

鄂尔多斯盆地奥陶系 风化壳岩溶储层孔洞充填特征及机理

任军峰^{1,2}, 包洪平^{1,2}, 孙六一^{1,2}, 刘宝宪^{1,2}
(1 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院; 2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)

摘 要 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组风化壳岩溶储层是盆地重要的储集类型,但后期成岩及埋藏期对溶蚀孔洞的充填,造成不同地区有效储层发育具有很大差异。对显微薄片观察及地球化学测试等研究表明,充填物主要以白云石、方解石、石英、石膏、硅质等为主,并常以组合形式出现,其中以白云石为主的充填最有利于孔洞的保存。孔洞充填主要经历了早表生期(风化壳期),浅埋藏期和深埋藏期三个阶段。认为孔洞充填主要受控于后期构造格局的转变。

关键词 鄂尔多斯盆地;奥陶系;岩溶储层;风化壳储层;成岩作用

中图分类号: TE112.23 **文献标识码**: A

古岩溶储层是一种常见的碳酸盐岩储层类型。在我国油气勘探中,与不整合面有关的碳酸盐岩古风化壳、古岩溶储层普遍发育,并占有十分重要的地位。目前,已经在鄂尔多斯、塔里木、四川以及渤海湾等盆地发现了大量古风化壳岩溶型储层,并找到了靖边、轮南及塔河等许多大型油气田,其中鄂尔多斯盆地已发现并探明了靖边奥陶系风化壳岩溶大气田,目前累计探明天然气地质储量 $4\,193.41\times 10^8\text{ m}^3$ 。

奥陶系马家沟组五段上部含膏白云岩,经历加里东风化壳期的淋滤溶蚀而形成溶蚀孔洞型储层,是靖边气田的主要储集空间^[1-6]。但是由于后期成岩及埋藏期的充填,部分孔洞型储集空间丧失,并进一步影响了储层的储集性能及含气性。近年来,随着勘探逐渐向靖边气田周边地区的拓展,对风化壳储层充填特征、控制因素及有效储层保存机理的系统认识就显得更为必要。本文以对盆地内大量探井的岩心及微观薄片的孔洞充填程度、充填物类型及分布特点的细致分析为基础,选取典型孔洞充填物进行地球化学分析,探讨孔洞的充填期次及控制因素,明确有效储层分布规律,为盆地奥陶系岩溶风化壳气藏勘探部署指出了方向。

1 奥陶系发育特征

鄂尔多斯盆地自下而上发育元古界、古生界、中生界和新生界,沉积岩平均厚度 $6\,000\text{ m}$,下古生界发育碳酸盐岩沉积建造,上古生界—中生界发育碎屑岩沉积建造。下古生界平均厚度 $1\,000\sim 2\,000\text{ m}$,其中下奥陶统马家沟组是主要的海相碳酸盐岩含气层位。马家沟组由六个岩性段组成,其中一、三、五段为膏云岩与盐岩发育段,二、四、六段为石灰岩发育段。马五段自上而下划分为10个亚段,其中上部的马五₁₊₂和马五₄亚段是靖边风化壳气藏的主力产层。

奥陶纪马家沟期,由于近南北向展布的古隆起(沉积期以间歇性暴露为主)的分隔作用,加之沉积期气候干旱炎热,盆地东部凹陷区为蒸发岩盆地,围绕其呈环带状发育膏云坪、含膏云坪(现今可以在马家沟组马五段中见到大量硬石膏结核及板条状的石膏晶体被溶蚀后残留的孔隙)及环陆泥云坪沉积。马家沟期五时,含硬石膏白云岩坪相带在盆地中部靖边地区近南北向展布(图1),分布面积近 $15\,000\text{ km}^2$,岩性以泥—细粉晶准同生白云岩为主,并普遍含石膏结核、石膏砂屑等易溶矿物,分布范围基本与加里东风化壳期岩溶斜坡位置一致,经历风化壳期淋滤溶蚀,

收稿日期: 2011-09-08; 改回日期: 2011-12-07
任军峰: 1978 年生,工程师。2004 年毕业于西北大学地质学系构造地质学专业,硕士。现主要从事鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩综合地质研究。通讯地址: 710018 陕西省西安市长庆兴隆园小区

易于形成溶蚀孔洞型储层。而且由于含膏层段的成层性好,形成的储层段平面上分布连续、稳定,为风化壳气藏大面积分布奠定了基础。

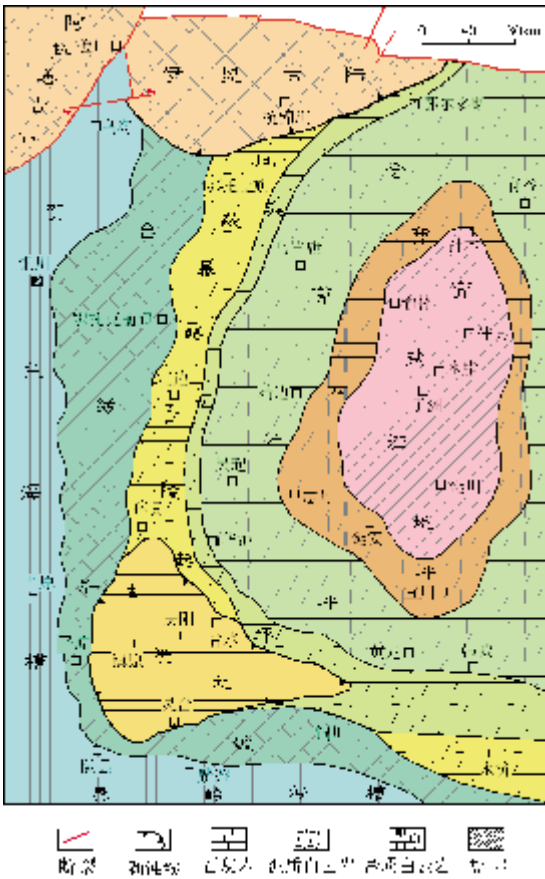


图1 鄂尔多斯盆地中东部地区奥陶纪马家沟组五时沉积相

2 风化壳储层孔洞充填特征

对盆地奥陶系马家沟组探井的岩心观察、铸体薄片鉴定、扫描电镜和图像分析研究表明,奥陶系风化壳储层的储集空间主要有孔隙、孔洞和裂隙三种,其中又以孔洞为主。孔洞充填物质包括机械沉积物和化学沉积物两大类。前者为风化壳期充填的机械碎屑、铝土质、泥质物,后者为自生矿物,如白云石、方解石、石英、硬石膏、黄铁矿、伊利石和高岭石等(图2)。

2.1 主要孔洞充填物类型

白云石 主要为淡水白云石,粉晶菱形,干净明亮,犬牙状,主要充填于孔洞下部,晶粒较粗,且晶间

孔发育(图2a—2d)。白云石化作用主要发生在沉积之后不久的准同生期和浅埋藏下的成岩早期,埋藏期的白云石仅为局部的,常充填于孔洞缝中,铁白云石是这一阶段最具特征的矿物。靖边气田本部孔洞充填物以白云石充填为主,孔隙充填程度相对较低,储层的物性及含气性均较好。

方解石 主要包括:①淡水方解石,细粉晶,自形、半自形及犬牙状,一般充填于孔洞下部(图2c);②铁方解石,白色及乳白色,中—粗晶,阴极发光一般呈暗红或橙黄色,充填于孔洞上部及裂缝中(图2e);盆地东部地区以方解石充填为主,充填程度相对较高,局部可使先成孔隙、孔洞充填殆尽而丧失储集性。

石英 以复三方柱状双锥及柱状双锥形态为主,呈马牙状充填于孔壁和洞壁,并与自形菱形淡水白云石、方解石和高岭石等共生(图2b、2f),阴极不发光;也有少量微晶质玉髓(图2h)。

地开石 是在奥陶系风化壳储层孔洞中发现的自生粘土矿物,在电镜下呈极好的六角板状和假六方板状,结晶好且晶体大,集合体呈宝塔状、六角柱状和放射状。据地开石形成机理,本区地开石可能有高岭石的成岩转变和热液蚀变两种成因,但无论哪种成因,均与两个因素相关:一是岩石曾经历了大于160℃的成岩温度,二是埋藏成岩过程介质偏于酸性,并相对缺乏钾、镁离子。由于上述条件正好不利于孔隙封堵的沉淀,因此,凡是有地开石分布的井段,就有利于溶蚀孔洞的形成、保存和再溶蚀扩大,地开石作为储层发育的指示矿物之一有着特殊意义。

黄铁矿 黄铁矿单晶以立方体和五角十二面体聚形为多,晶面无条纹。它是在成粒速度较低、埋藏环境相对稳定的背景下形成的,主要充填在孔洞的上部。

硬石膏 镜下硬石膏呈针状、长柱状、结核状及脉状充填在溶蚀孔洞中(图2g),中—粗晶结构,扫描电镜下硬石膏呈板状,解理相当发育。从岩心上看,硬石膏有白色和黑色两种。黑色硬石膏主要是含有机碳造成的(有机碳含量0.115%~0.131%),主要形成于有机质成熟阶段,由有机质分解的硫化氢经氧化形成的硫酸盐与钙离子反应所成^[7]。

2.2 主要孔洞充填物组合

对孔洞充填物组合及分布特点的研究表明,上述孔洞充填物很少单独出现,而且由于形成于不同

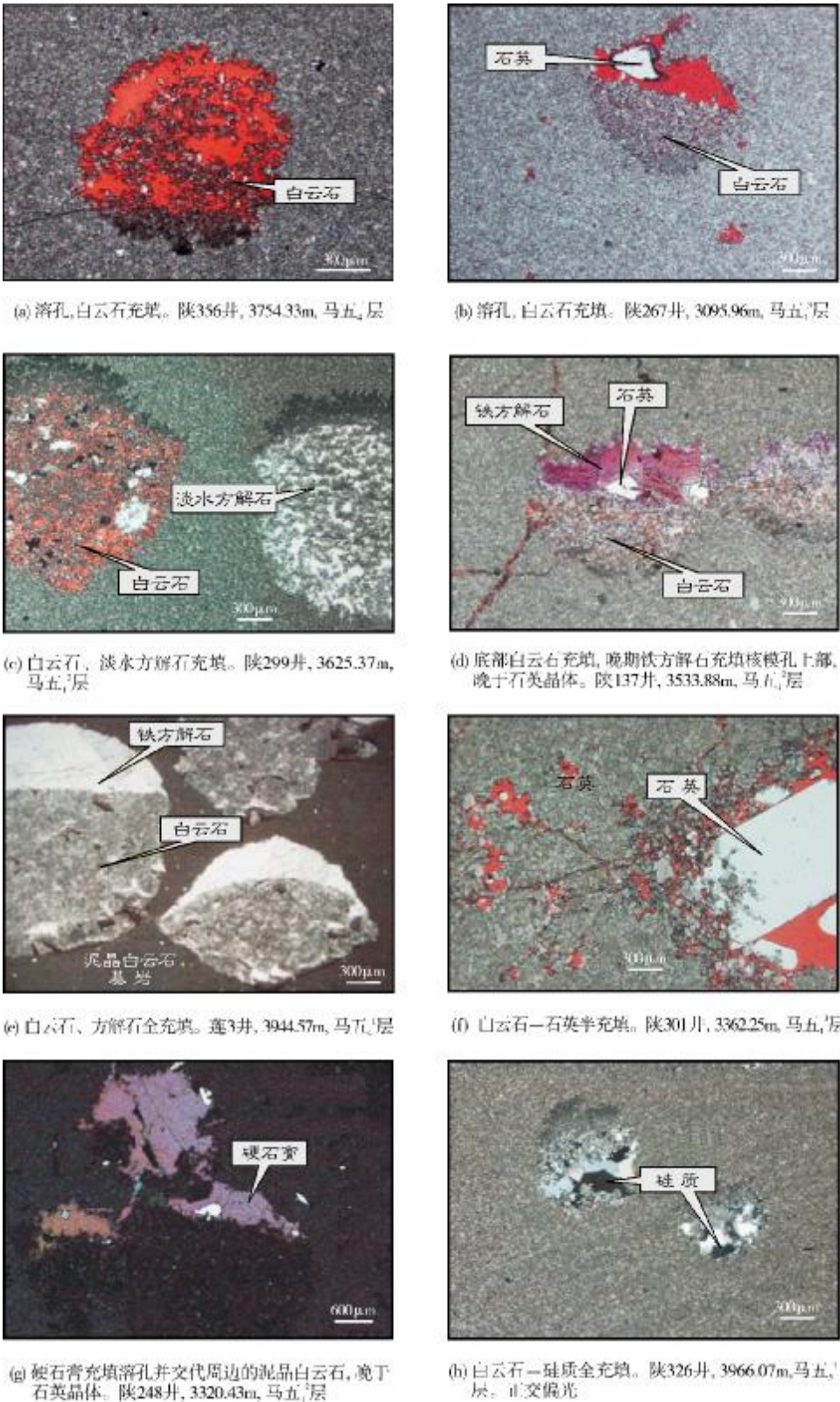


图2 鄂尔多斯盆地马家沟组风化壳储层孔洞充填特征

的充填阶段,孔洞充填物一般以下列几种组合形式集中出现,并与储层的储集性能密切相关。

以白云石为主的充填 这类充填多以半充填为主,白云石一般充填于孔洞的中下部,同时充填少量的淡水方解石、石英、地开石等矿物,由于白云石晶间孔较为发育且充填疏松,孔洞充填程度相对较低,储集性能好。靖边气田及其邻近的区域就是以白云石充填为主。

白云石—石英充填 这类充填的孔洞中,白云石充填于中下部,上部发育自由生长的晶型完好的石英,储集性较好。若局部被硅质充填,储集性能则明显降低。

方解石—白云石充填 由于方解石多晚于白云石充填,方解石会充填早期残留在顶部孔洞及细晶白云石形成的晶间孔,这类储层一般较致密,而局部残留的未被方解石充填的孔洞(白云石充填)则具有较好的储集性。盆地东部地区以方解石充填为主,充填程度相对较高,局部可使先成孔隙充填殆尽而丧失储集性。

方解石—硅质(石英)充填 这两种矿物的组合充填一般会造成早期孔洞空间的大量丧失,储集性能明显下降,是后期造成储层致密的主要因素。

3 孔洞充填物充填序列

孔洞充填期次的研究对于分析风化壳储层发育的主控因素具有重要的意义,本次研究主要基于微观薄片观察,并选取典型的充填物进行地球化学指标的对比分析,进而确定不同充填物的形成期次。

3.1 显微薄片指示的充填序列

在盆地马家沟组风化壳岩溶储层的显微薄片 中,经常可以观察到大量的溶蚀孔洞“示顶底”构造,即孔洞中,最先充填的是泥粉晶的淡水白云石(少量淡水方解石),而且均沉淀于孔洞的底部,在上部才逐渐充填其它孔洞充填物,经常看到的 就是上部充填方解石或者自生石英、硅质等的现象(图 2),这就为分析充填期次提供了必要的依据。

通过对研究区 200 余口钻遇风化壳储层探井的孔洞充填物的镜下观察,根据不同充填物之间的分布关系,基本可以确定主要充填物的早晚期次。最早一期为风化壳岩溶发育期,伴随膏质的溶解,结核中

的泥粉晶白云石沉淀并堆积于孔洞底部,并形成少量淡水方解石,而在盆地东部岩溶地区,膏质被溶解残留白云石的同时也沉淀了大量的方解石,且以粗晶为主,大多数的孔洞被完全充填。而铁方解石、硅质及石英等,均是在埋藏阶段,由于不同地区的流体环境差异而逐渐充填的。

3.2 孔洞充填物地球化学特征

碳酸盐岩中的碳、氧同位素,包裹体,微量元素等组成,可以用来定量地恢复成岩环境,目前已经有很多学者开展了这方面的研究^[7-10],可以确定孔洞充填的大致充填序列,但较少提供关于成岩过程及充填期次的更多信息。本次研究,重点选取了不同地区典型的孔洞充填物以及原岩样品,对其进行了系统的同位素、包裹体测温及微量元素分析,并根据地球化学指标的变化及差异,进一步分析了盆地风化壳储层的成岩演化及充填特征。

3.2.1 充填物包裹体特征

孔洞充填物的流体包裹体形态、成分及均一温度特征,能够较为直观地反映其形成时的流体特征及成岩环境。本次通过对区内充填物包裹体的测试分析,得到以下几点认识。

(1)充填物中由于方解石及石英的晶体粗大,目前获得的包裹体大多来自于这两种矿物中,来自白云石中的很少。包裹体以盐水包裹体为主,有单液相和气液相两种类型,部分含有烃类单气相和气液相两种类型包裹体,以及少量 CO₂ 气液相包裹体。

(2)孔洞充填物包裹体均一温度的统计分析表明,均一温度介于 90~220 ℃,其间为连续过渡,显示孔洞充填是储层埋深达到一定程度后持续发生的。在直方图上出现两个峰,落在 90~130 ℃、140~170 ℃温度区间的样品数明显较多,分别占统计总数的 51.2%和 37.7%(图 3),而且在部分探井,孔洞充填方解石的溶蚀微裂隙内普遍发育液态烃包裹体,具有蓝白色荧光,成分以甲烷为主,表明在中深埋藏期有过两期主要的烃类充注。按照地表温度为 15 ℃,地温梯度 4 ℃/100m 计算,90~130 ℃温度区间对应的风化壳储层埋深范围介于 1900~2900m,对应时代为晚三叠世;140~170 ℃温度区间对应的风化壳储层埋深为 2900~3900m,对应时代为侏罗纪—早白垩世末。

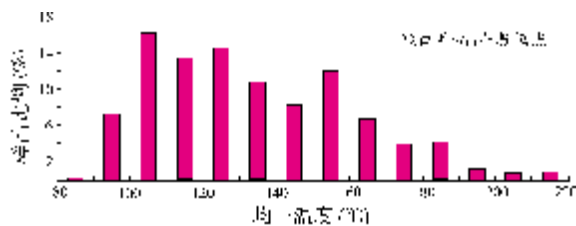


图3 鄂尔多斯盆地风化壳储层孔洞充填物包裹体均一温度分布图

3.2.2 充填物碳、氧同位素特征

碳、氧同位素是本次分析测试工作的一个重点。为了取得良好的效果，在样品的选取上主要采取了三种方法：(1)白云岩基质取样；(2)针对岩心样品中的白云石颗粒进行取样；(3)从岩心孔洞及裂缝中提取充填物进行取样。采用这样的取样方法，为成岩演化及充填物的充填期次分析奠定了坚实的基础。

通过上述分析，对该区孔洞充填物的充填序列有了更为清晰的认识。

首先，碳、氧同位素变化具有明显的规律性，自白云岩基质 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1\text{‰}\sim-1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-9\text{‰}\sim-6\text{‰}$) 向白云石充填物 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1\text{‰}\sim-1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-12\text{‰}\sim-9\text{‰}$) 和方解石充填物 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-10\text{‰}\sim-1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-15\text{‰}\sim-0\text{‰}$), $\delta^{18}\text{O}$ 同位素逐渐偏负,显示埋深和孔隙水温度逐渐增加,同时也表明了充填物非同时充填,白云石先充填,方解石后充填 (不属于风化壳期充填,而是形成于埋藏阶段)。与盆地东部风化壳期充填的方解石相比,靖边及其周边地区孔洞充填方解石具有更低的氧同位素值,显示出大气淡水和埋藏增温的影响,指示了埋藏成岩环境。

其次,对比白云岩基质和孔洞底部充填的淡水

白云石的同位素特征可以发现，其碳同位素基本近似，但充填白云石的氧同位素值要小于白云岩基质的氧同位素值,不仅表明了二者的先后关系,而且说明充填白云石接受了成岩改造,造成氧同位素偏负。

再则，盆地东部岩溶区孔洞充填以方解石为主，但其碳、氧同位素值显示出明显的分异特点,一部分值与白云岩基质的类似。氧同位素部分偏正,显示更多受到大气淡水的影响,应当属于风化壳岩溶期岩溶水汇聚沉淀的淡水方解石,而另外的碳同位素明显偏负 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-10\text{‰}\sim-1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-10\text{‰}\sim-8\text{‰}$) 的样品则代表了埋藏环境阶段形成的粗晶铁方解石(图 4)。

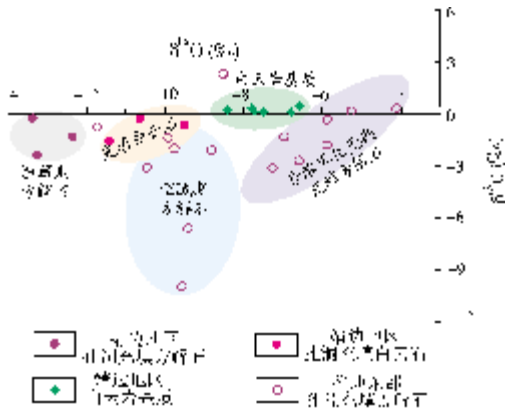


图4 鄂尔多斯盆地风化壳储层白云岩基质与孔隙充填物碳、氧同位素组成对比

3.3 充填期次

通过上述对盆地风化壳储层孔洞充填物的分析,认为盆地风化壳储层受风化壳期溶蚀、沉淀及不同埋藏阶段流体环境及成岩作用影响,其孔洞充填主要经历了以下三个阶段(表 1)。

表 1 鄂尔多斯盆地风化壳储层白云岩基质与孔隙充填期次及特征

成岩阶段	早表生阶段	浅埋藏阶段(<1000m)	深埋藏阶段(>2000m)
主要成岩作用	去盐化、云膏化	硅化、高岭石化	去白云石化、黄铁矿化、方解石化、埋藏白云石化
地下水特征	大气淡水	孔隙酸性压释水	有机质脱羧基作用产生的压释水
充填期次	第一期充填	第二期充填	第三期充填
主要填充物	淡水方解石、淡水白云石、泥质、砂质及机械破碎物	石英、高岭石、黄铁矿	铁方解石、铁白云石、黄铁矿、方解石、有机质

第一期充填作用发生在早表生成岩阶段。在表生期和裸露岩溶期的近地表环境下,形成具有淡水岩溶特征的充填物。因源于大气降水入渗的水循环

过程,岩溶作用以淡水为主体,当水流交替滞缓或水中 CO_2 溢出、水—岩平衡达到过饱和时,膏质等被溶蚀,矿物质沉淀充填于岩溶缝洞中。主要为淡水方

解石或淡水白云石,晶粒较围岩稍粗,常有泥质、砂质及机械破碎物伴生,所以第一期孔洞充填物几乎与孔洞同时形成。

第二期充填作用发生在浅埋藏阶段 (<1000 m)。随着埋藏深度不断增大,地温不断升高,储层中有机质不断发生分解、还原,排放出大量的CO₂和H₂S,使得储层中流体的pH值降低,当pH<7时,蒙脱石将加速转化为伊利石,释放出SiO₂,生成石英(硅质)充填于溶孔中。当溶孔孔隙度较大时,生成的石英晶形较好,否则为不规则状。

第三期充填作用发生在深埋藏阶段(>2000 m)。充填物主要为铁白云石和铁方解石,也有少量有机质、黄铁矿等。

4 孔洞充填控制因素与有效储层发育规律

风化壳岩溶储层的孔洞充填直接影响了有效储层的发育,综合上述研究,并结合已有钻探及试气成果,认为鄂尔多斯盆地风化壳岩溶储层孔洞充填与有效储层发育主要受控于以下两个因素。

4.1 孔洞充填程度及充填物类型是风化壳储层非均质的主控因素

对风化壳储层的孔洞充填类型统计表明,在白云石、方解石、石英、硅质及膏质等几种充填类型中,白云石充填以细晶为主,一般充填于孔洞的中下部,晶间孔较为发育,有利于储集性能的提高。而方解石、硅质等矿物的充填,不利于孔洞的保存,储层一般较致密,只有在局部充填较弱部位才发育较好储层。风化壳期,靖边气田西侧、南侧与靖边气田同处于岩溶斜坡区,溶蚀作用强烈,有利于溶孔类型储层的发育,从充填物类型上看,也都以白云石充填为主,而且孔隙充填程度较低(气田平均 67%,气田区西侧及南侧地区一般为 80%左右)。盆地东部地区马家沟组沉积与靖边地区相比较,硬石膏结核等易溶组分明显减少,溶蚀孔洞的发育程度也明显不及气田区,而且风化壳期主要处于岩溶盆地,属于岩溶水的聚集区,方解石沉淀及充填作用强烈,孔洞充填物以方解石充填为主,充填程度相对较高。从整体上看,以靖边气田为中心,向东西两侧及南侧,充填物中白云石的含量逐渐下降,而方解石、硅质的含量明显上升,储层逐渐致密,仅在局部充填较弱部位发育较好储层(图 5)。

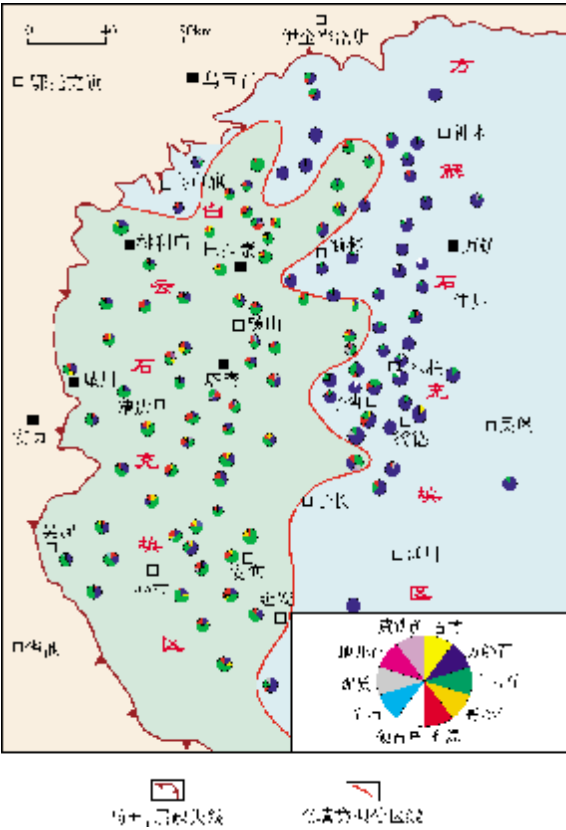


图 5 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组风化壳储层充填物类型分布图

上述对比分析也进一步证明,孔洞充填物中白云石的含量与储层的物性具有较好的相关性,有效储层发育区一般均处于以白云石充填为主的区域,因此在勘探中对于孔洞充填物的分布统计对于有利风化壳储层发育区的优选具有重要意义。

4.2 古构造格局演变对后期充填起宏观控制作用

古构造对储层发育具有重要的宏观控制作用,古生代盆地所经历的两度区域性构造-沉积格局转变,控制并影响了风化壳岩溶储层的形成、改造及后期保存。

海西期(石炭纪末—二叠纪),伴随区域沉降作用,海水开始从东部和西部两个方向向盆地侵入,并相继经历了多期的海进、海退旋回。盆地东部地区长期被海水覆盖,早期形成的奥陶系马家沟组五段,孔洞多被方解石进一步充填(加里东风化壳期盆地东部处于岩溶盆地汇水区,已经造成方解石对孔洞的

大量充填), 储集空间大量丧失, 仅在局部岩溶残丘高部位保留较好的储集空间。盆地中部靖边地区主要处于海陆过渡位置, 充填作用较弱, 孔洞充填以半充填—未充填为主, 有效储集空间得以保存。盆地南部紧邻秦岭加里东期隆起区, 上古生界向南逐渐减薄, 主要为海陆过渡相沉积, 所处成岩环境与中部靖边地区类似, 局部马家沟组顶部层段充填较弱, 发育以半充填为主的孔洞型储集空间, 近年在东南部奥陶系风化壳试气获得了工业气流。

5 结 论

- (1)鄂尔多斯盆地加里东期整体抬升遭受长期风化剥蚀, 奥陶系马家沟组含膏白云岩经风化淋滤作用, 发育溶蚀孔洞型储层。
- (2)孔洞充填程度及充填物类型是造成风化壳储层非均质性的主控因素。孔洞充填物主要为白云石、方解石、石英、硬膏质等, 并且常以组合形式出现。其中以白云石为主的充填最有利于有效储集空间的保存。
- (3)风化壳储层孔洞充填受风化壳期溶蚀、沉淀及不同埋藏阶段成岩作用影响, 其孔洞充填主要经历了早表生期(风化壳期)、浅埋藏期和深埋藏期三个阶段。淡水方解石—白云石、石英、铁方解石—白云石分别是这三个阶段的典型充填物。

(4)古构造格局演变对后期充填起宏观控制作用, 古构造高部位有利于孔洞的保存。

参 考 文 献

[1] 付金华, 郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶纪华北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 2001, 3(4): 25-34.

[2] 何自新, 郑聪斌, 陈安宁. 长庆气田奥陶系古沟槽展布及其对气藏的控制[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 35-40.

[3] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 106-112.

[4] 邸领军, 杨承运, 杨奕华. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组溶斑形成机理[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 260-265.

[5] 席胜利, 李振宏, 王欣. 鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 405-412.

[6] 黄道军, 文彩霞, 季海锴. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳储层特征及主控因素分析[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 10-18.

[7] 马振芳, 黄月明. 陕甘宁盆地中部气田白云岩储层孔洞充填物与储集性[J]. 石油勘探与开发, 1995, 57(3): 444-456.

[8] 彭军, 田景春, 侯中健. 陕甘宁盆地中部气田马五₄段白云岩储层孔洞充填物与储集性[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(2): 97-102.

[9] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地奥陶系孔洞充填特征分析[J]. 地质论评, 2011, 57(3): 444-456

[10] 张聪, 于炳松, 樊太亮, 等. 塔里木盆地北部下奥陶统碳酸盐岩孔洞充填物特征及其成岩环境分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 100-108.

编辑:金顺爱

Characteristics and Mechanism of Pore-space Filling of Ordovician Wethering Crust Karst Reservoirs in Ordos Basin

Ren Junfeng, Bao Hongping, Sun Liuyi, Liu Baoxian

Abstract: Ordovician Majiagou paleokarst weathering crust is an important reservoir in Ordos Basin but filling in the early dissolved pores and caves during late diagenesis and burial caused the effective reservoirs to be anisotropic in different areas. On the base of a large numbers of data from microscope observation and geochemical analysis of cores, it is shown that the fillings in pore space are dolomite, calcite, quartz and anhydrite, or assorted of them, in which dolomite-dominating filling is sure to be the most favorable for porosity preservation. Three stages of pore-space filling are identified. It is deemed that the filling is mainly in control of late tectonic transformation in this region.

Key words: Ordovician; Karst reservoir; Weathering-crust reservoir; Diagenesis; Ordos Basin

Ren Junfeng: male, Engineer. **Add:** Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China