)和鲕粒

白云岩(图2d,2e),储集空间主要为残余粒间孔和粒间溶孔,含少量硬石膏晶体铸模孔和裂缝。残余粒间孔(粒间溶孔)孔径大小一般为0.02~0.5 mm,粒间可见马牙状白云石、方解石、硬石膏和盐矿物等胶结物(图2a—2d),如图2d中颗粒边缘见第1世代犬牙状胶结物,局部边缘可见溶蚀现象,后期充填第2世代方解石胶结物;硬石膏晶体铸模孔呈长方形(图2e),长度一般为0.5~1 mm,宽0.1~0.2 μm,孔隙常常切割砂屑、鲕粒及其早期的粒状白云石胶结物。粉—细晶白云岩由粉晶白云石和细晶白云石组成(图2f,2g),

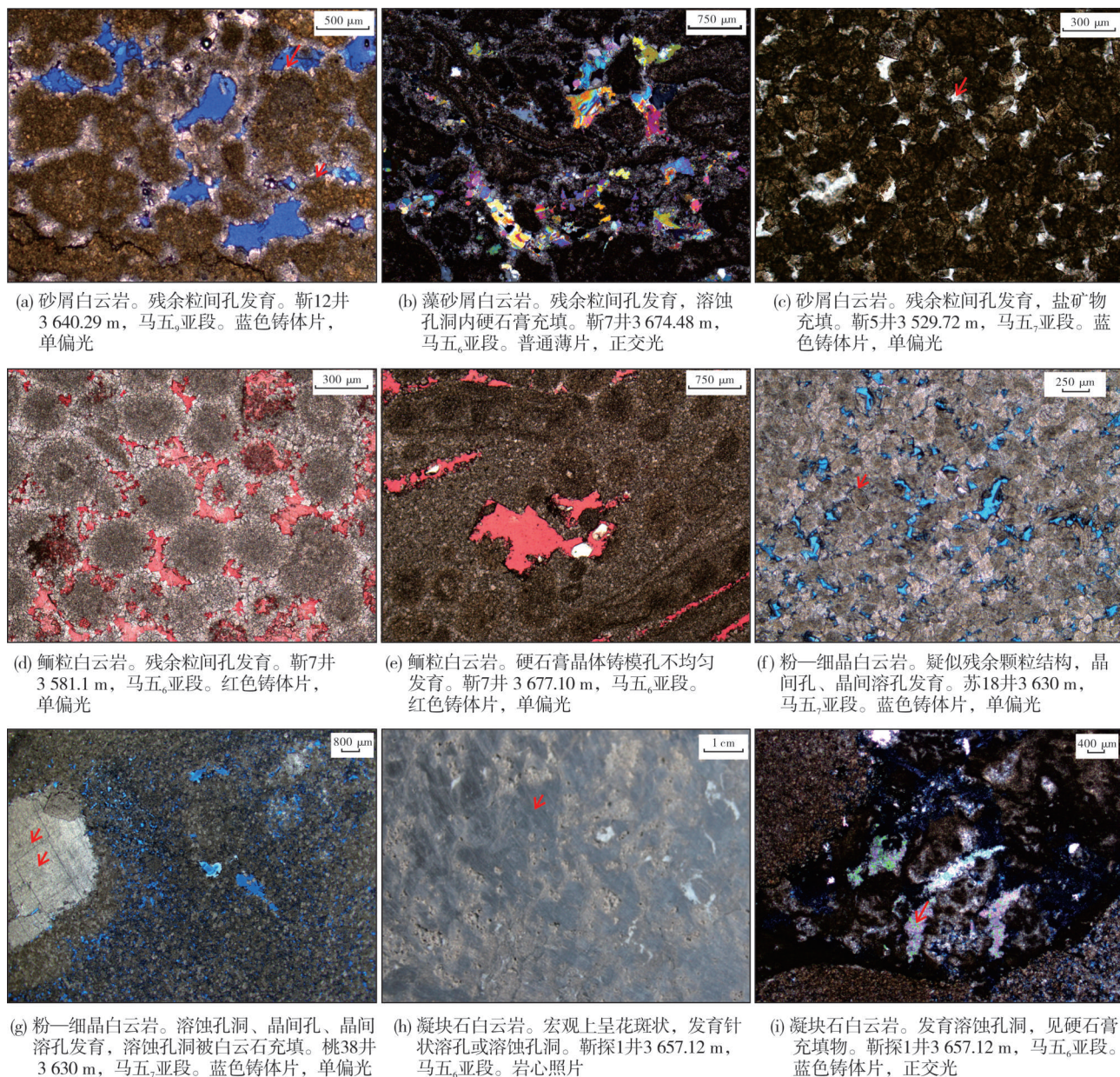


图2 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下储层岩性、储集空间类型及成岩特征

Fig. 2 Lithology, reservoir space types and diagenetic characteristics of the Ordovician pre-salt reservoirs in Ordos Basin

部分可见疑似残余颗粒结构(图2f),主要储集空间为溶蚀孔洞、晶间溶孔和晶间孔,含少量裂缝。溶蚀孔洞由残余粒间孔、晶间孔和晶间溶孔扩溶而来,直径介于0.2~20 mm,以6~10 mm为主,少数孔隙内被硬石膏、中晶白云石、巨晶白云石(图2g红色箭头所指)、石英和萤石等矿物充填。对200余块样品的物

性统计表明:该类储层的孔隙度介于1.27%~18.03%,平均孔隙度为6.04%,主要分布于2%~8%之间(图3a),其占比为80.4%;渗透率介于 $(0.002\sim172.83)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $7.36\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布于 $(0.1\sim100)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(图3b),其占比为86.7%,而渗透率在 $(1\sim10)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的样品占了48.4%。

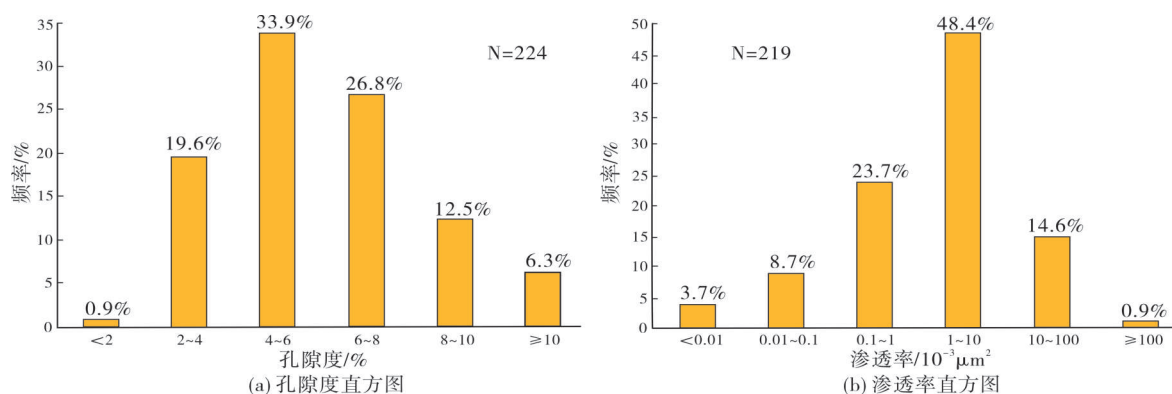


图3 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下颗粒滩白云岩储层物性直方图

Fig. 3 Physical property histograms of granular shoal dolomite reservoir of Ordovician pre-salt in Ordos Basin

2.2 微生物白云岩储层

微生物白云岩储层主要发育在马五₂亚段,储层岩性主要为凝块石白云岩,宏观上呈褐灰色与浅褐灰色杂乱分布的斑状结构(图2h,2i),灰色区域为粉晶白云岩(图2h红色箭头所指),浅色区域为残留凝块。浅色区域发育溶蚀孔洞,局部仍可见残余藻屑、砂屑(图2i),不发育孔隙处主要由他形粉晶白云

石组成,呈镶嵌接触(图2i)。孔径一般为0.02~0.2 mm,孔隙中可见方解石和硬石膏等充填物(图2i)。对50余块样品物性的统计表明:该类储层的孔隙度介于2.1%~14.6%,平均孔隙度为5.64%,主要分布于2%~8%之间(图4a),其占比为83.1%;渗透率介于 $(0.002\sim28.08)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $3.71\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布于 $(1\sim10)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(图4b),其占比为63.2%。

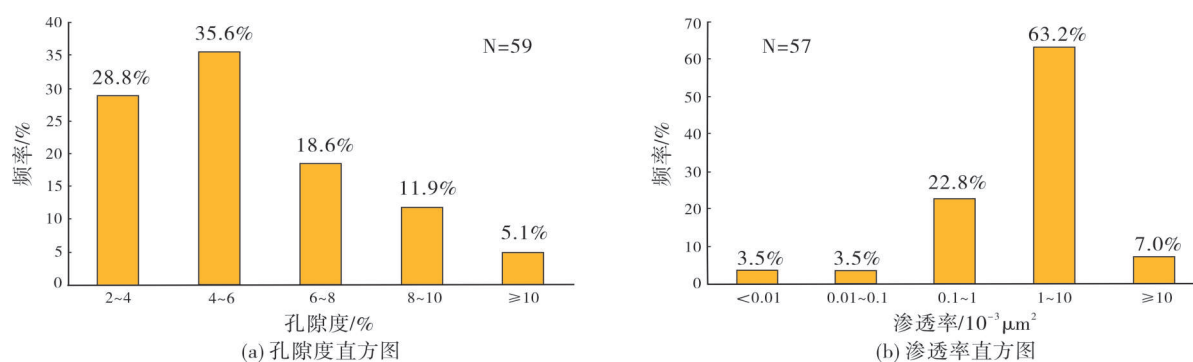


图4 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下微生物白云岩储层物性直方图

Fig. 4 Physical property histograms of microbial dolomite reservoir of Ordovician pre-salt in Ordos Basin

3 白云岩储层地球化学特征

3.1 碳、氧同位素组成

白云岩的碳、氧同位素组成与引起白云石化的成岩流体密切相关,并受到蒸发作用、稀释作用和

温度的影响^[12]。形成于高盐度蒸发海水中的白云岩具有较高的碳、氧同位素值;大气淡水环境下的成岩作用使白云岩的氧同位素值向偏负的方向迁移;在埋藏成岩环境中,埋深加大和温度的升高也会使氧同位素值向偏负的方向迁移。

从图5a可以看出,绝大多数奥陶系盐下粉晶白云岩、砂屑白云岩、鲕粒白云岩和粉—细晶白云岩的氧同位素值落在同期海水值(-6.6‰~-4.0‰)范

围内^[13-14];部分基质白云石的氧同位素值偏负与大气淡水溶蚀、深埋藏等因素相关;孔隙中的白云石和方解石氧同位素充填物偏负与其形成环境相关。

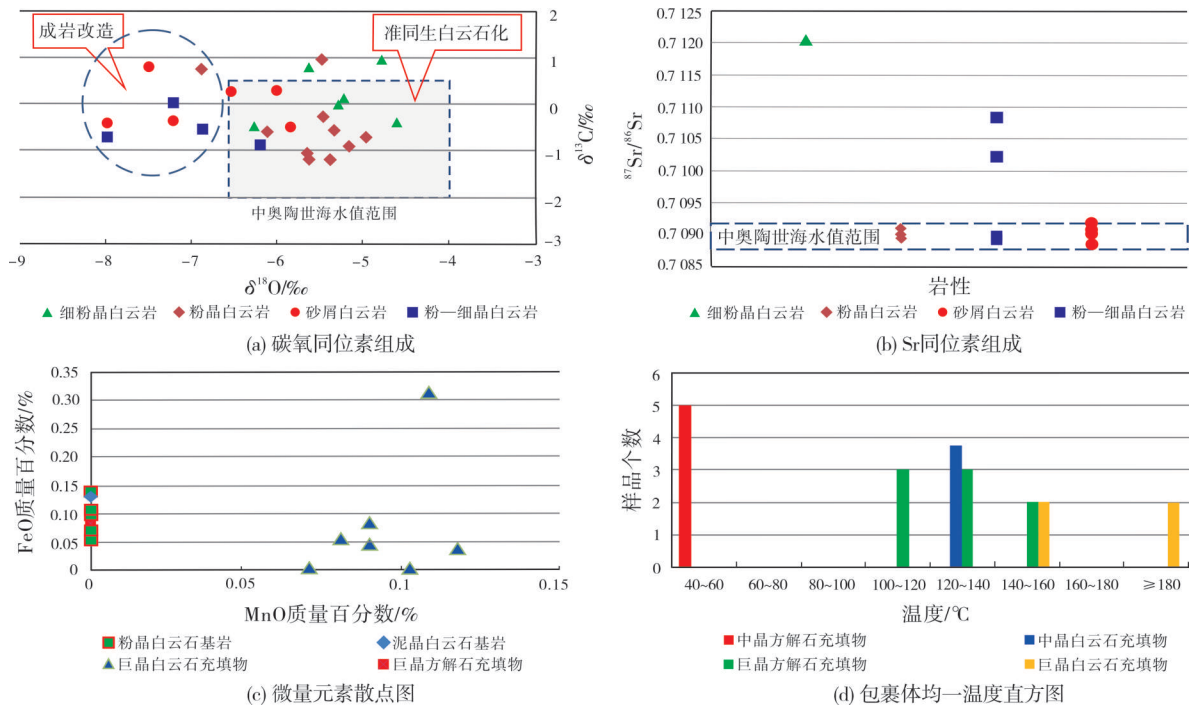


图5 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩地球化学特征

Fig. 5 Geochemical characteristics of Ordovician pre-salt dolomite in Ordos Basin

3.2 锶同位素组成

海相碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主要取决于同期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值^[12],并受到成岩作用影响。成岩过程中,受到硅酸盐矿物影响的深部地层水可向碳酸盐矿物提供放射性的 ^{87}Sr ,造成碳酸盐矿物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增加^[15];大气淡水流经富含放射性 ^{87}Sr 的硅质碎屑沉积物时将其溶入,并与海相碳酸盐矿物发生作用也会造成碳酸盐矿物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增加。

从14个奥陶系盐下样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布统计来看(图5b),绝大多数砂屑白云岩、粉—细晶白云岩和粉晶白云岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值落在同期海水值变化范围内(0.7087~0.7092)^[16],反映白云石化流体为同期海水,部分样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于同期海水值与后期成岩作用相关。

3.3 Fe、Mn含量

碳酸盐岩的成岩过程是对Fe、Mn不断获取的过程^[17-18]。埋藏条件下形成的碳酸盐岩具有较高的

Fe、Mn含量;热液流体对碳酸盐岩的改造过程也会导致碳酸盐矿物中Fe、Mn含量的增加^[19]。因此,可依据碳酸盐矿物的Fe、Mn含量判断其经受成岩蚀变的程度和成岩序次。

从电子探针的Fe、Mn元素分析结果来看(图5c),孔隙中的方解石、白云石充填物比大部分基质白云石具有更高的Fe、Mn含量,部分基质白云石Fe、Mn含量与充填物含量大致相当,表明其受到强烈的后期成岩流体改造,从而导致更多的Fe、Mn进入碳酸盐矿物晶格。

3.4 流体包裹体均一温度

通过测定参与矿物晶体形成的流体包裹体的近似成份和原始温度,可推测矿物岩石形成的环境和温度。

从图5d可以看出,研究区方解石充填矿物形成时间有2期:第1期为中晶方解石,由5个样品测得的包裹体均一温度为47.2~56.8°C;第2期为巨晶方解石,由8个样品测得的包裹体均一温度为104.5~148.1°C。白

云石充填物形成时间有2期:第1期为中晶白云石,4个样品的包裹体均一温度为123.2~129.2℃;第2期为巨晶白云石,来自统7井马五₇亚段深度3 162.8 m的2个样品的包裹体均一温度分别为140.3℃和150.1℃,来自莲64井马五₇亚段深度4 258.2 m的2个样品的包裹体均一温度为180.6℃和181.5℃。

4 储层成因

钻井岩心、微观薄片及地球化学特征综合研究表明,鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层孔隙的形成与沉积相和成岩作用相关。

4.1 储层与沉积相的关系

沉积相是海相碳酸盐岩形成的物质基础和先决条件,并控制优质储层的平面分布。中央古隆起、横山隆起及乌审旗坳陷中的低凸起地势相对较高,水动力较强,是颗粒滩和微生物丘发育的有利场所,这些部位的沉积物岩性主要为砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉—细晶白云岩和凝块石白云岩;米脂坳陷及乌审旗

坳陷中的凹陷地势相对较低,水动力较弱,发育局限潟湖相,沉积物岩性以粉晶白云岩、灰质粉晶白云岩和泥晶灰岩为主(图6)。前人研究认为,在颗粒滩沉积过程中,鲕粒或砂屑的机械堆积造成颗粒之间存在孔隙,颗粒滩的原始孔隙一般高达40%~60%^[20];而凝块石白云岩中的初始孔隙是由微生物粘结形成凝块,再由凝块颗粒造架产生的。这些沉积阶段形成的初始孔隙为储层的形成奠定了基础条件。

4.2 储层与成岩作用的关系

4.2.1 溶蚀作用是储层溶蚀孔洞形成的关键

研究表明,鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下白云岩储层经历了2期溶蚀作用:第1期溶蚀作用是准同生溶蚀作用,形成的孔隙类型为粒间溶孔、粒内孔和溶蚀孔,具有明显的组构选择性(图7a—7c);该类型成岩作用的发生与高频沉积旋回引起的暴露(短暂间断面)相关,呈现出颗粒滩或微生物丘旋回与孔洞发育程度及物性之间具有正相关性,即在向上变浅的颗粒滩或微生物丘旋回中,越

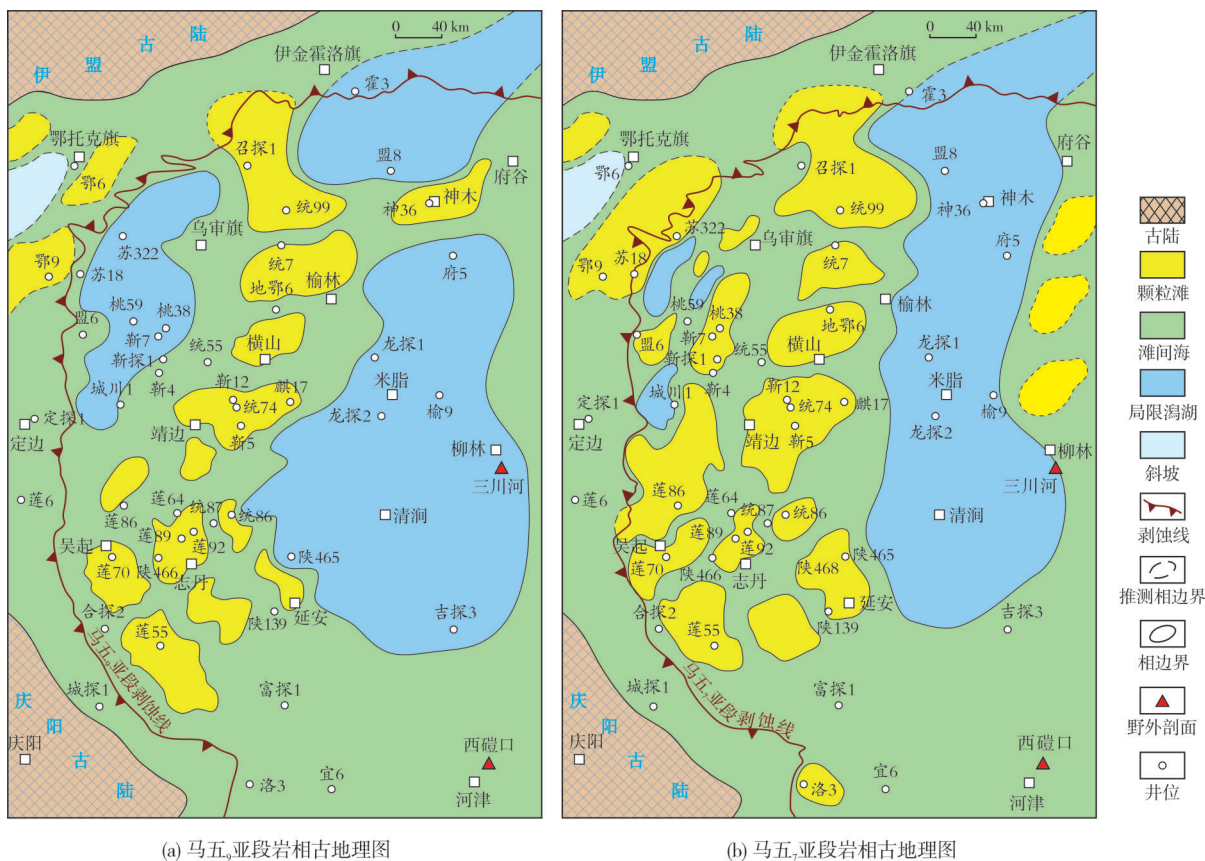


图6 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₉亚段与马五₇亚段岩相古地理图

Fig. 6 Lithofacies paleogeographic map of $O_1m_3^9$ and $O_1m_3^7$ in Ordos Basin

往上靠近高频层序界面(短暂间断面),孔洞越发育,物性也越好(图7)。第2期溶蚀作用为晚表生大气淡水溶蚀作用,形成的孔隙类型为溶蚀孔洞、硬石膏晶体铸模孔和溶缝;该类成岩作用的发生与加里东末期长达140 Ma的风化暴露有关。长期的大气淡水溶蚀作用致使在中央古隆起东侧形成一个环古隆起分布、缺失马五₁₀亚段—马五₆亚段的剥蚀窗口,大气淡水对中央古隆起剥蚀窗口区的盐下白云岩储层进行溶蚀,并沿剥蚀窗口下渗至盆地东部处于埋藏环境下的盐下白云岩储层中,溶蚀准同生期形成的硬石膏柱状晶体等易溶矿物(图2e)或对早期形成的储层进行溶蚀扩溶,造成部分基质白云岩的氧同位素组成偏负(图

5a)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值偏大(图5b),形成富含溶蚀孔洞、粒间溶孔和硬石膏铸模孔的白云岩储层。

4.2.2 白云石化作用改造储层岩石结构及孔隙类型

从研究区白云岩岩石学与地球化学特征来看,部分奥陶系盐下白云岩储层岩性为晶粒较粗的粉—细晶白云岩,且部分可见残余颗粒结构(图2e—2g),其氧、锶同位素仍处于同期海水值范围内,表明此类白云岩储层经历了近地表浅埋藏白云石化作用,白云石化流体为封存于孔隙中的富 Mg^{2+} 地层水。埋藏白云石化作用对储层的改造主要为导致储层的原始岩性结构被破坏或完全消失,孔隙由早期的粒间孔、粒间溶孔转换为晶间孔和晶间溶孔。

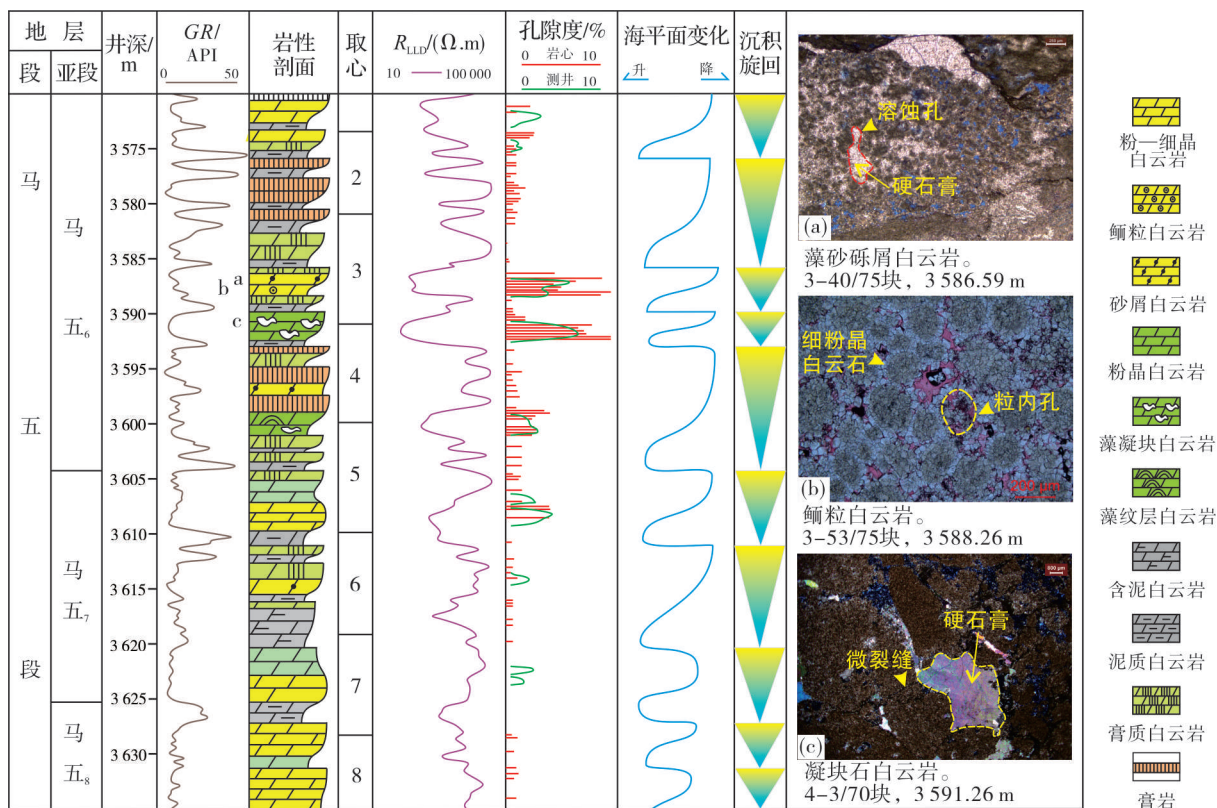


图7 鄂尔多斯盆地新2井奥陶系盐下沉积旋回与储层综合柱状图

Fig. 7 Sedimentary cycle-reservoir comprehensive column of Ordovician pre-salt in Well Jin 2, Ordos Basin

4.2.3 充填作用降低储层储集性能

钻井岩心、微观薄片与地球化学特征研究表明,鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下白云岩储层经历了粒状细粉晶白云石、硬石膏、盐矿物、石英、细—中晶白云石和方解石等充填作用。粒状细粉晶白云石形成于准同生期,呈等厚环边状分布于颗粒间,为海底成岩环境

产物,是储层孔隙中首期充填矿物(图2a,2b)。硬石膏、盐矿物充填作用也形成于准同生期,形成时间晚于粒状白云石形成期及准同生溶蚀作用,其流体来源于膏岩、盐岩沉积期的高盐度卤水,流体的运移通道为准同生期暴露面,充填的部位往往是地势相对较低的颗粒滩或微生物白云岩储层中的孔隙空间(图2c, 2e, 7a, 7c)。由图5d反映的2期方解石充填物、2期

白云石充填物,对其Fe、Mn含量及流体包裹体的综合研究表明:第1期方解石形成于晚表生成岩期,第2期方解石形成于晚埋藏期;第1期中晶白云石和第2期巨晶白云石均形成于晚埋藏期,但第2期巨晶白云石形成时间晚于第1期中晶白云石。

4.2.4 破裂作用形成的裂缝改善了储层渗流能力

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积后经历了加里东末期构造抬升、燕山期构造反转及晚期再次构造抬升等构造运动。受其控制,研究区奥陶系盐下白云岩储层经历了多期次构造破裂作用,由其形成的裂缝将溶蚀孔洞、粒间(溶)孔和晶间(溶)孔等早期孔隙连通起来,从而改善了储层的渗流能力。尤其是晚期裂缝,由于形成时间晚,通常切割围岩、硬石膏、连晶方解石和中—粗晶白云石等晚期充填矿物,且处于开启状态,对改善储层渗流能力起积极的建设性作用(图7c)。

5 有利储层分布

储层成因分析表明,控制鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层发育的主要因素是颗粒滩与微生物丘微相、溶蚀作用和膏盐矿物充填作用,这意味着经历了溶蚀作用的颗粒滩和微生物丘有利于储层孔隙的形成,而发育于远离风化壳剥蚀窗口且位于膏岩、盐岩边界线内侧的颗粒滩和微生物白云岩储层中的孔隙易于被膏盐矿物充填,而且晚表生岩溶作用改造弱或未受到改造,不利于原始孔隙的保存。据此,叠合奥陶系盐下颗粒滩体分布、马五₂亚段剥蚀线和马五₂亚段膏盐岩边界线,编制了鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层分布与评价图(图8)。如图8所示,鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层主要沿中央古隆起、横山隆起及乌审旗坳陷中的低凸起分布。根据沉积相和成岩作用特征,储层的分布可以划分为3类区:Ⅰ类区紧邻中央古隆起剥蚀窗口,沉积期颗粒滩发育,准同生期和晚表生岩溶期大气淡水溶蚀作用强,且无膏盐矿物充填(图2f);Ⅱ类区位于马五₂亚段膏岩边界线与盐岩边界线之间的颗粒滩和微生物丘分布区,存在硬石膏充填或再次溶蚀等现象,因而孔隙中既可见硬石膏充填物(图2b, 2h, 2i),也可见受晚表生期大气淡水溶蚀作用改造形成的硬石膏铸模孔(图2e);Ⅲ类区位于盐岩边界线内侧的颗粒滩分布区,孔隙中盐矿物充填严重(图2c),且不易受到晚表生岩溶作用的再次改造。

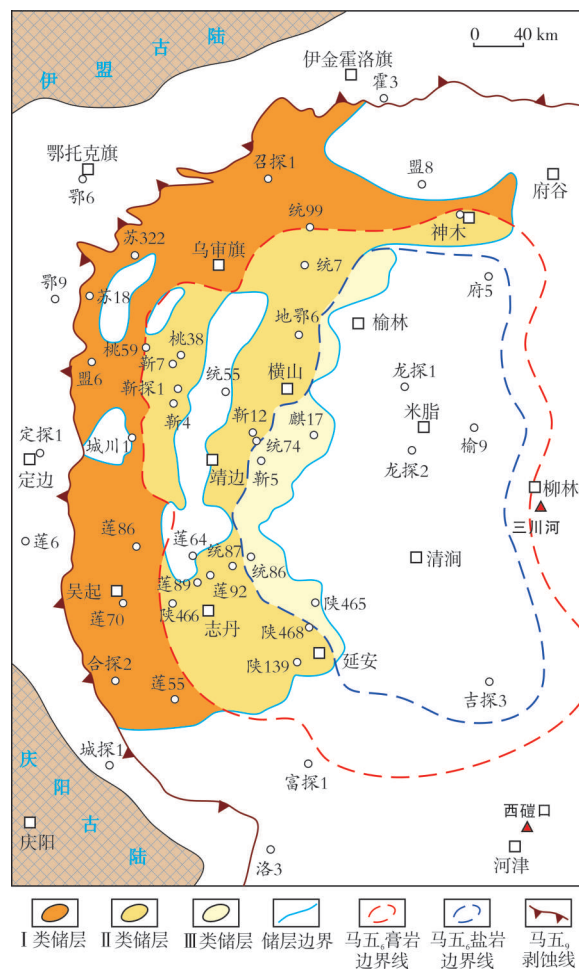


图8 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下有利白云岩储层分布区

Fig. 8 Distribution of favorable dolomite reservoir of Ordovician pre-salt in Ordos Basin

6 结论

(1) 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下主要发育颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层。颗粒滩白云岩储层岩性为鲕粒白云岩、砂屑白云岩和粉—细晶白云岩,主要储集空间为溶蚀孔洞、残余粒间(溶)孔、晶间(溶)孔和微裂缝,孔隙度介于1.27%~18.03%,平均孔隙度为6.04%;微生物白云岩储层岩性为凝块石白云岩,储集空间为溶蚀孔洞和微裂缝,孔隙度介于2.1%~14.6%,平均孔隙度为5.64%。

(2) 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层孔隙的形成与沉积相和成岩作用相关。颗粒滩和微生物丘是储层发育的物质基础;溶蚀作用进一步改善储集性能;埋藏白云石化作用改造储层岩石结构及孔隙类型;充填作用堵塞孔隙,降低储层孔隙度和渗流能力;破裂作用形成的裂缝改善了储层渗流能力。

(3) 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层主要

受颗粒滩与微生物丘微相、溶蚀作用和膏盐矿物充填作用控制,有利储层沿中央古隆起、横山隆起及乌审旗坳陷中的低凸起分布。

参考文献

- [1] 侯方浩,方少仙,何江,等.鄂尔多斯盆地靖边气田区中奥陶统马家沟组五₁—五₄亚段古岩溶型储层分布特征及综合评价[J].海相油气地质,2011,16(1):1-13.
- [2] 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].天然气工业,2011,31(12):1-10.
- [3] 姚泾利,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.
- [4] 陈洪德,胡思涵,陈安清,等.鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧非岩溶白云岩储层成因[J].天然气工业,2013,33(10):1-7.
- [5] 左智峰,熊鹰,何为,等.鄂尔多斯盆地中部马五段盐下储层成岩作用与孔隙演化[J].地质科技情报,2019,38(5):155-164.
- [6] 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.
- [7] 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,1997,42(4):401-406.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨俊杰,裴锡古.中国天然气地质学 卷四:鄂尔多斯盆地[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [12] 黄思静.碳酸盐岩的成岩作用[M].北京:地质出版社,2010.
- [13] ALLAN J R, WIGGINS W D. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution[M]. Tulsa: AAPG continuing education course note series No. 36,1993.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 黄思静.海相碳酸盐矿物的阴极发光性与其成岩蚀变的关系[J].岩相古地理,1990,10(4):9-15.
- [18] 黄思静,卿海若,胡作维,等.川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J].地球科学(中国地质大学学报),2008,33(1):26-34.
- [19] 金之钧,朱东亚,胡文瑄,等.塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J].地质学报,2006,80(2):245-253.
- [20] 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.

编辑:黄革萍

Characteristics, genesis and distribution of the Ordovician pre-salt dolomite reservoirs in Ordos Basin

DING Zhenchun, GAO Xing, DONG Guodong, TANG Jin, HUI Jiangtao, WANG Shaoyi, ZHAO Zhenyu, WANG Hui

Abstract: The Ordovician pre-salt dolomite reservoir is an important replacement field for natural gas exploration in Ordos Basin. Based on drilling core, thin section, physical analysis, geochemical characteristics and other related information, the characteristics, genesis and distribution of the Ordovician pre-salt dolomite reservoir are systematically studied by using the method of multi-parameter analysis in micro-region. The results showed that: (1)The granular shoal dolomite reservoir and microbial dolomite reservoir are mainly developed in the Ordovician pre-salt. The reservoir lithology of granular shoal dolomite is arenaceous dolomite, oolitic dolomite and very fine-fine crystalline dolomite, the pore space is composed of dissolved pores, intergranular pores, intercrystal (dissolved) pores and fractures, and the average porosity is 6.04%. The lithology of microbial dolomite is thrombolite dolomite, the pore space is composed of dissolved pores, dissolved vugs and micro-fractures, and the average porosity is 5.64%. (2)The pores of the Ordovician pre-salt reservoir inherited the primary pores of granular shoal and microbial dolomite which suffering from the dissolution, dolomitization, the mineral filling of gypsum, salt, quartz, finely-medium crystalline dolomite and calcite. (3) It is predicted that the favorable reservoir is mainly distributed in the central paleo-uplift, the Hengshan uplift belt and the low uplift zone of Wushenqi depression.

Key words: dolomite; dissolution; filling; sub-salt; Majiagou Formation; Ordovician; Ordos Basin

DING Zhenchun, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir research and seismic prediction. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China