

鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳 岩溶储层孔隙充填特征

沈 扬^{1,2}, 吴兴宇^{1,2}, 王少依^{1,2}, 吴东旭^{1,2}, 丁振纯^{1,2}, 于 洲^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室

摘 要 勘探实践表明,鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳蕴含了丰富的天然气资源,是重要的勘探领域,深入分析盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层的孔隙充填特征,对储层平面分布预测及提高钻探成功率具有重要意义。早奥陶世,鄂尔多斯盆地处于稳定的碳酸盐台地沉积环境,马家沟期发育广泛的碳酸盐岩地层,其中马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段发育典型的含硬石膏结核白云岩坪沉积,至中晚奥陶世,受构造抬升后遭受长达1.3亿年的风化溶蚀,形成风化壳膏模孔型岩溶储层。在岩心及薄片观察基础上,重点通过激光碳氧同位素、电子探针、阴极发光等微区多参数实验分析,研究表明奥陶系风化壳岩溶储层膏模孔中的充填物,包括渗流白云石粉砂、(含铁)方解石、(含铁)白云石、石英、萤石、黄铁矿、高岭石、硬石膏、残余泥质及有机质等12种,常见8种充填矿物组合类型。结合成岩演化分析,奥陶系风化壳岩溶储层膏模孔经历了早表生期、晚表生期、浅埋藏期和深埋藏期等4期充填。盆地东部膏模孔的充填程度明显高于盆地中部的靖边气田,充填程度主要受风化壳古岩溶地貌的控制,在盆地东部奥陶系风化壳二级古岩溶地貌中的平台、残丘、坡地及古沟槽两侧,膏模孔充填弱,储集空间大,储集性能更好。

关键词 鄂尔多斯盆地; 奥陶纪; 马家沟组; 风化壳; 岩溶储层; 膏模孔; 充填特征

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 引 言

鄂尔多斯盆地面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,油气资源丰富。奥陶系风化壳是鄂尔多斯盆地地下古生界重要的勘探层系,自20世纪90年代在盆地中部发现靖边气田以来,已累计提交探明储量 $6547 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。勘探实践表明,与盆地中部的靖边气田相似,盆地东部奥陶系风化壳也蕴含丰富的天然气资源,目前已有双5井、双15井、米15井、米35井及麒13井等多口探井获得高产工业气流,天然气勘探潜力大。前人针对鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层开展了大量研究工作^[1-5],但研究多集中于储层的基本特征及沉积微相、古地貌对储层分布的控制方面,仅部分研究者对溶孔充填物类型和地球化学特征作了初步研究^[6-8],对膏模孔中充填矿物组合类型、充填规律和充填序列的研究则较少。与盆地中部靖边气田相比,盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层更为致密,膏模孔充填矿物类型及组合更为丰富多样,充填程度也更高,这严重制约着

盆地东部奥陶系风化壳天然气的勘探。为此,笔者结合近年来的新钻井开展了以岩心、薄片观察描述为重点的研究工作,并综合碳氧同位素、电子探针等微区多参数实验,深入分析了膏模孔的充填特征及规律,期望能对盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层的分布预测及勘探部署起到一定指导作用。

1 区域概况

鄂尔多斯盆地在地理上横跨陕、甘、宁、蒙、晋5省(区),现今构造划分为伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断带、天环坳陷、陕北斜坡、晋西挠褶带等6个二级构造单元(图1)。奥陶系风化壳岩溶储层分布于盆地陕北斜坡的中东部,其中靖边气田位于盆地中部乌审旗—靖边—志丹一带,盆地东部指横山—安塞以东地区,蓝色方框为本次研究区范围(图1)。从古地理环境看,鄂尔多斯盆地北靠伊盟古陆,东为华北地台本部,西临贺兰裂谷,南滨秦岭海槽,属于华北地台范畴,奥陶纪马家沟期为稳定的碳酸盐台地沉积^[9-13]。马家沟组

收稿日期: 2017-08-10; 改回日期: 2018-04-16

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2016ZX05004-002)和国家“十三五”油气专项“深层古老含油气系统成藏规律与目标评价”(2017ZX05008005)资助

沈 扬: 1964年生,高级工程师,长期从事盆地构造及沉积储层研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号; E-mail: sheny_hz@petrochina.com.cn

由下向上划分为 6 段,其中马一段、马三段、马五段沉积时处于相对海平面下降时期,以发育广泛分布的白云岩和膏盐岩为典型特征,马二段、马四段、马六段沉积时处于相对海平面上升时期,以沉积厚层石灰岩为典型特征。

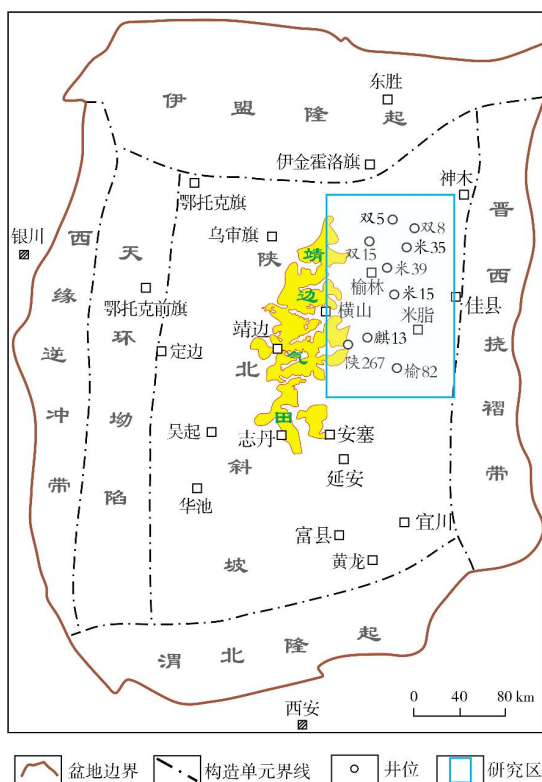


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元分区及研究区位置

盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层主要发育在马五段上部的马五₁亚段和马五₂亚段(图2)。岩心及薄片观察表明,马五₁亚段、马五₂亚段沉积时处于相对海平面下降时期,发育广泛分布的局限台地潮坪亚相沉积,主要包括白云岩坪、含硬石膏结核白云岩坪、含灰白云岩坪等沉积微相^[14-15],其中含硬石膏结核白云岩坪微相是盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层发育的最有利相带^[16-17]。

马五₁亚段在地层保留较全的情况下厚约 25 m,由上向下进一步分为 4 个小层(图2):马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₁⁴。马五₁¹小层的岩性为褐灰色微晶—细粉晶白云岩、角砾状白云岩,夹薄层含白云质泥岩、含硬石膏结核粉晶白云岩,顶部微裂缝及溶蚀孔洞发育,内有黄铁矿、铝土质及泥质等充填,一般厚约 3~8 m。马五₁²小层的岩性为浅灰色粉晶白云岩、含

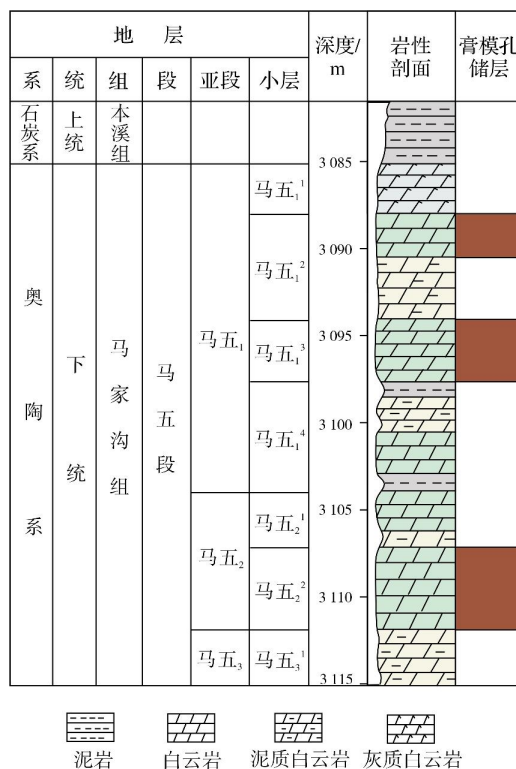


图 2 鄂尔多斯盆地东部马五₁亚段和马五₂亚段膏模孔储层发育柱状图

石膏结核粉晶白云岩,夹灰色砂屑白云岩、纹层状白云岩,局部夹岩溶角砾岩,含条板状、针状硬石膏假晶,溶蚀孔洞及针孔发育,横向分布较稳定,一般厚约 6 m。马五₁³小层的岩性为浅灰色含硬石膏结核及溶模孔的粉晶白云岩,夹角砾状白云岩,局部见颗粒白云岩薄层,偶见硬石膏假晶,岩溶强烈,以硬石膏结核为主的溶蚀孔洞发育,一般厚约 2~5 m。马五₁⁴小层顶部 1 m 左右的岩性为深灰色角砾状白云质泥岩,局部夹凝灰质泥岩;中部为灰色粉晶白云岩或灰质白云岩、微晶石灰岩,局部为含硬石膏结核粉晶白云岩;下部为深灰色—黑色凝灰岩夹白云质泥岩;底部凝灰岩为区域标志层,分布范围较广泛;马五₁⁴小层一般厚约 4~6 m。

马五₂亚段位于马五₁亚段的底部凝灰岩标志层之下,可进一步分为 2 个小层(图2),马五₂¹和马五₂²,厚度一般为 6~8 m,局部超过 10 m。马五₂¹小层,上部为深灰色微晶—细粉晶白云岩,下部为灰黑色—深灰色白云质角砾岩及泥质白云岩,底部为薄层凝灰岩,厚度比较稳定,一般为 2~4 m。马五₂²小层岩性为褐灰色、浅灰色粉晶白云岩,局部夹白云质角砾岩,

普遍含硬石膏结核,见毫米级条板状硬石膏假晶,发育密集的水平微裂缝,与下伏马五₃亚段顶部的白云质泥岩形成很好的岩性界面,一般厚约3~5 m,在区域上为一重要的标志层。

马五₁²小层、马五₁³小层和马五₂²小层中的硬石膏结核溶模孔最为发育,是盆地东部奥陶系风化壳中的主力含气层(图2)。

2 风化壳岩溶储层特征

2.1 储层岩石学特征

鄂尔多斯盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段的岩石类型,主要有微晶白云岩、细粉晶白云岩、(含)膏结核(微晶)细粉晶白云岩、(含)膏质(微晶)细粉晶白云岩、含泥(微晶)细粉晶白云岩、泥质(微晶)细粉晶白云岩、含灰(微晶)细粉晶白云岩、灰质(微晶)细粉晶白云岩,局部发育有粉晶白云岩,其中,最具有储集意义的岩性为(含)膏结核(微晶)细粉晶白云岩。



(a) 浅灰色细粉晶白云岩,岩溶角砾化。双5井 2 635.1 m, 马五₁²小层。岩心



(b) 褐灰色细粉晶白云岩,方解石、白云石粉砂充填膏模孔。榆82井2 836.2 m, 马五₁²小层。岩心

井位参见图 1

图 3 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层岩石学特征

2.2 储层储集空间特征

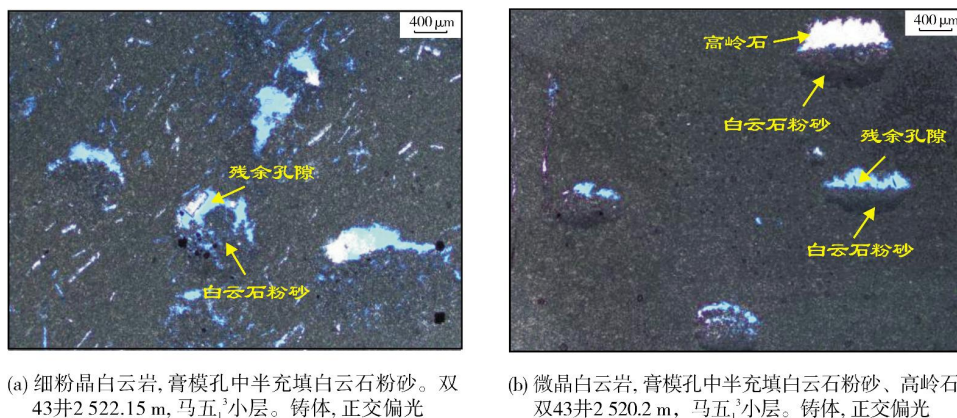
大量钻井岩心和岩石薄片观察表明,鄂尔多斯盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段,风化壳岩溶储层的储集空间以膏模孔为主(图4),溶蚀孔洞、晶间孔和微裂缝次之。

膏模孔 可进一步细分为石膏晶体铸模孔和石膏结核铸模孔两种类型。石膏晶体铸模孔(简称晶模孔)为针状、柱状、板状硬石膏晶体经选择性溶蚀而成,大小约(0.05 mm×0.5 mm)~(0.2 mm×0.5 mm),往往

微晶白云岩、细粉晶白云岩 成分、结构一般较均匀,白云石晶粒微细,以他形—半自形粒状镶嵌为主,常可分布不同含量的针状、柱状、短柱状石膏晶体(后期溶蚀后一般被方解石、石英、高岭石等充填而呈假晶形态),往往近顺层状分布(图3a)。

(含)膏结核(微晶)细粉晶白云岩 主体岩性为(微晶)细粉晶白云岩,以含石膏结核为特征,这种石膏结核形态大致呈不规则圆形、椭圆形等(图3b),其单体大小变化较大,最小可小于0.5 mm,大的可达5~7 mm,以1.5~3 mm居多。石膏结核一般近顺层分布,含量(分布密度)变化大,在石膏结核富集层中,其含量可达20%~30%,最高达40%;石膏结核分布稀少者,其含量在5%左右。从岩心详细观察可以看出,(含)石膏结核(微晶)细粉晶白云岩一般呈间隔性层状分布,其中,刚开始发育石膏结核时,石膏结核的含量低、单体小,往上则含量显著增多、单体变大。纵向上,研究区内的(含)膏结核(微晶)细粉晶白云岩在马五₁²小层、马五₁³小层和马五₂²小层相对最发育。

呈孤立状、层状分布于(微晶)粉细晶白云岩储层中,研究区储层中晶模孔绝大多数已被方解石、石英、高岭石等全充填,仅局部见未充填或半充填晶模孔(图4a)。石膏结核铸模孔(简称核模孔)是区内白云岩储层中分布的石膏集合体经选择性溶蚀而成,常呈不规则圆形、椭圆形等形态,直径一般0.5~5 mm不等,以1.5~3.0 mm居多,研究区储层中核模孔多数已被方解石、渗流白云石粉砂等全充填,但在局部地区部分小层中发育未充填的有效孔隙,有效孔隙分布于核模孔的中下部已充填的较自形细粉晶—粉晶白云石晶



(a) 细晶晶白云岩, 膏模孔中半充填白云石粉砂。双 43 井 2 522.15 m, 马五₁²小层。铸体, 正交偏光

(b) 微晶白云岩, 膏模孔中半充填白云石粉砂、高岭石。双 43 井 2 520.2 m, 马五₁²小层。铸体, 正交偏光

井位参见图 8

图 4 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层储集空间特征

间,以及核模孔上部未被充填的残余孔隙中(图4b)。

溶蚀孔洞 从岩心观察和测井解释来看,研究区马五₁亚段和马五₂亚段中,大型溶洞不发育,仅在局部发育有尺度较大的溶洞($n \times 10 \text{ cm} \sim 1 \text{ m}$ 左右),为表生期古岩溶作用所形成,溶洞中常常被岩溶角砾岩、白云石渗流粉砂及泥质等完全充填,基本无残留储集空间。常见的溶蚀孔洞一般 $2 \text{ mm} \sim 10 \text{ cm}$,但后期一般被多种矿物成分充填,仅局部可见半充填而残留有部分储集空间。

晶间孔 主要分布于粗粉晶白云石晶间,孔径一般约数十微米,研究区内总体较少见,马五₂亚段中发育较多晶间孔,为有效孔隙。

微裂缝 包括构造微裂缝、成岩微裂缝及溶缝,微裂缝宽度一般 $0.2 \sim 10 \text{ mm}$,呈网纹状或高角度斜交状分布,多被方解石和白云石充填。

2.3 储层物性特征

钻井岩心、薄片的观察及131块岩心样品的孔隙度、渗透率分析表明,盆地东部奥陶系马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段的储层物性总体较差,仅有部分相对较好:马五₁²小层孔隙度小于4%的约占76.5%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的约占77.2%;马五₁³小层孔隙度小于4%的约占75.5%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的约占74.3%;马五₂²小层孔隙度小于4%的约占77.2%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的约占80.2%。

3 储层膏模孔充填规律

3.1 膏模孔充填物类型及组合

如前所述,膏模孔是鄂尔多斯盆地东部马家沟

组马五₁亚段和马五₂亚段储层中最主要的储集空间,但岩心及岩石薄片观察表明,膏模孔充填普遍较为严重,充填物主要包括:渗流白云石粉砂、(含铁)方解石、(含铁)白云石、石英、萤石、黄铁矿、高岭石、硬石膏、残余泥质及有机质等12种,常见渗流白云石粉砂与不同的矿物形成8类组合(图5)。

(1) 渗流白云石粉砂 如图5a,在研究区内最为常见,以半充填为主,发育有效的储集空间,残留孔隙为未充填部分及渗流白云石粉砂中的粒间孔,马五₁²小层的充填程度65%~95%,平均83%,马五₁³小层的充填程度65%~95%,平均78.8%,马五₂²小层的充填程度85%~93%,平均89%。

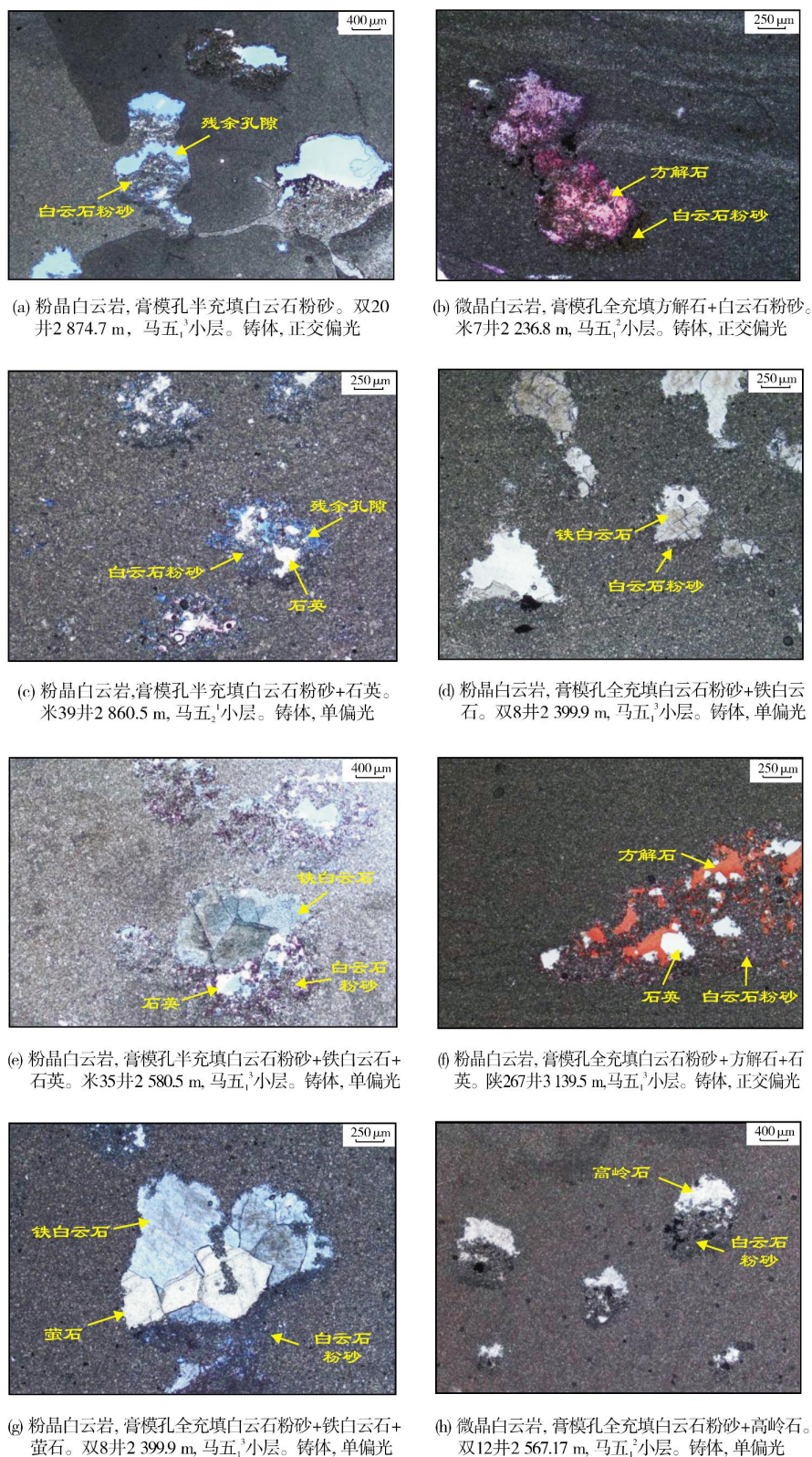
(2) 渗流白云石粉砂+方解石 如图5b,在研究区内常见,膏模孔被全充填,无有效储集空间。

(3) 渗流白云石粉砂+石英 如图5c,在研究区内较常见,膏模孔多被半充填,充填程度63%~95%,平均76.5%,残留一定量的有效储集空间,孔隙主要为膏模孔中渗流白云石粉砂的粒间孔。

(4) 渗流白云石粉砂+(含)铁白云石 如图5d,在研究区内较常见,膏模孔多数被半充填,充填程度80%~85%,平均82.5%,发育有效的储集空间,孔隙主要为渗流白云石粉砂中的粒间孔。

(5) 渗流白云石粉砂+(含)铁白云石+石英 如图5e,在研究区内较常见,膏模孔以半充填为主,充填程度83%~85%,平均84%,发育有效的储集空间,孔隙主要为渗流白云石粉砂中的粒间孔。

(6) 渗流白云石粉砂+石英+方解石 如图5f,在研究区内较常见,膏模孔基本被全充填,无有效的储集空间。



井位参见图8

图5 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层膏模孔充填矿物及其组合类型

(7) 渗流白云石粉砂+(含)铁白云石+萤石 如图5g,在研究区内偶尔见到,膏模孔基本被全充填,无有效的储集空间。

(8) 渗流白云石粉砂+高岭石 如图5h,在研究区内较少见,膏模孔基本被全充填,无有效的储集空间。

由上可知,在有方解石、萤石和高岭石等充填时,对研究区内储层有效储集空间的影响较大。

3.2 膏模孔充填期次及过程

如上所述,盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层发育的石膏结核铸模孔中,充填矿物类型及其组合多样,这些充填矿物形成时的成岩环境无疑存在着一定差异,而这种差异必然会在充填矿物的接触关系及地球化学特征方面有所反映。

通过大量钻井岩心和岩石薄片观察描述,依据膏模孔内充填矿物的类型及其接触关系,可以初步判断出膏模孔内充填矿物的充填次序。如图5g所示,双8井奥陶系马家沟组马五₁小层2399.9m的薄片显示,膏模孔中最先在下部充填渗流白云石粉砂,之后充填浅淡蓝色的铁白云石,最后充填白色萤石,表现出明显的示底构造。

利用碳氧同位素、电子探针、包裹体、阴极发光等微区多参数测试数据进行综合分析,也能较好地反映膏模孔经历的成岩环境和不同矿物的充填次序。对研究区马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段白云岩基质白云石,膏模孔中充填的方解石、(含)铁白云石及渗流白云石粉砂,裂缝充填方解石和溶洞充填方解石等17个样品的稳定碳氧同位素测定(图6)表明:细粉晶白云岩基质白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 -9.07‰ ~ -8.81‰ (PDB)(平均 -8.98‰);膏模孔中充填的方解石, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 -13.70‰ ~ -6.51‰ (平均 -10.50‰);膏模孔中充填的(含)铁白云石, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 -14.43‰ ~ -9.37‰ (平均 -11.90‰)。膏模孔中充填的白云石粉砂分两种情况,初始机械充填的白云石粉砂,其氧同位素组成与基质白云石相似($\delta^{18}\text{O}$ 值 -6.79‰ 左右);埋藏期沿白云石粉砂加大生长部分(一般均不同程度含铁),其氧同位素组成与膏模孔中充填的(含)铁白云石相似($\delta^{18}\text{O}$ 值 -12.5‰ 左右)。裂缝充填方解石的氧同位素组成相对偏负, $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -12.01‰ ~ -11.86‰ (平均 -11.94‰) (图6)。从碳氧同位素测试结果来看:白云岩基质白云石的氧同位素值与奥陶纪海水的氧同位素值相

近,反映其为与蒸发海水环境相关的准同生成因;白云岩膏模孔中充填的方解石的氧同位素值跨度大,从相对偏负到明显偏负,反映其既有与表生期大气淡水成岩环境相关的成因,也有与埋藏成岩环境相关(或受埋藏成岩环境改造)的成因;白云岩膏模孔中充填的(含)铁白云石的氧同位素值明显偏负,基本反映了形成于中深埋藏的成岩环境。

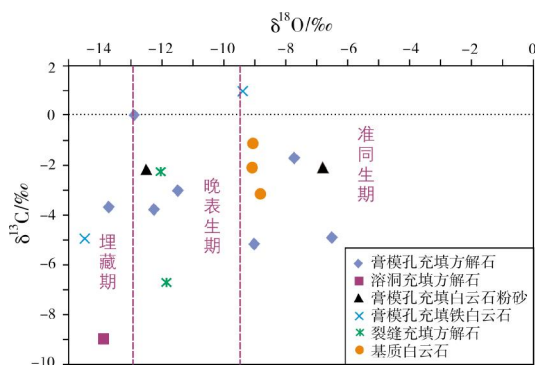


图6 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层孔隙充填物与基质白云石碳、氧同位素特征

此外,研究区内马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层膏模孔中充填的方解石FeO含量一般很低(多数小于0.1%,少量0.1%~0.2%),且MnO的含量也很低,一般小于0.05%,表明膏模孔中充填的方解石可能多为在表生风化期所形成,即使在此后的埋藏成岩环境下受热作用而发生矿物的重结晶,但其微量元素的含量可能变化也很小。

阴极发光观察显示,盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段储层膏模孔中充填的方解石一般发光很弱(可能反映其形成于大气淡水成岩环境),也见埋藏期溶蚀后再充填的方解石,发环带状明亮光(其中MnO含量高达2.3%);充填的铁白云石以不发光为主,反映其形成于中深埋藏成岩环境。

综上所述,并结合区域构造及沉积背景分析,研究认为盆地东部奥陶系马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层的膏模孔经历了4期充填。

第1期充填 发生在准同生期早表生成岩阶段,由于海平面间歇性下降,导致马五₁亚段和马五₂亚段含石膏结核白云岩坪地层露出海平面,其中石膏结核在大气淡水淋滤溶蚀作用下形成部分溶孔,部分被充填淡水方解石等,但该期次溶蚀和充填的规模有限。

第2期充填 发生在晚表生成岩阶段,由于加

里东末期的区域构造抬升作用,在长达1.3亿年的风化壳裸露期,研究区马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段经历了长期的大气淡水岩溶作用改造。表生岩溶所形成的各种孔、洞、缝,不同程度地充填了渗流白云石粉砂、方解石、泥质等。该阶段(含)膏结核白云岩储层中的膏模孔被大量充填,且相对早期(方解石在水-岩反应体系中处于不平衡或不饱和状态)的主要充填渗流白云石粉砂及少量泥质等,后期,当方解石在储层孔隙水-岩反应体系中达到平衡及过饱和状态时,淡水方解石发生沉淀并充填于石膏结核溶孔中。因此,在石膏结核溶孔中的充填物序列,显示出很好的示顶底构造:孔隙的中下部充填渗流白云石粉砂,中上部充填方解石。

第3期充填 发生在中浅埋藏成岩阶段,海西期末,随着盆地的再次沉降并持续接受沉积,在上覆晚石炭世—二叠纪地层的负荷作用下,研究区马五₁亚段和马五₂亚段风化壳储层快速、持续压实,由此产生的地层压释水与围岩发生水-岩反应,当方解石在膏模孔储层孔隙中的水-岩反应体系达到平衡及过饱和状态时,方解石便发生沉淀并充填于石膏结核铸模孔中的残余孔隙内,该阶段充填的方解石中,铁的含量极低,其结晶形态一般呈近晶粒状—连晶状。同时,由压释水带来的SiO₂、Al₂O₃、K等物质在局部以石英、高岭石(集合体)的形式充填于残余孔隙中。

第4期充填 发生在中深埋藏成岩阶段,随着埋藏深度加大,成岩环境温度不断升高,孔隙流体介质中Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺等离子浓度明显升高,储层孔隙的水-岩反应体系中,方解石类及(含)铁白云石类分别达到平衡及过饱和状态,它们缓慢持续地沉淀,充填于石膏结核铸模孔中的残余孔隙内。该阶段充填的方解石中,铁的含量低—中等,结晶形态一般呈连晶状;白云石的铁含量中等—较高,结晶形态一般呈连晶状,常具波状消光。

从岩心及薄片观察可以看出,上述4期充填均对盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层的储集空间发育起到了严重的破坏作用,但不同期次的充填对膏模孔储集空间的破坏程度不同。第1期和第2期充填发生于表生成岩环境,准同生期和晚表生期的大气淡水岩溶作用强烈,特别是在微古地貌的高部位和斜坡,在淋滤溶蚀作用下,膏模孔充填程度不高,仅部分被白云石粉砂充填,残余的储集空间发育,储集性能

好,而岩溶洼地则充填严重,但仍以白云石粉砂和淡水方解石充填为主。第3期和第4期发生于埋藏阶段,在水-岩反应及高温高压作用下,充填矿物类型多样,包括结晶(铁)方解石、结晶(铁)白云石、黄铁矿、石英、萤石等,对先期的残余孔隙具有严重破坏作用,特别是在小断层附近或古沟槽内,膏模孔的充填程度高,不利于形成优质储层。

3.3 膏模孔充填程度及平面分布

根据大量岩心及薄片观察统计,盆地东部奥陶系马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段膏模孔的整体充填程度偏高,充填率达88%~100%,其中马五₁²小层膏模孔的整体充填率为88%,马五₁³小层膏模孔的整体充填率为90%,马五₂²小层膏模孔的整体充填率为97%,而靖边气田区膏模孔的充填程度普遍在50%左右。总体来看,马五₁²小层和马五₁³小层的充填程度相对较低,但马五₁亚段和马五₂亚段各小层的膏模孔充填程度明显高于靖边气田的对应小层。

此外,从充填物组合类型对膏模孔充填程度的影响来看,对马五₁亚段和马五₂亚段主要小层中的膏模孔充填程度,起主导作用的是方解石类矿物的充填。统计结果显示,盆地东部风化壳岩溶储层膏模孔中,方解石+渗流白云石粉砂充填组合普遍发育(图7),其中方解石的占比达25.1%,而盆地中部靖边气田区方解石的占比仅9.8%。正是由于盆地东部风化壳岩溶储层膏模孔中方解石的占比高,从而导致了该区膏模孔整体充填程度高,这也是盆地东部马五₁亚段和马五₂亚段风化壳储层整体储集性能远逊于盆地中部靖边气田的原因。

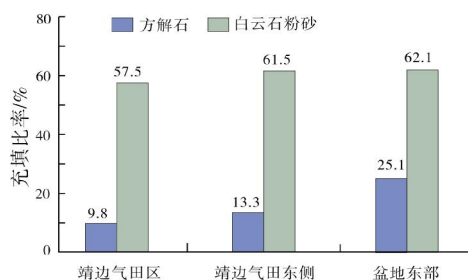


图7 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₁亚段和马五₂亚段膏模孔中方解石和白云石粉砂充填比例对比

平面上,马五₁亚段和马五₂亚段膏模孔的充填物组合类型及充填特征在不同地区存在差异。马五₁亚段在靖边气田东侧、神木以南及神木—佳县以西地

流白云石粉砂全充填组合为主,膏模孔的整体充填程度较高(图8),储层储集性能差,如榆88井,膏模孔以方解石充填为主,白云石粉砂充填为辅,且均为全充填,无残留储集空间。

图 8 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₁亚段膏模孔充填平面特征

储层储集性能好,如陕118井,岩心及薄片观察显示,膏模孔为白云石粉砂半充填(图9),仍有残留孔隙。其他区域的膏模孔基本为方解石+渗流白云石粉砂全充填(图9),且方解石充填占主体,膏模孔残留的储集空间微乎其微,造成储层储集性能差。

进一步研究分析表明,表生期古岩溶作用是鄂尔

多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层发育的主要原因,古岩溶地貌是控制膏模孔充填程度的最主要因素,不同的古岩溶地貌特征及其区域分布规律控制着风化壳岩溶储层发育的空间分布。根据一级古地貌划分,鄂尔多斯盆地东部,奥陶系风化壳顶面处于岩溶盆地部位,但从地震剖面及地层残余厚度图可以看出,盆地

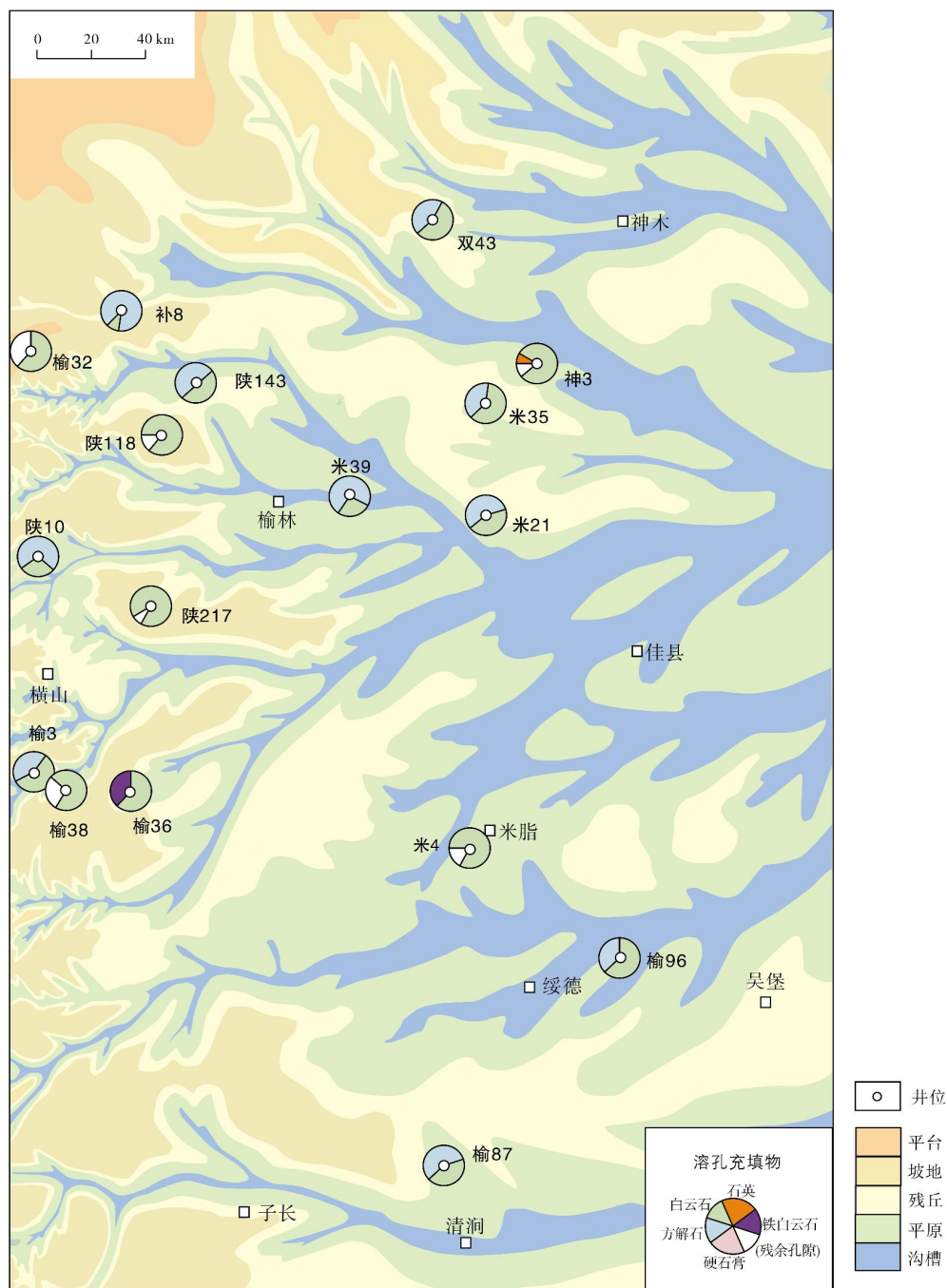


图9 鄂尔多斯盆地奥陶系马5₂亚段膏模孔充填平面特征

东部的奥陶系顶面二级岩溶古地貌样式和类型较为丰富,主要包括平台、残丘、坡地、洼地、平原、沟槽等。勘探实践及岩心观察表明,盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段膏模孔的充填程度主要受奥陶系风化壳顶面古岩溶地貌的控制。根据钻井分析,在盆地东部奥陶系风化壳二级古岩溶地貌中的平台、残丘、坡地和古沟槽两侧,膏模孔充填程度较弱,储层更发育,如陕360井、米39井、麒3井及神9井等处于古岩溶地貌中的平台、残丘、坡地或古沟槽两侧(图8),因更易接受表生期大气淡水长时间的淋滤溶蚀,且表生期

的大气淡水顺着古沟槽排出通畅(图10),并能带走被溶蚀的物质,使得膏模孔内的物质不易残留,从而充填程度减弱,使得储层的储集空间大,储集性能更好。而如米7井、米19井、榆49井等,均处于岩溶洼地及古沟槽内(图8),这些地区均是岩溶高部位风化淋滤物质的排泄区或堆积区,可对早期膏模孔中残留的储集空间再次充填,从而造成其充填程度更为严重,储集性能更差。因此,在含膏结核白云岩坪有利微相识别的基础上,精细的岩溶微古地貌刻画是预测盆地东部风化壳膏模孔储层的重要途径。

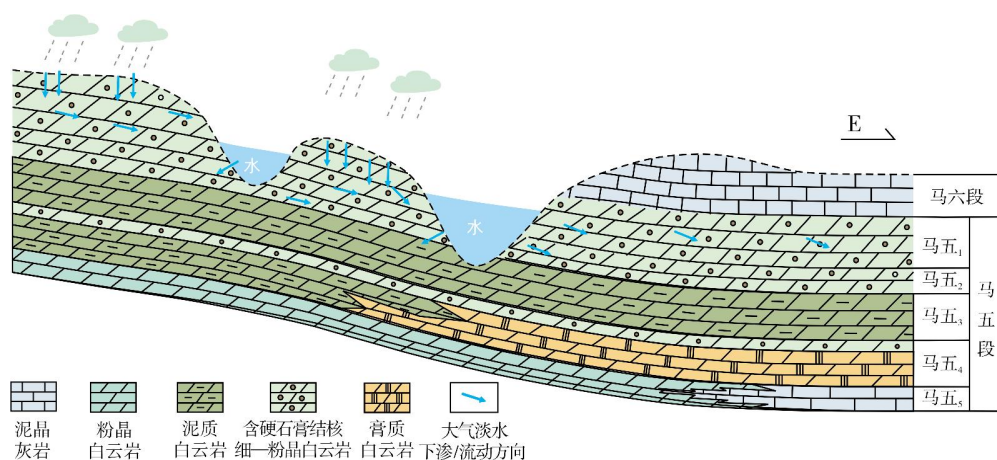


图 10 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳表生岩溶示意图

4 结 论

(1)早奥陶世,鄂尔多斯盆地东部马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段发育典型的含硬石膏结核白云岩坪沉积,至中晚奥陶世,受构造抬升遭受长达1.3亿年的风化溶蚀,形成风化壳膏模孔型岩溶储层。

(2)马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层膏模孔中的充填矿物,有渗流白云石粉砂、方解石、白云石、石英等12种,常见的充填矿物组合类型有8种。

(3)岩心薄片观察及微区多参数实验分析表明,马家沟组马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层膏模孔经历了早表生期、晚表生期、浅埋藏期和深埋藏期等4期充填。

(4)盆地东部马五₁亚段和马五₂亚段风化壳岩溶储层膏模孔的充填程度明显高于盆地中部靖边气田,且膏模孔的充填程度主要受风化壳岩溶古地貌的控制,在二级古岩溶地貌中的平台、残丘、坡地和

沟槽两侧,膏模孔充填弱,残留储集空间大,储层的储集性能更好。

参 考 文 献

- [1] 韩波,冯乔,赵振宇,等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳岩溶特征及储层分析[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(5): 24-30.
- [2] 黄道军,文彩霞,季海银,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.
- [3] 李振宏,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 604-609.
- [4] 王雪莲,王长陆,陈振林,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层研究[J]. 特种油气藏, 2005, 12(3): 32-36.
- [5] 刘梅,丁晓琪,万友利,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系风化壳储层特征及分布[J]. 海相油气地质, 2014, 19(1): 35-42.
- [6] 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.
- [7] 董岩,王少依,柏淑英,等. 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区奥陶系风化壳储层特征及主控因素研究[J]. 海相油气地质, 2017, 22(3): 37-46.

- [8] 王建民,王佳媛. 古岩溶地貌与古岩溶储层岩溶效应分析——以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(8): 1388-1398.
- [9] 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, 2011, 3(4): 25-34.
- [10] 侯方浩,方少仙,赵敬松,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. 海相油气地质, 2002, 7(1): 38-46.
- [11] 史基安,邵毅,张顺存,等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 316-324.
- [12] 周进高,张帆,郭庆新,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组障壁潟湖沉积相模式及有利储层分布规律[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 64-71.
- [13] 郭彦如,赵振宇,付金华,等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 95-109.
- [14] 包洪平,杨承运. 碳酸盐岩层序分析的微相方法——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. 海相油气地质, 2006, 5(1/2): 153-157.
- [15] 姚泾利,魏新善,张道锋,等. 硬石膏结核白云岩沉积微相——以鄂尔多斯盆地东部马五₃小层为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 690-695.
- [16] 郑聪斌,谢庆邦. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳储层特征[J]. 天然气工业, 1993, 13(5): 26-30.
- [17] 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五₁₋₅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.

编辑:董庸

Pore-filling characteristics of Ordovician karst reservoirs in eastern Ordos Basin

SHEN Yang, WU Xingning, WANG Shaoyi, WU Dongxu,
DING Zhenchun, YU Zhou

Abstract: The exploration shows that the natural gas resources in the Ordovician weathered crust at the eastern part of Ordos Basin is rich. An in-depth analysis for the pore-filling characteristics of the reservoirs is of great significance to the prediction of reservoir distribution and to the improvement of drilling success. Located in a stable carbonate platform in Majiagou period(Early Ordovician), there developed a wide range of carbonate rocks, among which anhydrite concretion-bearing dolomite flat developed in Majiagou Submember-5₁₋₂. Under the weathering and erosion (about 130 Ma) in the Late Ordovician, weathered crust karst reservoir developed mainly with anhydrite moldic pores. Based on cores, thin sections, and microstructure analysis by many experiments including carbon and oxygen isotopes, electron probe, and cathodoluminescence, there are 12 kinds of minerals such as calcite, dolomite, quartz, fluorite, pyrite, etc. filled in the pores, which usually formed 8 types of mineral assemblages. According to the diagenetic evolution of the Ordovician weathered crust karst reservoir, there are 4 filling stages including sea water, meteoric water, shallow burial, and deep burial. Mainly controlled by Ordovician paleokarst geomorphology, the anhydrite moldic pores are weakly filled at the platforms, mounds, slopes, and both sides of ancient trenches in the eastern part of the basin, with relatively high porosity.

Key words: Ordos Basin; Ordovician; Majiagou Formation; weathered crust; karst reservoir; anhydrite moldic pores; pore-filling characteristics

SHEN Yang: Senior Geological Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Road, Hangzhou, Zhejiang 310023, China