

鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系岩溶风化壳 储集层类型与形成条件

马春生¹, 许化政², 郑浚茂¹, 宫长红³

(1 中国地质大学(北京); 2 中国石化石油勘探开发研究院; 3 中原油田技术监测中心)

摘要 早奥陶世, 庆阳—黄陵古隆起北侧形成蒸发台地斜坡白云岩坪膏质白云岩、含膏白云岩沉积。加里东期, 该古隆起随同鄂尔多斯盆地整体抬升, 其北坡不同层位的石膏质白云岩、含膏白云岩差异溶蚀形成了膏溶角砾白云岩、蜂窝状膏溶细晶白云岩、针孔状膏溶白云岩、粒间溶孔细晶白云岩和溶蚀孔洞泥粉晶碳酸盐岩等不同类型的岩溶储集层。斜坡宽缓、地下水流梯度小、晶粒或结核状易溶膏盐颗粒分散是斜坡上岩溶储集层发育且类型多样的主因。斜坡北侧陕北坳陷以膏盐岩地层为主的致密岩性为斜坡上风化淋滤储集层的天然气聚集提供了区域圈闭条件, 从而使富县斜坡成为天然气勘探的有利场所。

关键词 鄂尔多斯盆地; 庆阳—黄陵古隆起; 富县斜坡; 风化壳储集层; 储集层类型; 储集层成因

中图分类号: TE112.23 **文献标识码**: A

1 区域地质背景

位于鄂尔多斯盆地南部的富县斜坡(陕西富县—甘泉一带), 是奥陶纪庆阳—黄陵“L”型古隆起向陕北坳陷过渡的一个宽缓斜坡(图1)。

奥陶纪时, 因受南部加里东地槽(秦岭海槽)控制, 盆地南部近边缘处发育的庆阳—黄陵古隆起成为分割华北海和秦岭海的正向构造单元, 它不仅控制了华北海与秦岭海的海域范围, 而且还决定了古隆起北侧奥陶纪的岩相古地理格局, 从而形成中奥陶统马家沟组三种不同的沉积岩性分区, 它们自南而北分别为: (1) 隆起台地和侧缘以泥晶—亮晶生物碎屑颗粒为主的灰岩或鲕粒状白云岩沉积; (2) 隆起北侧富县斜坡蒸发台地白云岩坪相膏质白云岩、含膏白云岩沉积; (3) 陕北坳陷局限海蒸发潟湖相盐岩、膏岩、膏质白云岩和石灰岩沉积^[1]。

奥陶纪中期至石炭纪中期的加里东运动, 导致鄂尔多斯盆地整体抬升, 庆阳—黄陵古隆起北侧富县斜坡的下奥陶统含膏白云岩、膏质白云岩经历了长达1.3亿年的风化剥蚀, 从而在准平原化的背景上, 形成多个近南北向长条状分布的溶蚀岩丘和同

方向水系, 为各类碳酸盐岩、白云岩孔洞缝型储层的形成奠定了基础^[2-3]。

中石炭世—早白垩世, 盆地进入稳定沉积阶段, 中奥陶统风化壳储集层之上覆盖了厚达3000余米的石炭系—二叠系—下白垩统碎屑岩沉积。

晚白垩世—早第三纪, 鄂尔多斯盆地遭受来自东部方向的挤压, 盆地回返, 并形成了东北高、西南低的陕北斜坡。富县古斜坡也因这次挤压回返而一改先期南高北低地势为北高南低, 从而成为陕北斜坡的一部分, 并位于低位处。陕北斜坡中部古坳陷的下奥陶统致密岩性(盐岩、膏岩)成为大型斜坡高部位的封堵层, 使富县斜坡区的风化壳储集层成为天然气聚集的有利场所。

目前, 沿奥陶系“L”型古隆起的内侧, 下古生界马家沟组探明的含气领域几近覆盖西部中央隆起带东侧的靖边斜坡, 向北已扩展至西部斜坡带塔巴庙气田的南部(大51、大60井获工业气流), 向南已扩展至横山塔湾地区, 形成西部和西北部对陕北潟湖坳陷的“围限”^[1,4]。陕北潟湖坳陷的南部, 为延长集团和中石化集团(富县区块)的矿权区(图1), 下古生界的勘探程度还很低, 少量钻井已获工业气流

收稿日期: 2010-05-20; 改回日期: 2011-01-24

马春生: 1972年出生, 高级工程师。1996年于成都理工学院石油勘探专业毕业, 2007年于中国地质大学(北京)获硕士学位, 现为中国地质大学在读博士研究生。主要从事油气田开发研究。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路29号

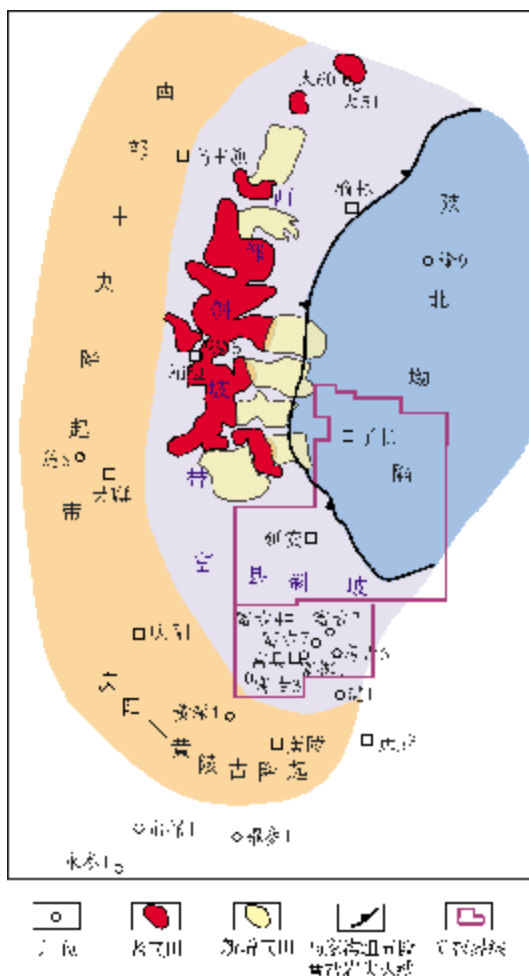


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积古地理与岩溶风化壳气藏分布图

(富古7井)和广泛的气显示(富古2、富古4井马家沟组风化壳中获天然气流,富探1井马家沟组五段岩心含气;旬宜区块建1井奥陶系见气显示),展示了广阔且良好的勘探前景。认真研究该地区下古生界马家沟组风化壳天然气成藏的烃源条件、储集层发育状况和区域圈闭特征,可增大对该区天然气勘探的投资信心,并提高勘探成功率^[5-6]。

根据长庆油田中部气田的勘探经验,提高天然气勘探成功率的关键是确定风化壳储集层的发育部位和发育程度,故本文以储集层为重点来分析富县斜坡地区的奥陶系天然气藏形成条件。由于本区下古生界钻井较少,故参考了靖边地区的区域研究资料。

2 风化壳储集层岩石类型

钻井和露头发现的岩溶储集层主要有以下类型。

2.1 膏溶角砾白云岩

膏溶角砾白云岩主要形成于石膏结核密度较大的含膏白云岩层中。石膏结核的膏溶作用不仅造成了岩石的孔洞化,而且使白云岩脆裂垮塌,经再次压实胶结后而形成。垮塌角砾岩的角砾大小混杂,未磨圆,没有搬运迹象;角砾和胶结物成分相同,均为白云质。角砾层的顶底板岩层完整,层面平整清晰。

垮塌角砾岩的胶结较致密,膏溶孔洞的溶蚀扩大程度较弱,孔径一般小于1 mm,但孔洞率较高,微裂隙较发育,且连通性较好,是风化壳储集层中物性较好的储集岩(图2a)。

2.2 蜂窝状膏溶细晶白云岩

岩心观察富古7井马五₃层(2 966.92~2 968.32 m),可见均匀分布的蜂窝状溶孔,岩心薄片镜下观察可见圆形管状溶孔多数未被充填或有少量次生方解石充填。

蜂窝状膏溶细晶白云岩一般分布在斜坡上长椭圆形溶丘的上游方向,或分布在靠近沟槽的岩层中。岩溶形态以圆形、椭圆形蜂窝状匀称分布的小溶孔、小溶洞为主,孔径2~4 mm。孔洞内充填物含量较少,以少量充填—半充填为主,充填物为泥质和凝灰质,洞壁可见溶蚀和侵蚀痕迹。

地层平缓是导致蜂窝状膏溶细晶白云岩形成的外部条件。在富县斜坡部位,树枝状分布的岩溶沟槽使坡地形成各自独立的NE—SW向长条状溶丘块体。溶丘块体内地层平缓,流体压力梯度小,岩溶水交替不畅,石膏结核和膏晶溶蚀速度缓慢。非常发育的石膏结核和盐岩晶粒被溶蚀后,地层水矿化度增高,结果导致去白云石化作用,但膏模孔和晶模孔的溶蚀扩大改造较少,从而形成蜂窝状白云岩。蜂窝是石膏结核溶解和白云石方解石化的共同结果。

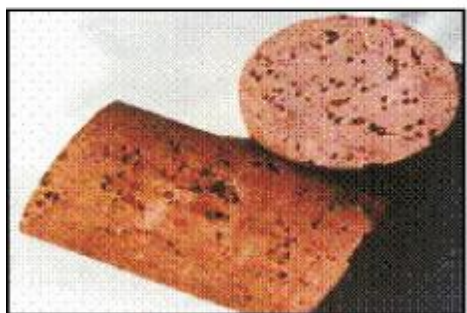
蜂窝状膏溶细晶白云岩是本区最好的储集层,它的出现表明马五₃层处于饱和水溶蚀条件下的时期较长(图2b)。

2.3 针孔状膏溶白云岩

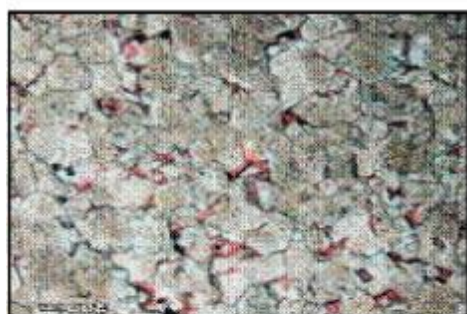
针孔状膏溶白云岩的沉积背景是膏盐湖相与蒸发潮坪相的过渡带,由于水体相对较深,潮汐影响相对较小,膏盐含量虽高但晶粒小,细如纤维,密如针孔,顺层分布。同样是地层平缓、潜水面水位高、水流



(a) 膏溶角砾白云岩。富古6井, 3198.4~3199.9m, 马家沟组五₁层。岩心



(b) 蜂窝状细晶白云岩。陕5井, 2953~2955m, 马家沟组五₁层。岩心



(c) 细晶白云岩。莲6井, 4301m, 马家沟组四段。单偏光, $\times 50$



(d) 碳酸盐岩溶蚀孔洞。富古4井, 3215.8~3216.2m, 马家沟组五段。岩心

图2 奥陶系马家沟组岩溶储集层特征

梯度小的原因, 含盐度较高的地下水只能溶蚀易溶的石膏, 而对白云石、方解石无影响, 其溶孔几乎完全

由纤维状膏岩溶蚀形成, 直径 0.5~2mm, 分布均匀度与蜂窝状细晶白云岩近似, 但难见溶蚀扩大现象。纤维状石膏是针孔状膏溶白云岩形成的溶蚀基础, 而地层的极度平缓是其形成的外部条件; 这类白云岩一般分布在长椭圆形溶丘块体的下倾方向, 或分布在岩溶坡地与洼地的过渡部位, 如富古3井马家沟组五段3144m取心面上的针孔状溶蚀孔洞和网状微细裂缝。

2.4 粒间溶孔细晶白云岩

粒间溶孔细晶白云岩储集层在庆阳—黄陵古隆起北侧的黄深1和莲6井, 南侧的永参1、旬探1、耀参1等井(图1)中均有钻遇, 发育层位包括马家沟组四段、六段等层位(图2c)。这些井均位于古隆起两侧斜坡高部位, 裸露期的古水文条件较好, 岩性较单一, 白云石含量一般大于50%。当白云石含量在50%~80%时, 白云石化和溶蚀的共同作用使孔隙度增加很快, 岩石的平均孔隙度可达19%; 当白云石含量超过80%后, 孔隙度及渗透率又开始降低。

2.5 溶蚀孔洞型泥粉晶碳酸盐岩

溶孔—溶洞型泥粉晶碳酸盐岩一般沉积于古隆起的侧缘, 母岩相对纯净, 膏岩、盐岩晶体含量低, 溶蚀的主体为碳酸盐岩(方解石、白云石)。溶蚀孔洞的直径相对较大, 分布不均, 规律性不明显, 一般沿裂隙、节理和层面呈串珠状或管状分布(图2d)。

3 岩溶储集层形成的地质地理背景

中奥陶世平凉期, 华北地台南、北、西洋壳分别向台地之下俯冲消减形成对挤压力, 造成地台整体抬升, 出现大规模海退, 鄂尔多斯主体成为陆地。陆地南侧受对挤压力影响, 庆阳—黄陵古隆起南翼窄陡, 北翼宽缓。隆起台地上奥陶系厚度不足100m, 风化壳地层为马家沟组四段微晶灰岩及云斑灰岩。北部富县斜坡奥陶系厚300~500m, 钻井揭露马家沟组一至五段地层齐全(局部含六段及中奥陶统平凉组), 缺失下奥陶统冶里组、亮甲山组, 马家沟组直接覆盖于中寒武统之上^[7]。

加里东裸露风化期的古水文地质特点为: 地层极度平缓, 庆阳—黄陵低幅度古隆起为南、北分水岭, 以此为界, 雨水呈地表水和地下水流分别呈面状、放射状向南、北两个方向运动。处于分水岭北侧的富县斜坡地面水、地下水均很活跃, 一方面形成南

北长条形分布的古岩溶丘地,同时自南而北形成三个不同类型的岩溶储层带,即南部斜坡高部位以粒间溶孔细晶白云岩和溶蚀孔洞型泥粉晶碳酸盐岩为主,斜坡中部以蜂窝状膏溶细晶白云岩和膏溶角砾白云岩为主,北部斜坡低部位以针孔状膏溶白云岩为主。延川以北地区为地面水、地下水的排泄中心,风化壳储集层不发育。

从纵向上看,中奥陶统马家沟组二、四、六段属偏湿热的海侵型沉积,以块状石灰岩为主,夹云斑石灰岩、灰斑白云岩,而马家沟组一、三、五段属干燥气候的海退沉积,主要为白云岩坪膏质白云岩,含膏白云岩、石灰岩和膏盐湖沉积的盐岩和膏岩。上述岩性组合决定了马家沟组一、三和五段是发生岩溶作用的主要层段^[8]。

斜坡上白云岩中的膏质按产状可分为结核状和层状。结核状膏质白云岩是斜坡白云岩坪相的主体,石膏呈结核状分布于泥粉晶白云岩中,是准同生期石膏在松软沉积物中生长形成的,常与泥粉晶白云岩伴生。层状膏岩呈薄层或纸状,水平纹理发育,与潮坪白云岩伴生^[9]。

岩溶作用有明显的选择性,裸露环境下,石膏与各种不同成分、不同结构的碳酸盐岩因溶蚀速度不同而形成差异溶蚀。在常温常压下,石膏的溶解度为 0.013 mol/L ,方解石和白云石溶解度为 0.002 mol/L ,因此结核状膏岩和石膏夹层首先被溶蚀。石膏的溶解使地下水中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量增加,大大提高了地下水对碳酸盐岩石的溶蚀、溶解能力,特别是对含镁岩石的溶解和迁移能力,从而出现去白云石化作用。石膏结核、石膏夹层的存在及其膏溶作用,加剧了岩溶发育程度,并因其在地层中含量和结构的不同而形成不同类型的储集层^[10]。

加里东期,长期缓慢的整体抬升不但控制着夷平作用的整体平稳进行,没有造成隆起带地貌上的很大反差,大气淡水逐渐由以地表径流为主转变为缓慢的沿层间裂隙和白云岩节理裂隙向地下渗透,溶蚀作用向下发展形成相对复杂的地下岩溶亚系统(地下流水系统),其中以普遍发育的“膏溶”为特征控制岩溶形态和岩溶程度。膏溶作用的最大特点是,除其自身溶蚀外,还引起周边脆性白云岩层的破裂,使岩溶作用加强。含有石膏结核、石膏夹层的白云岩在区域挤压应力和垂直压应力作用下常形成“X”状节理及张裂隙,从而为地下水的渗流提供了通道。因

此,尽管裸露状态下的方解石比白云石溶解速率高,但由于白云岩容易脆裂,机械性破坏比灰岩大,所以在白云岩层组中,岩溶作用较灰岩层强烈^[11]。

马家沟组风化裸露期跨越了加里东晚期至海西早期约 1.3 亿年的历史,构造运动一直以缓慢稳定的抬升为主,地表岩溶发育相对简单,其过程基本是一个溶蚀—剥蚀—夷平的过程,导致地貌形态简单,高差较小,以致地下水的水力梯度和水位埋深均较小。主要岩溶发育段处于地下水的水平潜流带,发育的溶孔以小溶孔、小溶洞为主,且呈层状均匀分布。近地表处以垂向溶蚀为主,沿节理或裂缝发育串珠状管道溶洞,孔洞直径相对较大。

在地壳构造运动平稳的背景控制下,斜坡上的侵蚀沟槽不断协调着地下潜水面及地区侵蚀基准面的变化。在向东北平缓倾斜的古地貌背景下,沟槽发育区的上游方向由于靠近水源补给区,岩溶水补给充分,排泄流畅,地表及地下水流相对活跃,加之含膏白云岩中结核状膏岩晶粒较大,溶蚀孔径也较大,白云岩溶蚀孔洞常发育成“蜂窝状”,近地表的岩溶作用或形成垮塌角砾岩,或形成串珠状管道溶洞。而向下游区,地下水流速变慢,结核状膏岩颗粒直径变小,溶蚀孔洞的密度较大,但孔径变小,常形成“针孔状”溶蚀孔洞储集层。

岩溶坡地的主体为溶丘,为坡地上古地势相对较高、地表侵蚀较弱的岩溶地带。溶丘形态呈椭圆形夹于两条或多条溶沟之间,长条形自西南向东北延伸,表面出露层位也由台地马家沟组四段(黄深1井)向东北方向顺次演变为以马家沟组六段为主。溶丘上靠近沟槽部位的岩层,水流的侧向侵蚀冲刷较严重,溶蚀孔洞较发育,而向溶丘内部,溶蚀孔洞变细小。

海西晚期奥陶系被深埋藏后,石炭系、二叠系有机质成熟而产生的酸性压释水通过前石炭纪沟槽进入风化壳储层段,从而发生酸性水溶蚀,促使古沟槽附近溶蚀孔洞扩大,而向溶丘内部,溶蚀孔洞的变化不大。古沟槽中含铁、铝质泥岩的充填,将斜坡上不同大小、不同形态、不同走向的溶丘分散隔离,成为其后天然气成藏的众多圈闭。

4 天然气藏形成的区域圈闭条件

早奥陶世,富县斜坡以北为陕北坳陷局限海潟湖区,沉积岩性以层状膏盐岩、层状盐岩、块状灰岩和白云岩为主,单颗粒、单晶体存在的石膏砂(砾)屑

及石盐晶体极其稀少,不具备差异溶蚀形成孔隙的基础。在风化壳形成过程中,坳陷区地势平坦开阔,为区域汇水排泄中心,虽未形成大量积水,但地表经受的侵蚀程度弱,奥陶系顶部层位保留比较完整,残余层位以马六段和马五₁层为主,上覆铝土岩层厚度达10~15m。同时,由于汇水排泄区充填、淀积作用强,岩溶空间充填程度高,从而形成致密岩性带。根据陕北坳陷区榆9井马家沟组岩性统计,盐膏岩厚402m,灰岩厚235m,白云岩厚167m,泥岩厚57.4m,其岩性组合在坳陷区域范围内具有代表性。

晚白垩世—早第三纪,陕北斜坡形成,陕北坳陷致密岩性区成为大型斜坡高部位的封堵层,而富县斜坡区的风化壳储集层成为天然气聚集的有利场所。

5 结 语

(1) 富县斜坡风化壳储集层岩石类型较多,最好的当属蜂窝状细晶白云岩和针孔状膏溶白云岩,它由膏模及盐晶粒溶蚀及白云石化作用形成,孔隙密度大,分布均匀,次生充填低,分布面积广,成层性好。

(2) 长期缓慢的整体抬升控制着夷平作用的整体平稳进行,导致地貌反差小和地面水、地下水流速慢,以膏溶为主体的岩溶作用形成顺层均匀分布的小溶孔和小溶洞,储集层性质好。

(3) 区域挤压作用导致脆性白云岩形成发育的节理和裂缝,为地下水渗流提供通道;和白云石共生的、易溶的、具有不同丰富程度和不同结晶程度的膏

模和盐晶粒为不同类型溶蚀孔隙的形成奠定了基础。地层极度平缓背景下高矿化度地下水的缓慢流动使易溶矿物溶蚀较彻底,而耐溶矿物(方解石、白云石)则未溶蚀或少量溶蚀,如此形成类型多样的储集层。

参 考 文 献

- [1] 杨俊杰,谢庆帮,宋国初. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古地貌成藏模式及成藏序列. 天然气工业, 1992, 12(4): 8-13.
- [2] 杨华,黄道军,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌气藏特征及勘探进展[J]. 中国石油勘探, 2006, 3(3): 1-5.
- [3] 辛勇光,周进高,邓红缨. 鄂尔多斯盆地南部奥陶统马家沟组沉积特征. 海相油气地质, 2010, 15(1): 1-5.
- [4] 何自新,郑聪斌,王彩丽,等. 中国海相油气田勘探实例之二: 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探. 海相油气地质, 2005, 10(2): 37-44.
- [5] 陈五泉. 鄂尔多斯盆地南缘古生界天然气地质条件及勘探有利区评价[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(2): 14-17.
- [6] 阎荣辉,白海峰,刘宝宪,等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶统马家沟组马六段成藏条件分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(5): 738-743.
- [7] 何自新,等. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [8] 张锦泉,耿爱琴,陈洪德,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组古岩溶天然气储层[J]. 成都地质学院学报, 1992, 19(4): 65-69.
- [9] 郑聪斌. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳古岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3): 280-290.
- [10] 黄道军,文彩霞,季海镔,等. 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.
- [11] 董少峰,陈洪德,赵俊兴,等. 鄂尔多斯盆地靖边气田北部马五₄亚段储层特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(2): 66-70.

编辑:赵国宪

Types and Formation Conditions of Ordovician Karst Weathering-crust Reservoirs in Fuxian Slope Area, Ordos Basin

Ma Chunsheng, Xu Huazheng, Zheng Junmao, Gong Changhong

Abstract: During early Ordovician time, a set of tidal flat dolostone deposited in evaporated platform slope in the northern side of Qingyang-Huangling Paleouplift, Ordos Basin. During the period of Caledonian orogeny, the paleouplift was uplifted accompanying with the rising basin while karst weathering-crust reservoirs with many types of anhydrite-dissolved dolostone formed within widespread different layers in the northern slope due to differential dissolution. Development and various types of karst reservoirs are dominantly attributed to these factors, i.e. the wide and gentle inclining slope, the low gradient of waterflow, the spreading crystal or nodular soluble anhydrite and salt grains. As the dense evaporite strata provide regional trapping condition for gas accumulation in weathering-leaching crust reservoirs in Fuxian Slope, it becomes an area favorable for gas exploration.

Key words: Ordos Basin; Fuxian Slope; Weathering crust reservoir; Karst reservoir; Reservoir type; Origin of reservoir
Ma Chunsheng: male, Senior Engineer, Doctor student. Add: China University of Geosciences (Beijing), 29 Xueyuan Rd., Beijing, 100083 China