

鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合特征及其对岩溶储层形成的意义

张军涛^{1,2}, 张玉银², 谷 宁^{1,2}, 金晓辉^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 刘四洪³, 贾会冲³, 杨佳奇⁴, 刘 玲^{1,2}, 高晓鹏^{1,2}

[1. 中国石化 深部地质与资源重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 3. 中国石化 华北油气分公司 勘探开发研究院, 河南 郑州 450006; 4. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083]

摘要:怀远运动(加里东期 I—II 幕)是鄂尔多斯盆地早古生代一次较大的构造活动,其影响仅次于加里东期(III 幕)—海西运动,存在长时间的沉积间断,在古隆起附近形成了较为有利的岩溶储层。怀远运动不整合面在乌审旗隆起东北侧表现为奥陶系马家沟组一段与寒武系三山子组之间的平行不整合接触。不整合面上、下均为碳酸盐岩地层,但在测井电性、岩石矿物、元素以及同位素分析上都存在很大的差异。三山子组为细晶白云岩,在测井响应上具有低伽马值、高电阻率的特征,发育不规则状溶蚀孔隙,是岩溶储层发育段。三山子组储层多属于相对高能的近隆浅滩、正常海水环境,白云岩作用为浅埋藏期渗透回流白云岩化。马家沟组一段是怀远运动后的首套沉积地层,由于靠近乌审旗古陆,岩性复杂,呈现出膏—云—泥—砂混杂沉积的特征,沉积时虽然也属于海相环境,但其与三山子组沉积时相比已发生了较大变化,属于海侵早期靠近古陆的混积潮坪沉积环境,气候相对于干旱,以海源碳酸盐沉积为主,又常有间歇性的陆源碎屑补给,白云岩则是准同生期萨布哈白云岩化作用的产物。三山子组储层受相对高能原始相带以及怀远运动相关白云岩化作用和岩溶作用共同控制,储层多为白云岩化作用和表生岩溶作用叠加形成,分布于乌审旗隆起、镇原隆起和吕梁隆起附近。

关键词:不整合面;岩溶储层;三山子组;怀远运动;乌审旗隆起;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Unconformity characteristics of Huaiyuan movement in the northeast of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin and its implications for karst reservoir generation

ZHANG Juntao^{1,2}, ZHANG Yuyin², GU Ning^{1,2}, JIN Xiaohui^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, LIU Sihong³, JIA Huichong³,
YANG Jiaqi⁴, LIU Ling^{1,2}, GAO Xiaopeng^{1,2}

[1. Key Laboratory of Deep Geology and Resources, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Institute of Exploration and Development, Huabei Oil/Gas Branch Company, Zhengzhou, Henan 450006, China; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Huaiyuan movement during the first and second episodes of the Caledonian was a major tectonic activity in the Early Paleozoic Ordos Basin, featuring long-term sedimentary hiatus and forming a more effective karst reservoir near the paleo-uplift, with the impact second only to the Caledonian (the third episode) - Hercynian movement. To the east side of Wushenqi paleo-uplift, the first member of the Ordovician Majiagou Formation (Ma 1 Member) was in parallel, unconformable contact with the Cambrian Sanshanzi Formation as the result of Huaiyuan Movement, and on either side of the unconformity were carbonate strata with great differences in terms of electrical logging properties, mineral, elemental and isotopic compositions. The Sanshanzi Formation was of fine-crystalline dolomites with irregular dissolved pores and karst reservoirs. The well logging response shows low gamma value and high resistivity at the interval. The reservoirs of the formation were mostly deposited in relatively high-energy shoals near the paleo-uplift with normal seawater, and experienced reflux dolomitization at shallow burial stages. The Ma 1 Member is the first interval of sediments after the Huaiyuan movement, featuring complex lithology and mixed deposition of anhydrite, dolomite, mud and sand due to its proximity to

收稿日期:2022-07-16;修订日期:2022-11-15。

第一作者简介:张军涛(1981—),男,博士、高级工程师,碳酸盐岩储层地质。E-mail: zhangjt.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010201);国家自然科学基金基金项目(42072177)。

the Wushenqi paleo-land. In terms of the depositional setting, the Ma 1 member was of marine type, that is, mixed tidal flat near the paleo-land in the early transgression period, though with great difference from the Sanshanzi Formation. The climate was relatively arid during its deposition, and the deposits were dominated by marine carbonates with intermittent terrigenous clastic supply. Its dolomite was a result of enecontemporaneous sabkha dolomitization. Controlled by both the primary facies belt with relatively high energy and the dolomitization as well as karstification related to the Huaiyuan movement, the reservoirs in the Sanshanzi Formation were mainly formed by a combination of dolomitization and epigenetic karstification and are widely seen in the vicinity of Wushenqi, Zhenyuan and Lyuliang paleo-uplifts.

Key words: unconformity surface, karst reservoir, Sanshanzi Formation, Huaiyuan movement, Wuzheng paleo-uplift, Ordos Basin

引用格式:张军涛,张玉银,谷宁,等.鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合特征及其对岩溶储层形成的意义[J].石油与天然气地质,2023,44(1):101-109. DOI:10.11743/ogg20230108.

ZHANG Juntao, ZHANG Yuyin, GU Ning, et al. Unconformity characteristics of Huaiyuan movement in the northeast of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin and its implications for karst reservoir generation[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 101-109. DOI: 10.11743/ogg20230108.

岩溶储层是碳酸盐岩油气藏中最重要的储层类型之一^[1],一直是碳酸盐岩储层研究的热点,塔河油田、威远气田、安岳气田以及顺北油气田等海相大型油气田就属于岩溶储层^[2-5]。岩溶储层的发育与分布受不整合面控制^[6-7]。

加里东期Ⅲ幕—海西期不整合控制并形成了鄂尔多斯盆地靖边气田等岩溶储层^[8-10]。对于这一期不整合相关的岩溶特征、发育机制以及分布规律,学者已做了大量细致的研究并认为含膏云坪、颗粒滩相和微生物丘是储层发育的有利相带^[11-15],古地貌中的残丘是储层发育的有利部位^[16],而差异性充填作用则是影响储层质量的重要因素^[17]。

鄂尔多斯盆地早古生代内部除了加里东期(Ⅲ幕)发育不整合之外,还存在与怀远运动(加里东期Ⅰ幕、Ⅱ幕)和蓟县运动等相关的大型不整合^[18-19]。其中,怀远运动相关不整合广泛发育于华北全区^[20],开始于张夏组沉积末期,结束于马家沟组沉积早期,持续时间约为30 Myr^[21],其成因可能与全球性的海平面下降以及秦岭—祁连板块的俯冲有关^[22]。此次不整合诱发了广泛发育的白云岩化作用及岩溶作用,因此可以发现在盆地内的一些钻井和野外剖面不整合面之下的三山子组和冶里组—亮甲山组中发育较好储层^[21]。

但是,关于怀远运动相关不整合面上、下特征差异和演化过程,以及岩溶储层形成与演化规律等问题,目前仍缺乏足够的关注。本文选取鄂尔多斯盆地乌审旗隆起附近的大牛地地区,分析典型钻井的怀远运动不整合面上下地层、岩石、储层和地球化学特征,对比怀远运动前、后的环境差异,并探讨怀远运动对储层的影响,试图最终建立怀远运动不整合面相关岩溶储层的形成模式。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪主要发育广袤的陆表海,沉积格局受镇原、伊盟、吕梁和乌审旗4个古隆起控制^[23-25]。乌审旗隆起又称为乌审旗—靖边隆起或横山凸起,位于鄂尔多斯盆地北部,伊盟隆起南侧,发育于寒武纪—马家沟组沉积早期。其核部表现为奥陶系马家沟组直接覆盖在中元古界长城系之上,缺失整个寒武系^[25],周缘则为寒武系各组依次向古隆起超覆。怀远运动在古隆起周缘表现得尤为明显,为对比研究该期的不整合特征提供了便利。

研究区位于乌审旗隆起东北侧,怀远运动不整合发育较为明显(图1),下伏寒武系由西向东分布差异较大。如在东部的D78井中,寒武系发育较全,而在西北部以及南部的D67井和E4井,缺失徐庄组和毛庄组,张夏组直接覆盖在基底之上;西南部处于乌审旗隆起的核心部位,如D124井则缺失整个寒武系,上覆马家沟组直接超覆在长城系基底(图2)。而上覆的马家沟组在研究区内分布较为稳定,超覆在寒武系之上。

2 不整合特征

2.1 地层特征

怀远运动不整合为近平行不整合,但在华北不同地区中,地层之间的接触关系却存在明显差异,反映了怀远运动启动和持续时间的不一致。在华北东北部的燕辽地区表现为马家沟组与亮甲山组接触,而在东南部的徐淮地区表现为马家沟组与三山子组接触^[26-27]。位于

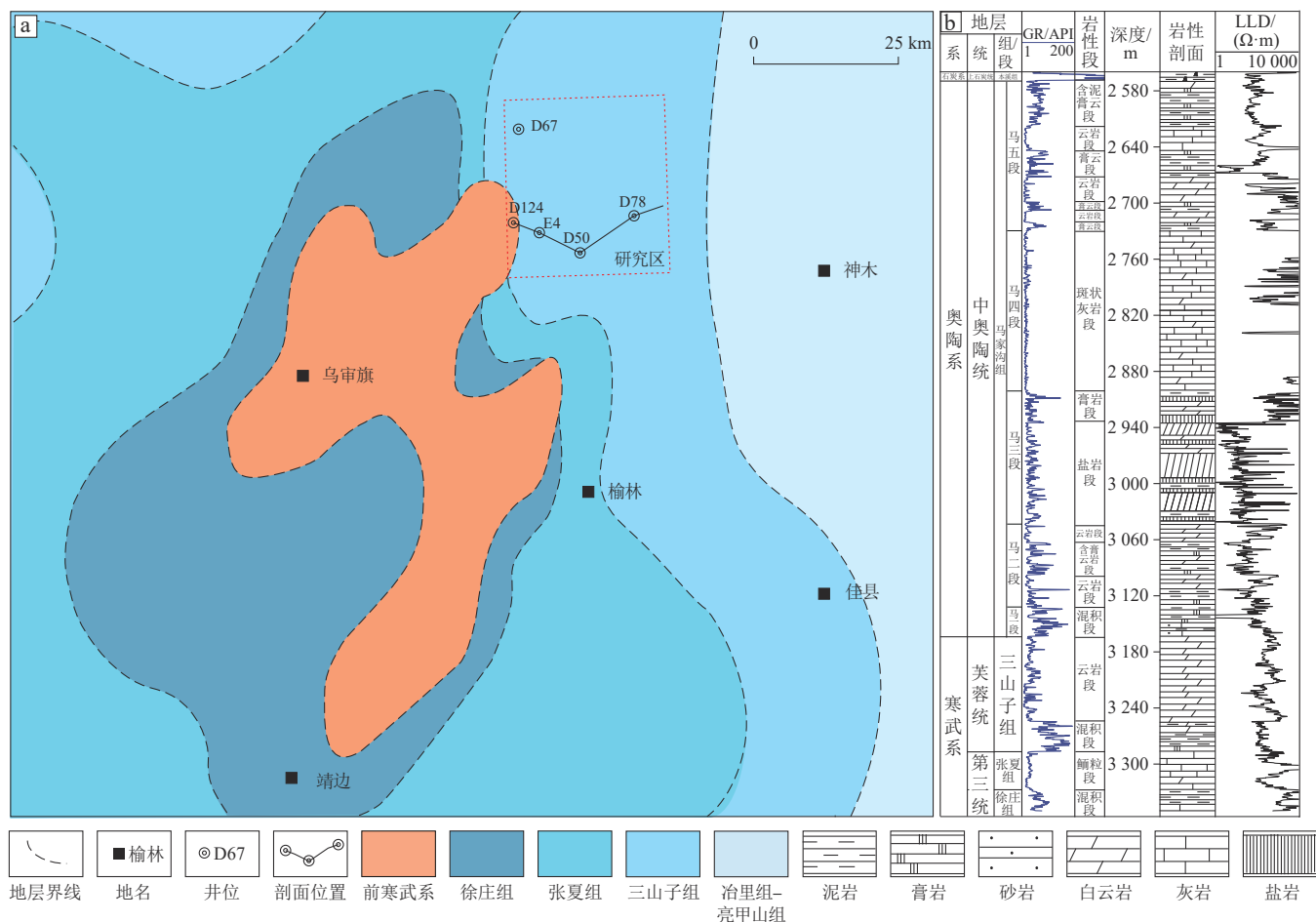


图1 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起附近前马家沟组古地质图(a)及地层柱状图(b)

Fig. 1 Paleo-geology map (a) and stratigraphic composite column (b) of the Majiagou Formation near the Wuzhengqi paleo-uplift in the Ordos Basin

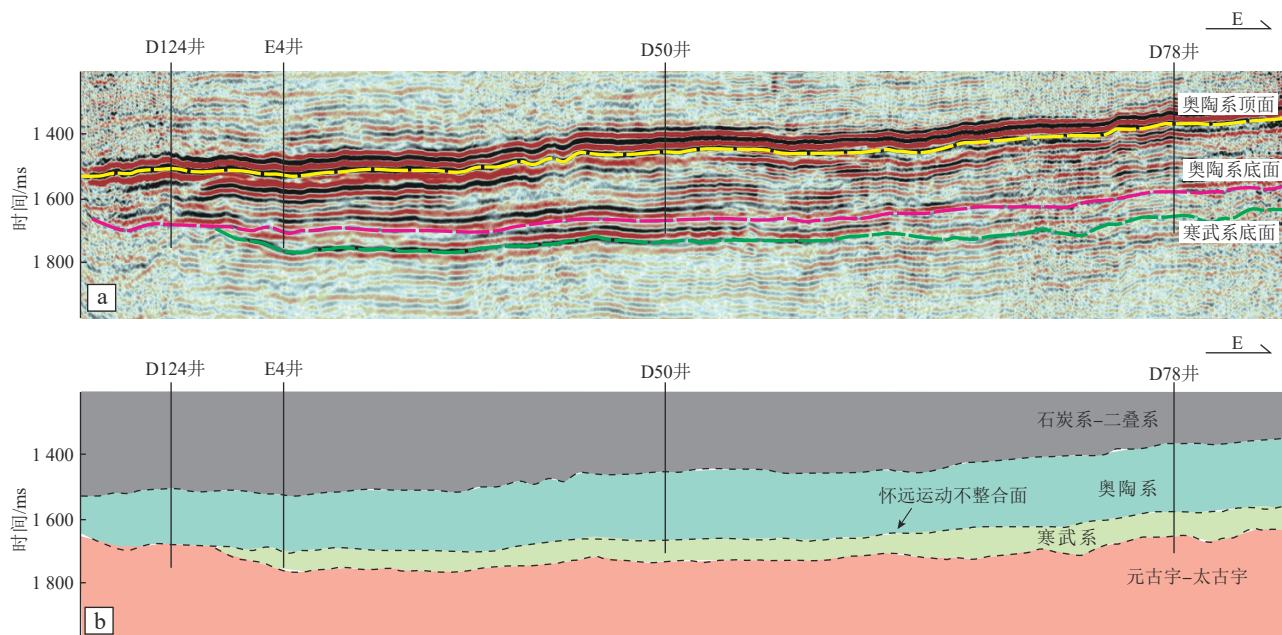


图2 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东侧地层接触关系(剖面位置见图1)

Fig. 2 Stratigraphic contact relationship of the eastern Wuzhengqi uplift in the Ordos Basin (see the profile location in Fig. 1)

a. 过D124—E4—D50—D78井地震剖面; b. 过D124—E4—D50—D78井地质解释剖面

华北西部的鄂尔多斯盆地不整合面上、下地层接触也不尽相同:大部分地区为马家沟组和三山子组接触;古隆起周缘为马家沟组与张夏组、徐庄组甚至前寒武系基底接触;在盆地东南部,马家沟组与冶里组-亮甲山组接触^[19]。研究区大牛地除西南部外,大部分区域怀远运动不整合表现为马家沟组一段与三山子组接触(图1)。

2.2 岩石学特征

不整合面上、下地层虽然均以碳酸盐岩沉积为主,但岩性、测井响应差异很大,可能反映了怀远运动前、后沉积环境的显著变化。

不整合面之下的三山子组在研究区可分为两个岩性段:上部白云岩段和下部砂-泥-云混杂段。其中,上部的细晶白云岩在测井响应上具有平滑低伽马值、高电阻率的特征,是储层发育段(图3,图4,图5a—c)。

不整合面之上的马(马家沟组)一段是研究区经历怀远运动后的第一套沉积物。马一段总体上岩性复

杂,呈现出膏-云-泥-砂混杂特征:石英碎屑多呈圆-次圆状,含量较多时,表现为颗粒支撑,石英碎屑之间发育白云石、硬石膏和泥质胶结;当石英含碎屑量较少时,表现为杂基支撑,碎屑“悬浮”在碳酸盐岩之中。西部(靠近隆起区)石英碎屑含量较大,而东部(远离隆起区)含量变小。测井响应上,混杂段具有较高的GR值,呈锯齿状,中等电阻率值(图3,图4,图5d—f)。

2.3 地球化学特征

研究区怀远运动不整合面上、下的奥陶系马一段与寒武系三山子组在常量元素、微量元素、稀土元素和碳、氧同位素等方面也存在较大差异,也是怀远运动前、后沉积环境变化的响应。

2.3.1 常量元素

常量元素分析涉及 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 和 K_2O 等氧化物。沉积物中常量元素的含

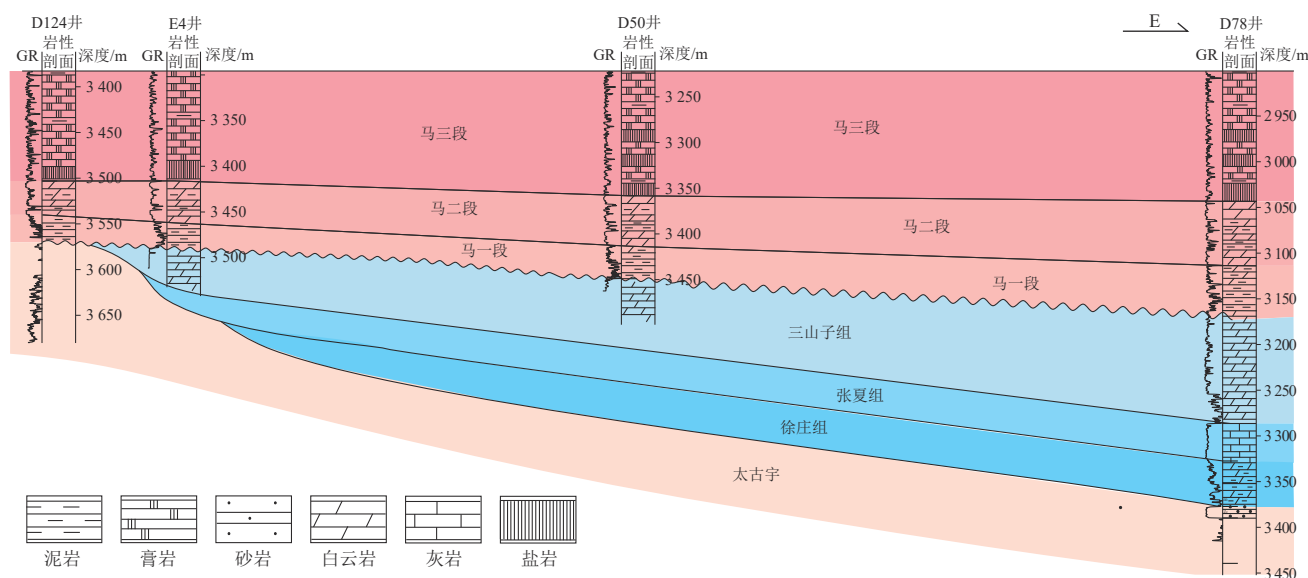


图3 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起东侧怀远运动不整合联井剖面(剖面位置见图1)

Fig. 3 Cross-well correlation of the unconformity resulted from Huaiyuan movement to the east of the Wushengqi paleo-uplift in the Ordos Basin (see Fig. 1 for the section location)

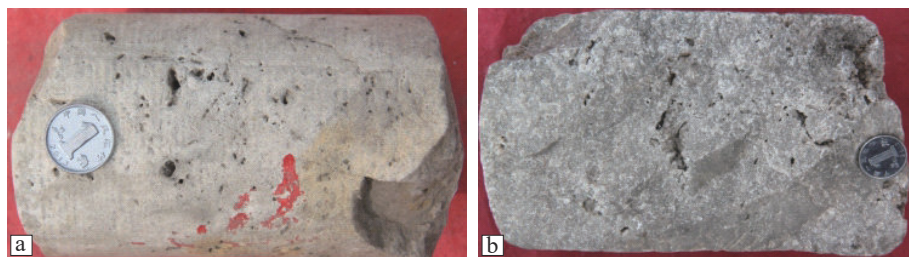


图4 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东侧三山子组岩心特征照片

Fig. 4 Characteristics of the cores from the Sanshanzi Formation to the east of the Wushengqi uplift in the Ordos Basin

a. 中-细晶白云岩,溶孔发育,埋深3376 m, E8井; b. 细晶白云岩,溶孔发育,埋深3493 m, E4井

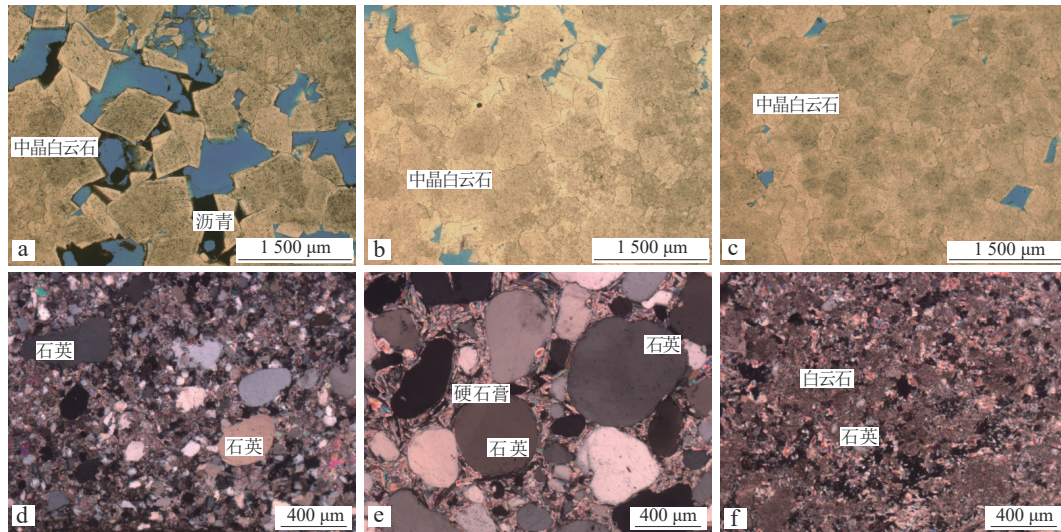


图5 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合面上、下岩石学特征镜下照片

Fig. 5 Petrological characteristics of samples above and below the unconformity resulted from Huaiyuan movement to the east of the Wuzhengqi uplift in the Ordos Basin

a. 中-细晶白云岩,溶孔发育,内有白云石和沥青充填,三山子组,埋深3 217 m,D78井,单偏光;b. 细晶白云岩,溶孔发育,可见颗粒幻影,三山子组,埋深3 493 m,E4井,单偏光;c. 细晶白云岩,溶孔发育,可见颗粒幻影,埋深3 492 m,E4井,单偏光;d. 云质石英砂岩,石英碎屑有一定磨圆,粒间为白云质胶结,马一段,埋深3 396 m,D67井,正交光;e. 膏质石英砂岩,石英碎屑磨圆较好,分选较差,粒间为硬石膏,马一段,埋深3 331 m,E8井,正交光;f. 含石英膏质白云岩,石英和硬石膏分布在粒间,马一段,埋深3 338 m,E8井,正交光

量与沉积物类型存在必然的相关性,元素的丰度明显受沉积物类型控制^[28-29]。其中, SiO_2 和 Al_2O_3 代表了陆源碎屑组分, CaO 和 MgO 则代表了碳酸盐岩组分。

大牛地地区三山子组碳酸盐岩具有非常高的 CaO 和 MgO 含量,分别为29.88%和22.35%,而 Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , K_2O 等含量都非常低(图6a),属于正常的海水碳酸盐岩,沉积时处于相对干净的正常盐度的海水环境,且基本无陆源淡水补给。

相对于三山子组的纯净碳酸盐岩,马一段中膏-云-泥混杂段中的 CaO 和 MgO 含量较低,分别为

24.78%和18.40%,而 Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , K_2O 等含量较高(图6a)。 SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ 含量分别为3.50%,1.00%和0.80%, TiO_2 和 K_2O 含量总体上略低,分别为0.79%和0.01%,反映了高含量的非碳酸盐陆源碎屑物质输入。高含量的 SiO_2 和 Al_2O_3 与马一段含有大量的石英碎屑和黏土矿物有关。

2.3.2 微量元素

相对常量元素而言,微量元素十分稳定。 Th , U , V , Ti , Zr , Sc , Co 等微量元素受到成岩作用影响很小,可

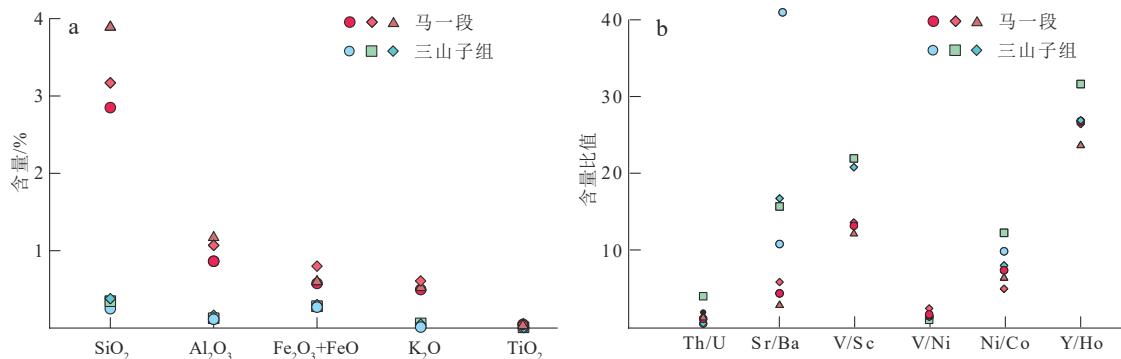


图6 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合面上、下常量元素-微量元素特征

Fig. 6 Characteristics of major-trace elements above and below the unconformity surface resulted from Huaiyuan movement to the east of Wuzhengqi uplift in the Ordos Basin

a. 常量元素含量对比;b. 微量元素含量比值对比
(图中的圆圈、菱形和三角分别代表不同钻井样品。)

以用来分析岩层的沉积环境。

Th/U 含量比值常作为氧化-还原条件的判别指标,在氧化环境中可达到8.00以上,而缺氧环境中为0~2.00。三山子组具有较低的Th/U比值,范围在0.39~3.96,对应弱还原环境。马一段较三山子组的Th/U比值略高,为1.02~1.29,但也属于相对还原环境(图6b)。

V 含量也可以作为水体的氧化-还原环境的判别指标。V 在缺氧或弱还原环境中会优先富集在沉积物中,通常用V/Sc、V/Ni和V/(V+Ni)含量比值来反映V的富集程度^[29-30]。马一段V/Sc比值在12.25~13.14,三山子组在23.90~37.86,均大于地壳平均值(7.90),基本反映了缺氧的水体环境(图6b)。三山子组较马一段的V/Sc比值更高,沉积环境更加缺氧。

Sr 主要富集在海水之中,Sr/Ba 含量比值能够反映古盐度的变化趋势。当Sr/Ba ≥ 1时为海相沉积,Sr/Ba < 1时为陆相沉积^[31]。高度咸化条件下的海相沉积通常表现为较高的Sr/Ba异常值。马一段Sr/Ba比值为2.91~5.81,为海水环境,未表现出高盐度异常值,这可能与陆源淡水的偶然补给有关。三山子组较马一段Sr/Ba比值高,分别为10.77~16.55,为典型的海水环境(图6b)。

Y/Ho 含量比值对沉积环境较为敏感,Y和Ho具有接近的离子半径,在地质环境中通常具有一致的地球化学行为。在矿物或硅质碎屑岩中Y/Ho比值通常保持为常数^[31],在海水中Y/Ho比值一般较高,Y/Ho比值常作为海相和陆相沉积物识别的标志。三山子组碳酸盐岩Y/Ho平均值为30.09,要高于马一段膏-云-泥混杂段的平均值26.62,同样说明三山子组沉积于典型的正常海水环境,而马一段沉积时期虽然也为海水环境,但有陆源物质的混入(图6b)。

2.3.3 稀土元素

由于在成岩过程中稀土元素(REE)具有稳定的地球化学特征,受后期改造作用很小,其含量和分布特征也常用来分析岩石的沉积环境。对不同组段岩石样品的稀土值,可以经球粒陨石平均值标准化后进行特征参数的分区研究。

马一段具有较高的稀土元素含量(Σ REE),代表地层中有陆源碎屑的混入,在配分形式上中稀土元素含量(Σ MREE)较高,轻稀土元素含量(Σ LREE)略高,重稀土元素含量(Σ HREE)略低,可能代表了相对缺氧的环境;而三山子组 Σ REE较低,代表了较为纯净的碳酸盐岩沉积,在配分模式上具有 Σ LREE略低、 Σ HREE略高的特征,大致与海水的配分形式接近。马一段和三山子组样品均未呈现出Eu异常,说明基本未受到高温热流体作用的影响(图7)。

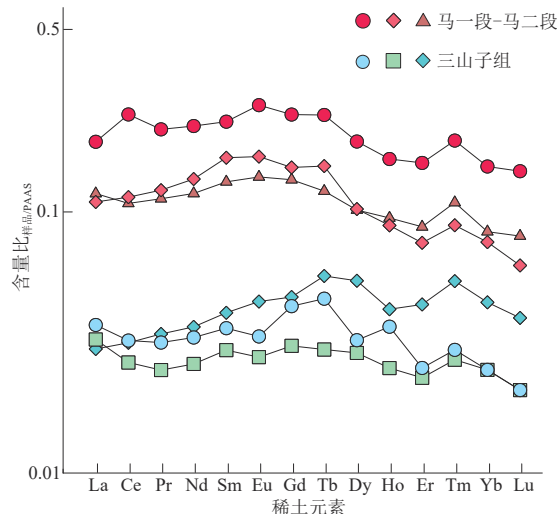


图7 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东侧怀远运动不整合面上、下稀土元素特征

Fig. 7 Characteristics of REE above and below the unconformity surface resulted from Huaiyuan movement to the east of the Wushenqi uplift in the Ordos Basin
(图中圆圈、菱形和三角分别代表不同钻井样品。)

2.3.4 白云石有序度与碳、氧同位素

三山子组白云岩具有较高的有序度(0.95~0.97),说明白云石结晶程度较好,生成时间较慢,多形成于浅埋藏条件下。碳同位素值($\delta^{13}\text{C} = 0.70\text{‰} \sim 1.10\text{‰}$)相对较高,与同期海水相近,说明白云岩化流体可能来源于海水,而相对较低的氧同位素值($\delta^{18}\text{O} = (-6.30\text{‰} \sim 7.20\text{‰})$),反映了其成岩环境处于浅埋藏期。

马一段白云岩具有较低的有序度(0.79~0.87),说明白云石晶体的生成时间相对较快。 $\delta^{13}\text{C}$ 相对略低,在 $-2.20\text{‰} \sim -0.60\text{‰}$,与全球大范围的海退事件相一致,与三山子组沉积环境不同。 $\delta^{18}\text{O}$ 相对略高,在 $-6.50\text{‰} \sim -5.60\text{‰}$,与海侵早期相对干旱的蒸发环境下的浓缩海水相一致。

3 不整合控储作用

怀远运动相关白云岩化作用和岩溶作用共同控制并形成了不整合面之下的优质碳酸盐岩储层。储层受怀远运动不整合面影响较为明显,仅发育在三山子组上部白云岩段,而在下部砂-泥-云混杂段基本不发育。储层岩石类型主要为细晶白云岩,在岩心上可见较大的溶蚀孔洞,最大溶孔孔径可达3 cm。在显微薄片上,白云石为细晶、他形-半自形结构。储集空间主要为不规则状的溶孔、溶洞,孔隙内有少量的粗晶白云石、硬石膏、石英、沥青和黏土矿物充填,面孔率最高可达17.54%,实测孔隙度可达6.78%(图5)。测井解

释得出的平均孔隙度为3.20%,最高可达5.00%。

3.1 沉积环境

三山子组沉积时期为典型的正常盐度海水环境。岩性为纯净的碳酸盐岩,具有较低的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量, Sr/Ba 和 Y/Ho 含量比值也印证了干净的海水环境,同时 Th/U 、 V/Sc 、 V/Ni 和 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 含量比值还说明沉积时处于相对稳定、缺氧还原、相对较深的水体环境。储层发育段能够见到颗粒幻影结构(图5c),说明其原始沉积环境可能为台内浅滩。而从沉积格局上看,近古隆起潮下带的水动能相对较高,适合发育浅滩相。因此综合认为,三山子组储层段沉积时多属于相对高能的近隆浅滩、正常海水环境。

马一段沉积时虽然也属于海相环境,但其沉积环境已与三山子组沉积时发生了较大的变化。从微量元素含量特征上看,其沉积时处于还原缺氧的海相环境;同时,较高的石英(SiO_2)和 Al_2O_3 含量说明有陆源碎屑的补给;地层中常见的硬石膏和略高的 $\delta^{18}\text{O}$ 代表着蒸发浓缩海水。从以上3个方面来看,可以推断马一段属于海侵早期靠近古陆的混积潮上带沉积环境,气候相对干旱,以海相碳酸盐沉积为主,又常伴有间歇性的陆源碎屑补给。

3.2 白云岩化作用

三山子组白云岩化作用与怀远运动引起的区域性海退有关^[27]。寒武纪末,怀远运动在华北板块的西部和南部开始启动,海水逐渐变浅,到早奥陶世末最终完全退出盆地。这种浅海水环境更适合后期白云岩化。因此鄂尔多斯盆地以及华北地区东南部徐淮地区三山子组已经发生完全白云岩化,而同时期华北地区东北部的崆山组、凤山组和长山组仍以灰岩沉积为主。三山子组白云岩是浅埋藏期渗透回流白云岩化作用形成的。如前节所述,白云岩具有典型的海水元素组成特征,其较低的稀土元素含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 与海水接近,说明三山子组中的白云岩化流体是海水。 $\delta^{18}\text{O}$ 略微偏负、较高的白云石有序度以及相对较大的白云石晶体都说明白云岩化发生在浅埋藏期。

马一段白云岩则是准同生期萨布哈白云岩化作用的产物。海相环境、白云石与石膏伴生、较小的白云石晶体以及较低的有序度,都是准同生期白云岩的特征,而微量元素和 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的干旱的高盐度海水环境,也与萨布哈环境相吻合。

3.3 表生期溶蚀作用(岩溶作用)

三山子组储层中的不规则状溶孔多是准同生期—表生期溶蚀作用形成的。三山子组沉积后,海水即开

始退出,并经历了30 Myr的风化暴露,剥蚀了部分地层,形成了大量的溶蚀孔洞,而储层段LREE亏损等特征也说明了大气降水的淋滤作用。储集空间形态上的不规则很可能是在颗粒滩准同生期,原始粒间孔隙经白云岩化作用调整和表生岩溶作用再溶蚀的结果,与马家沟组中-下组合储层,甚至四川盆地寒武系龙王庙组、长兴组-飞仙关组滩相储层成因相似。

储层在平面上分布受古隆起的影响。除乌审旗隆起外,在镇原隆起和吕梁古隆起附近也有三山子储层发育^[20]。究其原因,一方面,可能由于古隆起附近适合发育相对高能的沉积环境;另一方面,古隆起附近更适合岩溶储层的发育和保存。

3.4 储层演化

三山子组由表生阶段转入埋藏阶段后,白云岩发生重结晶作用,有助于孔隙的保持^[32],孔隙内有少量白云石充填(图8)。后续由于上覆膏盐地层的卤水下渗,造成部分石膏和石盐的充填从而破坏了储层的物

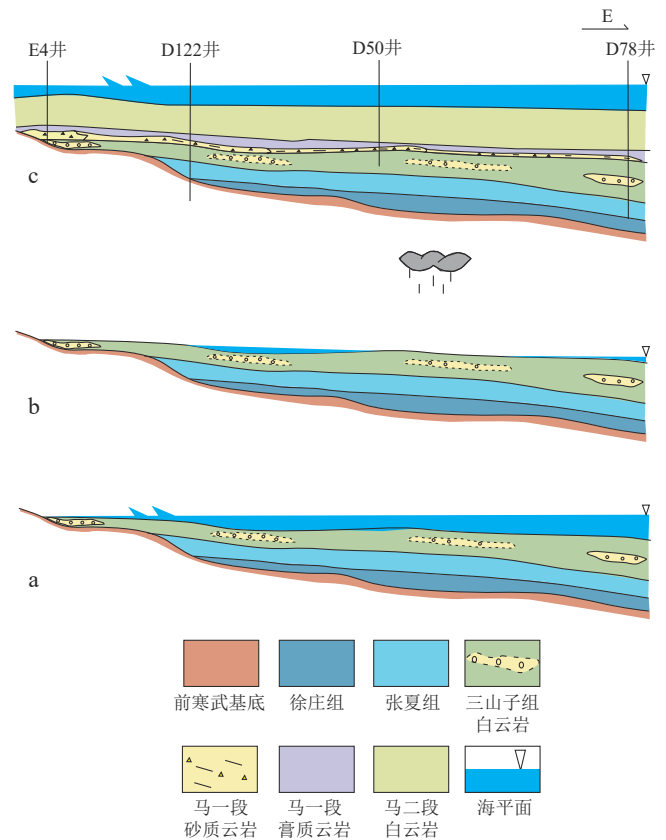


图8 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东侧岩溶储层形成模式
Fig. 8 Formation model of karst reservoir in the eastern side of Wushenqi uplift in the Ordos Basin

a. 三山子组沉积时,靠近隆起的局部区域形成高能浅滩;b. 怀远运动时,三山子组发生浅埋藏白云岩化作用和岩溶作用;c. 马家沟组沉积时,三山子组白云岩发生重结晶作用,孔隙少量充填

性。由于马一段沉积时,大量陆源碎屑物质对其影响较大,石英等直接充填于矿物内部,进一步堵塞了原始孔隙(图4e)。且与三山子组不同,马一段未受岩溶作用影响,无法形成后期溶蚀孔隙,导致无法形成有效储层。在油气生成阶段,三山子组储层经历了油气充注过程,孔隙中可以发现残存有少量的沥青。

4 结论

1) 怀远运动不整合面在乌审旗古隆起东北侧大牛地地区主要表现为马一段与三山子组接触。不整合面上、下地层的岩性、测井响应和地球化学特征差异很大,其中三山子组上部主要为纯净碳酸盐岩沉积,代表了盐度较为正常的海水沉积,而马一段则为砂-泥-膏-云混杂,代表了盐度海侵早期相对干旱的蒸发环境,说明了在怀远运动前、后沉积环境发生了剧烈的变化。

2) 怀远运动控制的白云岩化作用和岩溶作用形成了三山子组储层,储层岩性主要为溶蚀孔洞型白云岩,原始相带主要为近隆浅滩,关键成岩作用为表生期溶蚀作用。古隆起附近适合发育相对高能的环境,古隆起附近更适合岩溶储层的发育和保存。储层形成后经历了油气充注,是潜在的勘探目标层系。

参 考 文 献

- [1] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [2] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [3] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [4] 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.
- [5] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [6] 叶涛, 王清斌, 黄志, 等. 碳酸盐岩层序地层格架对岩溶储层的控制作用——以渤海西南海域下古生界为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 991-1005.
YE Tao, WANG Qingbin, HUANG Zhi, et al. Characteristic of sequence stratigraphic framework and its controls on reservoir: A case study of Lower-Paleozoic carbonate in southwest area of Bohai Sea[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 991-1005.
- [7] 毛先宇, 宋本彪, 田昌炳. 层序界面控制下差异早成岩作用对碳酸盐岩储层的影响——以伊拉克 R 油田 Mishrif 组为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 344-352.
MAO Xianyu, SONG Benbiao, TIAN Changbing. Effect of differential early diagenesis controlled by sequence boundary on carbonate reservoirs: A case study of Mishrif Formation in R Oilfield, Iraq[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 344-352.
- [8] 杨华, 刘新社, 张道锋. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 1-12.
YANG Hua, LIU Xinshe, ZHANG Daofeng. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 1-12.
- [9] 胡春桥, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 312-318.
HU Chunqiao, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Yanchang exploration area in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 312-318.
- [10] 何发岐, 徐兵威, 邵隆坎. 再论油气勘探开发哲学和创新性思维——纪念“中国陆上第一口油井”延1井[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 265-273.
HE Faqi, XU Bingwei, SHAO Longkan. On philosophy and innovative thinking of oil & gas exploration and development: Commemoration of the first oil well on land in China, Well-Yan 1 [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 265-273.
- [11] 李依林. 大牛地气田奥陶系马五7亚段储集空间类型及成因[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(6): 31-37.
LI Yilin. Reservoir space types and genesis of Ordovician M57 sub member in Daniudi Gas Field [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(6): 31-37.
- [12] 丁晓琪, 刘鑫, 祁壮壮, 等. 碳酸盐岩孔洞型储层分层次储集空间表征——以鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五7为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 689-696.
DING Xiaqi, LIU Xin, QI Zhuangzhuang, et al. Reservoir space characterization of vuggy carbonate reservoirs with multiple scales: A case study of Ma 5-7 interval, Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(4): 689-696.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 任海蛟, 吴伟涛, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马四段天然气成藏主控因素[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 27-33.
- REN Haijiao, WU Weitao, ZHAO Jingzhou, et al. Key controlling factors of natural gas accumulation in the Ordovician Ma member 4 in the central Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 27-33.
- [16] 张军涛, 金晓辉, 谷宁, 等. 鄂尔多斯盆地北部地区马家沟组岩溶储层的差异性和发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1159-1168, 1242.
- ZHANG Juntao, JIN Xiaohui, GU Ning, et al. Differences and development patterns of karst reservoirs in Majiagou Formation, northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1159-1168, 1242.
- [17] 张军涛, 金晓辉, 李淑筠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 684-690.
- ZHANG Juntao, JIN Xiaohui, LI Shujun, et al. Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 684-690.
- [18] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255-1269.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [19] 刘显阳, 魏柳斌, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯盆地西南部寒武系风化壳天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 13-21.
- LIU Xianyang, WEI Liubin, LIU Baoxian, et al. Characteristics of natural gas accumulation in the Cambrian weathering crust in the southwestern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 13-21.
- [20] 张春林, 姚泾利, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地深层寒武系碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 604-614.
- ZHANG Chunlin, YAO Jingli, LI Chengshan, et al. Characteristics of deep Cambrian carbonate reservoirs in the Ordos Basin and main control factors [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 604-614.
- [21] 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.
- [22] 刘化清, 李相博, 马玉虎, 等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面与深层天然气勘探领域[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 1-12.
- LIU Huaqing, LI Xiangbo, MA Yuhu, et al. The unconformity caused by the Huaiyuan movement and the deep natural gas exploration field in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 1-12.
- [23] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8.
- FENG Zengzhao, BAO Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 1-8.
- [24] 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(S2): 95-109.
- GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, FU Jinhua, et al. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 95-109.
- [25] 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗-靖边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.
- [26] 蔡本俊, 李席珍, 魏寿彭, 等. 邯邢地区中奥陶统蒸发岩特征及其对内生铁(硫)矿床的控制[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1987(2): 1-84.
- CAI Benjun, LI Xizhen, WEI Shoupeng, et al. Features of the Middle Ordovician evaporites and its control over the endogenic iron (sulfur) deposits in Han-Xing district, Hebei [J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences, 1987(2): 1-84.
- [27] 宋莫南. 对怀远运动的再认识[J]. 山东地质, 2001, 17(1): 19-23, 51.
- SONG Diannan. Re-recognition of Huaiyuan movement [J]. Geology of Shandong, 2001, 17(1): 19-23, 51.
- [28] RIBEIRO J, FLORES D. Occurrence, leaching, and mobility of major and trace elements in a coal mining waste dump: The case of Douro Coalfield, Portugal [J]. Energy Geoscience, 2021, 2(2): 121-128.
- [29] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record [J]. Marine Geology, 1993, 113(1/2): 67-88.
- [30] KIMURA H, WATANABE Y. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary [J]. Geology, 2001, 29(11): 995-998.
- [31] 陈松, 傅雪海, 桂和荣, 等. 皖北新元古界望山组灰岩微量元素地球化学特征[J]. 古地学报, 2012, 14(6): 813-820.
- CHEN Song, FU Xuehai, GUI Herong, et al. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 813-820.
- [32] 余敏, 沈安江, 吕玉珍, 等. 白云岩差异压实及对储层物性保存的控制作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 13-22.
- SHE Min, SHEN Anjiang, LYU Yuzhen, et al. Differential compaction of dolostone reservoir and its controlling effect on physical property preservation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 13-22.