

鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩成因 及其储集性能

苏中堂¹, 陈洪德¹, 徐粉燕², 金学强³

(1 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室)

(2 四川省核工业辐射测试防护院; 3 宁夏国土资源调查监测院)

摘要 对鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组野外剖面、钻井岩心和铸体薄片观察以及地球化学分析及岩石物性测试,马家沟组白云岩可分为泥微晶白云岩、晶粒白云岩和溶蚀残余白云岩三大类。泥微晶白云岩常有石膏伴生, Sr含量较高,其稀土配分模式及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间等特征与本区的泥微晶灰岩相似,包裹体均一温度接近地表温度,为近地表与海水相关流体准同生白云石化。晶粒白云岩的伴生矿物少, Sr含量低,其稀土配分模式及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间与本区的泥微晶灰岩相近,包裹体均一温度较高,为与海水相关流体埋藏白云石化。溶蚀残余白云岩为前两类白云岩受后期大气淡水改造而成。晶间孔、晶间溶孔、溶孔为马家沟组白云岩的主要储集空间。泥微晶白云岩的孔隙度、渗透率均较低,难构成储层;晶粒白云岩的孔隙度和渗透率较高,可成为良好储层;而溶蚀残余白云岩具高孔高渗特征,为优质储集岩类。盆地中东部、东南部、南部及天环地区是白云岩型储层勘探的重点区域。

关键词 鄂尔多斯盆地; 马家沟组; 白云岩储层; 白云岩成因; 地球化学特征; 储集层特征

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

白云岩作为最重要的碳酸盐岩油气藏储层之一,一直是人们关注的焦点。近几年,我国在四川东北部、塔里木盆地所发现的大气田均与白云岩有关^[1-5],羌塘盆地侏罗系白云岩也被认为是极具油气勘探潜力的储集岩^[6]。鄂尔多斯盆地拥有可观的白云岩体,很多学者通过不同的方法研究其成因,提出了不同的观点^[7-18],希望由此推动碳酸盐岩油气勘探取得新进展,但可惜盆地内一直没有发现白云岩型气田。笔者试图通过对鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组白云岩岩石学及其地球化学特征的分析,阐明不同白云岩的成因,并结合岩石储层物性分析判别不同白云岩体的储集性能,为寻找盆地内白云岩型储层提供依据,以促进盆地碳酸盐岩油气勘探取得新突破。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地在早古生代加里东构造幕演化阶段位于华北板块西部,是典型的克拉通盆地,其北部

为古亚洲洋,西南部为秦祁海,盆地具有内部稳定、周缘活动的特点。早奥陶世亮甲山期末的怀远运动使盆地短暂抬升,而后发生早古生代最大一次海侵,形成了马家沟组及其同时期相应地层。马家沟组依据沉积旋回自下而上分为6个岩性段。

马家沟期,盆地内部表现为隆坳相间格局,其西南部发育中央古隆起,北部横亘伊盟隆起,该时期海相沉积地层主要受东部华北海和西南部秦祁海的影响。盆地沉积东西分异明显,东部为陆表海碳酸盐台地,主要发育潮坪相、局限台地相沉积,在柳林一带形成膏盐湖;西南缘为陆缘海碳酸盐台地,潮坪、碳酸盐台地、台地边缘、陆棚—盆地等各个相带均有发育。因此,盆地东部主要发育一套白云岩夹盐岩沉积,西南部发育厚层灰岩夹白云岩沉积(图1)。马家沟组沉积之后,加里东运动使得盆地整体抬升,盆地主体缺失了中—晚奥陶世沉积,在经历了长达1.5亿年的风化剥蚀后,形成了一套风化壳储集体。

收稿日期: 2012-05-16; 改回日期: 2012-11-18

基金项目: 本文受油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金资助项目(编号: PLC201202)和四川省教育厅基金项目(编号: 12ZB008)共同资助

苏中堂: 1981年生,讲师。2011年毕业于成都理工大学沉积学专业,获博士学位。主要从事储层沉积学方面的教学与科研工作。通讯地址: 610059 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号; 电话: (028)84075588

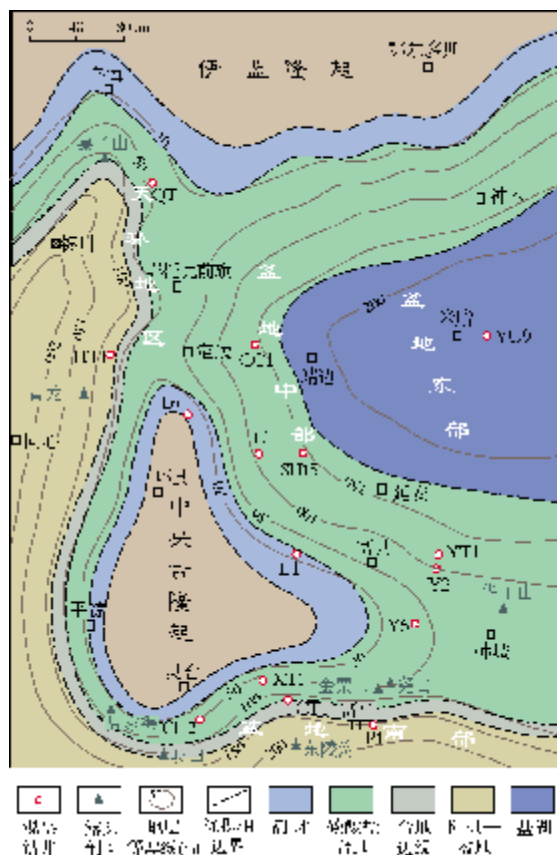


图 1 鄂尔多斯盆地马家沟期沉积格局及沉积相分布图

2 岩石学特征

冯增昭等^[19]曾对鄂尔多斯盆地白云岩进行详细深入的研究,并将其分为准同生白云岩和准同生后白云岩两大类及其八种不同成因类型。笔者在其研究的基础上,通过对鄂尔多斯盆地白云岩 8 条野外露头剖面、15 口钻井岩心(图 1)以及 300 件铸体薄片的观察,将盆地地下奥陶统马家沟组白云岩先按成

因分为泥微晶白云岩、晶粒白云岩和溶蚀残余白云岩三大类,再根据结构,在泥微晶白云岩中分出泥晶白云岩和粒屑微晶白云岩两种类型,在晶粒白云岩中又分出具残余砂屑粉晶白云岩和结晶白云岩两种类型(表 1)。这 5 种白云岩的时空发育特征如图 2,其岩石学特征描述如下。

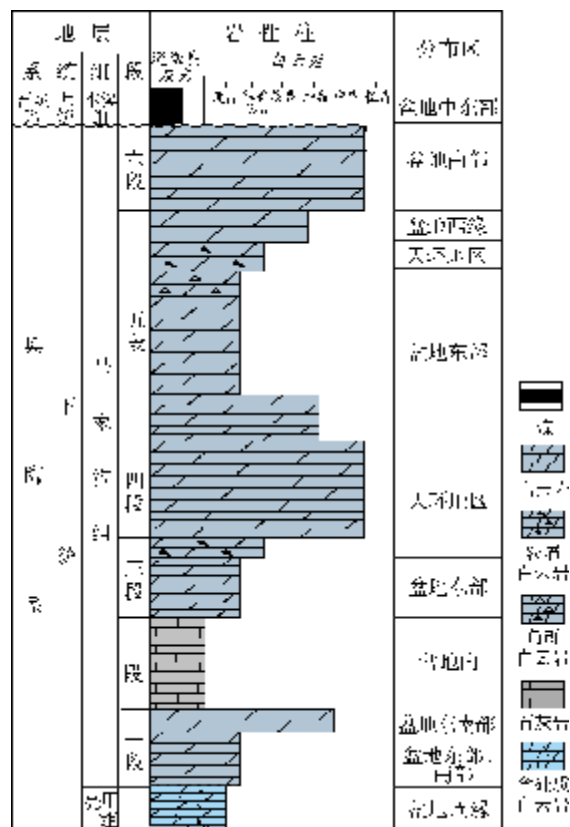


图 2 鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组白云岩发育综合柱状图

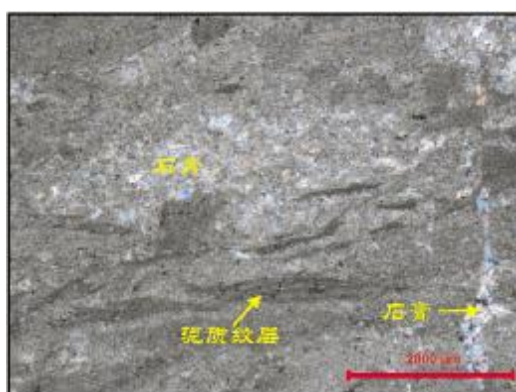
泥晶白云岩 该类岩石不含或少含颗粒,局部可见藻纹层或泥纹,颗粒含量小于 5%,伴生石膏呈

表 1 鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组白云岩岩石学特征

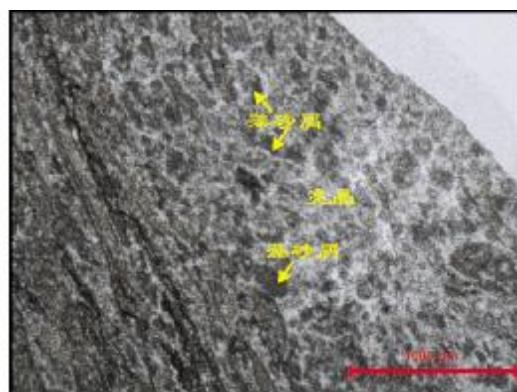
| 分 类 | 岩石结构 | 物性特征 | | 发育层位 | 分布地区 |
|---------|-----------|------------|-----|----------------|---------------------|
| | | 孔隙性(%) | 渗透性 | | |
| 泥微晶白云岩 | 泥晶白云岩 | 面孔率 2~5 | 差 | 一段,三段,五段 | 盆地东部,天环地区 |
| | 粒屑微晶白云岩 | 面孔率 1~3 | 差 | 三段,五段 | 天环地区 |
| 晶粒白云岩 | 残余砂屑粉晶白云岩 | 面孔率 5~8 | 较好 | 五段 | 中央古隆起东缘、南缘,天环地区 |
| | 结晶白云岩 | 面孔率 2~10 | 好 | 一段,四段,五段中下部,六段 | 天环地区,盆地中东部,盆地南部和东南部 |
| 溶蚀残余白云岩 | | 岩心孔隙度 5~12 | 好 | 四段,五段,六段上部 | 全盆地 |

结核状、板状集合体或层状产出,往往见粒状黄铁矿弥散于岩石中,主要分布在盆地东部、天环地区的马家沟组一、三、五段中。按岩石组构特征可分纯净的泥微晶白云岩(图3a)、含藻屑水平纹层的泥晶白云岩和含膏(膏质)泥晶白云岩三种类型。泥晶白云岩

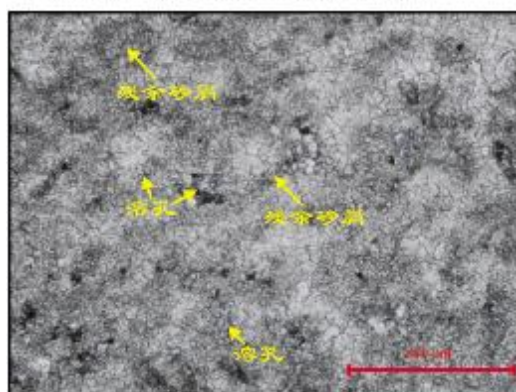
大多数孔隙不发育,部分重结晶成为粉晶白云岩,其白云石的晶面平直,自形程度好。岩石较致密,局部见有溶蚀孔、缝,被硅质或其它矿物充填,也见有膏模孔和针状溶孔,面孔率可达2%~5%,但孔隙连通性差,渗透率低,基本不形成好储层。



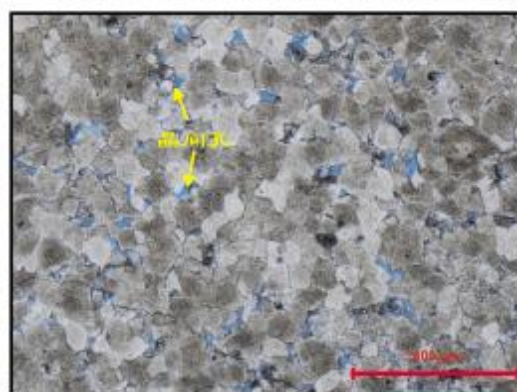
(a) 泥微晶白云岩。泥微晶结构,含石膏及泥质纹层。SH15井3590.6m,马家沟组五段。×20,正交偏光



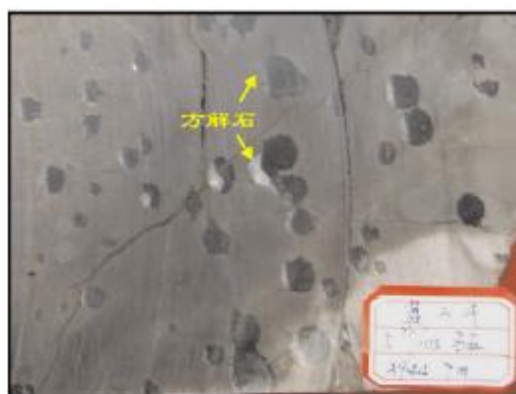
(b) 粒屑微晶白云岩。粒屑结构,藻球粒不规则,颗粒间被微晶白云石胶结。L6井4627.6m,马家沟组二段。×40,单偏光



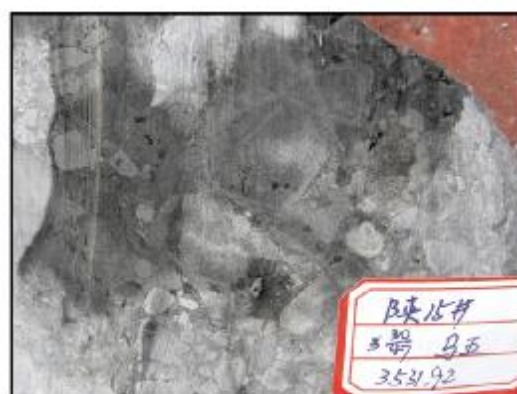
(c) 残余砂屑粉晶白云岩。残余结构,砂屑中心干净、边缘模糊,白云石粉晶级。CC1井3657.5m,马家沟组五段。×100,单偏光



(d) 晶粒白云岩。中粗晶结构,晶体曲向他形,晶间孔、晶间溶孔发育。L6井4509.8m,马家沟组四段。×40,单偏光



(e) 溶蚀残余白云岩。白云岩中发育蜂窝状溶孔,被黑色、白色方解石充填。L3井3944.7m,马家沟组五段。岩心



(f) 溶蚀残余白云岩。岩溶作用形成大小不等、磨圆较差的岩溶角砾。SH15井3531.92m,马家沟组五段。岩心

图3 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组白云岩主要结构类型和特征照片

粒屑微晶白云岩 该类岩石具粒屑结构, 常见粒屑包括砾屑、砂屑和藻球粒(图 3b), 主要分布于天环地区马家沟组三、五段中。粒屑多微晶结构, 少数重结晶成粉晶。砾屑微晶白云岩的粒屑间主要为微晶白云石, 局部被石膏充填; 砂屑微晶白云岩的砂屑间几乎都为微晶白云石, 部分砂屑发生变形; 藻球粒微晶白云岩多被微亮晶白云石胶结, 部分球粒之间为微晶白云石。该类岩石相对致密, 偶见孔隙发育, 面孔率可达 1%~3%, 连通性和渗透性差, 不具形成良好储层的条件。

残余砂屑粉晶白云岩 该类岩石原岩为砂屑泥晶白云岩或含生物碎屑砂屑泥晶白云岩, 多见于天环地区及盆地中部中央古隆起东缘和南缘的马家沟组五段中。经重结晶作用原岩结构不明显, 白云石达到粉晶级, 彼此镶嵌接触, 残余砂屑往往中心干净、边缘模糊, 砂屑间为较干净的白云石(图 3c)。该类岩石容易发生溶蚀作用, 在砂屑间形成溶孔, 部分溶孔被后期方解石或白云石充填, 面孔率 5%~8%, 且连通性较好, 可成为较好储层。

结晶白云岩 该类岩石少见伴生矿物, 主要见于盆地南部马家沟组六段、天环地区马家沟组四段、盆地中东部马家沟组五段下部及盆地东南部马家沟组一段中。该类白云岩可按晶粒大小再细分为粉—细晶白云岩、细—中晶白云岩、中—粗晶白云岩和粗晶白云岩。粉—细晶白云岩特征因晶体形态不同而存在差异: 晶体曲面他形镶嵌接触者不发育晶间孔, 含有少量岩屑、藻类及泥质; 晶体半自形、自形贴面接触者发育晶间孔, 面孔率 3%~5%, 可成为有效储层; 晶形为麦粒状时面孔率可达 10%~15%, 能成为优质储层。细—中晶白云岩内细晶白云石通常较脏, 晶体曲面他形居多, 中晶白云石往往较干净, 晶面多平直, 发育晶间孔, 面孔率 4%~6%, 可成为有效储层。中—粗晶白云岩白云石晶体多为曲面他形, 往往形成环带, 晶间孔、晶间溶孔发育, 面孔率可达 8%~

10%(图 3d)。粗晶白云岩中的白云石呈半自形—他形, 晶体较脏, 岩石相对致密, 面孔率 2%~3%。由此可见, 结晶白云岩可能形成良好的储层, 是油气勘探需要关注的重点, 这种白云岩主要分布在天环地区马家沟组四段中下部、盆地中东部马家沟组五段下部及盆地南部、东南部马家沟组一段和六段中。

溶蚀残余白云岩 该类岩石受岩溶作用改造, 在全盆地奥陶系顶部风化壳内均有分布, 主要位于马家沟组四、五、六段顶部地层中。岩石主要表现为蜂窝状溶蚀孔洞白云岩和岩溶角砾白云岩。前者发育大量的溶蚀孔洞, 多被白色或黑色方解石、白云石及少量石英充填、半充填(图 3e), 岩心观察孔隙率可达 5%~12%, 可成为良好储集岩; 后者角砾大小不一, 大部分呈棱角状, 部分具溶圆现象, 角砾成分主要为泥—微晶白云岩或颗粒白云岩, 角砾间为泥—微晶白云石(图 3f)、石膏、有机质和泥质组分, 孔隙不太发育, 孔隙率一般低于 1%, 属于非理想储层岩类。

3 地球化学特征

对马家沟组泥微晶白云岩、晶粒白云岩及溶蚀残余白云岩进行微量元素、稀土元素及碳氧同位素分析, 结合郑葆英等^[20]、张永生等^[21]包裹体研究资料, 现分别讨论其地球化学特征。微量元素 Fe 和 Sr 以及稀土元素测试由侯新生教授用仪器中子活化分析法(INAA)测量, 测量仪器采用美国 CANBER 公司生产的 Ge(Li) 半导体探测器和 4096 道分析器; Mn 元素由侯新生教授采用 X 射线荧光法测量, 测量仪器为 Si-PIN 半导体探测器, 采用 Pu-239 激发源, 检出限为 0.01%。碳、氧同位素由中国石油集团西南油气田分公司勘探开发研究院地质实验室采用 MAT252 气体同位素质谱仪测试完成(实验温度 20℃, 湿度 44% RH)。分析结果见表 2, 各类白云岩地球化学特征的详细分析可参阅文献[7]和文献[8], 本文在此仅略加概述。

表 2 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组白云岩地球化学特征

| 岩 性 | 微量元素(μg/g) | | | | 稀土元素(μg/g) | | | | 碳氧同位素(‰,PDB) | | | 包裹体 | |
|---------|------------|---------|-------|--------|------------|---------|-------|-------|--------------|-------------------|-------------------|-----|--------------------|
| | 样品数 | Fe | Mn | Sr | 样品数 | ΣREE | δEu | δCe | 样品数 | δ ¹³ C | δ ¹⁸ O | 个数 | 均一温度(℃) |
| 泥微晶白云岩 | 8 | 5215.0 | 346.2 | 965.2 | 8 | 46.917 | 0.634 | 0.942 | 17 | -0.885 | -5.949 | 4 | 97.4 ^① |
| 晶粒白云岩 | 10 | 2361.0 | 334.0 | 60.0 | 10 | 8.788 | 0.724 | 0.780 | 16 | 0.181 | -5.927 | 21 | 201.3 ^② |
| 溶蚀残余白云岩 | 4 | 17847.5 | 335.0 | 50.7 | 4 | 142.147 | 0.744 | 1.008 | 7 | -1.390 | -7.308 | — | — |
| 泥微晶灰岩 * | 1 | 14280.0 | 400.0 | 1972.0 | 1 | 72.409 | 0.656 | 1.046 | 6 | 0.457 | -6.855 | — | — |

注: * 为对比样品; ① 数据引自文献[20]; ② 数据引自文献[21]

微量元素 泥微晶白云岩、晶粒白云岩的微量元素特征(表2)表明,白云石化过程中未受或很少受到大气淡水的影响,因而使石灰岩发生白云石化的流体为海水或与海水有关。泥微晶白云岩具较高的 Sr 含量($965.25 \mu\text{g/g}$),与其交代石灰岩不彻底有关,表明这类白云石化过程较快,可能形成于准同生阶段;晶粒白云岩的低 Fe 含量($2\,361 \mu\text{g/g}$)和低 Sr 含量($60 \mu\text{g/g}$)反映了白云石化过程中大量的 Fe 和 Sr 流失,表明这种白云岩可能形成于埋藏过程中;溶蚀残余白云岩 Fe 含量($17\,847.5 \mu\text{g/g}$)增加,而 Sr 含量($50.75 \mu\text{g/g}$)大量流失,说明存在大量外来非海源流体的参与。

稀土元素 稀土元素配分模式可提供物质来源信息^[7,22]。从表2和图4可知,经北美页岩(NASC)标准化^[23]后的配分模式显示:泥微晶白云岩与晶粒白云岩配分模式相似,跟泥微晶灰岩相近,说明白云石化的流体与海水有关(泥微晶灰岩受成岩蚀变小,能代表同期海水的相关信息^[24]);而溶蚀残余白云岩的配分模式不同于泥微晶灰岩,显示充填在溶孔、溶缝中的有机质或泥质吸附稀土元素提高了其总量。低温、碱性环境中 Eu^{3+} 易被还原为 Eu^{2+} 而迁移贫化^[25], Ce^{3+} 易被氧化为 Ce^{4+} 优先进入沉积物^[26-27]。泥微晶白云岩中 δCe 呈弱负异常($0.942 \mu\text{g/g}$)和 δEu 呈弱—中等负异常($0.634 \mu\text{g/g}$)^[7],说明该类白云岩形成于弱还原—弱氧化的低温环境中;而晶粒白云岩较泥微晶白云岩表现为稍强的 δCe 负异常($0.78 \mu\text{g/g}$)和稍弱的 δEu 负异常($0.724 \mu\text{g/g}$)^[7],反映出这种白云岩形成温度高于泥微晶白云岩;溶蚀残余白云岩表现出 δCe 无负异常($1.008 \mu\text{g/g}$)和最弱的 δEu 负异常($0.744 \mu\text{g/g}$)^[7],表明岩溶流体具弱氧化低温性质。

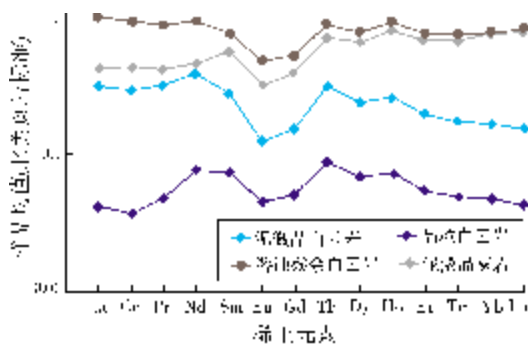


图4 鄂尔多斯盆地马家沟组稀土元素配分模式
(据文献[7-8]修改)

碳、氧同位素 碳酸盐岩的碳同位素比较稳定,常被用作示踪剂。马家沟组泥微晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据大部分落在 Veizer 等^[28]所建立的奥陶系碳酸盐岩碳同位素变化范围之内(图5),因此能代表马家沟组沉积时的海水信息,并可作为白云石化流体性质对比分析的依据。而碳酸盐岩的氧同位素同时是流体和温度的函数^[29],其成岩意义需要结合碳同位素来共同讨论。 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图5)显示,泥微晶灰岩投点弥散度小;泥微晶白云岩大部分投点均在泥微晶灰岩投点附近,说明使其发生白云石化的流体主要为海水或与海水相关;晶粒白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ (-2.876‰ ~ 2.468‰)分布范围与泥微晶灰岩 (-0.578‰ ~ 1.328‰)几乎一致,但 $\delta^{18}\text{O}$ 弥散度高,表明使其白云石化的流体同样与海水有关,但因埋深的温度效应,致使 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较大;溶蚀残余白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ (-1.390‰)和 $\delta^{18}\text{O}$ (-7.308‰)同时负偏,则证明大气淡水不断淋滤使白云岩碳、氧同位素发生了很大的变化。

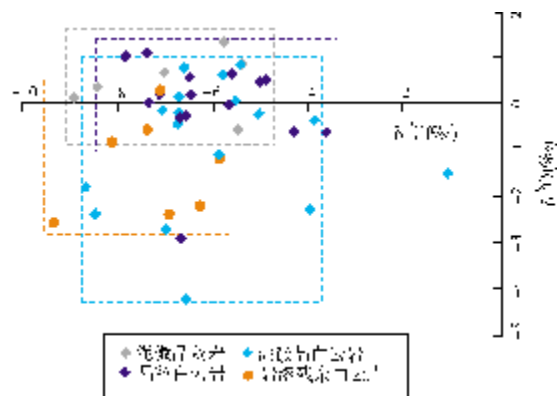


图5 鄂尔多斯盆地马家沟组 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

包裹体 前人用平凉组沉积之前泥晶白云岩溶斑方解石中的包裹体温度代表这种白云岩形成时的温度^[20],4个包裹体均一温度平均值为 97.4°C (表2),说明这种白云岩形成温度相对较低;张永生等^[21]获得了细晶白云岩中包裹体的温度,21个包裹体均一温度平均值为 201.3°C (表2),说明这种白云岩形成温度较高。

综合上述岩石学特征和地球化学特征,笔者认为泥微晶白云岩为海源流体准同生白云石化,晶粒白云岩为与海水相关流体埋藏白云石化,二者的白云石化机理不同。

4 储集性能

4.1 储集空间类型

侯方浩等^[30]对马家沟组中东部的白云岩内风化壳型储层及其分布做了详细研究,笔者也曾对盆地南部马家沟组的储集空间做过一些分析^[31],在此基础上,笔者根据野外剖面、钻井岩心、铸体薄片和扫描电镜观察,进一步分析了马家沟组白云岩的储集空间类型,其特征如下:

晶间缝 主要发育在马家沟组斑块状粉—细结构白云石中,呈网状分布,形成于后生成岩阶段,它们使晶间孔贯通,增加了白云岩的渗透性,面孔率可达0.5%。

溶缝 主要见于马家沟组四、五、六段上部,由不同成岩阶段溶蚀作用形成。溶缝通常相互切割,呈网状,溶缝缝壁常粘有黑色有机质,宽缝常被方解石、白云石或石英和陆源碎屑物充填,窄者多未被充填,面孔率有时可达2%,能作为储集空间,同时可沟通孤立的孔隙。

晶间孔 多见于粉—细晶、中—粗晶白云岩中,经白云石化或低、中程度重结晶作用形成;孔径0.02~0.45 mm,面孔率最大可达14%,通常为5%~7%,孔隙间连通性较好,是最常见的孔隙类型。

晶间溶孔 多见于细晶白云岩、残余砂屑粉晶白云岩中,晶间孔经溶蚀作用改造扩孔,局部边缘不规则,多未被充填,面孔率通常3%~5%,最大可达8%,是仅次于晶间孔的孔隙类型。

溶孔 这在马家沟组表生期暴露地层中均可见到,不具选择性,多呈蜂窝状,但被方解石、白云石或石英等充填或半充填者居多,剩余孔隙度最高达12%左右,是马家沟组白云岩中常见储集空间之一。

溶洞 主要见于马家沟组四、五、六段白云岩中,长宽不等,洞壁不规则,往往向原岩内溶蚀延伸,面孔率达6%~7%,发育数量有限且孤立,往往被充填,因而不是马家沟组白云岩中主要的储集空间类型。

4.2 物性特征

采集马家沟组各类白云岩样品进行岩石物性测试,其中泥微晶白云岩358件,晶粒白云岩99件,溶蚀残余白云岩146件。实验数据显示:泥微晶白云岩孔隙度最大2.93%,最小0.06%,平均为0.744%;渗透率分布范围为 $(0.0042\sim6.275)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $0.1551\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。晶粒白云岩孔隙度最大12.32%,最小0.39%,平均为3.225%;渗透率分布范围为 $(0.00205\sim28.259)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $0.6746\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。溶蚀残余白云岩孔隙度最大44.5%,最小0.44%,平均为5.94%;渗透率分布范围为 $(0.0068\sim466.2)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $13.014\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。可以看出溶蚀残余白云岩不仅具高的孔隙度,而且拥有高的渗透率,泥微晶白云岩孔隙度和渗透率均为最低,晶粒白云岩渗透率和孔隙度居中,这些特征均表明白云岩类型对储层物性具有一定的控制意义。

为了进一步了解各类白云岩中孔隙分布情况并对其进行分析,现将这三类白云岩的孔隙度和渗透率分布范围统计成图(图6)。

从图6a中可以看出,泥微晶白云岩孔隙度在小于1%范围的样品达74%,而1%~3%范围的样品仅有26%,说明泥微晶白云岩孔隙度非常低,基本上不形成有效储层。晶粒白云岩样品孔隙度主要分布在1%~3%和3%~5%范围内,频率分别为52%和34%,而孔隙度在5%~8%范围的样品占10%,即晶粒白云岩主要以中等孔隙度为主。溶蚀残余白云岩的孔隙度在各个统计范围内均有分布,这说明该类白云岩

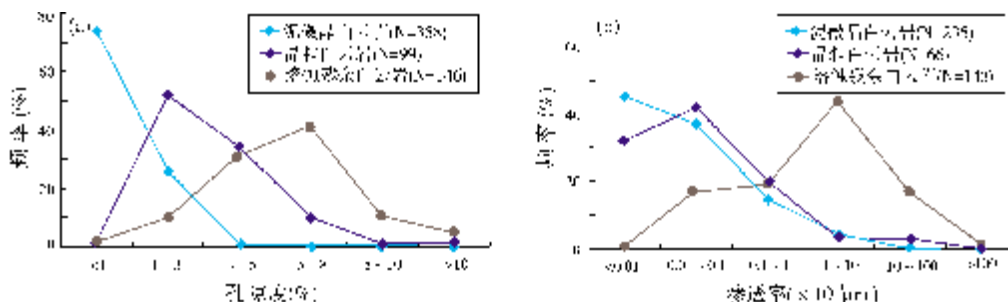


图6 马家沟组不同白云岩的孔隙度和渗透率分布图

中孔隙非均质性很强,从其分布频率来看,孔隙度主要分布在5%~8%的范围内,样品出现频率为42%,其次为孔隙度3%~5%的样品,占31%,说明该类白云岩以高孔隙度为特征。

各类白云岩的渗透率分布也存在差异(图6b)。泥微晶白云岩渗透率在 $<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围的样品占45%, $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围的出现频率为37%,而 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 渗透率区内出现的样品仅占15%,这说明该类白云岩渗透性相对较差。晶粒白云岩渗透率主要分布在 $(0 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内,其中小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围的样品分布频率为32%, $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占42%,而 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 渗透率区内出现的样品占20%,这说明该类白云岩主要为中等渗透性。溶蚀残余白云岩渗透率主要分布在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 区间内的出现频率为43%,而 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 渗透率范围内样品数分别占17%、20%和17%,这说明溶蚀残余白云岩以高渗透性为特征。

5 结 论

鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组白云岩可分为泥微晶白云岩、晶粒白云岩和溶蚀残余白云岩三类,并可进一步分为五种。

泥微晶白云岩常与石膏伴生,具较高的Sr含量,稀土配分模式及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间的特征与泥微晶灰岩相似,弱 δCe 负异常和弱—中等 δEu 负异常,包裹体均一温度相对较低,这些特征表明该类岩石为近地表的与海水相关的流体白云石化。晶粒白云岩的伴生矿物少,Sr含量低,稀土配分模式和 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间的特征与泥微晶灰岩相近,具稍强的 δCe 负异常和稍弱的 δEu 负异常,包裹体均一温度较高,这些特征表明该类岩石为埋藏条件下与海水相关的流体白云石化。当这两种白云岩受后期大气淡水不同程度的改造,形成了溶蚀残余白云岩。

马家沟组白云岩中所发育的晶间缝、溶缝、晶间孔、晶间溶孔、溶孔和溶洞中,以晶间孔、晶间溶孔和溶孔为最主要的储集空间类型。泥微晶白云岩的孔隙度和渗透率均低,难以构成储层;晶粒白云岩中的细—中晶白云岩具较高的孔隙度和渗透率,可成为良好储层;溶蚀残余白云岩具高孔隙度和高渗透率,为优质储集岩。溶蚀残余白云岩主要分布在盆地中

东部马家沟组五段上部 and 天环地区马家沟组四段上部,细—中晶白云岩多见于天环地区马家沟组四段中下部、盆地中东部马家沟组五段下部以及盆地南部和东南部马家沟组一段和六段地层中,这些地区可成为盆地白云岩型储层勘探的重点地区。

参 考 文 献

- [1] 黄思静, Qing Hairuo, 胡作维, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 475-483.
- [2] 郑荣才, 耿威, 郑超, 等. 川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 817-823.
- [3] 马锋, 许怀先, 顾家裕, 等. 塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 144-155.
- [4] 陈永权, 周新源, 杨海军. 塔里木盆地塔中地区上寒武统三种截面特征白云岩的岩石地球化学特征与成因研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 209-218.
- [5] 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 19-30.
- [6] 朱井泉, 李永铁. 藏北羌塘盆地侏罗系白云岩类型、成因及油气储层特征[J]. 古地理学报, 2000, 2(4): 30-42.
- [7] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩稀土元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增刊 2): 53-61.
- [8] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2230-2238.
- [9] 刘燕, 付金华, 李建明. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组白云岩成因机理分析[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(11): 46-52.
- [10] 黄擎宇, 张哨楠, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云岩成因研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 147-154.
- [11] 王保全, 强子同, 张帆, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段白云岩的同位素地球化学特征[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 472-479.
- [12] 刘德良, 孙先如, 李振生. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 155-162.
- [13] 赵俊兴, 陈洪德, 张锦泉, 等. 鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 38-42.
- [14] 李振宏, 杨永恒, 郑聪斌. 鄂尔多斯盆地天环北段白云岩体成因及储集性能[J]. 海相油气地质, 2005, 10(3): 19-24.
- [15] 张传禄, 张永生, 康祺发, 等. 鄂尔多斯南部奥陶系马家沟群马六组白云岩成因[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 22-26.
- [16] 张永生. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋白云石化机制[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 424-430.
- [17] 陈致远, 马振芳, 张锦泉. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五⁵亚段白云岩成因[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 20-23.

- [18] 覃建雄,曾允孚,杨俊杰. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统白云岩成因及储集特征[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(4): 275-284.
- [19] 冯增昭,陈继新,张吉森. 鄂尔多斯盆地早古生代岩相古地理[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- [20] 郑葆英,叶俭,祝总祺,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组气液包裹体研究[J]. 西安工程学院学报, 1999, 21(3): 13-17.
- [21] 张永生,张传禄,康祺发. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟群块状白云岩的包体研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(3): 213-219.
- [22] 李泽敏,苗建宇. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳储层稀土元素配分特征及其油气地质意义[J]. 海相油气地质, 2012, 17(3): 55-61.
- [23] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The North American shale composite: Its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12): 2469-2482.
- [24] 黄思静,石和,毛晓东,等. 早古生代海相碳酸盐岩的成岩蚀变性及其对海水信息的保存性[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 9-18.
- [25] 郑荣才,党录瑞,郑超,等. 川东—渝北黄龙组碳酸盐岩储层的成岩系统[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 237-245.
- [26] Mazumdar A, Tanaka K, Takahashi T, et al. Characteristics of rare earth element abundances in shallow marine continental platform carbonates of Late Neoproterozoic successions from India[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(2): 277-289.
- [27] Frimmel H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator[J]. *Chemical Geology*, 2009, 258(3/4): 338-353.
- [28] 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. *Chem Geol*, 1999, 161 (1/3): 59-88.
- [29] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- [30] 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.
- [31] 苏中堂,陈洪德,朱平,等. 鄂尔多斯盆地南部马家沟组孔隙类型及其演化[J]. 海相油气地质, 2010, 15(4): 6-13.

编辑:赵国宪

Genesis and Reservoir Property of Lower Ordovician Majiagou Dolostones in Ordos Basin

Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, Jin Xueqiang

Abstract: Based on the observation of outcrop profiles, well cores and thin sections, combining with the analysis of geochemistry and petrophysics, the Lower Ordovician Majiagou dolostones in Ordos Basin can be divided into dolomicrite, crystalline dolostone and dissolution dolostone. The dolomicrite is characterized by accompanying gypsum, high content of Sr and similar REE distribution pattern and $\delta^{13}\text{C}$ distribution range to the micrite in place. The homogenization temperature of inclusions is approximate to that of earth's surface, which implies penecontemporaneous dolomitization by fluid relating with surface-closing water or sea water. The crystalline dolostone is characterized by seldom accompanying gypsum, low content of Sr, and similar REE distribution pattern and $\delta^{13}\text{C}$ distribution range to the micrite. The homogenization temperature of inclusions is high, which indicates that crystalline dolostone forms from burial dolomitization by fluid relating with sea water. The dissolution dolostone are formed from the former two kinds of dolostones by atmospheric water. Intercrystalline pores and intercrystalline solution pores and dissolution pores are common reservoir space in Majiagou dolostone. Because of low porosity and permeability, the dolomicrite is hard to be reservoir rock while contributing to high porosity and permeability, the crystalline dolostone can be good reservoir rock. The dissolution dolostone displays higher porosity and permeability so it can be excellent reservoir rock. It is suggested that the dolomite reservoirs being of exploration potential are in the central to eastern, southeastern and southern parts of Ordos Basin as well as Tianhuan area.

Key words: Middle Ordovician; Majiagou Formation; Dolostone reservoir; Classification of dolostone; Genesis of dolostone; Geochemistry characteristics; Reservoir property; Ordos Basin

Su Zhongtang: male, Dr., Lecturer. Add: State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, 1 Dongsan Rd., Chengdu, Sichuan, 610059, China