

The Karstification and Porosity Evolution of Ma₅⁴ Sub Member, Ordovician Majiagou Formation, Western Jingbian Tableland in the Ordos Basin

Qiqi Lv^{1,2}, Shunshe Luo¹, Jinhua Fu³, Xinshan Wei⁴, Qing Zhao², Guangming Hu²

¹Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas (Yangtze University), Wuhan Hubei

²School of Geosciences of Yangtze University, Wuhan Hubei

³PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

⁴Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi
Email: 569274193@qq.com

Received: May 25th, 2016; accepted: Jul. 23rd, 2016; published: Sep. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The karstification was of great significance for the formation and distribution of the reservoir in the Ma₅⁴ of Ordovician Majiagou Formation in the western Jingbian tableland in the Ordos basin. Based on the analysis of observation of drilling cores, casting slices and scanning electron microscope, the karstification and regulation of porosity evolution in Ma₅⁴ were studied in depth. The results show that the areas of carbonate karst of Ma₅⁴ sub member are divided into three categories, such as syngenetic, supergene and buried stage karstifications, and different karstifications play an important role on the formation and evolution of the reservoir porosity. According to the characteristics of porosity formation and porosity evolution, the Ma₅⁴ is divided into four stages, such as penecontemporaneous stage—pores construction period, shallow burial stage—pores cementation destruction period, uplift weathering stage—pores corrosion construction period and mid-deep-burial stage—pores-filling and destruction period; porosity evolution models are established.

Keywords

Karstification, Porosity Evolution, Diagenetic Stage, Jingbian Tableland

鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧奥陶系马五4亚段岩溶作用与孔隙演化

吕奇奇^{1,2}, 罗顺社¹, 付金华³, 魏新善⁴, 赵卿², 胡光明²

¹非常规油气湖北省协同创新中心(长江大学), 湖北 武汉

²长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

³中国石油长庆油田分公司, 陕西 西安

⁴中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安

作者简介: 吕奇奇(1986-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事沉积学及石油地质学研究工作; 通信作者: 罗顺社。

Email: 569274193@qq.com

收稿日期: 2016年5月25日; 录用日期: 2016年7月23日; 发布日期: 2016年9月15日

摘要

岩溶作用对鄂尔多斯盆地靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五4亚段储层的形成及分布具有重要意义。在大量钻井岩心及铸体薄片观察、扫描电镜鉴定等分析方法的基础上, 对研究区马五4亚段岩溶作用与孔隙演化规律进行了深入研究。研究表明: 研究区马五4亚段碳酸盐岩储层经历了同生期岩溶、表生期岩溶和埋藏期岩溶3期岩溶作用; 且不同岩溶作用对该储层的孔隙形成和演化起关键性作用, 根据研究区马五4亚段孔隙形成和演化特征, 将其划分为准同生阶段——孔隙建设期、近地表浅埋藏阶段——孔隙胶结破坏期、风化壳大气淡水阶段——孔隙溶解建设期、中-深埋藏成岩阶段——孔隙充填破坏期4个演化阶段, 并建立了孔隙演化模式。

关键词

岩溶作用, 孔隙演化, 成岩阶段, 靖边潜台

1. 引言

鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组发育一套与岩溶作用相关的碳酸盐岩沉积储层, 该储层分布较广、且受不同期次岩溶作用的改造, 影响着孔隙的演化。系统深入研究其岩溶作用类型与孔隙演化特征对研究该储层的分布规律、形成机理及油气勘探具有重要的理论意义和实际价值。笔者在前人研究的基础上, 根据研究区大量钻井岩心观察、铸体薄片观察、扫描电镜鉴定等分析, 对靖边潜台西侧奥陶系马五4亚段储层岩溶作用类型与孔隙演化进行综合研究。

2. 地质背景

研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的中北部, 北到鄂托克旗, 西至砖井, 南至延安, 东至子长, 总面积约 $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在奥陶系古地貌上大致处于伊盟古隆起和盐池-庆阳-黄陵“L”型的古隆起(又称中央古隆起)之间, 包括米脂-延川古凹陷的一部分(图1) [1]。

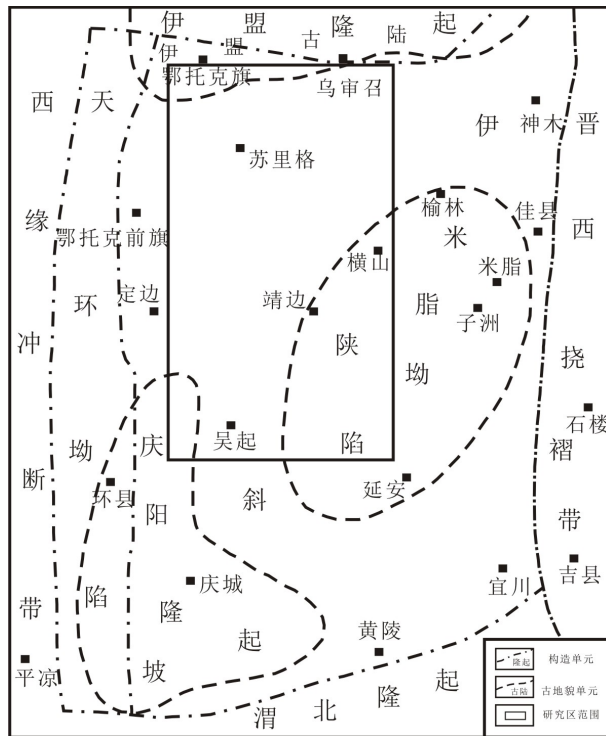


Figure 1. The tectonic location and ancient landform background of the study area
图 1. 研究区构造位置及古地貌背景

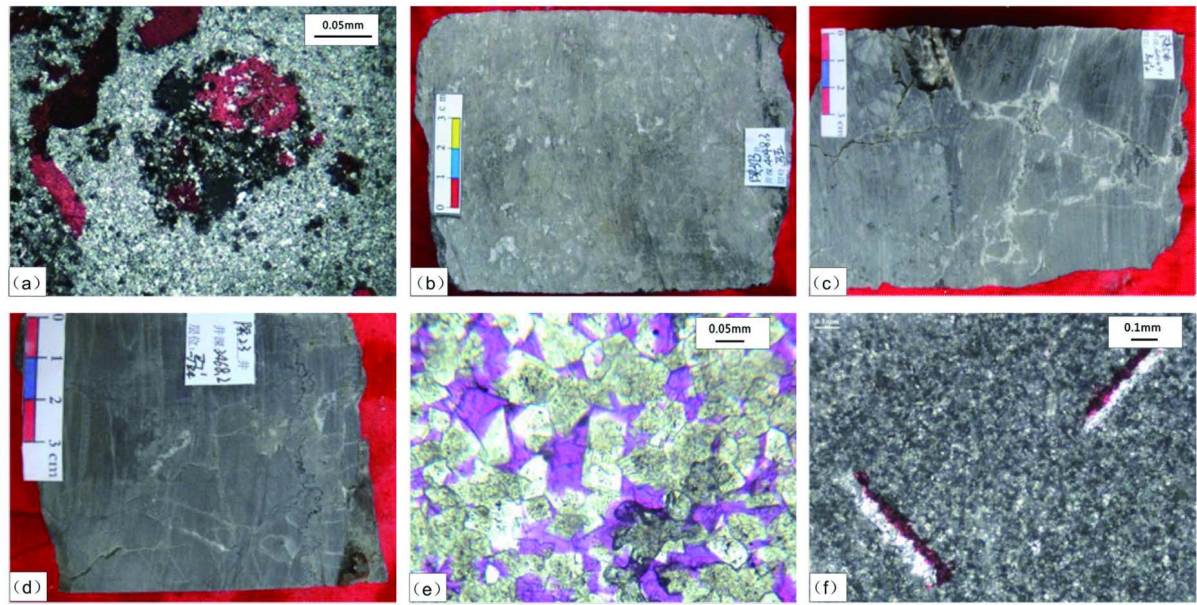
中奥陶世, 靖边潜台沉积了一套以碳酸盐岩和蒸发岩沉积为主的地层, 即马家沟组。奥陶纪末, 由于洋壳向华北板块的南部和北部俯冲, 导致区域性隆起, 结束了海相沉积历史。之后, 经历了大约 130 Ma 的沉积间断, 上覆志留系、泥盆系和早石炭统地层缺失[2] [3]。早奥陶世后, 由于马家沟组碳酸盐岩长期暴露于地表, 广泛发育表生期岩溶和白云岩化作用; 之后, 经埋藏岩溶和白云岩化作用改造, 形成了一套复杂的碳酸盐岩岩溶储层[4]。研究目的层段马五 4 亚段可分为 3 个小层, 即: 马五₄³、马五₄²和马五₄¹; 在该沉积期海平面较低, 在蒸发气候的影响下, 海水盐度普遍增大, 水体极度闭塞, 岩石类型以发育含膏云岩、膏质云岩和膏云岩为主, 为热带海洋环境下的克拉通台地陆表海碳酸盐岩局限蒸发潮坪沉积[5] [6]。

3. 岩溶作用类型及特征

根据野外地质剖面及岩心观察, 结合薄片、扫描电镜、X-衍射和阴极发光等分析资料, 靖边潜台西侧马五 4 亚段主要包括压实、胶结、白云岩化、岩溶以及重结晶等成岩作用, 其中岩溶、白云岩化以及胶结作用对该区马五 4 亚段岩溶储层孔隙演化起到关键性作用。在前人研究成果的基础上[7]-[10], 根据岩溶作用的形成机理、发育特征、控制因素、发生的先后顺序及持续时间等, 将研究区马五 4 亚段岩溶作用划分为: 同生期岩溶作用、表生期岩溶作用以及埋藏期岩溶作用。

3.1. 同生期岩溶作用

同生期岩溶作用的发生时间是表生阶段, 溶解作用、胶结作用和白云石化作用中的很大一部分可能是在该环境下发生并甚至是完成的[11]。其主要的岩溶产物及特征有: ①岩溶段上、下界面清晰, 溶孔、溶洞具淡水白云石示底充填特征(图 2(a)); ②晶间溶孔部分发育, 不规则溶孔、溶洞局部可见(图 2(b));



(a)膏模孔，溶蚀孔洞具淡水白云石示底充填，陕319井，马五¹₄，3723.6 m(+); (b)不规则溶孔，方解石充填，陕373井，马五³₄，4048.3m; (c)高角度溶缝，其间由灰质渗流粉砂充填，陕324井，马五²₄，4014.91m; (d)高角度溶缝，泥质充填，陕23井，马五¹₄，3468.2m; (e)同生期间形成的淡水白云石，苏203井，马五¹₄，3584.6m(+); (f)石膏假晶，被淡水方解石所交代，苏21井，马五³₄，3581.25m(-)

Figure 2. The characteristics of contemporaneous in the syngenetic period

图 2. 同生期岩溶作用特征

③溶缝和溶沟多呈高角度分布，其边缘多被溶蚀、圆化，常被渗流粉砂、细粒碎屑物质、泥质以及其上覆沉积物完全充填，溶缝宽度一般在 0.1~0.6 cm，长度在 5~15 cm (图 2(c)、图 2(d)); ④石膏溶蚀后形成的孔洞被等轴、粒状淡水白云石不完全充填，形成了溶洞、溶斑，示底充填特征明显(图 2(e)); ⑤石膏集合体被等轴、粒状的淡水方解石交代形成石膏假晶(图 2(f))。

3.2. 表生期岩溶作用

受加里东、海西运动的抬升作用，在奥陶系马家沟期沉积结束后，研究区马五4亚段碳酸盐岩进入了长期的风化剥蚀及大气淡水淋滤作用，时间周期约 130 Ma，即称为表生岩溶阶段[12] [13]。在该阶段，研究区马五4亚段形成了大量的溶孔、溶洞、溶缝。

该期岩溶作用主要的岩溶产物及其特征有：①垂直方向岩溶特征明显，由地表向地下岩溶作用不断推进，为一个完整的岩溶旋回(图 3)，该岩溶作用深度可至不整合面 150 m 以下；②发育一套以石膏溶蚀、角砾岩充填洞穴为特征的岩溶产物(图 4(a)、图 4(b)); ③受岩溶古地貌控制，出现硬石膏不完全溶蚀面，以及硬石膏充填溶蚀孔洞下部、上部由方解石充填的特征，它指示了风化壳岩溶发育的底界(图 4(c)); ④奥陶系上覆地层石炭系的底部发育一套层状或透镜状风化残积层(图 4(d)); ⑤溶沟、溶缝较为发育，产状与地层高角度斜交或垂直，向下其产状有变缓趋势，常呈管状、漏斗状及不规则状，主要分布在风化壳界面以下，局部可延伸至 50 m 以下；⑥岩溶角砾岩普遍发育，是该期岩溶的主要鉴别标志之一(图 4(e)); ⑦次生方解石发育，伴随发生去白云石化形成的方解石往往保存了白云石的结构，如自形程度较高，雾心亮边结构等(图 4(f))。

3.3. 埋藏期岩溶作用

中-深埋藏阶段，沉积物在富含有机质的侵蚀性流体或具有高矿化度卤水(地层水)条件下发生溶蚀，

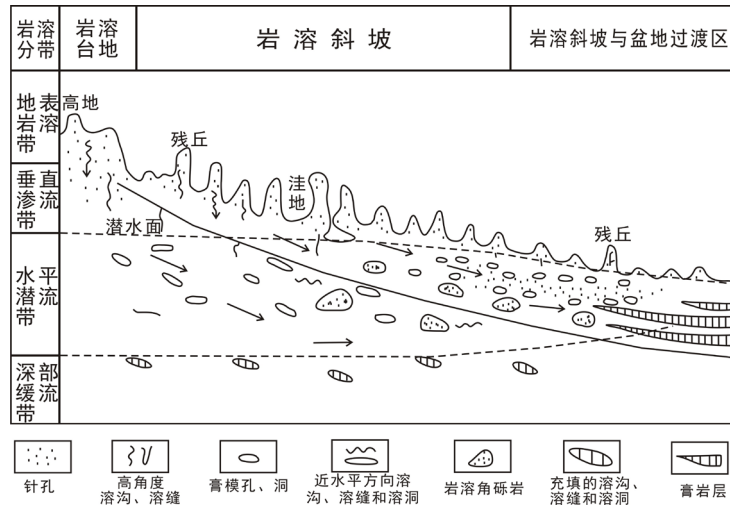


Figure 3. The ancient karst developmental mode of the Ordovician in the study area
图 3. 研究区奥陶系古岩溶发育模式



(a)岩溶洞穴充填, 召6井, 马五¹₅, 3142.1m; (b)石膏溶蚀后充填裂缝, 陕23井, 马五¹₄, 3475.6m; (c)溶孔上部由方解石充填, 下部由石膏充填, 陕373井, 马五¹₄, 4048.3m; (d)马家沟组顶古风化壳, 白水三眼桥剖面; (e)溶缝、岩溶角砾, 苏29井, 马五³₄, 3667.77m; (f)次生方解石, 陕361井, 马五¹₍₋₎, 3905.85m

Figure 4. The characteristics of contemporaneous in the hypergene period
图 4. 表生期岩溶作用特征

最终在深部地层形成一定数量的溶孔、溶洞以及溶缝, 该期岩溶作用时间与油气的形成相当或稍晚[14][15]。

该期岩溶作用主要的岩溶产物及其特征有: ①黄铁矿较为发育, 其成因为压释水在风化壳内有大量细菌寄生, 细菌吸收地层水中的有机质和 SO_4^{2-} , 产生 H_2S 和 CO_2 , 使地层水溶蚀性更强, 同时 H_2S 与古风化壳顶部的 Fe^{2+} 形成黄铁矿(图 5(a)、图 5(b)); ②岩溶角砾间见中-巨晶方解石充填物(图 5(c)、图 5(d)); ③晶粒白云岩中发育大量晶间溶孔及少量晶内溶孔, 局部可见晶间溶扩孔(图 5(e)), 溶孔大多未充填; ④沿缝合线及其附近见穿过缝合线的溶孔、溶洞(图 5(f))。

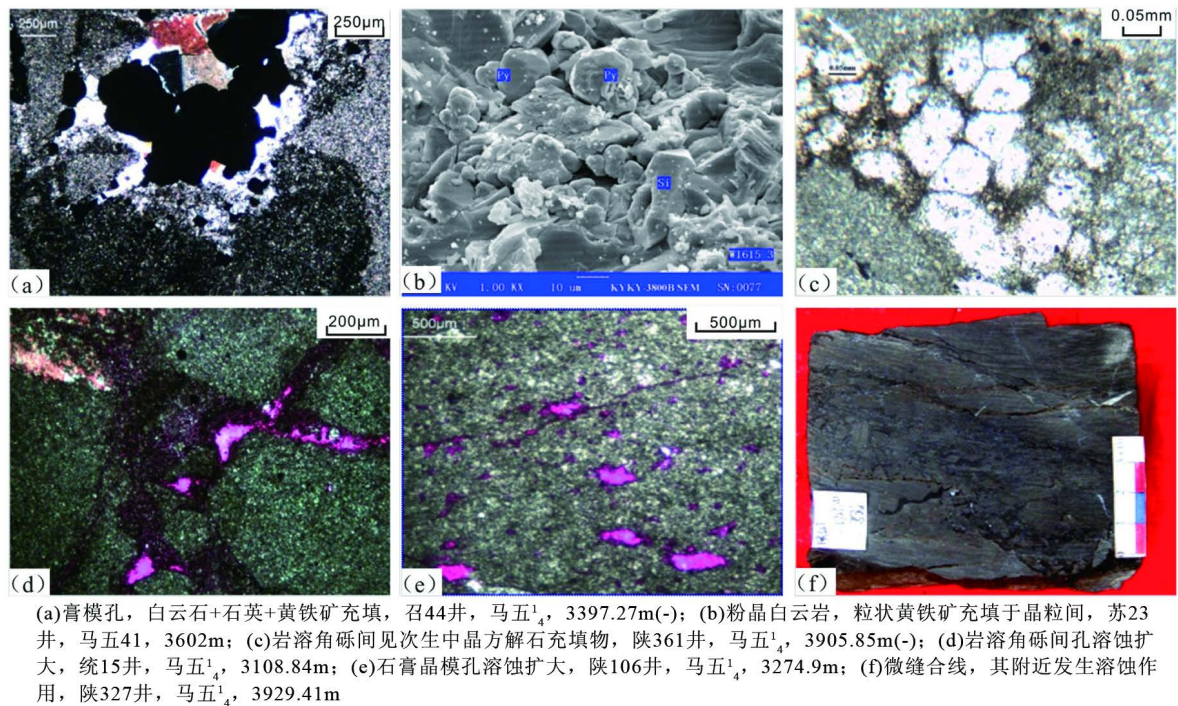


Figure 5. The characteristics of karstification during in the burial period

图 5. 埋藏期岩溶作用特征

4. 孔隙演化特征

成岩作用对该储层的孔隙形成和演化起关键性作用[16]。靖边潜台西侧马五4亚段碳酸盐岩在地质历史时期先后经历了准同生、近地表浅埋藏、风化壳大气淡水以及中-深埋藏成岩作用阶段(图6), 因此根据研究区马五4亚段孔隙形成和演化特征, 将其划分为4个阶段: ①准同生成岩阶段——孔隙建设期、②近地表浅埋藏成岩阶段——孔隙胶结破坏期、③风化壳大气淡水成岩阶段——孔隙溶解建设期以及④中-深埋藏成岩阶段——孔隙充填破坏期。

4.1. 准同生阶段——孔隙建设期

在干燥气候的潮坪环境下, 由于准同生白云石化和回流渗透白云石化作用, 研究区马五4亚段形成了大量的、分布广泛的泥粉晶白云岩, 其中以晶间孔为主, 其次发育少量的晶间微孔, 在后期由于胶结等成岩作用影响, 导致孔隙逐渐减少。

研究区马五4亚段中膏模孔是研究区马五4亚段的主要储集空间。根据膏模孔溶蚀与充填主要特征, 建立了准同生成岩阶段膏模孔演化模式(图7(a))。由于地壳短时间抬升, 成岩环境变为淡水与海水过渡流体环境, 导致硬石膏结核溶蚀, 形成膏模孔, 其下部被淡水、泥粉晶白云石(渗流粉砂)部分充填, 形成示顶底构造, 形成了大面积分布的层状储层的锥形。

4.2. 近地表浅埋藏阶段——孔隙胶结破坏期

由于胶结和压实等成岩作用, 晶间孔在该阶段不断减少。由于该期处于不受准同生期的影响, 渗流带和潜流带中的膏模孔基本没发生变化; 近陆区的缓流带, 膏模孔下部的淡水白云石和泥粉晶白云石(渗流粉砂)被方解石晶体胶结, 形成了方解石+白云石组合特征; 在近海区的缓流带, 前期形成的淡水、泥粉晶白云石(渗流粉砂)充填物被石膏晶体胶结, 形成了石膏+白云石组合特征(图7(b))。

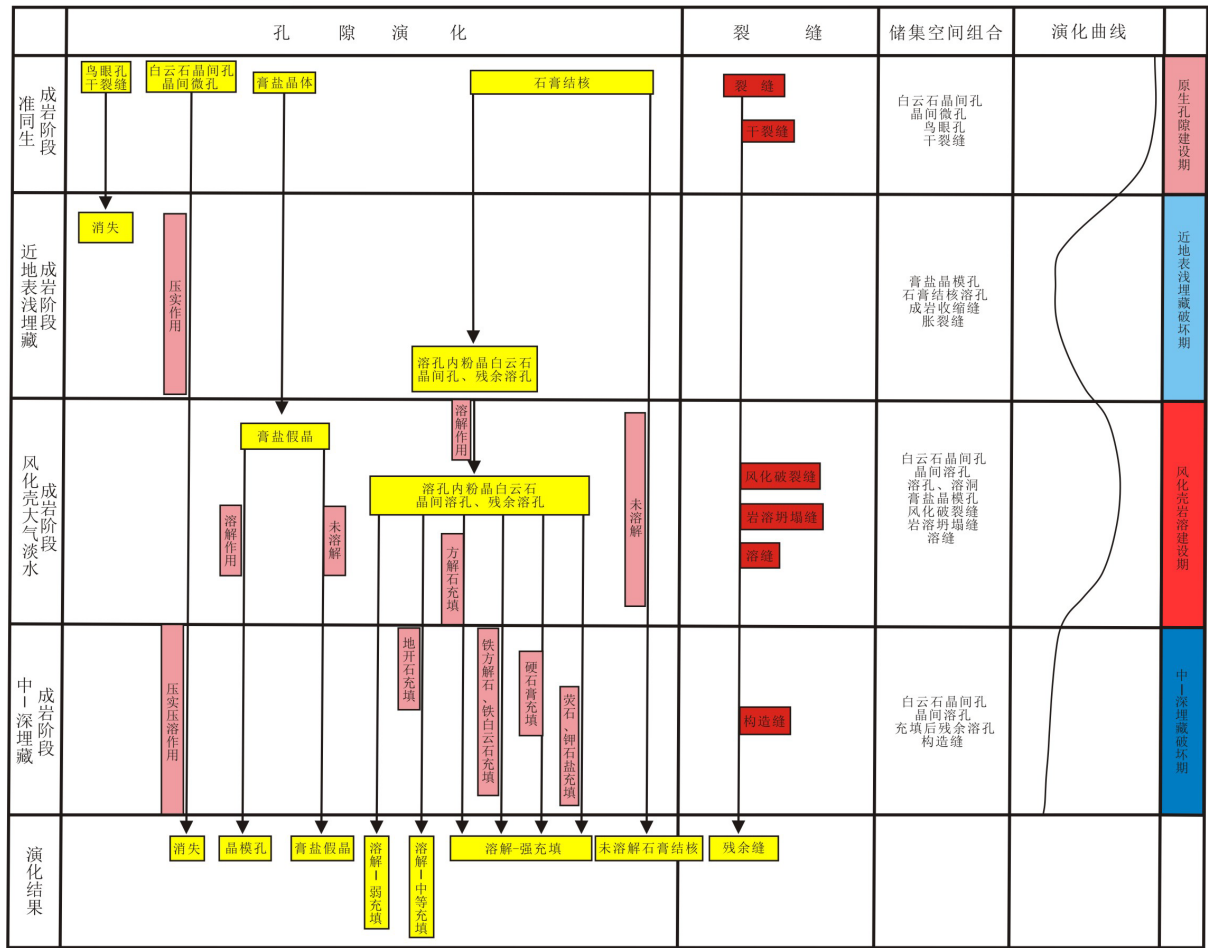


Figure 6. The karstification and porosity evolution of Ma54 of Ordovician Majiagou Formation in western Jingbian tableland
 图 6. 靖边潜台西侧奥陶系马家沟组马五 4 亚段成岩作用与孔隙演化图

4.3. 风化壳大气淡水阶段——孔隙溶解建设期

风化壳大气淡水成岩阶段为孔隙溶解建设期。该阶段主要以溶蚀作用为主，形成大量溶孔、溶洞、角砾间孔、晶间溶孔及溶缝等。在研究区古地貌形态的控制下，膏模孔中的充填物变化较大；在淡水渗流带的岩溶作用下，岩溶高地和岩溶斜坡区(研究区中西部)的膏模孔上部的方解石被部分或完全溶解；而在淡水潜流带，由于其水平溶蚀能力较强，岩溶高地及斜坡区的膏模孔上部的方解石或石膏被溶解，形成大量半充填 - 示底构造；在岩溶盆地(研究区东部)中，该区由于大部分处在缓流 - 半咸水带，溶蚀能力较弱，膏模孔以充填作用为主，前期形成的膏模孔充填物未发生变化(图 7(c))。该阶段研究区西部以溶解作用为主，形成了主要以膏溶为特色的储层，东部地区以胶结、充填作用为主。

4.4. 中 - 深埋藏阶段——孔隙充填破坏期

该阶段西部地区由于距离风化壳较近，出露地层与上覆地层直接接触，导致酸性压释水进入，使大量的方解石及部分白云石溶蚀，但由于自生大量石英以及黄铁矿生成并将孔隙充填，只有少量孔隙得以保存；而东部地区由于离风化壳较远，基本上不受酸性压释水的影响，前期形成的充填物基本不变；中部地区由于少量酸性压释水进入地层，前期形成的方解石及白云石部分溶蚀，且有少量自生石英充填孔隙，其余大部分孔隙得以保存(图 7(d))。

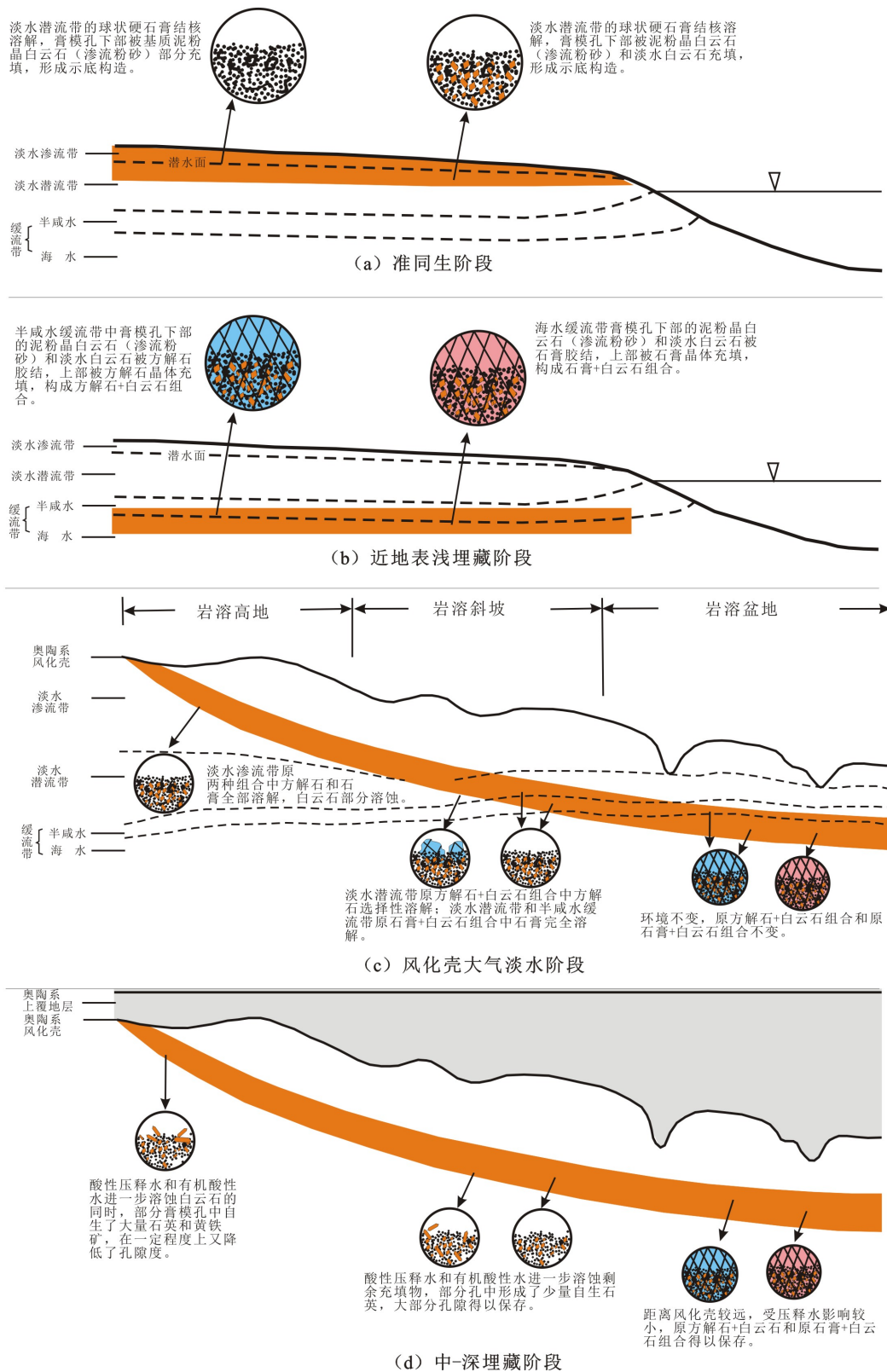


Figure 7. The evolution model of anhydrite-moldic pores

图7. 膏模孔演化模式图

5. 结论

1) 根据野外地质剖面及钻井岩心观察, 结合铸体薄片、扫描电镜、X-衍射等分析测试资料, 靖边潜台西侧马五 4 亚段主要包括压实、胶结、白云岩化、岩溶以及重结晶等成岩作用, 其中岩溶、白云岩化以及胶结作用对该区马五 4 亚段岩溶储层孔隙演化起到关键性作用。

2) 根据岩溶作用的形成机理、发育特征、控制因素、发生的先后顺序及持续时间等, 将研究区马五 4 亚段岩溶作用划分为: 同生期岩溶作用、表生期岩溶作用和埋藏期岩溶作用。并详细研究了不同时期的岩溶作用的产物及特征。

3) 根据研究区马五 4 亚段孔隙形成和演化特征, 将其划分为 4 个阶段, 即准同生成岩阶段、近地表浅埋藏成岩阶段、风化壳大气淡水成岩阶段以及中-深埋藏成岩阶段。

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(TPR-2015-13)。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 魏丽, 王震亮, 冯强汉, 等. 靖边气田北部奥陶系马五₁亚段碳酸盐岩成岩作用及其孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2234-2244.
- [3] Yang, Y.T., Li, W. and Ma, L. (2005) Tectonic and Stratigraphic Controls of Hydrocarbon Systems in the Ordos Basin: A Multicycle tectonic Basin in Central China. *AAPG Bulletin*, **89**, 255-269. <http://dx.doi.org/10.1306/10070404027>
- [4] 李景明. 中国大中型气田富集区带[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 25-26.
- [5] 姚泾利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地中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] 胡光明, 罗顺社, 倪超, 等. 靖边潜台奥陶系马五 4 亚段白云岩化作用研究[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 110-117.
- [7] 李振宏, 郑聪斌. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响: 以鄂尔多斯盆地奥陶系为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 247-252.
- [8] 陈学时, 易万霞, 卢文忠, 等. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.
- [9] 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.
- [10] 钱一雄, Taberner, C., 邹森林, 等. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较: 以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 1-7.
- [11] 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.
- [12] 李彩莲, 王宝清, 尚凯. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组古岩溶特征[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(5): 43-45.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Mateu, E. and Colin, F.K. (1983) Subaerial Exposure Environment (in Carbonate Depositional Environments). *AAPG Memoir*, **33**, 1-54.
- [16] 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.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org