

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.013

鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧奥陶系马家沟组 马五₄亚段岩溶储层特征及分布

刘雨乔¹, 罗顺社², 刘忠保¹, 吕奇奇^{1,2}, 张 严¹, 赵 卿¹, 孙 宁¹

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100)

摘 要: 岩溶作用控制着鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五₄亚段岩溶储层发育特征。通过大量岩心观察, 结合薄片、扫描电镜等分析资料, 将鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五₄亚段分为含硬石膏结核铸模泥—泥微晶(藻)白云岩等12种岩石类型及膏模孔等4种储集空间类型; 并采用印模法对研究区前石炭系古地貌进行恢复, 将其划分为岩溶高地、岩溶斜坡以及岩溶盆地三个二级岩溶古地貌单元, 并认为岩溶基准面和硬石膏含量共同控制着岩溶作用强度, 其中岩溶斜坡的岩溶最强, 岩溶高地次之, 岩溶盆地最弱, 其储层展布主要受沉积相带、古地貌特征、岩溶等成岩作用的共同控制。

关键词: 岩溶作用; 古地貌; 储层分布; 靖边潜台

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)05—0076—06

Characteristics and Distribution of Karst Reservoirs of Ma₅⁴ Sub Member, Ordovician Majiagou Formation, Western Jingbian Bur-ied Platform in Ordos Basin

LIU Yuqiao¹, LUO Shunshe², LIU Zhongbao¹, LV Qiqi^{1,2},
ZHANG Yan¹, ZHAO Qing¹, SUN Ning¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2 Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas (Yangtze University), Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Karstification controls the karst reservoir development characteristics of Ordovician Ma₅⁴ sub member of the western Jingbian buried platform in Ordos Basin. In this paper based on core observation, combined with thin section and SEM analysis data, the western Jingbian buried platform of Ordovician Ma₅⁴ sub member in Ordos Basin is divided into anhydrite-nodules bearing mold micrite-microcrystalline (algae) dolomite and other 12 kinds of rock types and gypsum mould pore and other 4 kinds of reservoir space. The Precarboniferous paleogeomorphic of study area was restored by the method of impression, and then divided into 3 types of karst highland, karst inclining and karst basin karst paleogeomorphic unit. It is recognized that the karst base level and anhydrite content jointly control the karstification intensity, among them, karst inclining has the strongest karstification, followed by karst highland, and karst basin is the weakest, its reservoir distribution is mainly controlled by sedimentary facies belts, paleogeomorphic characteristics and karstification.

Keywords: karstification; paleogeomorphic; reservoir distribution; Jingbian buried platfor

研究区位于鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧, 东起横山, 西至延安, 北抵乌审召, 南达吴起, 整体位于中

央古隆起东侧的伊陕斜坡构造带上, 工区面积 $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区在中奥陶世马家沟组沉积了

收稿日期: 2017-04-30

修稿日期: 2017-05-25

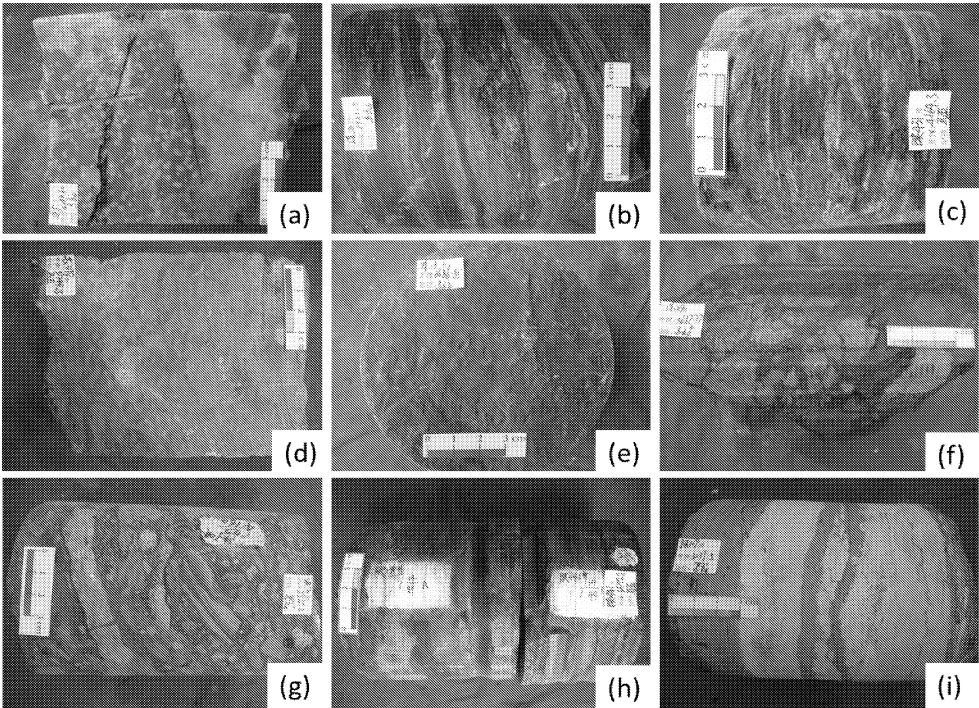
基金项目: 国家自然科学基金项目(41672099); 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放课题项目(TPR-2015-13); 长江青年基金项目(2016cqnl16)

作者简介: 刘雨乔(1994—), 女, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 研究方向为沉积学。E-mail: liuyuqiao941006@163.com

通讯作者: 罗顺社(1961—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事沉积学与储层地质学教学与研究工作。

E-mail: 429330504@qq.com

一套以碳酸盐岩、蒸发岩以及过渡岩性为主的地层^[1-3]。受全球构造事件的影响,在中奥陶统沉积之后,华北地台经历了 150 Ma 的沉积间断,缺失志留系、泥盆系和早石炭统的地层。由于马家沟组长期暴露于地表,广泛发育表生岩溶和白云岩化作用;之后,经后期埋藏岩溶和白云岩化作用改造,形成了一套复杂的碳酸盐岩储层。此次研究目的层段为马家沟组马五₄亚段,从下至上划分为马五₄³、马五₄²、马五₄¹三个小层,岩石类型以白云岩、灰岩、含膏云岩和膏质云岩为主,为克拉通台地陆表海碳酸盐岩局限蒸发潮坪沉积^[4-5]。



注:(a) I5井,4 099.62 m,马五₄¹,膏模孔,含硬石膏结核铸模孔泥粉晶白云岩,孔洞沿层面近平行成层分布;(b) I4井,3 931.9 m,马五₄¹,水平纹层;(c) SH431井,4 164.3 m,马五,泥质云岩;(d) S379井,3 749.25 m,马五,中-粗粉晶云岩;(e) S13井,3 686.85 m,马五₄²,含生物遗迹泥晶灰岩;(f) S29井,3 667.77 m,马五₄³,岩溶角砾;(g) SH70井,3 996.2 m,马五₄¹,岩溶角砾泥质泥粉晶去岩,角砾大小不一;(h) SH441井,3 577.2 m,马五,黑色泥岩;(i) SH109,3 239.5 m,马五₄¹,厚层石膏和泥质云岩互层,石膏夹浅灰色云岩,石膏呈铁丝鸡笼状。

图 1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五₄亚段岩心图

2 储集空间类型

通过岩心观察及铸体薄片、扫描电镜等分析资料表明,研究区马五₄亚段主要发育膏模孔、岩溶角砾间孔、石膏晶模孔以及晶间孔等储集空间(见图 2)^[6-7]。风化壳储层发育的裂缝有一部分被方解石充填,储集性能较差,但是仍能改善储层的渗透性。研究区马五₄亚段各类储集空间类型如下:

(1) 膏模孔。膏模孔是研究区马五₄亚段地层风化壳储层的主要储集空间,且马五₄¹小层最为发

1 储层岩石类型

根据大量岩心观察,结合薄片、扫描电镜等分析资料,研究区马五₄亚段岩石类型主要发育非蒸发岩(灰岩、白云岩),蒸发岩(硬石膏岩),泥质岩(泥岩)及其过渡岩性(见图 1);以及少量的凝灰岩和凝灰质泥岩,为马五₄亚段小层划分的 K₁(马五₄¹底)、K₃(马五₄¹底)标志层;并主要依据矿物组分、晶粒结构、颗粒结构等将研究区马五₄亚段分为 12 种主要岩石类型,其岩石类型及特征详见表 1。

育,形态为圆形或椭圆形,直径范围 1 mm~6 mm,主要发育于细—粉晶白云岩中(见图 2(a))。未一半充填主要发育在中上部膏模孔,全充填主要集中在下部,面孔率为 20%,分布较均匀,孔径多为 2 mm~4 mm。充填物以白云岩和石膏为主,次为方解石,岩溶作用较弱,溶蚀主要集中在膏模孔的中上部。

(2) 晶间孔及晶间溶孔。研究区马五₄亚段各小层均较发育晶间孔,局部同时发育晶间溶孔。该类储集体的储层岩石主要为粗粉晶、泥—粉晶结构的晶粒状白云岩(见图 2(b));白云石的晶粒大小为

40 μm ~ 120 μm , 晶粒结构较均一, 自形程度较高, 多为半自形—自形状, 整体构造多为块状或厚层状, 纹层不太发育。除晶间孔部分被方解石、白云石等充填破坏, 大多为有效孔, 孔径为 2 μm ~ 15 μm , 面孔率为 0.5% ~ 3.5%。

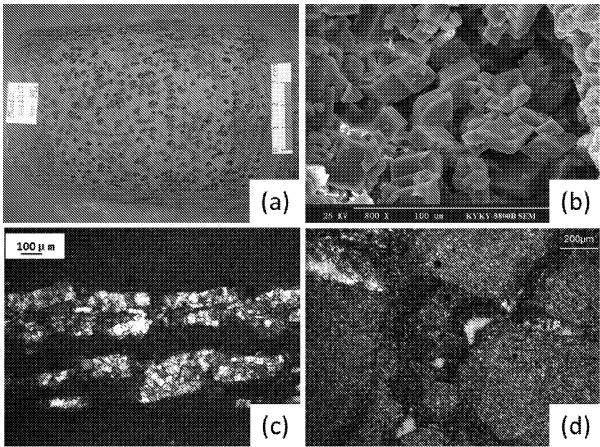
表 1 靖边潜台西侧马家沟组马五 4 亚段主要岩石类型及特征

岩石类型	层理构造	沉积微相
含硬石膏结核铸模泥—泥微晶(藻)白云岩	无明显沉积构造	含膏云坪
泥—泥微晶(藻)白云岩	韵律层理、爬升波痕层理、沙纹交错层理、包卷层理、微截切构造、冲刷面、生物潜穴、层面虫迹	云坪
泥—泥微晶泥质白云岩	韵律层理、沙纹交错层理、脉状层理、波状层理、透镜层理、爬升波痕层理、包卷层理、负载构造、塑性流动构造	泥云坪
细—中晶白云岩	无明显沉积构造	云坪
泥—粉晶(残余)颗粒白云岩或(残余)颗粒泥—粉晶白云岩	交错层理	潮下滩
泥—泥微晶石灰岩	水平层理、韵律层理、生物扰动、虫穴构造	灰坪
泥微—细晶含灰白云岩—云质石灰岩	沙纹交错层理、条带状或港湾岛屿状的去云方解石化残余构造	云坪
岩溶溶洞塌积角砾状白云岩	无明显沉积构造	取决于角砾原岩各自的沉积特征
岩溶溶洞冲积白云岩质砂砾岩	无明显沉积构造	视巨砾反映的沉积特征而定
云质泥岩	水平层理、韵律层理、透镜层理、波状层理、脉状层理、爬升波痕层理、塑性流动构造	云泥坪
凝灰岩—凝灰质泥岩	韵律层理、包卷层理、页理构造	灰质泥坪
膏质云岩—云质膏盐	沙纹交错层理、包卷层理、硬石膏团块呈鸡笼铁丝构造、鸡雏构造	膏云坪

(3) 晶体铸模孔(晶模孔)。晶体铸模孔主要是由石膏及石盐晶体被选择性溶蚀形成的, 呈柱状和针状(见图 2(c))。晶体偏大的柱状石膏溶解形成柱状膏模孔, 孔隙形态较规则, 孔隙大小为 0.3 mm ~ 0.6 mm, 局部主要为方解石充填, 同时充填少量白云石及自生石英。晶体偏小的针状石膏溶解形成针状膏模孔, 具明显单向延长特征, 孔隙长轴 0.3 mm ~ 0.5 mm, 短轴 0.02 mm ~ 0.05 mm, 局部主要为方解石充填, 次为自生石英。

(4) 粒间溶孔。粒间溶孔由粒间的碳酸盐胶结物溶蚀而成, 多在颗粒灰岩和具残余结构的砂屑白云岩中发育; 其边缘不规则, 呈港湾状溶蚀边缘; 多呈孤立状, 少数连通性好, 孔径一般在 0.01 mm ~ 0.40 mm。

(5) 角粒间孔。角粒间孔为岩石经溶蚀破碎, 垮塌滑落, 形成的不规则孔隙, 其角砾大小不等, 多被泥灰质或碳酸盐胶结物半充填或全充填(见图 2(d)), 主要发育于研究区马五₄¹, 由于后期风化剥蚀及淡水淋滤作用强烈, 角粒间孔规模相对较大, 形成有利的储集空间。



注: (a) SH106, 3 274.7 m, 马五₄¹, 硬石膏结核铸模孔; (b) SH115, 3 375.93 m, 马五₄¹, 晶间孔; (c) Z11 井, 3 254.5 m, 马五₄¹, (—), 泥晶云岩与柱状石膏晶体共生(已方解石化); (d) T15, 3 108.84 m, 马五₄¹, 岩溶角砾间孔。

图 2 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₄ 亚段储集空间类型

3 岩溶作用对储层的影响

3.1 岩溶古地貌特征

古岩溶地貌是岩溶作用与各类地质作用综合改

造的结果,不同地貌形态对岩溶发育起着控制作用^[8]。在地质资料对古地貌沟槽识别的基础上,以上覆地层二叠系太原组二段毛儿沟灰岩标志层,统计太原组该标志层顶至奥陶系顶部的厚度为补偿厚度,采用印模法对研究区前石炭系古地貌进行恢复^[9],将其划分为:岩溶高地、岩溶斜坡以及岩溶盆地。

(1) 岩溶高地。岩溶高地位于研究区吴仓堡—旦八镇—永宁以及桃利庙—哈汉兔庙—城川的剥蚀线边缘一带。其补偿厚度在 40 m 线向西和向南,补偿厚度逐渐减小,说明马家沟组地层为相对较高的高地。从古地貌图看出,地层出露的宽度由东向西逐渐变窄,反映出岩溶高地区块由东向西地层倾角逐渐变大的趋势。

(2) 岩溶斜坡。岩溶斜坡位于岩溶高地与岩溶盆地之间,大致沿剥蚀线以东处于乌拉特老亥庙—巴音来登—沙尔利—靖边—大路沟—西河口一带,呈带状分布。补偿厚度 40 m~60 m,岩溶作用充分,地形平坦,水力梯度较小,岩溶作用方式以慢速扩散流溶蚀为主,可形成良好的溶蚀孔洞。顶部发育有岩溶溶洞建造岩,规模不等,大致在 3 m~4 m,主要为塌积岩和填积岩。

(3) 岩溶盆地。岩溶盆地位于研究区东部的小纪汉—殿市—子长—延安一带,其补偿厚度大于 80 m。进一步可划分出洼地、沟槽两个三级地貌单元。

3.2 岩溶发育特征

研究区马五₄亚段在各岩溶古地貌单元之上发育的岩溶储层差异性明显^[10-11]。受白云石化等成岩作用的影响下,在岩溶高地和岩溶斜坡区马五₄亚段地层主要发育含硬石膏结核铸模泥—泥微晶(藻)白云岩、细—中晶白云岩、角砾状白云岩等岩石类型,储集空间类型以膏模孔、晶间孔、晶间溶孔、角粒间孔以及裂缝为主,孔隙多呈未充填—半充填;其特点主要为硬石膏不发育,但岩溶角砾极为发育,部分角砾位移较小,多数位移明显,呈次棱角—次圆状,说明该区的马五₄亚段地层属于潜流带,部分处于渗流带。岩溶盆地区马五₄亚段地层以膏质云岩、云质膏盐、泥—泥微晶白云岩为主,储集空间类型以晶体铸模孔、晶间孔为主,膏模孔少量发育,其特点主要为硬石膏较为发育,但岩溶角砾发育较少,说明说明该区的马五₄亚段地层处于缓流带,基本不受奥陶系古地貌影响,岩溶作用较弱,充填作用较强。

研究区马五₄亚段的膏模孔的充填特征表明,

岩溶高地中,大部分膏模孔中未充填部分比例较小,个别比例较大,充填物以白云石为主,其次为方解石;岩溶斜坡中,膏模孔中未充填部分比例较大,充填物以白云石为主,其次为方解石,再次为黄铁矿和石英;岩溶盆地中,膏模孔中未充填部分极少,充填物以方解石、硬石膏和白云石为主。在剥蚀线附近,膏模孔中未充填部分比例较小,充填物除了白云石和方解石外,常见石英和黄铁矿。进而可以总结出,岩溶斜坡的岩溶最强,岩溶高地次之,岩溶盆地最弱。这与岩溶基准面决定的岩溶高地的岩溶强度比岩溶斜坡强有所不同,原因在于硬石膏的含量是影响岩溶强度的另一个重要因素:硬石膏自身可溶性极强,且 SO_4^{2-} 在低温条件下能加速白云石的溶解^[12-13]。

3.3 岩溶基准面对岩溶的影响

通过对岩溶发育特征研究,结合靖边潜台西侧奥陶系古地貌特征表明:位于岩溶盆地马五₄¹小层的膏模孔和裂缝中见硬石膏,但岩溶角砾发育较少,且研究区岩溶盆地的范围与马五₄¹小层块状硬石膏的分布范围大部分重合,说明位于岩溶盆地中的马五₄¹小层及其以下地层处于缓流带,基本不受奥陶系古地貌影响,岩溶作用较弱,充填作用较强;位于岩溶斜坡和岩溶高地马五₄¹、马五₄²和马五₄³小层的膏模孔与裂缝中均未见硬石膏,但岩溶角砾极为发育,部分角砾位移较小,多数位移明显,呈次棱角—次圆状,说明处于岩溶斜坡和岩溶高地的马五₄亚段属于潜流带,部分处于渗流带。

本文根据残留的硬石膏确定研究区马五₄亚段的岩溶基准面(见图3),从其模式图3看出位于岩溶斜坡和岩溶高地的马五₄亚段地层明显受岩溶作用影响,位于岩溶盆地的马五₄亚段地层基本上不受岩溶作用影响,岩溶基准面决定了研究区西部地区马五₄亚段以风化壳岩溶储层为主,岩溶作用对储集性能有重要影响。

综上所述,岩溶基准面和硬石膏含量共同决定了马五₄亚段岩溶斜坡的岩溶最强,岩溶高地次之,岩溶盆地最弱。

4 储层物性特征与展布

储层发育与否主要受沉积环境和岩溶等成岩作用的控制^[14-16]。通过大量岩心样品物性数据统计,研究区马五₄亚段储集岩孔隙度多为 1%~10%,平均孔隙度为 4.3%,渗透率多为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 13.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率平均值为 $0.23 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的低孔低渗储层。依据大量岩心样品物性分析资料以及测井物性分析资料,结合沉积相的展布特点,绘制了研究区马五₄¹小层孔隙度、渗透率等值线平面图(见图 4、图 5)。再结合沉积相展布、古地貌特征、储层物性展布特征综合评

价,对马五₄¹小层储层的平面展布进行了刻画表明(见图 6):马五₄¹小层储层主要分布在有利沉积微相含膏云坪、膏云坪中,储层连片分布,岩溶斜坡处物性最好,岩溶高地次之,岩溶盆地较差,储层厚度一般大于 4 m,最大可达 10 m。

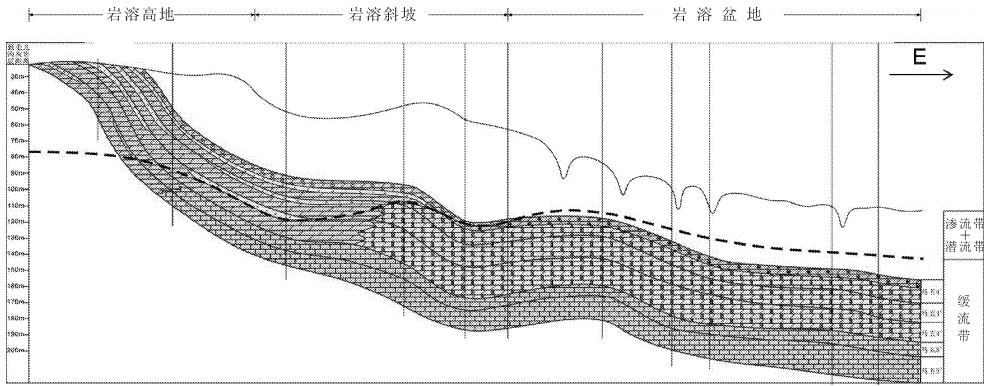


图 3 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₄亚段岩溶基准面模式图

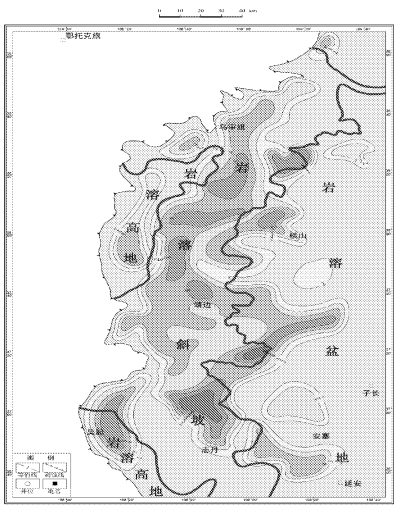


图 4 靖边潜台西侧奥陶系马五₄¹小层孔隙度等值线图

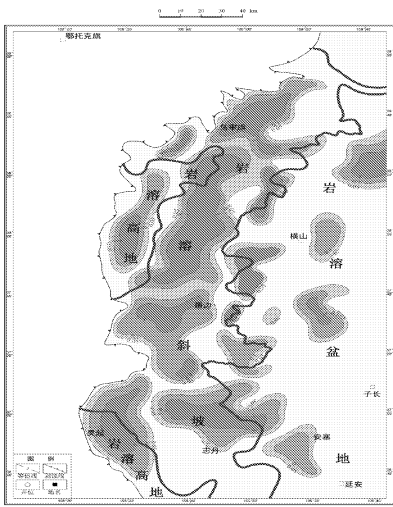


图 5 靖边潜台西侧奥陶系马五₄¹小层渗透率等值线图

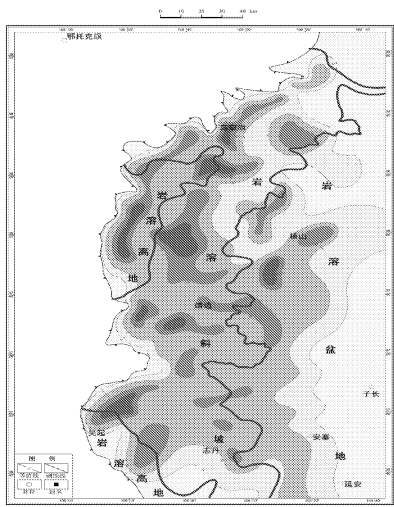


图 6 靖边潜台西侧奥陶系马五₄¹小层储层厚度等值线图

5 结 论

(1) 根据大量岩心观察,结合薄片、扫描电镜等分析资料,研究区马五 4 亚段主要发育的岩石类型为:含硬石膏结核铸模泥—泥微晶(藻)白云岩、泥—泥微晶(藻)白云岩、泥—泥微晶泥质白云岩、细—中晶白云岩、泥—粉晶(残余)颗粒白云岩或(残余)颗粒泥—粉晶白云岩、泥—泥微晶石灰岩、泥微—细晶含灰白云岩—云质石灰岩、岩溶溶洞塌积角砾状白云岩、岩溶溶洞冲积白云岩质砂砾岩、云质泥岩、凝灰岩—凝灰质泥岩、膏质云岩—云质膏盐。

(2) 通过岩心观察及铸体薄片、扫描电镜等分析资料表明,研究区马五 4 亚段地层风化壳储层发

育膏模孔、岩溶角砾间孔、石膏晶模孔、晶间孔等主要储集空间类型。

(3) 根据研究区地层展布特征结合古构造背景,应用印模法恢复了研究区前石炭系岩溶古地貌,将该区的岩溶古地貌划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶盆地,并对各单元中的流体运动特征进行了细致的分析,认为岩溶高地和岩溶斜坡是主要的储层发育区域。且岩溶基准面和硬石膏含量共同决定了马五₄亚段岩溶斜坡的岩溶最强,岩溶高地次之,岩溶盆地最弱。

(4) 通过储层物性和厚度图,结合沉积相的展布特点以及储层物性综合评价,认为马五₄¹小层储

层主要分布在有利沉积微相含膏云坪、膏云坪中,储层连片分布,岩溶斜坡处物性最好,岩溶高地次之,岩溶盆地较差。

参考文献:

[1] 苏中堂,陈洪德,赵俊兴,等.鄂尔多斯盆地靖边北部奥陶系马五₄₋₁段成岩作用特征[J].成都理工大学(自然科学版),2008,35(2):194-200.

[2] 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):38-47.

[3] 杨华,黄道军,郑聪斌,等.鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌气藏特征及勘探进展[J].石油地质,2006,11(3):1-13.

[4] 乔琳,沈昭国,方少仙,等.鄂尔多斯盆地靖边潜台及其周边地区中奥陶统马家沟组马五₁₋₄亚段储层非均质性主要控制因素[J].海相油气地质,2007,12(1):12-20.

[5] 姚泾利,王保全,王一,等.鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J].沉积学报,2009,27(3):281-289.

[6] 罗军梅.靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五₄、马五₅储层特征研究[D]:武汉:长江大学,2012.

[7] 杨西燕,包洪平,任军峰,等.鄂尔多斯盆地马五₅白云岩储层特征及主控因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(2):27-34.

[8] 罗香建,田景春,张锦泉.高桥地区奥陶系马家沟组马

五₁₋₂亚段岩溶作用与孔隙演化[J].地质科技情报,2014,33(4):60-65.

[9] 胡光明,李国栋,魏新善,等.靖边潜台西侧奥陶系马五₄亚段岩相古地理特征[J].沉积学报,2017,35(3):527-539.

[10] 王振宇,李凌,谭秀成,等.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型识别[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(5):11-16.

[11] 罗顺社,金姗姗,郝放,等.靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五₄段沉积微相研究[J].海洋地质前沿,2011,27(11):25-31.

[12] 夏明军,戴金星,邹才能,等.鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J].石油勘探与开发,2007,34(3):291-292.

[13] 夏日元,唐建生,邹胜章,等.碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J].地球学报,2006,27(5):503-509.

[14] 王宝清,章贵松.鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系古岩溶储层成岩作用[J].石油实验地质,2006,28(6):518-522.

[15] 郑聪斌,冀小林,贾疏源.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):280-288.

[16] 张银德,周文,邓昆,等.鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J].岩石学报,2014,30(3):757-767.



(上接第 50 页)

[7] 李松辉,赵国藩,王松根.CFRP加固钢筋混凝土整体式板桥的受力性能研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):207-211.

[8] 刘耀刚,张开金.加固装配式空心板铰缝的方法综述[J].城市建设理论研究(电子版),2013(7).龙源期刊网 <http://www.qikan.com.cn>

[9] 张鹏,李耀军,王常松,等.装配式连续梁桥的设计与施工[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3):70-73.

[10] 李增锋,庄一舟,程俊峰,等.横向预应力对装配整体式空心板桥纵向抗裂性能的影响[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):127-133.

[11] 张云娜.施加横向体外预应力加固装配式空心板桥的研究[D].郑州:郑州大学,2007.

[12] Attanayake U B. Macromechanical modeling of precast orthotropic bridge superstructure systems[C]// Transportation Research Board 86th Annual Meeting. 2007.

[13] 张云娜,陈淮.装配式斜交空心板桥体外横向预应力加固研究[J].铁道建筑,2011(7):4-6.

[14] 中华人民共和国交通部.公路桥涵通用图[M].北京:人民交通出版社,2008.

[15] 尹江南.装配式钢筋混凝土空心板桥支座与铰缝损伤的数值仿真分析[D].天津:天津大学,2009.

[16] 杜红静.装配式空心板桥横向加固结构分析方法研究[D].西安:长安大学,2012.

[17] Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of Elasticity[M]. New York: McGraw - Hill, 1970.

[18] 唐先习,尹月西,国伟,等.铰接板桥铰缝疲劳性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):6-10.

[19] 赵素锋.装配式空心板梁桥铰缝病害机理分析与防治措施[J].中国港湾建设,2010(4):15-17.

[20] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.