

鄂尔多斯盆地志丹地区马家沟组五₁亚段碳酸盐岩储层孔隙特征及影响因素

陈建明, 王起琮, 翟顺涛

(西安石油大学地球科学与工程学院)

摘要 鄂尔多斯盆地志丹地区马五₁亚段碳酸盐岩储集孔隙类型多样,非均质性强。依据孔隙的形成演化及其对岩石结构的依赖性,将研究区孔隙分为组构选择性孔隙和非组构选择性孔隙,前者包括晶间孔、晶间溶孔和铸模孔等,后者包括裂缝、角砾间溶孔和裂缝溶蚀扩大孔。认为沉积环境影响和控制了马五₁亚段储层孔隙系统的形成与改造,成岩作用是主要因素,其中溶蚀作用、白云石化作用形成储层次生孔隙,压实-压溶作用减小孔隙体积,重结晶作用在不同成岩阶段对储集空间的改造具有不同影响。构造破裂形成的裂缝,在形成渗流通道的同时扩大了碳酸盐岩的储集空间。研究区储层的孔隙演化经历了原生孔隙形成—缩减、次生孔隙发育—充填、次生孔隙再埋藏—充填三个阶段,孔隙的类型随成岩环境的变化而不同。

关键词 早奥陶世; 马家沟组; 碳酸盐岩储层; 孔隙特征; 孔隙演化; 影响因素; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.2³

文献标识码: A

在鄂尔多斯盆地的天然气勘探过程中,陕北志丹地区有多口井在奥陶系马家沟组五段获得了可观的工业气流,预示着该区具有极大的天然气勘探开发潜力^[1]。目前碳酸盐岩孔隙特征及储层预测是陕北地区奥陶系碳酸盐岩储层的研究重点。前人按孔隙形态分别对马家沟组碳酸盐岩孔、洞、缝的特征进行了大量的研究^[2-5],但对志丹地区马家沟组五段的孔隙发育及演化规律的影响因素未作深入研究。基于此,本文在对志丹地区Y811等12口井马家沟组五₁亚段(以下简称“马五₁”)产气层岩石学特征与储层物性进行研究的基础上,探讨了其沉积环境、成岩作用和构造破裂等方面对孔隙发育演化的影响因素,旨在为该区天然气勘探与开发提供理论依据。

1 研究区地质概况

研究区位于陕北志丹县境内纸坊—双河—永宁一带,构造上属于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中南部,即吴起岩溶台地东侧与相邻岩溶阶地部位(图1)。晚奥

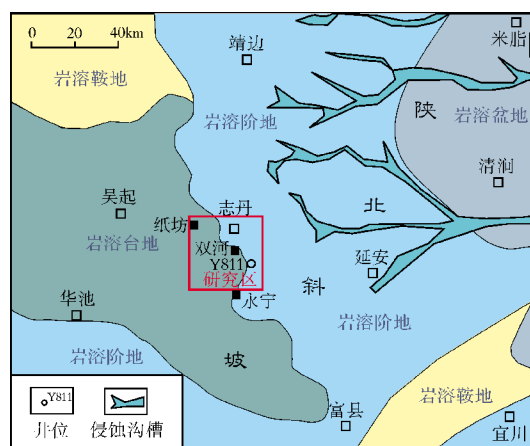


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌
(据文献[6]修改)

陶世至早石炭世,鄂尔多斯盆地遭受了约1.5亿年的风化剥蚀,形成了广泛分布于盆地的岩溶古地貌,自盆地东部的米脂—清涧岩溶盆地至西部和南部的吴起—彬县(位于图1南界外)岩溶台地及北部的新召

收稿日期: 2014-11-14; 改回日期: 2015-04-02

本文受国家科技重大专项专题“鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成岩作用及储层分布”(编号:2011ZX05005-004-08HZ)和西安石油大学全日制硕士研究生创新基金项目“陕北志丹地区马五₁亚段碳酸盐岩储层孔隙特征及影响因素”(编号:2013cx120216)共同资助

陈建明: 1990年生,西安石油大学在读硕士研究生。从事储层地质学研究。通讯地址: 710065 陕西省西安市雁塔区电子二路东段 18号 186信箱; E-mail: chenjianming568@sina.com

苏木(位于图1北界外)等岩溶台地,奥陶系顶部剥蚀程度逐渐增加,残余地层厚度逐渐变小,接受剥蚀的层位主要是下奥陶统马家沟组上部^[7]。

马家沟组由三个3级海进—海退旋回组成,根据岩性特征,自下而上划分为六段,其中一、三、五段以海退期准同生微晶白云岩为主,二、四、六段以海侵期微晶灰岩为主^[8]。马家沟组五段是天然气赋存的主要层位,沉积环境以低海平面期的蒸发台地亚相为主,由五个4级海进—海退旋回组成,从中可划分出10个亚段,地层总厚度在85~140m,平均厚度约112m。其中马五₉、马五₇和马五₅亚段以高海平面期的微晶灰岩为主,其余亚段以低海平面期的准同生微晶白云岩为主^[9]。

本文研究目的层段为马家沟组五₁亚段,地层厚度自东北至西南方向逐渐变薄,西南部地层遭受风化剥蚀而缺失,地层平均厚度在20~25m。纵向上,下伏马五₂亚段,上覆中奥陶统峰峰组,上下皆为连续沉积(图2)。马五₁时处于蒸发环境,泥质白云岩潮坪发育。

2 储层岩石学特征

通过对志丹地区马五₁亚段12口井74块样品的分析得知,这些岩样的岩石矿物成分主要为白云石(74.75%)、方解石(22.23%)和伊利石(2.15%),其它少量组分有黄铁矿、硅质等。

根据取心资料分析,研究区马五₁亚段储层的岩石类型整体上以灰褐色泥质白云岩和白云岩为主,局部夹薄层的泥岩、含灰泥质白云岩、白云质泥岩等。白云岩主要为细粉晶白云岩、泥微晶白云岩,这也是马五₁亚段储层的主要岩性。储层主要发育于马五₁和马五₂小层。另外,在马五₁小层底部含有一套广泛且稳定分布于研究区的深灰色凝灰质泥灰岩或凝灰岩标志层,镜下观察可见大量硅质碎屑及胶结物(图2)。

泥晶白云岩 是马五₁亚段的主要岩性,形成于蒸发泵、回流渗透等白云石化作用,岩石致密,常发育显微纹层构造,白云岩呈他形泥晶结构,偶见黄铁矿和粉砂级碎屑,基质中可见网状、管状微粒隐藻。泥晶白云岩中晶间微孔在压实—压溶作用下消失,含大量板条状、短柱状、圆形膏盐假晶和膏模孔、盐模孔等组构选择性溶孔,直径约1mm,其中底部被围岩碎屑充填,顶部被淡水方解石胶结物充填,形成

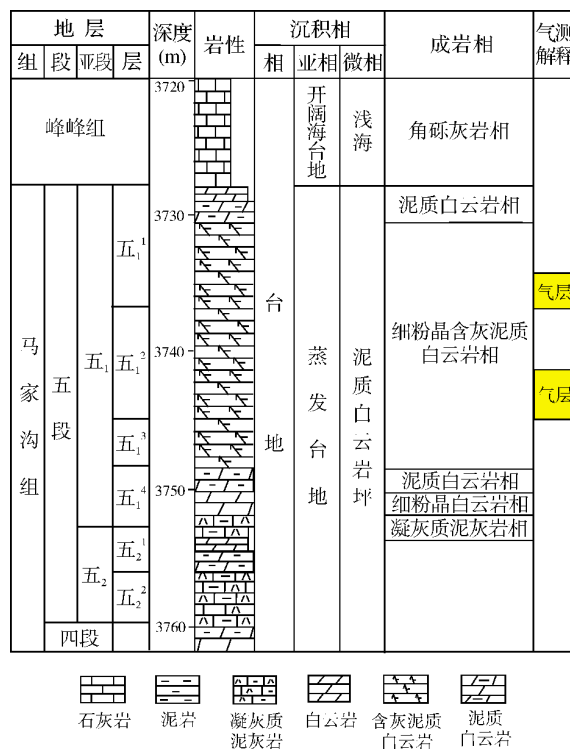


图2 志丹地区Y811井单井柱状图

示底构造,偶见自生石英充填孔隙。

粉—细晶白云岩 马五₁小层以残余颗粒结构白云岩为主,白云石呈自形、半自形粉—细晶结构,残余颗粒结构可能是由于早期成岩过程中发生埋藏白云石化作用而形成。残余颗粒包括残余鲕粒、球粒、砂屑等,鲕粒间为亮晶白云石胶结物,残余球粒及砂屑之间为泥晶基质。颗粒间有泥晶基质的存在,说明水动力条件微弱,冲洗不彻底。残余颗粒轮廓大小0.2~0.3mm,有不同程度的去白云石化现象,多发育晶间孔、晶间溶孔、膏模孔和微裂缝。晶间孔细小,最大孔径仅为30μm,孔隙连通性较差,可见缝合线构造。

3 孔隙类型及特征

马家沟组五段上部的储层中,以次生溶蚀孔隙为主,罕见原生孔隙。本文考虑到次生孔隙发育对于岩石矿物组分及岩石结构的依赖关系,依照张学丰等人^[10]的分类,将储层孔隙划分成两类:(1)受矿物组分等内部因素控制的组构选择性孔隙;(2)受构造破裂等外部因素制约的非组构选择性孔隙。前者形成于同期及早成岩期,后者形成于表生期及晚成岩期。

3.1 组构选择性孔隙

组构选择性孔隙的形成和演化受矿物颗粒或晶体形态的制约。本区马五₁亚段46块岩心铸体薄片的孔隙鉴定结果(表1)表明,储层孔隙以晶间孔和晶间溶孔为主,其次为铸模孔和粒间溶孔。

表1 志丹地区马家沟组五₁亚段铸体薄片孔隙鉴定数据表

孔隙类型		样品数	面孔率(%)		孔径范围 (μm)
			范围值	平均值	
组构 选择性	晶间孔	46	0.3~6.0	1.51	2~30
	晶间溶孔	4	1.0~2.0	1.25	15~50
	粒间溶孔	12	0.1~3.0	1.08	5~20
	粒内溶孔	5	0.1~3.0	0.69	25~80
	铸模孔	6	0.5~3.0	1.42	30~100
非组构 选择性	裂 缝	3	0.2~0.3	0.23	3~5
	裂缝溶蚀扩大孔	2	0.15~0.25	0.20	5~15
	角砾间溶孔	5	1.0~5.0	2.65	50~1500

晶间孔与晶间溶孔 晶间孔主要是分布于粉晶、细晶白云岩中自形及半自形白云石之间的微孔隙,如果晶间孔被进一步溶蚀扩大,即可形成晶间溶孔,连通性较差(图3a,3b)。晶间孔孔径一般为2~30 μm,溶蚀后可达15~50 μm(表1)。由于孔隙在形成过程中受白云石晶体形态的控制,晶间孔在形态上棱角较分明,而晶间溶孔的形态不太规则。

粒间溶孔 形成于层间岩溶角砾间充填物的选择性溶解,常见于层间岩溶角砾白云岩(图3c)。粒间溶孔孔径在5~20 μm,连通性好。

粒内溶孔 形成于颗粒内部易溶组分的溶蚀作用,常见于马五₃小层巨晶次生灰岩之中,是其中膏质及白云质砂屑溶蚀作用的结果(图3d)。粒内溶孔彼此间分布独立,连通性差,孔径可达25~80 μm。

铸模孔 是易溶矿物石盐、石膏晶体或其结核状集合体,在选择性溶解作用下溶解并保持了颗粒外形的特殊孔隙,孔隙间一般由微裂缝或微孔隙连通。根据薄片鉴定,区内孔径较大的膏、盐结核状铸模孔大部分已被淡水方解石充填,常见见底构造。主要的铸模孔以板条状膏模孔为主,孔径介于30~100 μm,面孔率介于0.5%~3%(图3e)。

3.2 非组构选择性孔隙

非组构选择性孔隙形成于岩溶作用、构造破裂

等外部因素,其发育不受岩石矿物及结构等内部因素影响。本区马五₁亚段储层中的非组构选择性孔隙按照其形态和大小,可分为裂缝、裂缝溶蚀扩大孔及角砾间溶孔^[11]。

3.2.1 裂缝

志丹地区马家沟组五段的构造裂缝及成岩裂缝普遍发育。按照产状,一般将裂缝分为水平裂缝(倾角≤30°)、网状裂缝(倾角为30°~70°)和垂直裂缝(倾角≥70°)。根据成像测井图像可以识别各类裂缝。

水平裂缝 属于成岩裂缝,平行于层面发育。碳酸盐沉积物在上覆地层的压力下,排出富含CO₂的孔隙水并沿层面流动,同时发生选择性溶解作用,形成缝合线(图3f)。现今水平裂缝基本都已闭合,形成无效孔隙。水平裂缝主要分布于含泥或泥质碳酸盐岩层段,泥质呈分散状或条带状分布。成像测井图像特征表现为近水平的深、浅相间的条带,裂面呈低幅正弦波形(图4a)。

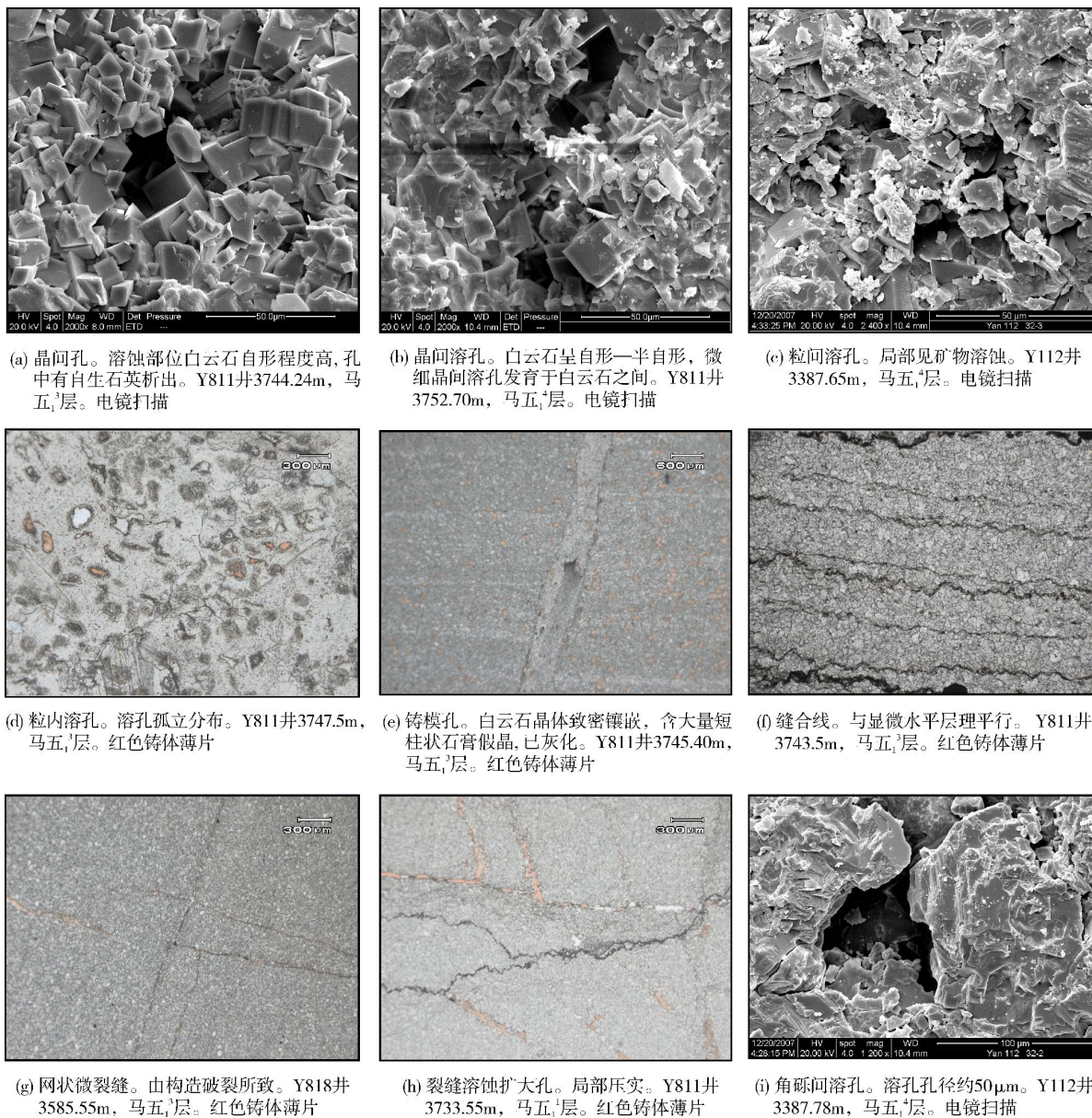
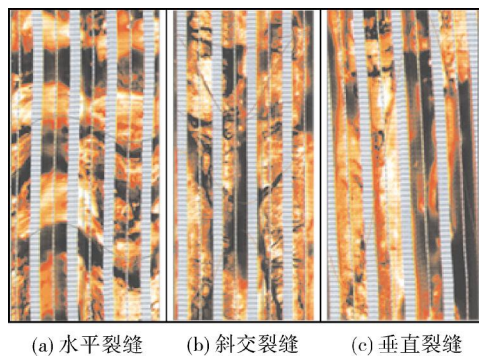
网状裂缝与垂直裂缝 均属于构造裂缝,形成于构造应力作用下的岩石破裂作用,在空间上主要分布于褶皱构造轴部及断裂带两侧。部分微裂缝被碳酸盐岩胶结物脉状充填,而未被胶结的裂缝段在取心作业时,岩心沿清洁的裂缝面劈开,网状裂缝发育段的岩心则呈碎裂角砾岩状,其岩石薄片多见微裂缝发育(图3g)。网状裂缝普遍分布于马五₁亚段的四个小层,成像测井图像中代表角砾的深、浅色块彼此镶嵌,相互交错的裂面呈中幅及低幅正弦波形(图4b);垂直裂缝主要发育于马五₃厚层白云岩层段中,其成像测井图像特征表现为近垂直的深、浅相间色带,裂面呈高幅正弦波形(图4c)。

3.2.2 裂缝溶蚀扩大孔

裂缝及微裂缝的发育使岩石系统处于开放状态,地表淡水或酸性地层水沿裂缝渗入地层,一方面促进了岩层内部可溶矿物的溶蚀与交代作用,同时也使得裂缝周围的可溶矿物被溶蚀,形成裂缝溶蚀扩大孔(图3h)。这是风化壳岩溶角砾岩和层间岩溶角砾岩中常见的非组构选择性孔隙。地层在强烈溶蚀作用下,可进一步形成更大的溶蚀孔洞。

3.2.3 角砾间溶孔

是风化壳岩溶角砾岩的主要孔隙类型,形成于岩溶期的岩层溶蚀、坍塌以及角砾化作用。此类溶

图3 志丹地区马家沟组五₁亚段储层孔隙镜下特征图4 志丹地区Y811井马五₁亚段碳酸盐岩裂缝成像测井特征

蚀孔的发育不受岩石矿物及结构影响, 形态极不规则, 连通性好, 孔径差异很大(最大值可达1 500 μ m)(图3i, 表1)。

4 储层物性特征

根据志丹地区12口井51块岩心样品的常规物性分析数据统计, 马五₁亚段碳酸盐岩储层孔隙度最小值为0.24%, 最大值为6.71%, 平均值为2.46%。研究区储层孔隙度值主要集中在1%~3%之间, 占样品总数的35%左右。孔隙度分布直方图(图5a)呈

现双峰分布状态,孔隙度峰值大致出现在1.1%与6.3%,孔隙度值大于4%的样品较少。渗透率最小值为 $0.0005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值为 $1.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.127 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究区储层渗透率值主要集中在 $(0.007 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,占样品总数的78%左右。渗透率分布直方图(图5b)呈现单峰分布状态,峰值大致为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

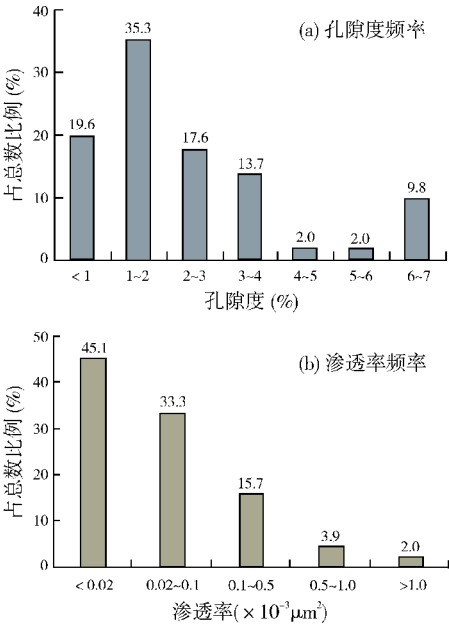


图5 志丹地区马家沟组五、亚段岩石物性分布直方图

根据国家行业标准,可知马五、亚段为特低孔低渗储层。孔渗资料表明现今研究区的地层致密,孔隙不发育或后期孔隙充填严重,孔隙间连通性差。

5 影响孔隙发育及演化的因素

奥陶系马家沟组碳酸盐岩储层的各类孔隙,经历了复杂的溶蚀—充填—再溶蚀—再充填的变化过程,其中沉积环境、成岩作用、构造运动是影响孔隙形成与演化的主要因素,它们决定了储层的储集性能并控制着储层的分布规律。

5.1 沉积环境的影响

沉积环境决定着岩石的矿物组分,决定了成岩介质的运动规律以及对岩层的改造作用,进而影响和控制着储层孔隙的形成与发育(图6a, 6b)。

对孔隙发育的控制作用 志丹地区马五、时期,蒸发台地环境是准同生白云岩、膏岩、盐岩形成的有

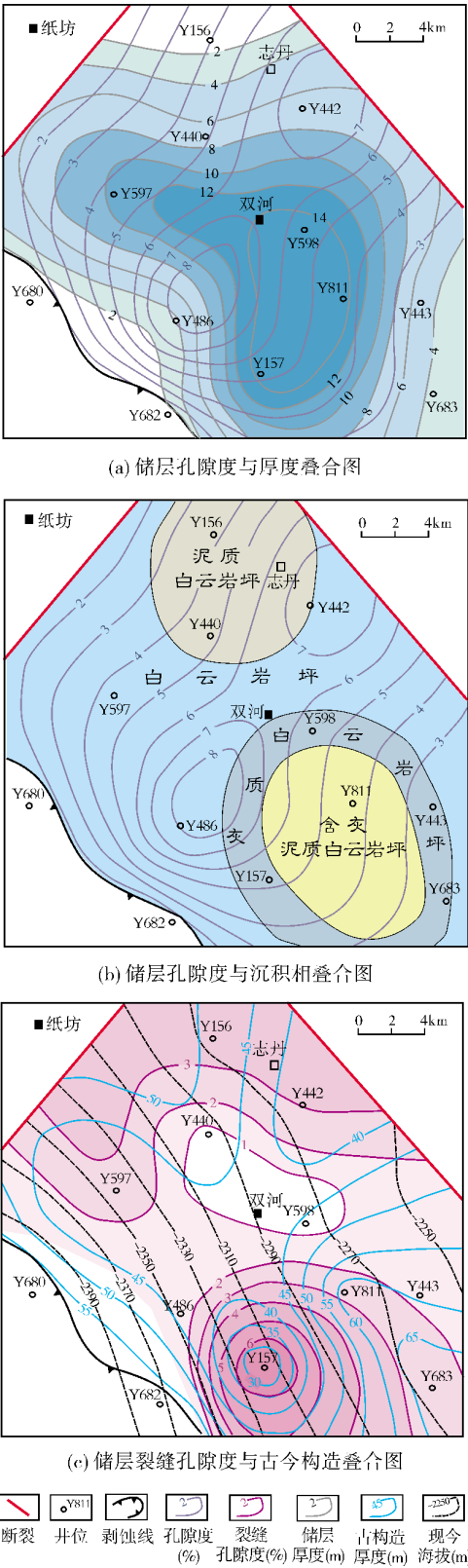


图6 志丹地区马家沟组五、亚段孔隙度与影响因素的关系图

利场所。在以准同生白云岩沉积为主的膏质白云岩坪环境中,几乎所有的碳酸盐岩均不同程度地含有膏、盐等易溶矿物。这些易溶矿物的存在不仅成为识别沉积环境的标志,同时也是膏模孔、盐模孔等组构选择性溶蚀孔隙形成的物质基础。

在蒸发台地的潮间及潮下带,由于水体的强烈蒸发作用以及蒸发盐的沉淀作用,使得 Mg^{2+} 高度富集,其结果促进了文石、方解石等碳酸钙沉积物的白云石化。由于 Mg^{2+} 半径小于 Ca^{2+} 半径,根据白云石化作用的机理,理论上将产生12%的孔隙。这是组构选择性孔隙中白云石晶间孔形成的基本理论依据。

对溶洞发育的影响 通过盆地边缘野外露头的观察,发现石灰岩发育稳定,而白云岩的风化、溶蚀、破碎作用强烈。由于石灰岩的岩性致密,抗风化能力强,故而不能成为储层;而白云岩易成为储层。由于白云岩常与膏岩层互层,膏岩层在早期暴露之后遇到淡水溶蚀,或被交代变成次生石灰岩,造成岩层坍塌,形成角砾岩,岩石的硬度降低,抗风化能力减小。研究区马家沟五期的沉积环境为蒸发台地,马五₁亚段白云岩可能在表生期受到渗流带或潜流带的表生淡水的淋滤和溶蚀作用,孔隙、溶洞在早期岩盐溶解之后因尚未来得及充填而被存留下来。纯净的白云


岩层段表生岩溶作用相对较弱,但研究区马五段的上部属于膏质白云岩坪环境,含有大量的蒸发盐,白云岩被溶蚀的程度大幅度提高,从而形成了有效的储集孔洞。

对裂缝发育程度的影响 毛毳等^[12]的研究结果表明,裂缝的发育程度与碳酸盐岩岩性密切相关。形成于开阔台地厚度较薄的致密泥晶灰岩层段,易形成网状及垂直裂缝,岩层厚度与裂缝密度呈负相关。形成于蒸发台地潮上带的蒸发岩层段以及泥质碳酸盐岩层段,易形成水平裂缝;而水平裂缝在上覆地层压力作用下,基本上都已闭合,成为无效缝隙。

5.2 成岩作用的影响

研究区马五₁亚段的沉积环境为蒸发台地亚相(图2),其成岩环境可划分为近地表成岩环境、浅—中埋藏成岩环境、表生岩溶环境和深埋藏环境(表2)^[4],储层成岩相类型主要包括泥晶白云岩相、粉—细晶白云岩相等(图2)。不同的成岩作用对次生孔隙形成与演化的影响决定了储层的最终物性,其中的溶蚀作用和白云石化作用对于次生孔隙的形成具有建设性,而压实-压溶作用和后期重结晶作用会造成储集空间缩小,因而具有破坏性。

表 2 志丹地区马五₁亚段碳酸盐岩储层成岩环境与孔隙演化表(据文献[4]修改)

成岩阶段	同生期	成岩期	表生期	再度埋藏期
成岩环境	近地表	浅—中埋藏	表生岩溶	再度埋藏
成岩介质	海水、大气淡水	大气淡水	大气淡水	酸性地层水
成岩作用	准同生白云石化	混合水白云石化、压实、压溶、胶结、重结晶、溶蚀	溶蚀,去石膏化	溶蚀、充填
孔隙类型	晶间孔、微缝	晶间孔,晶间溶孔,裂缝,溶孔,膏模孔	残余孔洞,构造裂缝	次生溶孔
孔隙度演化				
孔隙演化阶段	早期原生孔隙形成—缩减		中期次生孔隙发育—充填	晚期次生孔隙再度埋藏充填

溶蚀作用 由于碳酸盐矿物的易溶性和不稳定性,溶蚀作用可在早成岩期、表生期和晚成岩期不断改造原生孔隙并形成次生孔隙。特别是粒间溶孔,具有扩孔和扩喉作用^[13]。

白云石化作用 研究区泥晶白云岩形成于准同生白云石化,粉细晶白云岩形成于埋藏白云石化。当方解石被白云石交代时,体积收缩,形成大量晶间孔,储层连通性得到提高,储集性能得到优化。

压实-压溶作用 压实作用始于沉积物被埋藏期,成岩中期固结成岩,直到表生期为止。疏松沉积物在上覆地层的巨大负荷压力下失水,紧密堆积。压实作用对马家沟组储集空间具有破坏作用,使原生孔隙减少,物性变差。在高温高压的埋藏成岩环境下,压溶孔隙中的流体总体上呈过饱和,压溶产物以胶结物的形式在邻近的孔隙中沉淀,从而使储集空间减小。

重结晶作用 重结晶作用对研究区储集空间的

发育具有双重影响。早—中成岩阶段,随着温度和压力的不断增大,晶粒重结晶变粗,细晶白云岩向中、粗晶白云岩转化,有利于形成溶孔。随着重结晶程度的增加,晶粒直径变大,晶间孔被进一步充填,结果对储集空间造成了破坏^[14]。

5.3 构造破裂作用的影响

研究区经历了加里东、海西两大构造运动,盆地基底经历了抬升—剥蚀—稳定沉降,形成了复杂的裂缝系统。本文根据李善军等^[15]的研究,计算了志丹地区马五、亚段的裂缝孔隙度,绘制了裂缝孔隙度与古构造图及现今海拔的叠合关系图(图6c),并由此探讨构造破裂作用对裂缝发育的影响。

志丹地区位于陕北斜坡,整体构造稳定,局部有背斜构造。马五时期,Y157井(井位见图6c)及其附近位于古构造背斜顶部,裂缝十分发育,裂缝孔隙度值很高;双河地区,即Y440井和Y598井周围,构造相对平缓,平均裂缝孔隙度小于1%(图6c)。裂缝的发育,导致地表水进入,促进了岩溶作用,造成局部地层坍塌并形成溶洞、溶沟等,进而成为沟通孔隙的重要通道。

6 孔隙演化

志丹地区马家沟组碳酸盐岩随构造背景的变迁和沉积环境的演变,经历了同生期、早成岩期、表生期和晚成岩期四个成岩演化阶段(表2)^[4],这些成岩演化直接影响了马五、亚段碳酸盐岩储层孔隙的形成和演化。本文将此孔隙的循序演化划分为以下三个阶段。

6.1 早期原生孔隙形成—缩减阶段

在近地表环境的同生期,志丹地区碳酸盐沉积物处于灰泥状态,沉积物中保留着大量的原生孔隙。在阴极发光显微镜下,可以发现方解石、白云石具有环带构造,这表明成岩环境中盐水介质发生了变化。由海水作用形成的方解石胶结物中,MgCO₃含量较高(最大可达3%),通过碳氧同位素分析可知其富¹⁸O而贫¹³C。通过主要微量元素的分析(表3)可知,研究区马五、亚段MnO含量最大值可达0.072%,平均值为0.042%;Sr元素含量最大值可达309.95 μg/g,平均值为81.89 μg/g;Ba元素含量最大值可达155.809 μg/g,平均值为22.81 μg/g;Sr/Ba最大值可达45.77(其中有91%的样品值超过了2),平均值为10.59。胶结物中锰、锶、钡元素的富集,证明了海水环境的存在。

表3 志丹地区马五、亚段样品中主要微量元素含量表

测试项目	样品数	范围值	平均值
MnO (%)	18	0.018~0.072	0.042
Sr (μg/g)	33	45.844~309.954	81.89
Ba (μg/g)	33	3.581~155.809	22.81
Sr/Ba	33	0.64~45.77	10.59

由于海平面周期性的升降变化,使固结—半固结的沉积物暴露地表,淡水淋溶作用与胶结作用交替进行,大气淡水溶蚀易溶组分并使地层角砾化,从而形成铸模孔、粒内溶孔以及溶洞等。阴极发光显微镜下,可以发现孔隙中淡水方解石、淡水白云石、硅质等嗜酸性矿物的析出与充填。

至浅—中埋藏环境的早成岩期,随着上覆沉积物不断加积,原始碳酸盐沉积物经固结和压实压溶,孔隙水大量排出,使原生孔隙大量减少。此阶段若出现短暂的海平面下降,早期的大气淡水向下渗透会造成近地表的蒸发盐等易溶矿物的溶解,进而造成蒸发岩层溶解,引起上覆地层原地坍塌,形成早期的膏岩溶蚀坍塌角砾岩。这些作用往往又会促进岩层中形成大量次生孔隙并被保留下来,成为有效的储集空间。在混合水白云石化作用下,泥晶灰岩向粉—细晶白云岩转化,形成大量晶间孔^[16]。

6.2 中期次生孔隙发育—充填阶段

在表生岩溶期,晚加里东运动使得鄂尔多斯盆地全面抬升,下古生界碳酸盐岩暴露地表遭受剥蚀,形成大范围的岩溶古地貌。志丹地区位于岩溶台地与阶地交界处(图1),奥陶系马家沟组顶部形成了上、下两个大气淡水渗流带,发育了广泛分布的古岩溶型储层。此期间形成的非组构选择性孔隙广泛发育。亮晶白云石自形程度高,有序度可达0.72~1。粗大的淡水方解石、淡水白云石、硅质等就是岩溶期大气淡水环境下的析出矿物。在此表生岩溶环境下,次生孔隙的形成与充填作用十分强烈。

6.3 晚期次生孔隙再度埋藏—充填阶段

至深埋藏环境的晚成岩期,海西运动使得本区下古生界再度下沉,奥陶系碳酸盐岩被上古生界覆盖,埋藏深度逐渐加大,早期形成的孔隙被硅质矿物、高岭石等充填,孔隙体积大量缩小。通过X衍射全岩分析,发现研究区孔隙中含有铁方解石、铁白云石等矿物,这应是地层再度下沉后化学析出的成岩

矿物。上古生界含煤层系中的大量有机质进入成熟阶段,地层水中酸性组分对奥陶系碳酸盐岩进行溶蚀作用,又使碳酸盐岩中形成少量的溶蚀孔隙,但当介质的酸碱度发生变化后,其中的硅质或钙质组分又会在孔隙中发生沉淀,从而缩小了储集空间。

7 结 论

(1)陕北志丹地区马五₁亚段碳酸盐岩储层中的孔隙类型多样,以次生孔隙为主。组构选择性孔隙中,晶间孔和膏模孔普遍发育,偶见粒间溶孔和粒内溶孔。非组构选择性孔隙中,裂缝广泛发育,可见溶蚀角砾孔和裂缝溶蚀扩大孔。

(2)沉积环境是影响和控制储层孔隙系统形成与改造的前提,而成岩作用是主要因素,其中溶蚀作用、白云石化作用可形成储层次生孔隙,压实-压溶作用会减小孔隙体积,重结晶作用在不同成岩阶段对储集空间的改造具有不同的影响。构造破裂形成的裂缝,在形成渗流通道的同时也扩大了碳酸盐岩的储集空间。

(3)马五₁亚段碳酸盐岩孔隙的类型及大小随着成岩作用的变化而演化。孔隙演化经历了同生期—早成岩期的原生孔隙形成—缩减、表生成岩期的次生孔隙发育—充填、晚成岩期的次生孔隙再度埋藏—充填等三个阶段。

参 考 文 献

- [1] 马新华. 鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 50-53.

- [2] 张绍平. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系顶盐溶作用及其储集孔隙成因[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 72-80.
- [3] 刘永先. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系碳酸盐岩储层溶蚀及充填作用特征[J]. 岩相古地理, 1995, 15(5): 43-51.
- [4] 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.
- [5] 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—五₂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.
- [6] 郑聪斌, 张军. 鄂尔多斯盆地奥陶系天然气成藏特征及气藏分布规律[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 5-12.
- [7] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 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.
- [8] 何自新. 鄂尔多斯盆地油气与演化[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 68-83.
- [9] 谢锦龙, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段岩相古地理及有效区带预测[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 23-32.
- [10] 张学丰, 蔡忠贤, 李林, 等. 白云岩的残余结构及由此引发的孔隙分类问题[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 475-485.
- [11] 王起琮, 赵淑平, 魏钦廉, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组海相碳酸盐岩储集层特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 229-242.
- [12] 毛鑫, 钟建华, 李阳, 等. 沉积环境对塔河油田六区奥陶系碳酸盐岩储集空间的影响[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 15-22.
- [13] 牛永斌, 钟建华, 王培俊, 等. 成岩作用对塔河油田二区奥陶系碳酸盐岩储集空间发育的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(6): 13-19.
- [14] 王勇. 川东南地区嘉一—嘉二段储层特征及成岩作用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 5(3): 22-30.
- [15] 李善军, 汪涵明, 肖承文, 等. 碳酸盐岩地层中裂缝孔隙度的定量解释[J]. 测井技术, 1997, 21(3): 205-214.
- [16] 陈凤喜, 王东旭. 靖边气田马五₁储层成岩作用及孔隙演化[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(1): 22-26.

编辑: 赵国宪

Pore Characteristics and Influencing Factors of Lower Ordovician Majiagou Submember-5₁ Carbonate Reservoir in Zhidan Area, Ordos Basin

Chen Jianming, Wang Qicong, Zhai Shuntao

Abstract: It is porous but heterogeneous in the Lower Ordovician Majiagou Submember-5₁ carbonate reservoir in Zhidan area, Ordos Basin. According to pore evolution and associated lithologic structures, two types of different pores can be divided. One is the fabric selective pores that include intercrystal pores, intercrystal solution pores and moldic pores, and the other is the non-fabric selective pores that mean fissures, interbreccia solution pores and fissure-corrosion enlarged pores. It is indicated that sedimentary environments and late diagenesis are the factors influencing and controlling pore development in the carbonate reservoir. Diagenesis plays the key roles, such as solution and dolomitization resulting in secondary pores, compaction and pressolution decreasing pore volumes, and recrystallization influencing reformation of reservoir space. Fissures play a role of enlarging reservoir space as forming seepage ways. The evolution of pores experienced four stages in this area, the formation-reduction stage of primary pores, the development to filling stage of secondary pores, and the reburial-filling stage of secondary pores. It is shown that the pores are different in type with changing diagenetic environment during these stages.

Key words: Early Ordovician; Carbonate rock; Pore evolution; Influence factor; Ordos Basin

Chen Jianming: Master degree in progress at Xi'an Petroleum University. Add: School of Earth Science and Engineering, Xi'an Petroleum University, Box 186, Dianzi Rd., Xi'an, Shaanxi, 710065, China