

鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理

何发岐¹, 张威¹, 丁晓琪², 祁壮壮², 李春堂¹, 孙涵静¹

(1. 中国石化华北油气分公司, 河南 郑州 450006; 2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059)

摘要:随着鄂尔多斯盆地北部中国石化大牛地区块一系列深井的钻探成功,发现乌审旗古隆起对奥陶系马家沟组的成藏起着重要的控制作用。在充分利用盆地北部钻井、地震和分析化验资料的基础上,研究乌审旗古隆起的形成与演化对下古生界成储和成藏的控制作用。结果表明:①乌审旗古隆起形成于新元古代,一直持续活动到奥陶纪末,具有“水上、水下交替发育”的特点,可分为5个演化阶段;②乌审旗古隆起在早古生代的持续活动造成了其东侧断裂系统发育,这些断裂为加里东期—海西期马家沟组岩溶作用提供了通道,形成深层岩溶储层;③乌审旗古隆起上沉积水体较浅,利于微生物岩的形成和准同生白云石化,可以形成白云岩孔隙型储层;④乌审旗古隆起东侧的断裂是成藏期天然气运移的主要通道,断裂沟通了多套储层,具有“三向供烃、断裂控储、立体成藏”的特征。该研究为鄂尔多斯盆地地下古生界奥陶系的立体勘探提供了一种新模式。

关键词:白云岩;储集体;古隆起;岩溶气藏;马家沟组;奥陶系;大牛地;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin

HE Faqi¹, ZHANG Wei¹, DING Xiaohu², QI Zhuangzhuang², LI Chuntang¹, SUN Hanjing¹

(1. Huabei Oil and Gas Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450000; 2. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059)

Abstract: It's found that the Wushenqi paleo-uplift has a significant impact on controlling the hydrocarbon accumulation of the Ordovician Majiagou Formation in the northern Ordos Basin with a batch of deep wells successfully drilled in Da'niudi gas field there. The study makes full use of the drilling, seismic and laboratory data from the northern part of the basin to discuss the controlling effects of the paleo-uplift on reservoir forming and hydrocarbon accumulation in the Lower Paleozoic. The results are shown as follows. First, the Wushenqi paleo-uplift was formed in the Late Proterozoic and continued to be active until the end of the Ordovician. It underwent five stages of evolution featuring alternated development above and under water. Second, the continuous activities during the Early Paleozoic resulted in the development of fault system to the east of the paleo-uplift, which served as fluid channels for the confined aquifer karstification during the Caledon and Hercynian periods. Deep karst reservoirs were developed thereby. Third, the sedimentary water body on the paleo-uplift was shallow, favorable for the deposition of microbial rocks and enconemporaneous dolomitization, and prone to generate porous dolomite reservoirs. Fourth, the faults to the east of the paleo-uplift acted as major passages for natural gas migration during accumulation. Multiple reservoirs get connected by these faults, featuring "hydrocarbon charging from three directions, fault-controlled reservoir formation and multi-layered hydrocarbon accumulation". The study is of a new model to the exploration of the Lower Paleozoic and Ordovician in the Ordos Basin.

Key words: dolomite, reservoir, paleo-uplift, karst gas reservoir, Majiagou Formation, Ordovician, Da'niudi gas field, Ordos Basin

收稿日期:2022-09-20;修订日期:2023-01-06。

第一作者简介:何发岐(1967—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质综合研究及油气勘探开发。E-mail: hefq.hbsj@sinopec.com。

通讯作者简介:丁晓琪(1981—),男,博士、副教授,储层地质。E-mail: Xiaoqingding@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-001-010);中国石化科技攻关项目(P20043-2)。

引用格式:何发岐,张威,丁晓琪,等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 276-291. DOI: 10. 11743/ogg20230203.

HE Faqi, ZHANG Wei, DING Xiaoqi, et al. Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 276-291. DOI: 10. 11743/ogg20230203.

继承性古隆起及周缘发育高能的储集相带,其间歇性暴露利于溶蚀作用的发生,可形成多种类型的储集体。多期不整合面和断裂系统为油气运移提供了有效通道,而继承性构造及地层圈闭是天然气运移的指向^[1-2]。古隆起及其周缘成为大油气田分布的重点领域,往往具有多层系立体成藏的特征^[3-5]。自1989年发现靖边气田后,鄂尔多斯盆地碳酸盐岩领域的主要勘探目标为奥陶系马五⁵亚段(马家沟组五段5亚段)之上的风化壳气藏^[6-7],随着近年来勘探的深入,马五⁵亚段以下逐渐取得突破,马五⁵⁻⁷亚段及马四段均有多口井试获工业气流,揭示了奥陶系多层系叠合成藏特征。

前期许多学者认为奥陶纪鄂尔多斯地区发育“三隆”,即北部的伊盟隆起、中部的L型中央古隆起及东部的吕梁古隆起。盆地内的沉积分异性不大,具有“平底锅”或“大盐洼”模式,横向上连续性好,为陆表海沉积^[8]。近年来随着一系列的深井钻探发现了乌审旗古隆起,认为乌审旗古隆起在奥陶纪为水下古隆起,总体处于潮间带,控制着微生物丘滩体的发育。乌审旗古隆起对东、西两侧的拗陷沉积具有分异作用,并控制了两侧的岩性旋回^[9-10]。隆起区与拗陷区相互协调、长期共存,奠定了盐下规模生烃、成储的基础^[11]。

加里东期由于中央古隆起的抬升幅度较大,自中央古隆起向东,不整合面下出露的地层依次变新。在中央古隆起上,上古生界的煤系烃源岩与马家沟组白云岩直接接触,构成了良好的天然气运移通道^[12-14]。与古隆起相关的多期构造裂缝对马家沟组储层渗流能力的提高也具有建设性作用^[11, 15]。

对于盆地中东部加里东期的岩溶底界,前期普遍认为马五⁵亚段致密灰岩(局部为白云岩-灰岩互层),马五⁵亚段以下基本不存在加里东表生期的淡水溶蚀^[16]。然而近期乌审旗东侧的探井在马五⁶⁻¹⁰亚段发现有岩溶角砾岩,部分井马五⁶⁻¹⁰亚段有近100 m厚的气测异常,成像测井及取心资料显示溶蚀孔洞、裂缝发育,这与区域上岩溶作用终止于马五⁵亚段的现象存在巨大差异。总体上,目前对奥陶系岩溶气藏的认识仍存在两个问题:①马五⁵亚段以下岩溶储层的形成机理不清楚;②多层系立体成藏模式尚未建立。

本文通过解剖乌审旗古隆起的形成演化,研究古隆起对马家沟组沉积的控制作用;通过分析古隆起东

侧马家沟组储层的储集空间类型,研究古隆起对成储的控制作用。最后,结合天然气成因,提出古隆起东侧的天然气成藏模式。该研究成果提出一种新的岩溶模式,拓展了岩溶气藏的勘探深度,为古隆起周缘的天然气勘探提出一种新思路。

1 地质背景

奥陶纪马家沟期,鄂尔多斯地区存在隆-洼相间的构造格局。其中,隆起包括伊盟隆起、中央古隆起、乌审旗古隆起和吕梁古隆起,两个洼陷为靖西洼陷和米脂洼陷^[17-18],洼陷内地层厚度明显较大(图1a)。受晚奥陶世加里东运动的影响,华北地台整体抬升,奥陶系顶部经历了近150 Myr的风化剥蚀,在中央古隆起上出露层位为马四段,而在盆地中东部大面积出露马五段,马六段的分布范围较小。

马家沟组是一套海相碳酸盐岩夹膏盐岩的地层,根据岩性的不同,将马家沟组由下而上分为马一段—马六段,其中马五段自上而下又细分为10个亚段(图1b)。马家沟期经历了3次大规模的海侵、海退旋回,马一段、马三段和马五段沉积于海退期,马二段、马四段和马六段沉积于海侵期。海退期以局限台地-蒸发台地为主,岩性为白云岩与蒸发岩互层;海侵期以开阔台地为主,岩性为灰岩夹厚度不等的白云岩。为满足勘探的实际需要,将盆地中东部马家沟组划分为3个成藏组合:马五¹亚段—马五⁴亚段为上组合,马五⁵亚段—马五¹⁰亚段为中组合,马四段及其以下为下组合^[18]。

2 古隆起成因

2.1 古隆起边界的确定

乌审旗古隆起面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,其构造活动具有继承性,有时位于水下,有时位于水上。为了界定其分布范围,认为古隆起的范围就是寒武系缺失区。根据钻井和地震资料以及前人的研究成果^[4],可以看出乌审旗古隆起具有燕尾状特征,一翼向鄂托克前旗延伸,另一翼向横山—靖边延伸。中国石化大牛地区块正好位于乌审旗古隆起东北侧(图1a)。

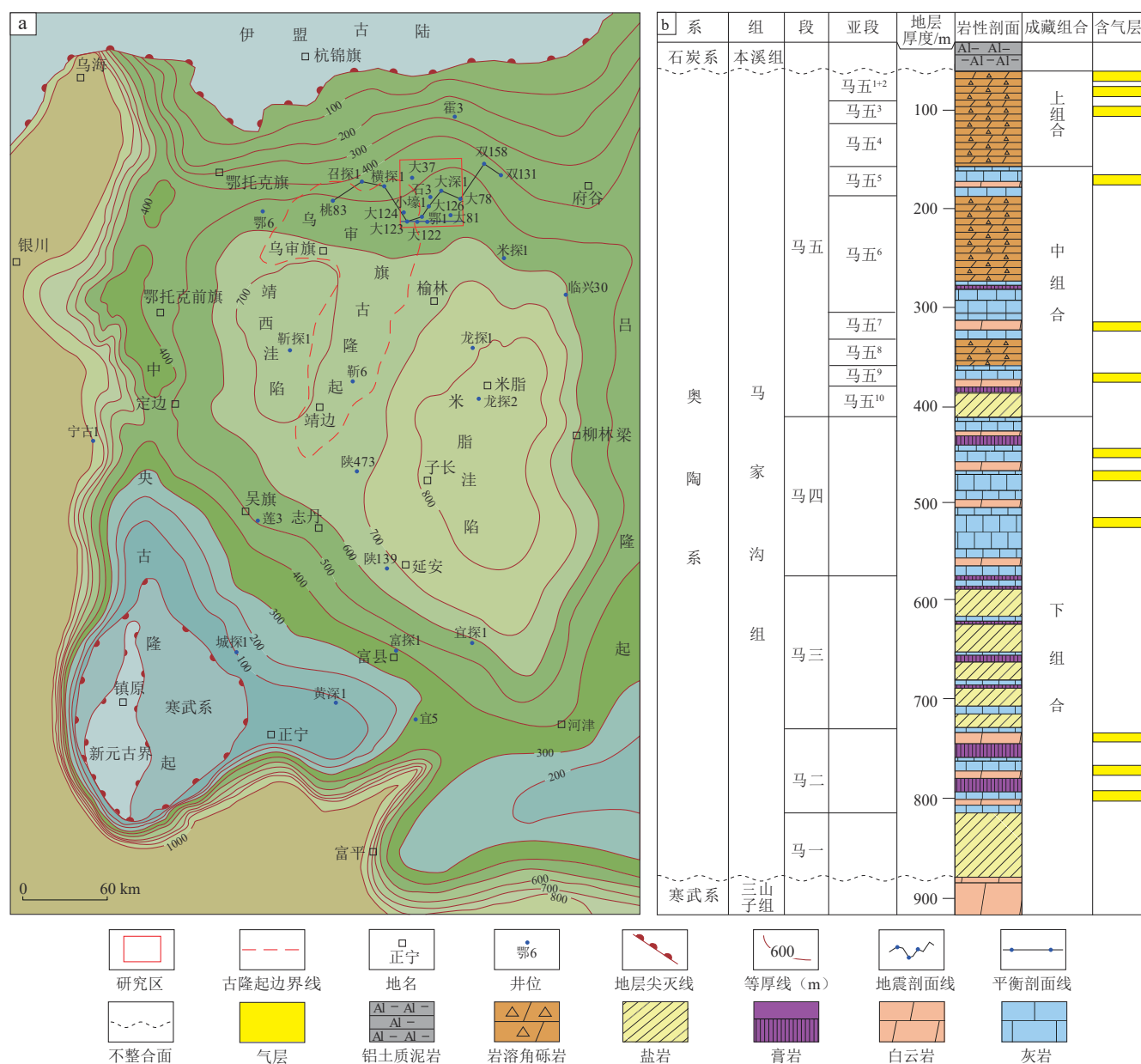


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组残留地层厚度(a)及地层柱状图(b)

Fig. 1 Residual stratum thickness (a) and stratigraphic column (b) of the Majiagou Formation, Ordos Basin

2.2 古隆起的演化

通过编制东西向平衡剖面,可以看出古隆起的演化主要经历了以下5个阶段(图2)。

2.2.1 前寒武纪首次隆升阶段

乌审旗古隆起东、西两侧均存在中元古界长城系石英岩,并且这套石英岩在古隆起西侧厚、东侧薄,但在古隆起上缺失。结合长城系岩相古地理可知,乌审旗—横山—靖边地区位于定边拉张槽上,是存在长城纪沉积的^[19-20]。中元古代末期(1 000 Ma左右),西伯

利亚板块和华北板块对接碰撞,形成了巨大的陆缘碰撞造山带,华北地台北缘进入碰撞挤压造山阶段,构造变形强烈,也使得先存板内裂陷槽抬升隆起^[21]。近期在鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区发现了3个中元古界NW向断陷槽逆冲反转形成的隆起带,其形成与这次挤压构造运动有关^[22]。与此同时,乌审旗古隆起也经历了一次构造隆升,裂陷槽内先存NW向断裂逆冲反转,断裂之间形成古隆起,古隆起上的长城系被剥蚀(图2a)。研究区NW向断裂恰好位于杭锦旗NW向裂陷槽与太行—吕梁地区的NNW-NW向基性岩墙群的连线上,推测它们之间具有成因联系^[22-23]。由于研究

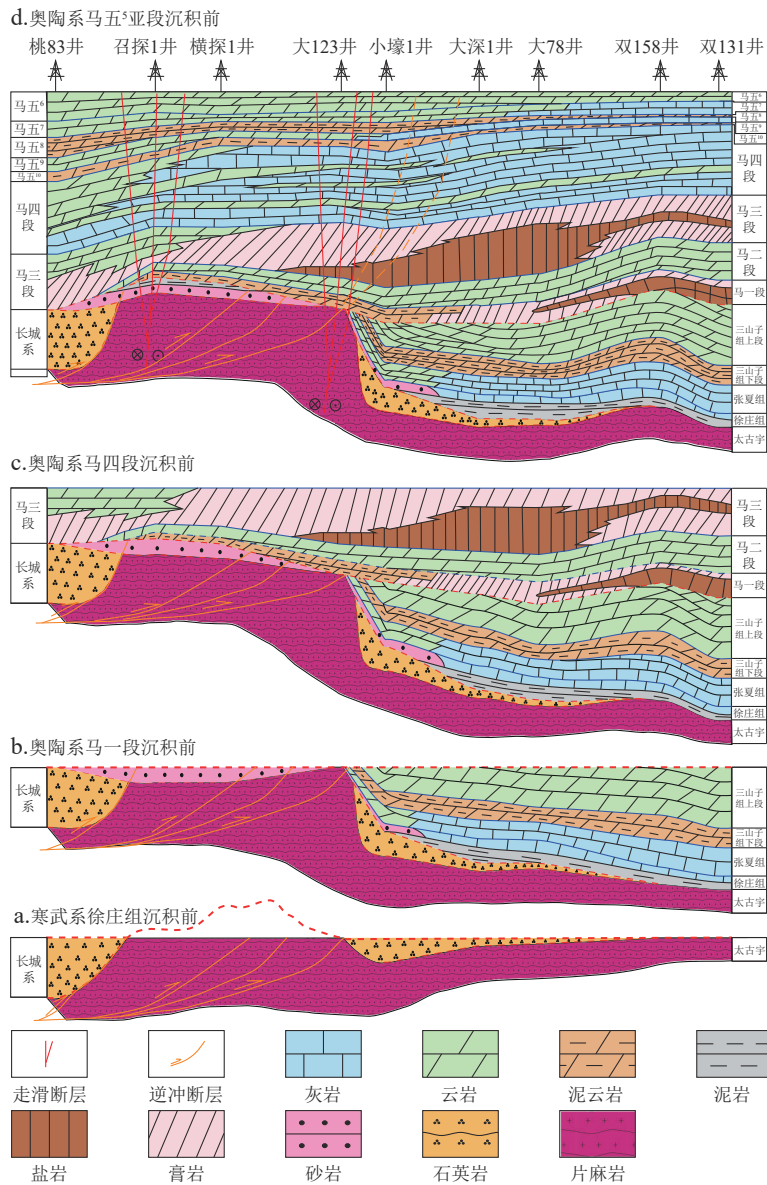


图2 鄂尔多斯盆地元古宙—早古生代乌审旗古隆起演化剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 2 Wushenqi paleo-uplift evolution profile from the Proterozoic to Early Paleozoic, Ordos Basin (see Fig. 1a for the profile location)

区内未发现断层反转相关的构造,这种变形的时间及断裂特征很难精确厘定。

2.2.2 寒武纪水下低隆沉积阶段

前人认为,乌审旗古隆起在寒武纪为水上隆起,没有接收寒武纪沉积^[4,11]。本次研究认为寒武纪时古隆起为水下隆起,发育了寒武纪沉积,但这套沉积地层由于受到早古生代怀远运动的影响而遭受剥蚀(图2b),理由如下:①从大牛地的三维地震资料可以看出,寒武系以低角度上超于太古宇花岗片麻岩和中元古界石英岩之上,但顶部被高角度削截(图3);②寒武系厚度在古隆起东侧急剧变化,但各层段的岩性在平面上变化并不大(图2b,图3),说明古隆起边缘不是寒武纪的沉

积边界;③寒武纪古隆起自下而上总体呈现一个海侵的过程,张夏组沉积期海侵达到最大,但在古隆起上的召探1井揭示了35 m厚的下寒武统徐庄组,说明古隆起上存在寒武纪海侵初期的沉积,据此推断海侵范围更广的张夏组和三山子组在这里也应该有发育。徐庄组在古隆起上为一套互层的砂岩、泥岩和白云岩,而在古隆起东侧变为泥岩沉积;张夏组在古隆起上为鲕粒白云岩,而在古隆起东侧为鲕粒灰岩和泥晶灰岩。由此可以看出,乌审旗古隆起在寒武纪更有可能为水下隆起,水体能量高。

2.2.3 早奥陶世第二次隆升阶段

寒武纪沉积结束之后,商丹洋的洋壳向北俯

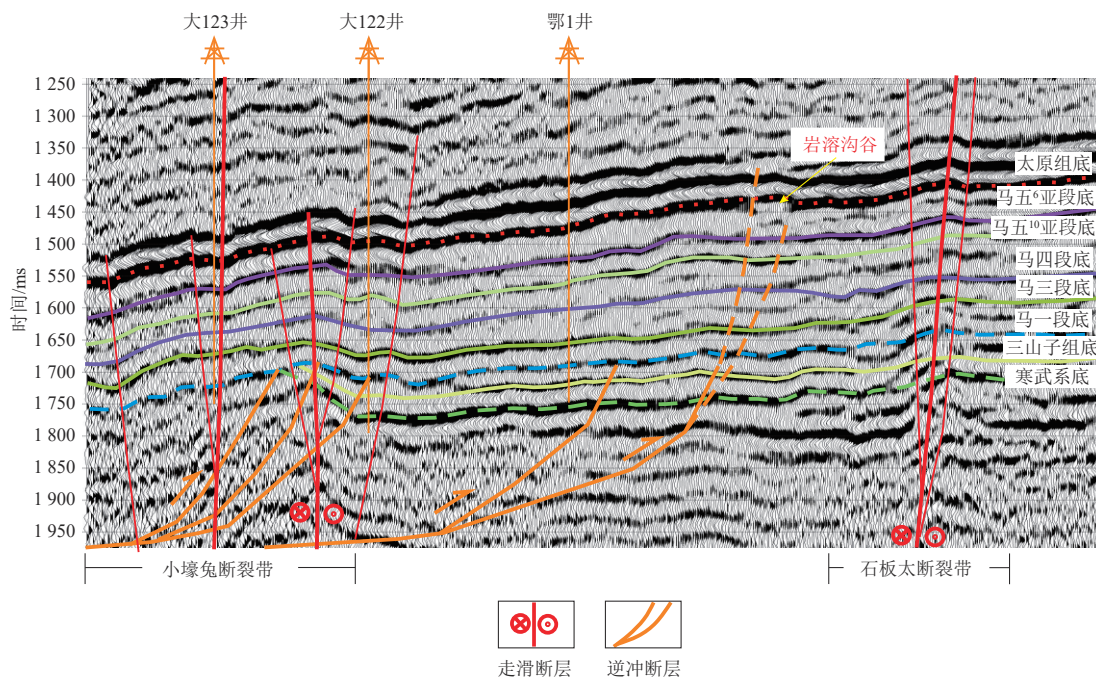


图3 鄂尔多斯盆地过乌审旗古隆起的東西向地震剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 3 EW seismic profile crossing the Wushenqi paleo-uplift, Ordos Basin (see Fig. 1a for the profile location)

冲^[24],鄂尔多斯地块内部受怀远运动“幕式”作用影响,遭受强烈抬升^[25]。鄂尔多斯地块西部的镇原古凸起、北部的伊盟隆起及东部的乌审旗古隆起均持续隆升^[26]。

地震剖面揭示,乌审旗古隆起东侧沿基底顶面发育的一系列向东的逆冲断层构成了小壕兔逆冲断裂带(图3)。该断裂带的活动导致了乌审旗古隆起的强烈隆升,其本身亦是古隆起的东部边界。在怀远运动中,该断裂带的活动向上影响到了奥陶系顶面,使地层形成东翼宽缓、西翼窄陡的不对称褶皱。乌审旗古隆起上的寒武系几乎被剥蚀殆尽,同时缺失了下奥陶统里组和亮甲山组,直到中奥陶世马家沟组沉积期才被向西超覆的奥陶系覆盖,在古隆起东侧形成了寒武系厚度突变带(图2b,图3)。

2.2.4 中奥陶世水下低隆沉积阶段

中奥陶统马家沟组沉积期,现今鄂尔多斯盆地沉积受华北北部主动大陆边缘、华北南部—西南部被动大陆边缘背景联合控制,海侵范围持续扩展^[27]。乌审旗古隆起演化为同沉积水下低隆,马一段和马二段超覆于古隆起上(图2c)。马一段—马三段在古隆起上为膏岩和白云岩,向古隆起两侧转变为膏岩、岩盐夹白云岩。地层厚度由东部向乌审旗古隆起上明显变薄,如在大牛地气田东部的大78井中其厚度为260 m,古隆起东侧的小壕1井为211 m,而古隆起之上召探1井

仅112 m。马三段以上各层段的岩相也受古隆起的影响,古隆起上以白云岩沉积为主,向东逐渐变为白云岩和灰岩的互层(图2d)。

2.2.5 加里东期—海西期断裂复活阶段

马家沟组沉积后,受华北地块南、北洋壳向下俯冲消减而形成对挤力的影响,华北地块整体抬升,遭受150 Myr的剥蚀,奥陶系发生强烈岩溶作用。加里东晚期的升降活动造成了鄂尔多斯盆地基底断裂复活,在奥陶系沉积盖层中形成一系列“隐形”走滑断裂^[28]。乌审旗古隆起一带发育一条近NEE向盆地级基底断裂(鄂托克旗—乌审召断裂)及若干条NW向坳陷级基底断裂,控制了研究区加里东期走滑断裂的发育。在研究区地震剖面上(图3),寒武系—奥陶系断裂一般表现为“上凸”状,表明其构造环境转变为压扭;上凸幅度向上降低,一般消失在石炭系—二叠系。也有部分断裂的花状构造消失在石炭系—二叠系顶面甚至“通天”。这表明走滑断裂的活动一直持续至晚古生代,部分断裂在古生代以后复活。

小壕兔逆冲断裂带的西支在奥陶系顶面的切割线与小壕兔走滑断裂基本伴生,可能指示两者存在成因上的联系。一方面,断裂活动控制了岩溶古地貌格局,在断裂带附近形成一系列岩溶冲沟,成为岩溶水从西部岩溶高地流向东部岩溶盆地的主要通道;另一方面,断裂活动控制了奥陶系碳酸盐岩地层中裂缝—

断缝的发育。钻井过程中,多口水平井在马五⁵亚段中钻遇10~50 cm的断缝带,发生井漏。断裂附近水平井的裂缝密度可达1.36条/m,均为高角度缝,高导缝占裂缝总数的72%(DK13-FP9井1180 m长度水平段统计)。

因此,古隆起周缘的断裂在早奥陶世之前为逆断层,使古隆起发生垂向抬升,经历了两次大的区域剥蚀;而加里东期周缘断裂以走滑为主,在古隆起两侧形成断缝-裂缝带,控制着后期的岩溶深度和强度。

3 古隆起对沉积的控制作用

奥陶系马家沟组沉积期,乌审旗古隆起为水下隆起,由于继承性的隆升作用,沉积水体较浅。在古隆起上地层厚度偏薄,蒸发岩相对不发育;相反在乌审旗古隆起的两侧发育“膏盐潟湖”(图2)。古隆起对沉积的控制作用分海侵期和海退期讨论。

3.1 海侵期

主要指马四段及马五⁹、马五⁷和马五⁵亚段沉积期。此时乌审旗古隆起上沉积水体较浅,水体循环受限,盐度不正常,但盐度尚未达到石膏析出的浓度,沉积物主要为一套微-粉晶白云岩与泥晶灰岩的不等厚互层,代表若干个高频旋回。从古隆起向东,海水的循环逐渐正常,从古隆起上的白云岩向东转变为白云岩-灰岩互层及灰岩(图2)。

3.2 海退期

主要指马一段、马三段、马五¹⁰、马五⁸和马五⁶亚段沉积期。此时乌审旗古隆起对海水的遮挡作用明显,在古隆起的东、西两侧形成米脂膏盐湖和靖西膏盐湖(图2),岩性为膏岩、岩盐和泥晶白云岩的互层。古隆起上形成膏岩、膏质白云岩与白云岩的互层,海水盐度的增加导致窄盐度的生物不能生存,因此大量的藻类繁盛。古隆起上的白云岩以泥-微晶白云岩和凝块石白云岩为主,含少量的藻砂屑白云岩。

4 古隆起对储层的控制作用

乌审旗古隆起控制着沉积的分异,造成原始岩性的差异,后期的表生成岩阶段,不同的岩性具有不同的溶解度,最终形成不同类型的岩溶储层。古隆起东缘的断裂及其伴生的缝网,既是表生期淡水流动的主要通道,本身也是主要的储集空间。

4.1 主要储层类型

根据储层的孔隙类型和成因,可以将乌审旗古隆起东侧马家沟组储层划分为岩溶缝洞型和白云岩孔隙型两种类型,其中前者为主要的储层类型。

4.1.1 岩溶缝洞型储层

对于岩溶缝洞型储层,马五⁵亚段以上层位已有大量的研究成果^[16,29]。近年来在马五⁶亚段以下的中-下组合也发现了大量与表生期淡水溶蚀相关的缝洞^[30-32]。常见的孔隙类型有膏模孔、溶洞及溶缝。

1) 膏模孔

膏模孔是马五⁶⁺⁷亚段中常见的孔隙类型,可见板条状石膏和核状石膏被溶后形成的膏模孔(图4a),膏模孔内见未被石膏完全交代的白云石晶粒,晶粒间发育晶间孔(图4b)。

2) 溶洞

溶洞在乌审旗古隆起东侧的马五⁶⁻¹⁰亚段和马四段中普遍发育,主要见于灰质白云岩等过渡岩性中。溶洞从毫米级到厘米级不等(图4c),并被两期方解石不完全充填(图4d)。早期方解石在岩心中呈灰色,阴极发光下不发光, $\delta^{18}\text{O}$ (氧同位素值)在-13.8‰~-10.6‰,平均-12.0‰, $\delta^{13}\text{C}$ (碳同位素值)在-3.8‰~-2.4‰,平均-0.2‰, $\delta^{18}\text{O}$ 较基质灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负3.4‰; $\delta^{13}\text{C}$ 与基质灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 基本一致,说明该期方解石应该形成于淡水环境中。晚期方解石在岩心中呈白色晶簇状,阴极发光呈桔黄-橙黄色光(图4e)。 $\delta^{18}\text{O}$ 在-12.9‰~-11.6‰,平均-12.2‰, $\delta^{13}\text{C}$ 在-12.3‰~-8.9‰,平均-10.5‰, $\delta^{18}\text{O}$ 偏负可能是温度升高分馏所致,而 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负说明该期方解石形成过程中可能存在有机碳的参与。综合阴极发光和碳、氧同位素分析可知,早期方解石形成于浅埋藏的氧化环境,晚期方解石形成于中埋藏的还原环境。

3) 裂缝和溶缝

乌审旗古隆起西侧的马五⁶⁻¹⁰亚段和马四段中网状缝和水平缝发育,这些裂缝受到淡水的溶蚀后发生扩溶形成溶缝和溶洞(图4f)。部分溶缝仍被方解石不完全充填,充填序列和溶洞中的方解石充填序列基本相同。古隆起周缘的断裂在中-新生代再次活动,形成大量的垂直缝,这些垂直缝和加里东期的网状缝共同构成毫米-微米级缝网系统。

4.1.2 白云岩孔隙型储层

马四段和马五段中发育大量的白云岩,除致密的

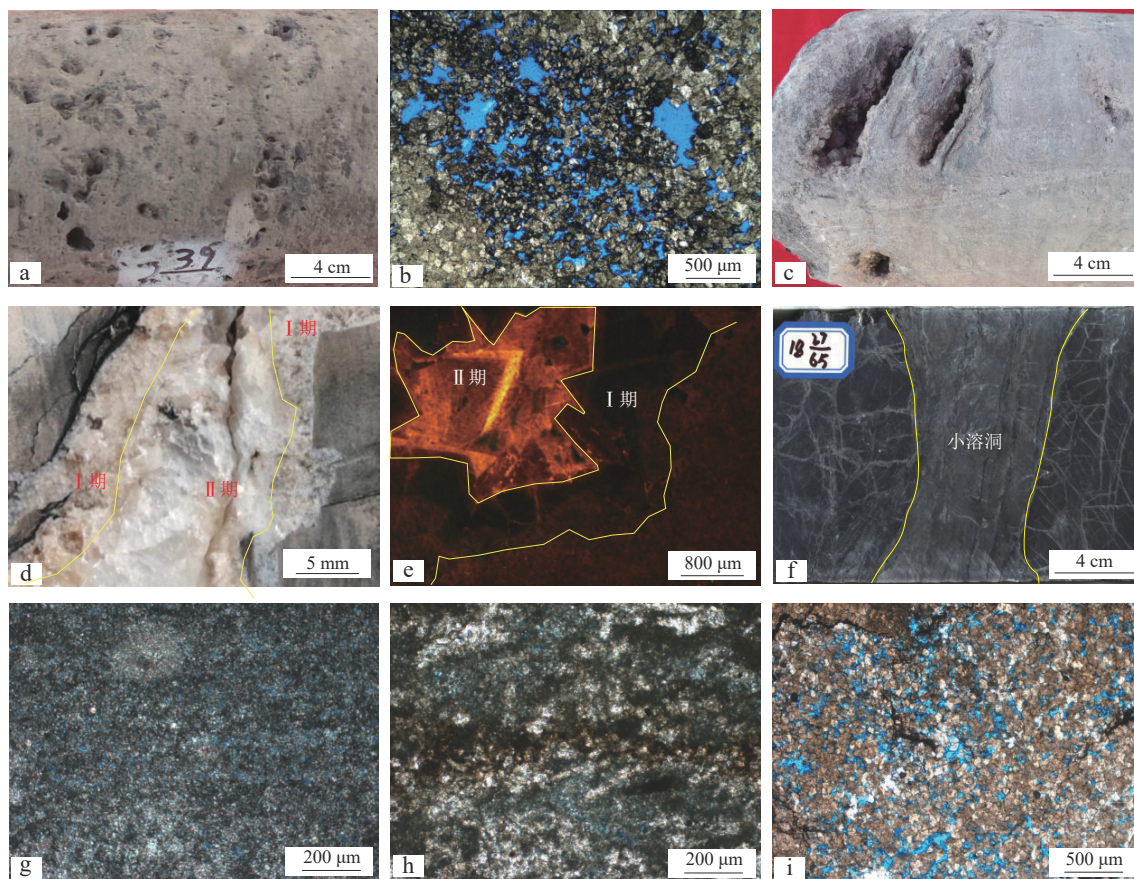


图4 鄂尔多斯盆地马家沟组储层典型储集空间类型照片

Fig. 4 Micrographs showing the typical reservoir space types in the Majiagou Formation, Ordos Basin

a. 溶洞、膏模孔, 马五⁷亚段, 埋深3 153.94 m, 大124井, 岩心照片; b. 膏模孔, 马五⁷亚段, 埋深3 153.94 m, 大124井, 铸体薄片; c. 厘米级溶洞, 马五⁶亚段, 埋深2 865.45 m, 大65-3井, 岩心照片; d. 溶洞被两期方解石不完全充填, 马五⁵亚段, 埋深2 849.90 m, 大65-3井, 岩心照片; e. 两期方解石阴极发光特征, 马五¹⁰亚段, 埋深2 693.72 m, 大107井, 阴极发光照片; f. 泥晶白云岩中的网状裂缝, 中间的小溶洞被洞穴砂砾岩充填, 马五⁸亚段, 埋深3 059.50 m, 石103井, 岩心照片; g. 藻砂屑白云岩, 马四段, 埋深3 117.90 m, 石1井, 铸体薄片; h. 凝块石白云岩, 马四段, 埋深3 122.80 m, 石1井, 铸体薄片; i. 粉晶白云岩, 晶间孔发育, 马五⁷亚段, 埋深3 155.05 m, 大124井, 铸体薄片

泥晶白云岩外, 还有部分藻砂屑白云岩、凝块石白云岩以及微-粉晶白云岩, 发育晶间孔。

藻砂屑白云石化后致密无孔, 但藻砂屑之间的灰泥白云石化后, 形成微晶白云石, 晶粒之间可见晶间孔发育(图4g)。凝块石白云岩往往和藻砂屑白云岩伴生, 凝块之间的微晶白云石之间发育晶间孔(图4h)。微-粉晶白云岩出现在马五⁵、马五⁷、马五⁹亚段以及马四段中, 常与灰岩伴生, 白云石晶粒粒径在30~50 μm, 呈平面自形-半自形晶, 晶间孔发育(图4i)。

4.2 储层形成机理

4.2.1 孔洞型储层

乌审旗古隆起东侧马四段上部和马五段溶蚀孔洞普遍发育, 与盆地内其他区域的溶蚀孔洞主要见于马五⁵亚段以上存在明显差别。古隆起东侧的大1-566

井对奥陶系马四段以上地层进行了全取心(图5)。马家沟组不整合面之下的马五³⁺⁴亚段为一套紊乱角砾白云岩, 局部夹数层2~3 m厚的层状白云岩或裂缝-镶嵌角砾白云岩, 偶见溶蚀孔洞。马五⁵亚段为一套黑色泥晶灰岩, 网状裂缝和水平缝发育, 可见裂缝扩溶形成溶缝, 被方解石半充填。马五⁶⁻¹⁰亚段为灰色白云岩、黏土质白云岩夹各种类型的角砾白云岩, 网状缝、水平缝和溶蚀孔洞在各个层段均有发育, 但充填严重。马四段上部为含灰白云岩, 可见厘米级的溶蚀孔洞。马家沟组溶蚀孔洞主要形成于表生期溶蚀, 加里东期存在非承压水岩溶和断裂沟通的承压水岩溶。

1) 非承压水岩溶

主要指马五⁵亚段以上部分, 淡水垂直下渗进入马五⁵亚段以上地层。马五⁵亚段为25~30 m厚的泥晶灰岩与白云岩的互层, 尽管有裂缝发育, 但岩性总体致密, 平面上分布稳定, 形成了区域性隔水层。加里东期

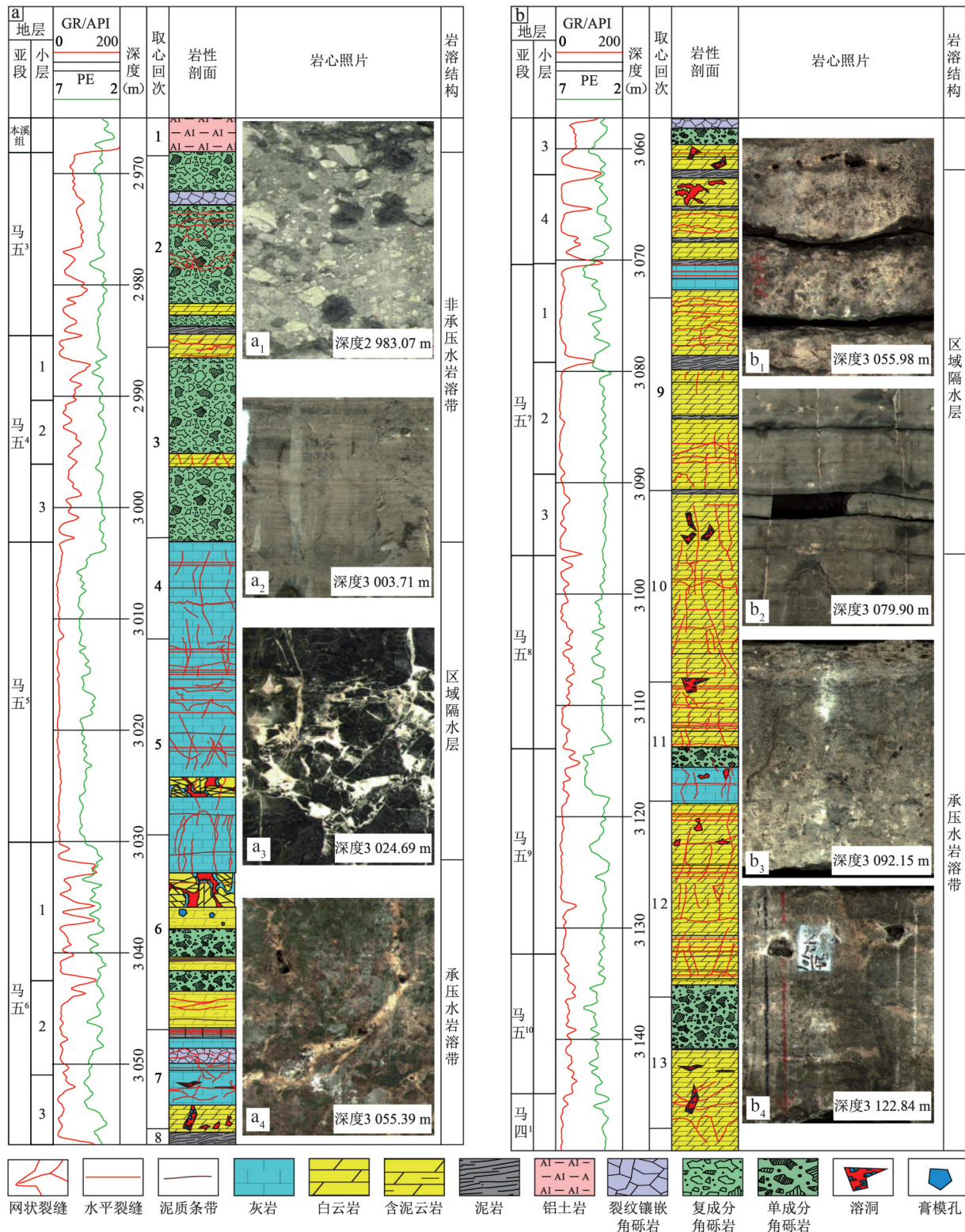


图5 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起东侧大1-566井马五段岩溶剖面

Fig. 5 Paleokarst section of the 5th member of the Majiagou Formation (Ma 5 Member) in well D1-566 to east of the Wushenqi paleo-uplift, Ordos Basin

a. 埋深2 965.0 ~ 3 057.0 m; b. 埋深3 057.0 ~ 3 149.0 m

隔水层之上的孔隙水和地表水连通,岩石中的孔隙充填孔隙水和空气,孔隙水处于一种非承压状态,因此称之为非承压水岩溶。

在非承压水系统中,由于不同岩性在淡水中的溶解度差异大,主要发生顺层溶蚀和沿层垮塌,局部因为下伏地层的强烈溶蚀而导致上覆地层整体垮塌。以大

牛地气田为例,在马五⁴亚段2 000 km²的分布范围内,马五^{4(1a)}小层的含石膏结核白云岩的分布面积因整体垮塌而只有约650 km²。

含石膏结核的白云岩,溶而不垮形成裂纹-镶嵌角砾白云岩^[30];致密的泥-微晶白云岩,如果无裂缝发育,由于淡水很难渗入,基本保持原状;而黏土质白云岩、云质泥岩和膏质白云岩,由于石膏在淡水中具有易溶性,以及黏土晶体和白云石晶体之间的结合力较弱^[33],形成顺层垮塌的角砾支撑或杂基支撑的紊乱角砾白云岩,普遍可见地下水垂流动的痕迹以及来自上古生界的炭屑、陆源碎屑等(图6a,b)。形成的岩溶角砾岩,其角砾成分可以是单一的,也可以是多种类型角砾的混合,前者代表顺层垮塌,后者可能是垮塌后又经历了搬运再堆积。由于非承压水岩溶带处于氧化、弱氧化-弱还原环境中,紊乱角砾白云岩以灰色、灰黑色为主。

2) 承压水岩溶

对于马五⁶⁻¹⁰亚段的溶蚀,前人多认为是同生期溶

蚀^[34-36],但从岩溶角砾岩类型、溶蚀孔洞及风化网状缝的分布来看,古隆起东侧马五⁶⁻¹⁰亚段的溶蚀应该主要形成于加里东期的表生期。证据有:①白云岩大面积发生去云化和去膏化,形成大量次生灰岩,岩石成分在横向上变化快(图6c,图7);②网状裂缝、水平缝普遍发育(图6d,e);③以大牛地区块为例,马五⁶亚段整体上为一套裂纹镶嵌角砾岩(图6f)与紊乱角砾岩(图6g)的互层,总体受原始岩性控制,但由于局部垮塌后被地下水改造,横向变化不稳定(图7);④发育从毫米-厘米级不等的溶蚀孔洞(图4c),溶洞往往与裂缝伴生。

由于马五⁵亚段区域性隔水层的存在,马五⁵亚段以下地层来自于地表垂直下渗的淡水有限,淡水主要来自加里东-海西期古地貌位置较高的马五⁵亚段以下地层出露区。水压头的存在使马五⁵亚段以下层段中的孔隙水承受更大的压力,将其称之为承压水岩溶。

加里东运动使整个鄂尔多斯地块被不均匀抬升遭受剥蚀,由于上覆垂直应力的减小,在地层中形成了大

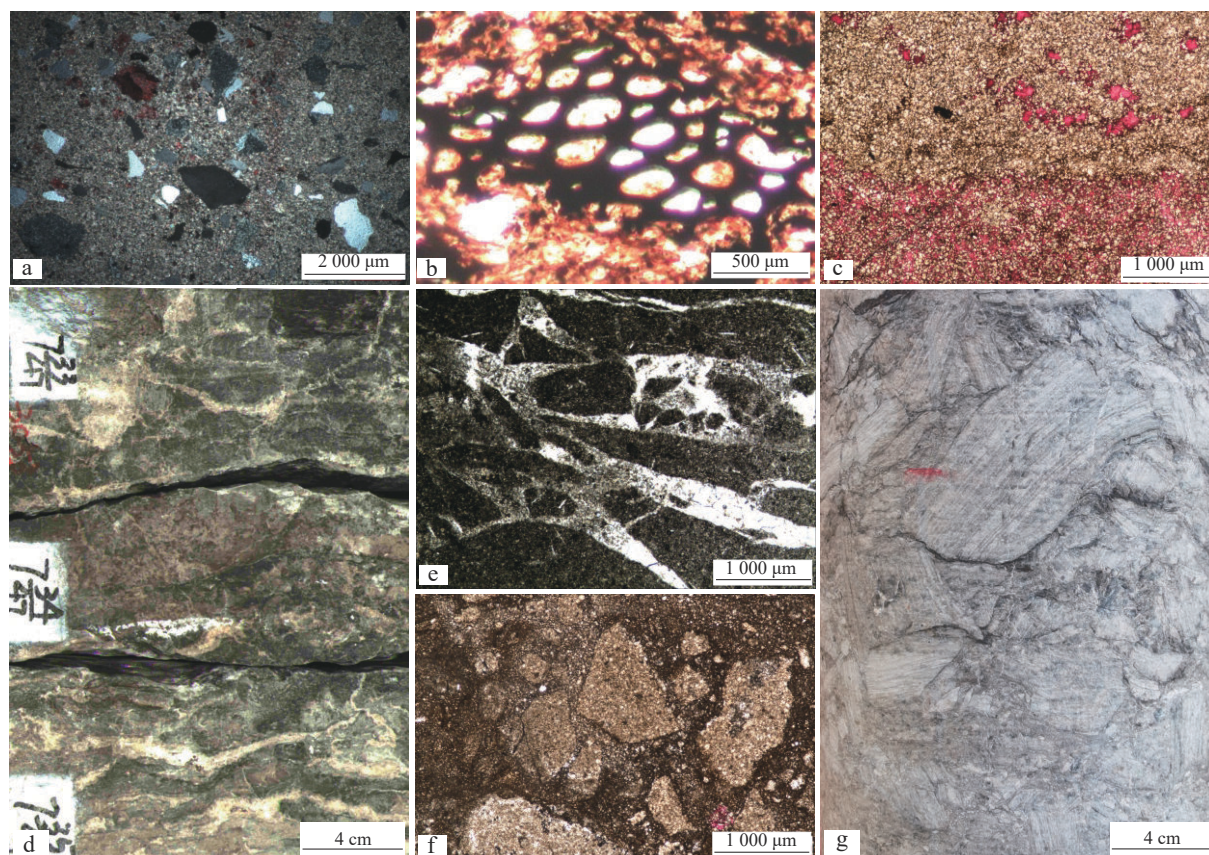
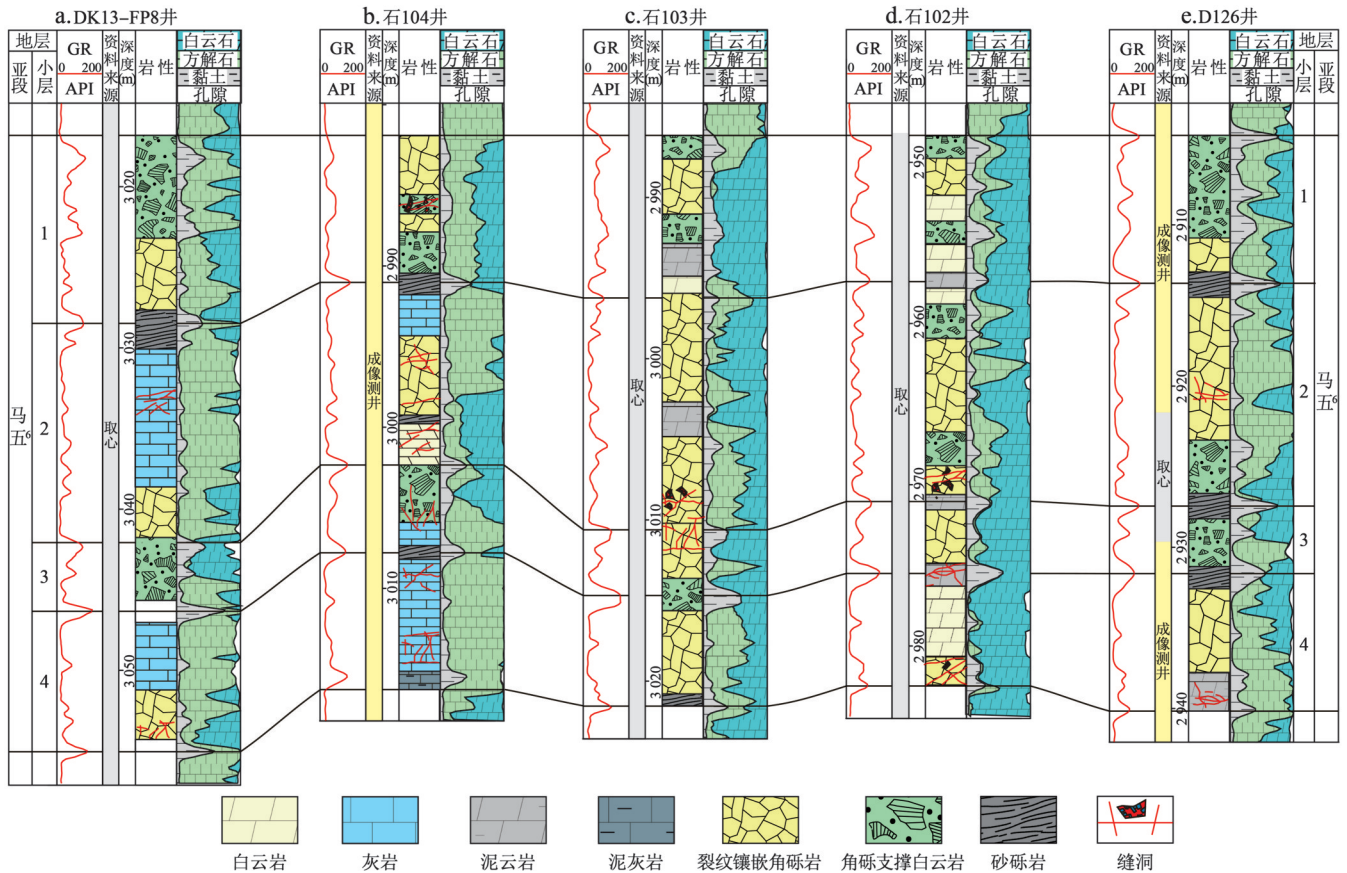


图6 鄂尔多斯盆地马家沟组中组合角砾岩显微特征照片

Fig. 6 Photos and micrographs showing breccia in the middle source-reservoir-cap rocks assemblage of the Majiagou Formation, Ordos Basin
a. 洞穴砂砾岩中来自上古生界的石英碎屑,马五²亚段,埋深2 722.20 m,大77井,铸体薄片;b. 角砾岩中来自上古生界的炭屑,马五⁴亚段,埋深2 844.00 m,大32井,铸体薄片;c. 白云岩发生不均匀的去白云石化,红色为次生方解石,马五⁶亚段,埋深2 960.15 m,石102井,铸体薄片;d. 水平裂缝与网状裂缝,缝宽0.2~0.5 mm,被两期方解石充填,马五⁶亚段,埋深3 053.00 m,大1-566井,岩心照片;e. 网状裂缝发育,方解石充填,马五⁶亚段,埋深3 039.10 m,DK12-FP8井,铸体薄片;f. 角砾支撑白云岩,角砾间为混有黏土的白云石砂,角砾分选差,马五⁶亚段,埋深3 052.30 m,石401井,铸体薄片;g. 角砾支撑白云岩,注意角砾中的纹层,为同一层垮塌的产物,杂乱分布,马五⁶亚段,埋深2 195.80 m,察1井,岩心照片

图7 鄂尔多斯盆地大牛地区块马家沟组马五⁶亚段岩相对比Fig. 7 Lithofacies correlation of the 6th submember of the Ma 5 Member (M5⁶), Daniudi block, Ordos Basin

量的沿层面张开的水平缝及网状缝(图5,图6d,图6e),特别是在薄层含黏土的白云岩中。在古地貌高部位的马五⁶⁻¹⁰亚段和马四段出露区,淡水下渗后,沿着白云岩渗透层或水平缝流动,并发生溶蚀,形成不同尺度的溶蚀孔洞。马五⁶⁻¹⁰亚段中形成裂纹镶嵌角砾岩、角砾支撑白云岩(图6f,g),角砾之间充填原地溶解形成的混有黏土的白云石砂,这些特征均表明其为表生期岩溶而非同生期的岩溶。非承压水岩溶形成的角砾岩与承压水岩溶形成的角砾岩之间区别有:①前者存在大量复成分角砾岩,而后者角砾成分往往单一;②前者存在较多的来自上古生界的陆源碎屑和炭屑,而后者几乎不可见(图6a,b);③前者形成的角砾岩颜色以灰黑色为主,而后者的颜色更多表现为黑色,反映出承压水岩溶处于还原成岩环境;④前者黏土矿物中存在高岭石,而后者无高岭石。

马家沟组顶面的沟槽尚未下切至马五⁵亚段以下地层段并形成泄水区,如果没有断裂的沟通作用,承压水溶蚀产物将很难被及时带出。因此乌审旗古隆起周缘的断裂成为溶蚀产物向上被带出承压水溶蚀系统的通道。加里东期的这些断裂具有走滑性质,在断裂附

近裂缝发育,断裂和裂缝构成断缝带。相较于致密的白云岩,断缝带具有极高的渗透性,成为地下水最为活跃的区域,并最终形成古地貌高部位的淡水补给区。马五⁶⁻¹⁰亚段以及马四段中的淡水溶蚀区和乌审旗古隆起东侧断裂附近的排泄区,构成一个完整的岩溶体系(图8)。

承压水岩溶有3个特征:①在非断裂区域具有顺层性,岩性的控制作用明显,含石膏、含黏土和含灰质的白云岩地层易溶,形成溶控孔洞型储层,而致密的白云岩和灰岩地层难溶,为非储层;②在断裂发育区域具有穿层性,断裂和裂缝的控制作用明显,而岩性的控制作用相对不明显,与断裂伴生的裂缝、溶缝和溶洞发育,形成断控缝洞型储层;③承压水岩溶的底界反映岩溶的最大深度,自补给区向排泄区依次抬高,局部断层可能会增加承压水岩溶的深度。

4.2.2 孔隙型储层

孔隙型储层主要发育在海侵期形成的粉晶白云岩中,但在海退期的凝块石白云岩、藻砂屑白云岩中亦可发育。

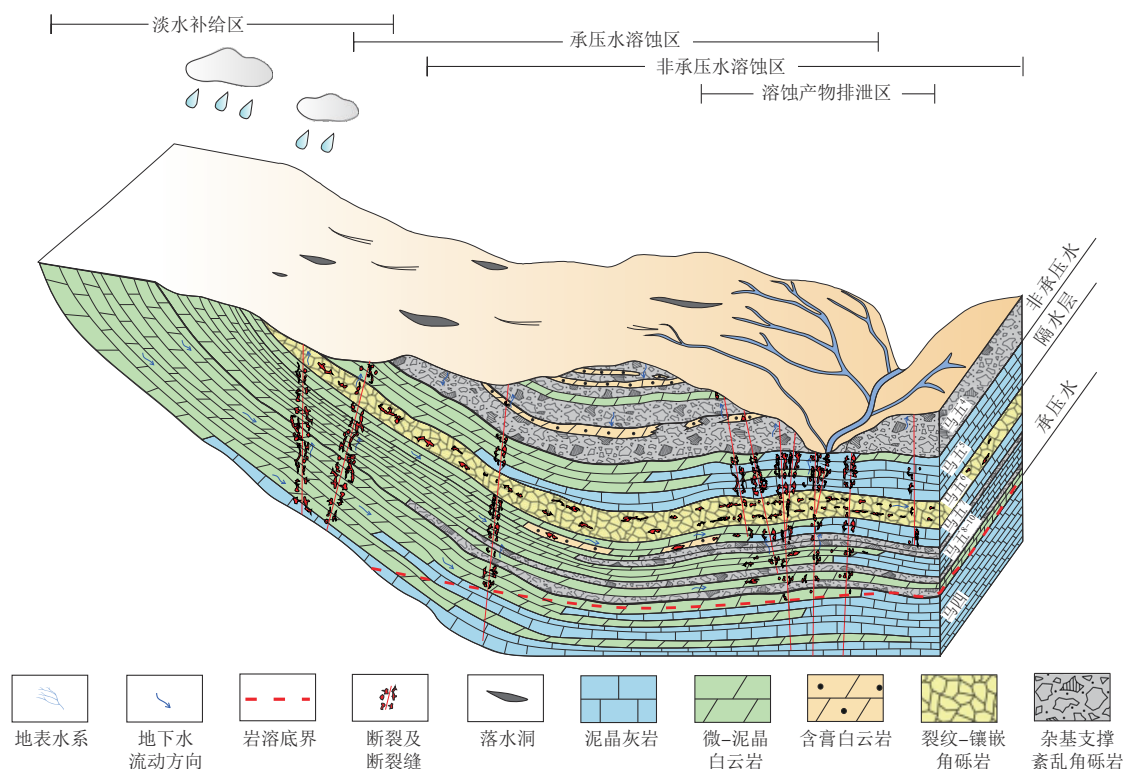


图8 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起周缘马家沟组孔洞型储层形成模式

Fig. 8 Diagram showing the generation model of vuggy reservoirs in the Majiagou Formation surrounding the Wushenqi paleo-uplift, Ordos Basin

1) 海侵期

以马五⁵亚段为例,典型的剖面结构自下而上为泥晶灰岩(底部见数厘米的叠层石灰岩和砂屑灰岩),粉晶云岩与泥晶灰岩的互层,向上过渡为微晶白云岩。代表早期快速海侵,水体盐度基本正常,沉积了正常的海相灰岩;随着海平面的下降,水体盐度增加,发生渗透回流白云石化,由于 Mg^{2+}/Ca^{2+} 相对较低,白云石的成核速度小于生长速度,形成晶形相对较好的粉晶白云岩;随着海平面的持续下降, Mg^{2+}/Ca^{2+} 逐渐升高,此时白云石的成核质点迅速增加,形成晶形差的微晶白云岩。因此,随着海平面的下降,总体上白云岩储层物性向上变差,平面上向东变好,最终过渡为灰岩非储层。其形成模式如图9所示。

2) 海退期

此时乌审旗古隆起对海水的遮挡作用明显,海水盐度增加,藻类繁盛,形成的白云岩以泥-微晶白云岩和凝块石白云岩为主,含少量的藻砂屑白云岩。泥-微晶白云岩晶粒细、晶形差,岩石致密。凝块石白云岩和藻砂屑白云岩总体致密无孔,但个别层段粒间孔和晶间孔发育^[37]。通过薄片资料可以看出,藻屑白云石化后致密,但藻屑之间的灰泥白云石化后,见少量的晶间孔(图4g,h)。对于凝块石白云岩,可见少量的类似

窗格孔的孔隙,窗格孔内充填白云石。尽管尚无法解释为什么只有部分藻屑白云岩和凝灰石白云岩发育孔隙,但它们构成了海退期的孔隙型储层。

5 古隆起对成藏的控制作用

据戴金星等的研究,典型煤成气的乙烷碳同位素值($\delta^{13}C_2$)最轻为-28.3‰,而典型油型气的 $\delta^{13}C_2$ 最重为-29.0‰,因此大于-28.0‰的常为煤型气,小于-28.5‰的常为油型气,介于两者之间的为混合气^[38-39]。另外研究认为 $\delta^{13}C_2$ 与 $\delta^{13}C_1$ 差值越小,成熟度越高^[40]。盆地中东部奥陶系马五⁶⁻¹⁰亚段和马四段天然气 $\delta^{13}C_1$ 普遍小于-35‰, $\delta^{13}C_2$ 介于-35‰~-20‰, $\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1$ 略偏正^[41-42](图10),天然气中普遍含 H_2S 。因此认为马家沟组中-下组合的气源既有来自上古生界的煤型气,又有来自下古生界的油型气,天然气可能从3个方向向储层内运移。

5.1 下古生界垂向向上运移的油型气

尽管盆地内马家沟组规模生烃遭受质疑^[43],但大量的研究成果表明马家沟组中的白云质黏土岩还是具备生烃潜力的,是中-下组合气藏天然气的重要来

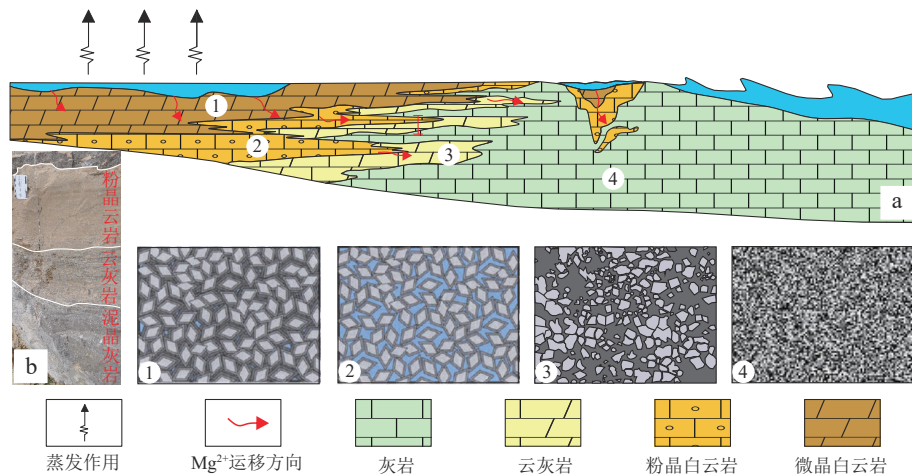


图9 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起海侵期白云岩储层形成机理及分布模式(以马五⁵亚段为例)

Fig. 9 Genetic mechanism and distribution pattern of dolomite reservoirs developed during transgressive period in the Wushenqi paleo-uplift, Ordos Basin (Take M5⁵ as an example)

a. 白云岩储层形成模式;b. 野外露头中向上变浅的准层序旋回,粉晶白云岩发育在旋回上部,位置如a图中的红色段,照片来自陕西天生桥剖面
① 过白云石化段,微晶白云岩;② 适当白云石化段,粉晶白云岩;③ 部分白云石化段,灰质白云岩段;④ 未白云石化的灰岩段

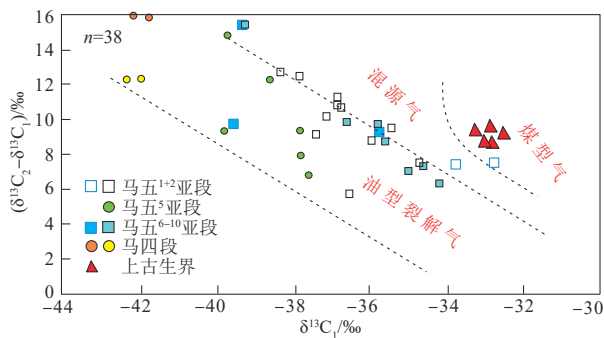


图10 鄂尔多斯盆地天然气成因的碳同位素解释图版

Fig. 10 Cross-plot of carbon isotope for interpretation of natural gas origin in Ordos Basin
(□, ●, ▲ 来自参考文献[41-42].)

源^[37, 44]。岩心中见溶蚀孔洞和裂缝中存在残留的沥青,方解石胶结物中普遍见沥青包裹体;米脂洼陷的米探1井在膏盐层下的马四段获高产气流,压力系数达1.5^[45],均表明马家沟组具有生烃潜力。马家沟组形成的天然气可沿乌审旗周缘断裂带向上运移。

5.2 上古生界垂向向下运移的煤型气

乌审旗古隆起周缘形成的一系列断裂,在燕山期再次活化,形成北西和北东向交错发育的走滑断裂和挠曲破裂系统,为上古生界的天然气垂向运移提供了有效通道。上古生界的煤型气成为马家沟组上组合的主要气源,同时也是中-下组合的重要气源。以乌审旗隆起东侧大牛地气田为例,已发现的中-下组合气藏多分布在这些断裂和挠曲带上,距奥陶系顶部不整

合面最大距离达600 m,说明断裂系统可作为良好的输导通道,促进上古生界煤型气和下古生界油型气运移到深部储层中。

5.3 上古生界侧向运移的煤型气

加里东运动使中央古隆起上马五⁵⁻¹⁰亚段和及马四段直接位于上古生界的煤系地层之下,形成东西方向上40~110 km宽的供气窗口^[12]。一方面,上古生界的煤型气可以沿古隆起西侧的马五⁵⁻¹⁰亚段和马四段渗透层自西向东运移;另一方面,古隆起上由于马家沟组剥蚀地层较多,垂向应力减小,发育大量的水平缝(图5,图6d—e),这些水平缝可构成天然气运移的优势通道。晚侏罗世—早白垩世,由于盆地地温梯度急剧升高,不管是下古生界的油型气还是上古生界的煤型气均规模生成^[46]。此时西倾的构造背景利于上古生界煤型气通过供气窗口向东运聚。

马家沟组已发现气藏主要有:①马五¹⁺²亚段和马五⁴亚段受岩溶古地貌和物性控制的岩性气藏;②马五⁵⁻⁷亚段受物性和构造控制的岩性-构造气藏。而乌审旗古隆起东侧的断裂沟通了纵向上多个层位的不同类型储层,在马五⁵⁻¹⁰亚段中形成数十米厚的断控缝洞储集体,该类储层叠加在区域分布的岩溶储层和孔隙型储层上,3个方向运移的天然气向断裂附近运移,由于物性的差异形成侧向遮挡,最终在断裂附近富集成藏。因此古隆起东侧气藏具有“三向供烃、断控成储、立体成藏”的特征。成藏模式如图11所示。

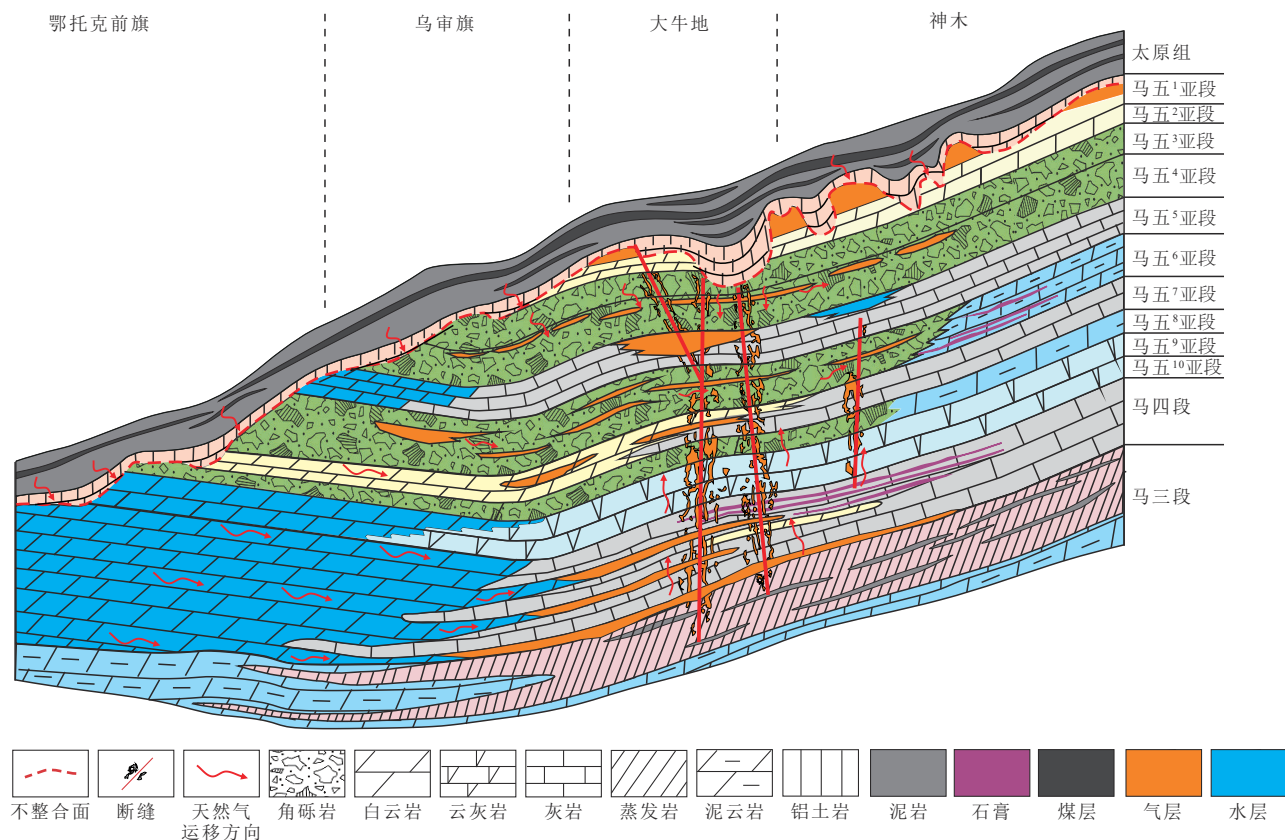


图11 鄂尔多斯盆地乌审旗东侧马家沟组成藏模式

Fig. 11 Gas accumulation model of the Majiagou Formation to the east of Wushenqi paleo-uplift, Ordos Basin

6 结论

1) 乌审旗古隆起经历了5个演化阶段:中元古代—新元古代的首次隆升;寒武纪的水下低隆沉积阶段;早奥陶世的第二次隆升;中奥陶世的水下低隆沉积阶段;加里东期—海西期的古隆起周缘断裂复活阶段。古隆起周缘的断裂在早奥陶世之前为逆断层,在中奥陶世—石炭纪为走滑断层。

2) 古隆起东侧主要发育两种类型储层,即岩溶缝洞型储层和白云岩孔隙型储层。孔洞型储层形成于加里东期,分为马五⁵亚段以上的非承压水溶蚀和马五⁵亚段以下的承压水溶蚀。承压水溶蚀系统中的淡水来自加里东期古隆起西侧的马五⁵⁻¹⁰亚段和马四段暴露区,孔隙水沿渗透层和水平缝运移并发生溶蚀,溶蚀产物在古隆起周缘的断裂发育区向上排出,与断裂相关的承压水溶蚀增大了岩溶的深度和范围。

3) 对于白云岩孔隙型储层,在古隆起及其周缘主要发育海侵期的晶粒白云岩储层和海退期的凝块石白云岩、藻屑白云岩储层。

4) 燕山期生烃达到高峰,活化的断裂沟通了垂向

上的上古生界煤型气和下古生界油型气;乌审旗古隆起西侧40~110 km宽的马五⁵⁻¹⁰亚段—马四段的“供烃窗口”直接位于煤系烃源岩之下,生烃高峰期西低东高的构造格局促使了天然气向东运移,古隆起东侧断裂发育带具有“三向供烃、断裂控储,立体成藏”的特征。

致谢:谨以此文庆祝在中国石油地质研究中作出卓越贡献的李德生先生百岁华诞!感谢先生“严谨治学,探无止境”的科学家精神一直激励着我们不断前行。

参 考 文 献

- [1] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 乐山—龙女寺古隆起震旦系一下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 1-7.
XU Chunchun, SHEN Ping, YANG Yueming, et al. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan—Longnüsi Paleohigh, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (3): 1-7.
- [2] 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 76-83, 90.
LYU Haitao, ZHANG Zhongpei, SHAO Zhibing, et al. Structural

- evolution and exploration significance of the Early Paleozoic palaeouplifts in Bachu-Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 76–83, 90.
- [3] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 多期叠加盆地古隆起控油规律[J]. *石油学报*, 2008, 29(4): 475–488.
- HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al. Accumulation and distribution of oil and gas controlled by paleo-uplift in poly-history superimposed basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(4): 475–488.
- [4] 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗-靖边古隆起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 391–400, 521.
- WEI Liubin, CHEN Hongde, GUO Wei, et al. Wushen-Jingbian paleo-uplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 391–400, 521.
- [5] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究进展[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 737–748.
- MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Advances in basic research on the mechanism of deep marine hydrocarbon enrichment and key exploitation technologies[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(5): 737–748.
- [6] 付金华, 孙六一, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- FU Jinhua, SUN Liuyi, FENG Qianghan, et al. *Petroleum geology and exploration of Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Ordos Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [7] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- HE Zixin. *Evolution of Ordos Basin and oil and gas*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [8] 冯增昭, 王英华, 陈继新, 等. 华北地台早古生代岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- FENG Zengzhao, WANG Yinghua, CHEN Jixin, et al. *Early Paleozoic lithofacies palaeogeography of the North China platform*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [9] 魏柳斌, 赵俊兴, 苏中堂, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合微生物碳酸盐岩分布规律及沉积模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1162–1174.
- WEI Liubin, ZHAO Junxing, SU Zhongtang, et al. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblage, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1162–1174.
- [10] 钟寿康, 谭秀成, 胡广, 等. 古地理格局对膏盐岩-碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制——以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段6亚段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 728–740.
- ZHONG Shoukang, TAN Xiucheng, HU Guang, et al. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: A case study of the sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 member in central-eastern Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 728–740.
- [11] 付玲, 李建忠, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下深层储层特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(11): 1548–1561.
- FU Ling, LI Jianzhong, XU Wanglin, et al. Characteristics and main controlling factors of Ordovician deep subsalt reservoir in central and eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(11): 1548–1561.
- [12] 包洪平, 黄正良, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下侧向供烃成藏特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 134–145.
- BAO Hongping, HUANG Zhengliang, WU Chunying, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potential of Ordovician pre-salt formations by lateral hydrocarbon supply in the central-eastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 134–145.
- [13] 时保宏, 刘亚楠, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起东侧奥陶系马家沟组中组合成藏地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 610–618.
- SHI Baohong, LIU Yanan, WU Chunying, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation in middle reservoir-source rock combination of the Ordovician Majiagou Formation on the east side of the paleo-uplift in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 610–618.
- [14] 王禹诺, 任军峰, 杨文敬, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组天然气成藏特征及勘探潜力[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(4): 29–37.
- WANG Yunuo, REN Junfeng, YANG Wenjing, et al. Gas accumulation characteristics and potential of Ordovician Majiagou reservoirs in the center-east of Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(4): 29–37.
- [15] 丁振纯, 高星, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层特征、成因及分布[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(1): 16–24.
- DING Zhenchun, GAO Xing, DONG Guodong, et al. Characteristics, genesis and distribution of the Ordovician pre-salt dolomite reservoirs in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(1): 16–24.
- [16] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(3): 350–356.
- HE Jiang, FANG Shaoxian, HOU Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Middle Ordovician Majiagou Formation of gas fields in the central Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(3): 350–356.
- [17] 张春林, 张福东, 朱秋影, 等. 鄂尔多斯克拉通盆地寒武纪古构造与岩相古地理再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 281–291.
- ZHANG Chunlin, ZHANG Fudong, ZHU Qiuying, et al. New understanding of the Cambrian palaeotectonic and lithofacies palaeogeography in the Ordos Craton Basin[J]. *Oil & Gas*

- Geology, 2017, 38(2): 281–291.
- [18] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 41–53.
- ZHOU Jingao, XI Shengli, DENG Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian–Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 41–53.
- [19] 白海峰, 包洪平, 李泽敏, 等. 鄂尔多斯盆地元古界长城系沉积特征及天然气成藏潜力[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 672–691.
- BAI Haifeng, BAO Hongping, LI Zemin, et al. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of Changcheng System in Ordos Basin in Proterozoic[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 672–691.
- [20] 陈思谦, 周义军, 郭庆, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界拗拉槽特征及勘探潜力[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 692–702.
- CHEN Siqian, ZHOU Yijun, GUO Qing, et al. Characteristics and exploration potential of the Mid-Late Proterozoic aulacogens in Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 692–702.
- [21] 刘正宏, 刘雅琴, 冯本智. 华北板块北缘中元古代造山带的确立及其构造演化[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 110–114.
- LIU Zhenghong, LIU Yaqin, FENG Benzhi. The establishment and tectonic evolution of Proterozoic orogenic belt in the north margin of North China plate[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(2): 110–114.
- [22] 张威, 闫相宾, 刘超英, 等. 鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式[J/OL]. 地质学报: 1–11[2022–09–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=DZXE20220511003&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022283.
- ZHANG Wei, YAN Xiangbin, LIU Chaoying, et al. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern of Ordos Basin[J/OL]. Acta Geologica Sinica: 1–11[2022–09–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=DZXE20220511003&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022283.
- [23] 侯贵廷, 李江海, 刘玉琳, 等. 华北克拉通元古代末的伸展事件: 拗拉谷与岩墙群[J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1366–1373.
- HOU Guiting, LI Jianghai, LIU Yulin, et al. Extensional events in the North China craton at the end of the Paleoproterozoic era: Depression valleys and dyke swarms[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(11): 1366–1373.
- [24] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746–768.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling orogen[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 746–768.
- [25] 李相博, 王宏波, 黄军平, 等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1043–1055.
- LI Xiangbo, WANG Hongbo, HUANG Junping, et al. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1043–1055.
- [26] 何登发, 包洪平, 孙方源, 等. 鄂尔多斯盆地中央古隆起的地质结构与成因机制[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 627–656.
- HE Dengfa, BAO Hongping, SUN Fangyuan, et al. Geologic structure and genetic mechanism for the central uplift in the Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 627–656.
- [27] 何发岐, 王付斌, 郭利果, 等. 鄂尔多斯盆地古生代原型盆地演化与构造沉积格局变迁[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 373–384.
- HE Faqi, WANG Fubin, GUO Ligu, et al. Evolution of prototype basin and change of tectonic-sedimentary pattern in Paleozoic, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(3): 373–384.
- [28] 徐兴雨, 王伟锋. 鄂尔多斯盆地隐性断裂识别及其控藏作用[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1754–1768.
- XU Xingyu, WANG Weifeng. The recognition of potential fault zone in Ordos Basin and its reservoir control[J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1754–1768.
- [29] 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五₁–五₄亚段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.
- HOU Fanghao, FANG Shaoxian, HE Jiang, et al. Distribution characters and comprehensive evaluation of Middle Ordovician Majiagou 5₁–5₄ submembers reservoirs in Jingbian Gas Field area, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(1): 1–13.
- [30] 丁晓琪, 张哨楠, 潘怀孝, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 210–217.
- DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, PAN Huaixiao, et al. Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 210–217.
- [31] 雷涛, 邓虎成, 吴冬, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系马家沟组中下组合沉积模式[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 523–538.
- LEI Tao, DENG Hucheng, WU Dong, et al. Depositional model of the Lower-Middle Ordovician Majiagou Formation in Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3): 523–538.
- [32] 张威, 丁晓琪, 李春堂, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗马家沟组四段碳酸盐岩储层分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 615–626.
- ZHANG Wei, DING Xiaoqi, LI Chuntang, et al. Distribution of paleo-karst reservoirs in Ma 4 member, Hangjinqi area, northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 615–626.
- [33] JAMES N P, JONES B. Origin of carbonate sedimentary rocks

- [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [34] 于洲, 丁振纯, 王利花, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1213-1224.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WANG Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1213-1224.
- [35] 周进高, 付金华, 于洲, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要储层类型及其形成机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 20-30.
- ZHOU Jingao, FU Jinhua, YU Zhou, et al. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 20-30.
- [36] 罗清清, 刘波, 姜伟民, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组五段白云岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 102-115.
- LUO Qingqing, LIU Bo, JIANG Weimin, et al. Diagenesis and pore evolution of dolomite reservoir in the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 102-115.
- [37] 胡安平, 沈安江, 张杰, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 943-956.
- HU Anping, SHEN Anjiang, ZHANG Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 943-956.
- [38] 戴金星, 李剑, 罗霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 18-26.
- DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, et al. Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 18-26.
- [39] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1-6.
- DAI Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 1-6.
- [40] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2/3): 1-40.
- DAI Jinxing. Hydrocarbon isotopic characteristics of natural gas and identification of various natural gases [J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2/3): 1-40.
- [41] 任军峰, 刘新社, 喻建, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下天然气成藏特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 125-140.
- REN Junfeng, LIU Xinshe, YU Jian, et al. Characteristics of natural gas accumulation and exploration target of the Ordovician subsalt in the central and eastern Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 125-140.
- [42] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(3): 423-432.
- KONG Qingfen, ZHANG Wenzheng, LI Jianfeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of Ordovician natural gas under gypsolyte in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(3): 423-432.
- [43] 王传刚. 鄂尔多斯盆地海相烃源岩的成藏有效性分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 253-263.
- WANG Chuangang. Availability analysis of oil pool forming for marine source rock in Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 253-263.
- [44] 涂建琪, 董义国, 张斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组规模性有效烃源岩的发现及其地质意义[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 15-24.
- TU Jianqi, DONG Yiguo, ZHANG Bin, et al. Discovery of effective scale source rocks of the Ordovician Majiagou Fm in the Ordos Basin and its geological significance [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(5): 15-24.
- [45] 何海清, 郭绪杰, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马四段天然气成藏新认识及勘探重大突破[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 429-439.
- HE Haiqing, GUO Xujie, ZHAO Zhenyu, et al. New understandings on gas accumulation and major exploration breakthroughs in subsalt Ma 4 member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 429-439.
- [46] 任战利, 于强, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 137-148.
- REN Zhanli, YU Qiang, CUI Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 137-148.

(编辑 张玉银)