

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

魏柳斌^{1,2,3,4}, 陈洪德^{1,2}, 郭玮^{3,4}, 严婷^{3,4}, 蔡郑红^{3,4}, 周黎霞^{3,4}

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018)

摘要: 基于钻井及地震地层对比剖面、系统性的寒武系厚度、寒武系各层段超覆尖灭线以及前奥陶纪古地质图等编图研究, 发现鄂尔多斯盆地早古生代除了发育伊盟隆起、吕梁隆起和中央古隆起外, 还发育乌审旗-靖边古隆起。乌审旗-靖边古隆起核部缺失整个寒武系, 周缘寒武系由老到新依次向古隆起超覆。进一步的古构造分析表明, 奥陶纪沉积期受寒武系乌审旗-靖边古隆起的继承性影响, 该区仍为低幅度的水下隆起, 对盆地中东部奥陶系盐下沉积与储层发育具有明显的控制作用。主要表现在3个方面: 一是乌审旗-靖边古隆起东、西沉积分异明显; 二是乌审旗-靖边古隆起、中央古隆起和吕梁隆起的共同障壁作用形成了盆地东部米脂盐洼; 三是乌审旗-靖边古隆起上发育浅水沉积特征的丘滩体等有利储集相带, 海退期则由于间歇性暴露而利于溶孔型储层的形成, 是奥陶系盐下天然气勘探的有利区带。

关键词: 颗粒滩; 微生物丘; 古隆起; 奥陶系; 寒武系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Wushen-Jingbian Paleo-uplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin

Wei Liubin^{1,2,3,4}, Chen Hongde^{1,2}, Guo Wei^{3,4}, Yan Ting^{3,4}, Cai Zhenghong^{3,4}, Zhou Lixia^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Research Institute of Exploration and Development under Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: A detailed study on stratigraphic correlation based on drilling data and of seismic sections, the Cambrian system thickness measurements, observation of superjacent pinch-out boundaries of intervals in the system and the pre-Ordovician paleo-geologic mapping of the Ordos Basin shows that, apart from the Yimeng and Lyuliang Uplifts as well as the Central Paleo-uplift, another uplift, the Wushen-Jingbian Paleo-uplift was also developed in the basin during the Early Paleozoic. Though completely absent from the core of the paleo-uplift, the Cambrian intervals are successively (from old to young) overlapping the uplift. Further paleo-structural analysis indicates that inherited from its Cambrian predecessor, Wushen-Jingbian was still a low-amplitude underwater uplift during the Ordovician sedimentary period and controlled the subsalt deposition and reservoir development in the central and eastern Ordos Basin. As a result, the uplift is of distinctively differentiated sedimentary facies in the east-west direction, and has played an indispensable role in joining the Central Paleo-uplift and Lyuliang Uplift to form the Mizhi Salt Depression in the east of the basin. Furthermore, with well-developed mound-shoal complexes that are typical of shallow-water deposition and prone to generate dissolved pore structures due to intermittent exposure during sea regression, the uplift is considered to be highly promising in terms of the Ordovician subsalt gas exploration.

Key words: grain shoal, microbial mound, paleo-uplift, Ordovician, Cambrian, Ordos Basin

收稿日期: 2020-05-16; 修订日期: 2020-12-01。

第一作者简介: 魏柳斌(1987—), 男, 博士研究生、工程师, 油气地质。E-mail: weilb_cq@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05004-006); 中国石油天然气集团公司重大专项(2016E-0514)。

国内外油气勘探证实,古隆起是油气勘探的重要目标,尤其是继承性古隆起中的油气藏具有多层系复合含气的特征^[1-2]。如中国四川盆地的川中古隆起,低幅隆起控制了震旦系灯影组岩溶储层及寒武系龙王庙组大面积丘滩体的形成和发育,发现了中国最大的整装气田——安岳气田^[3-4]。再如沙特阿拉伯的加瓦尔隆起,1940年发现了世界第一大油田——加瓦尔油田,产层为侏罗系的Arab组碳酸盐岩,1971年加深钻探又在三叠系Khuff组碳酸盐岩层系发现了加瓦尔大气田,后期又在石炭—二叠系及泥盆系发现了砂岩气藏^[5-6],均证实继承性古隆起是形成大型—超大型油气田的重要构造单元。鄂尔多斯盆地早古生代也存在“中央古隆起”^[7-9],虽未直接控制古生界天然气成藏,但对其周边地区的地层岩性及储层发育特征却起着重要的控制作用。围绕中央古隆起带附近马家沟组发育厚层白云岩体,具有极佳的物性条件,发育以晶间孔为主的白云岩储层^[10-18]。近期的钻探证实,鄂尔多斯盆地早古生代除了发育中央古隆起、伊盟隆起外,在寒武纪沉积期还存在“乌审旗—靖边古隆起”(图1),它对后续奥陶系的沉积及储层发育起着重要的控制作用。笔者基于钻井及地震地层对比剖面、系统性的寒武系厚度、寒武系各段地层超覆尖灭线以及前奥陶纪古地质图等编图,详细论述寒武系古隆起形成分布及确认依据,重点围绕继承性古隆起控制背景下,奥陶系马家沟组碳酸盐岩—膏盐岩体系发育的古构造背景及地层岩性分区特征,分析乌审旗—靖边古隆起对奥陶系盐下沉积、储层发育的控制作用,以期指导鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下碳酸盐岩领域的天然气勘探。

1 寒武纪古构造格局

1.1 古隆起形成与分布

早期研究证实,寒武纪鄂尔多斯地块主要发育三大古隆起:一是中央古隆起,位于鄂尔多斯盆地西南部环县—镇原一带,主轴呈南北向展布,形态似枣核状,中央古隆起核部前石炭系出露前寒武系,不同阶段形态特征略有差异,奥陶系中央古隆起的范围进一步扩大,演化成“L”型展布的古隆起,横亘南北^[7-9];二是吕梁隆起,位于鄂尔多斯盆地东部挠褶带的柳林—临县一带,盆地东部柳林三川河下古生界露头剖面显示寒武系沉积期仅发育晚寒武世三山子组沉积,缺失早—中寒武世地层,该古隆起呈近南北向展布;三是伊盟隆起,位于盆地北部,分布范围较广,多数学者认为伊盟隆起在中元古代长城纪沉积后即处于隆升

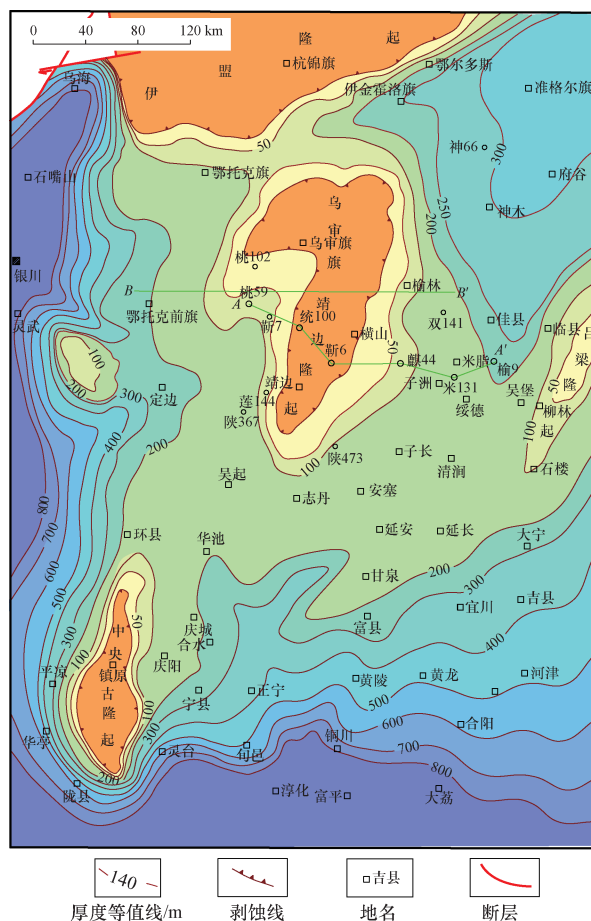


图1 鄂尔多斯盆地寒武系厚度

Fig. 1 The Cambrian system thickness in the Ordos Basin

A—A'绿线示图2剖面位置;B—B'绿线示图3剖面位置

状态^[19-22],核部前石炭系出露千里山群和乌拉山群基底变质岩系,局部发育长城系裂陷槽沉积,岩性以石英砂岩为主(图1)。

近期钻探资料揭示,鄂尔多斯盆地在寒武系沉积期,除了发育中央古隆起、伊盟隆起以及吕梁隆起外,还发育“乌审旗—靖边”古隆起。该古隆起位于盆地中部乌审旗—靖边地区,呈燕尾形态,一翼向靖边地区延伸,另外一翼向鄂托克前旗延伸。周缘寒武系向古隆起超覆减薄直至尖灭缺失,古隆起核部缺失整个寒武系,钻井约束寒武系缺失面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。古隆起上的中元古界长城系与奥陶系马家沟组直接接触,表明整个寒武系沉积期该古隆起一直处于隆升状态,直至奥陶纪马家沟期才开始接受沉积。

1.2 古隆起的确认依据

1.2.1 寒武系厚度变化

利用露头与钻井资料编制了鄂尔多斯盆地寒武系

厚度(图1)。鄂尔多斯盆地在寒武系沉积期形成了隆坳相间的古构造格局,伊盟隆起、乌审旗-靖边古隆起及中央古隆起均缺失寒武系,而吕梁隆起寒武系也明显较两翼变薄。鄂尔多斯盆地寒武系整体分布上具有“盆地边缘厚度大、盆地内部厚度较薄”的特点。盆地东北部神木、准格尔旗厚度约300 m,盆地西南缘最厚可达800 m,指示寒武系沉积期海水从盆地西南缘及东北部向鄂尔多斯台地内部逐渐海侵的演化过程。

1.2.2 钻井地层对比剖面

通过横穿古隆起的钻井地层对比剖面可以更直观地反映古隆起的形成、消亡时间及古隆起周缘地层展布规律。由乌审旗-靖边古隆起的東西向钻井地层对比剖面发现(图2),古隆起核部奥陶系马家沟组直接与中元古界长城系接触,其间缺失整个寒武系。从寒武系徐庄组开始,古隆起两翼开始接受沉积,伴随海平面的缓慢上升,古隆起周缘的寒武系由老到新依次向古隆起超覆直至尖灭缺失。其上覆的奥陶系马家沟组早期沉积的马一段、马二段也具有向古隆起超覆减薄的现象,表明乌审旗-靖边古隆起为同沉积古隆起。

1.2.3 地震剖面依据

由横切乌审旗-靖边古隆起的G12-05地震大剖面可见,寒武系向乌审旗-靖边地区逐渐减薄并尖灭缺失,奥陶系也显著较两侧减薄,地震预测靖西地区奥陶系厚约700 m,盆地东部厚度可达800 m,而乌审旗-靖边地区仅640 m(图3),证实奥陶系沉积期乌审旗-靖边地区仍为水下古隆起。从深部地震反射结构来看,长城系沉积期在靖边西侧发育裂陷槽,长城纪地层向乌审旗-靖边地区逐渐减薄并缺失,盆地东部地区整体缺失长城系沉积,寒武系与太古界直接接触。表明乌审旗-靖边古隆起发育于长城纪裂陷槽的边缘,它的形成可能与长城系裂谷边缘挤压反转隆升有关。

1.2.4 寒武系各层段超覆尖灭线分布

寒武系底面各层段超覆尖灭线是寒武系底部地层分布的总体轮廓,主要反映寒武纪从早到晚的地层超覆沉积特征,也可以间接反映古隆起的性质。由鄂尔多斯盆地寒武系层段超覆尖灭线可见(图4),吕梁隆起、伊盟隆起及乌审旗-靖边隆起周缘地层向古隆起地层年代依次变新,周缘寒武系依次向古隆起超覆,具有同沉积古隆起的特点;而中央古隆起周缘寒武系发育齐全,平面上寒武系剥蚀区位于底部毛庄组发育区,寒武系向古隆起剥蚀削截,说明中央古隆起可能形成

于寒武纪之后,早奥陶世怀远运动时期的可能性较大。

1.2.5 前奥陶纪古地质图

鄂尔多斯盆地前奥陶纪古地质图可以反映奥陶系沉积前寒武系顶部地层分布的全貌,也可在一定程度上反映寒武系沉积结束后的古地貌轮廓或地形起伏状况。由鄂尔多斯盆地前奥陶纪古地质图可见(图5),中央古隆起、乌审旗-靖边古隆起及伊盟隆起均缺失寒武系,古隆起周缘的寒武系向古隆起依次由新变老,乌审旗-靖边古隆起与中央古隆起在寒武纪末期渐趋连成一体,横亘于盆地中部,成为分割盆地东部和西部坳陷区的分水岭。

综合前奥陶纪古地质图及寒武系各层段超覆尖灭线范围,寒武系古隆起演化特征总体表现为:寒武纪早期古隆起主要发育于盆地北部,伊盟隆起、乌审旗-靖边古隆起及吕梁隆起连成一线,分割南北两大海域;到了寒武纪末期,随着中央古隆起的隆升,伊盟古隆起、乌审旗-靖边古隆起及中央古隆起南北连成一体,分割东西两大海域,反映出寒武纪构造格局由南北向构造向东西向构造的转换。

2 寒武纪古隆起对中东部奥陶系沉积的继承性影响

2.1 控制盆地东部米脂盐洼的分布格局

从奥陶系厚度可以看出,受盆地西南部中央古隆起、中部乌审旗-靖边古隆起、东部吕梁古隆起的三面夹持作用,在盆地东部奥陶纪马家沟期形成了一个三角洼陷带,即米脂盐洼。所在区受三大古隆起的共同障壁阻隔作用,致使马家沟组海退期古隆起大部分时间暴露地表,导致盆地东部米脂洼陷与广海长时间隔绝或海水循环不畅,水体盐度升高,形成厚层的石盐岩沉积(图6)。其中,马一段、马三段、马五⁶亚段是蒸发岩的主要发育期,马一段石盐岩分布面积约 $5.4 \times 10^4 \text{ km}^2$;马三段石盐岩分布面积约 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$;马五⁶亚段石盐岩分布面积约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图6)。其中,马一段石盐岩分布范围最广,面积最大,随着马家沟组振荡性海侵作用的不断推进,石盐岩逐渐向北收缩,石盐岩分布范围从马一期至马三期、再到马五⁶亚期依次缩小。从石盐岩分布范围可知,乌审旗-靖边古隆起、吕梁古隆起及中央古隆起对石盐岩分布具有明显的控制作用。石盐岩沉积边界西至乌审旗-靖边古隆起东侧的靖边-横山一带,东至吕梁隆起西侧柳林-临县一带,南至中央古隆起北侧的吴旗-富县一带。

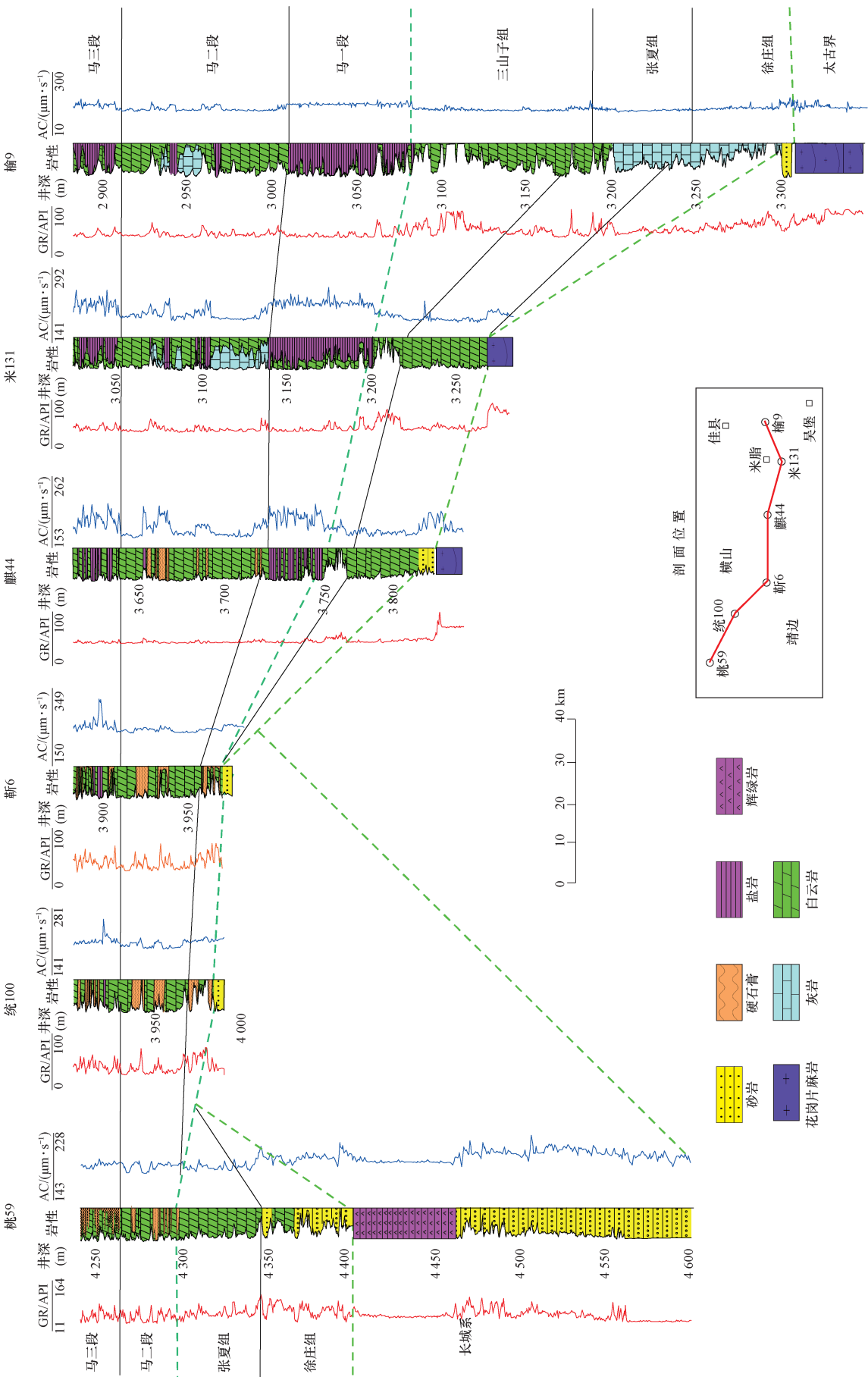


图2 鄂尔多斯盆地中部奥陶系-寒武系连井剖面 (剖面位置见图1所示A—A')

Fig.2 Well-tie cross-section of the Ordovician-Cambrian strata in central Ordos Basin (see Fig. 1 for the section location as shown in line A—A')

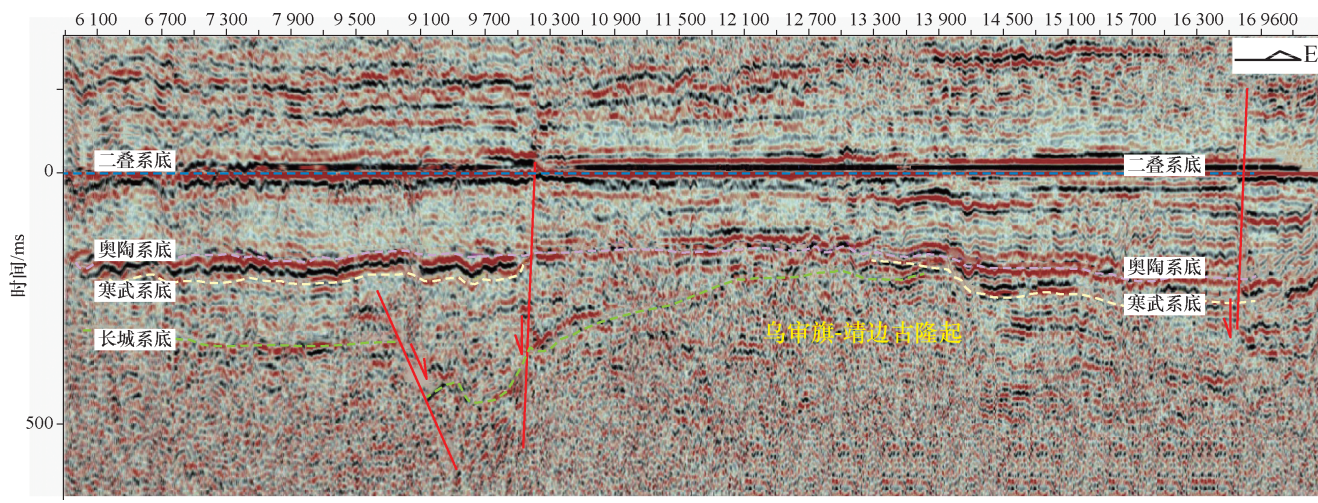


图3 鄂尔多斯盆地中东部地区东西向地震偏移时间剖面(剖面位置见图1B—B'所示)

Fig.3 Offset time profile of transmeridional stitching seismic line in central and eastern Ordos Basin (see Fig.1 for the section location as shown in line B—B')

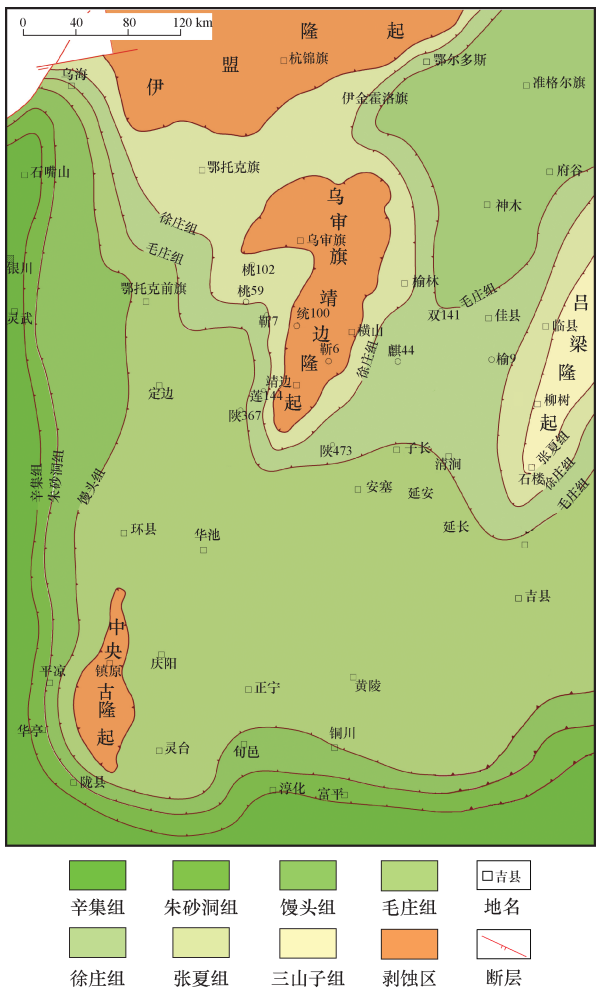


图4 鄂尔多斯盆地寒武系各层段超覆尖灭线分布

Fig.4 Distribution of overlapping pinch-out boundaries of the Cambrian in the Ordos Basin

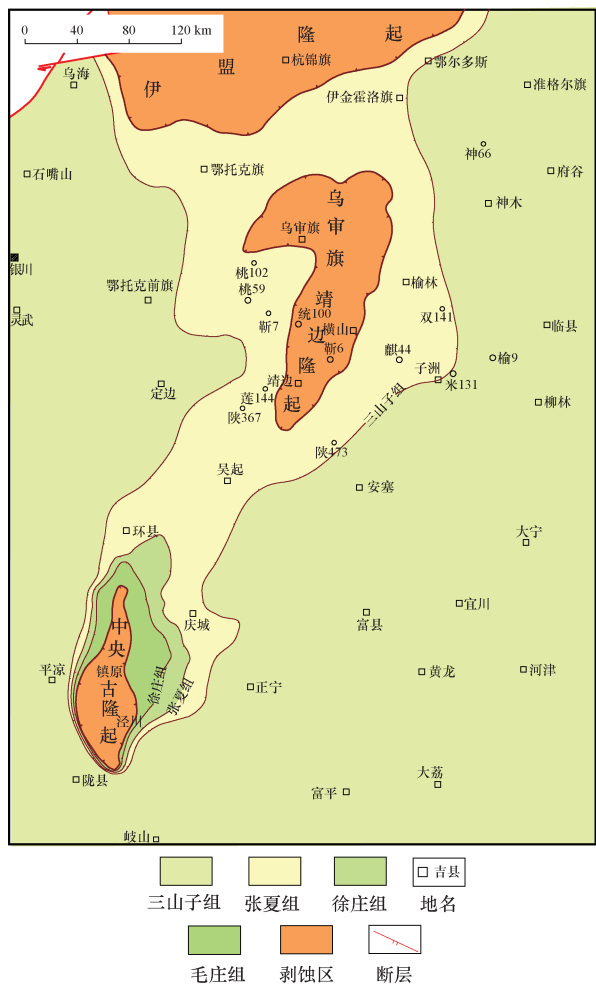
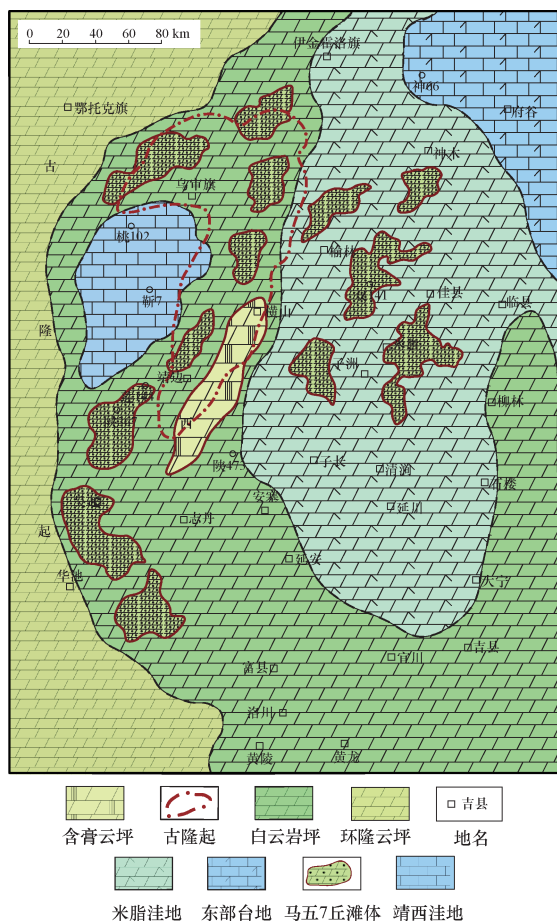


图5 鄂尔多斯盆地前奥陶纪古地质图

Fig.5 The pre-Ordovician paleo-geological map of the Ordos Basin

图8 鄂尔多斯盆地马五⁷亚段岩相古地理Fig. 8 Lithofacies paleogeography of the Ma 5⁷ Sub-member in the Ordos Basin

3 古隆起对奥陶系储层发育的控制作用

3.1 乌审旗-靖边古隆起海侵期发育丘滩体等有利储集相带

短期海侵层序的白云岩储层是夹于蒸发岩旋回的粉晶白云岩,其成因受短期海侵期形成的丘滩相沉积体控制,通常与局部地区古沉积底形的相对高部位密切相关。受寒武系乌审旗-靖边古隆起的继承性影响,该区在奥陶纪也基本处于相对隆起的地区,是一个间歇性暴露的水下古隆起,形成了一个宽缓的低幅隆起带,东西横亘几十公里,南北延绵上百公里,为大面积丘滩体的发育提供了有利的古地形条件,成为一个有利于丘滩体发育的区带(图8)。平面上丘滩体呈毯式、群带状围绕乌审旗-靖边古隆起大面积发育,储层以凝块石白云岩、颗粒白云岩为主(图11a,b),发育残余格架及溶孔型储层(图11d,e)。

纵向上受海平面升降控制,盆地中东部马家沟组发育碳酸盐岩-膏盐岩交互沉积,尤其是马五段发育次一级的海侵-海退旋回,马五⁷、马五亚段⁹等奥陶系盐下碳酸盐岩是夹于蒸发岩旋回中的短期海侵沉积。结合区域岩相古地理研究发现(图8),乌审旗-靖边古隆起在马五⁷、马五⁹亚期均处于潮上-潮间的浅水环境,局部可发育高能丘滩体沉积,经沉积后白云岩化作用,有利于形成丘滩型白云岩储层。横向上,乌审

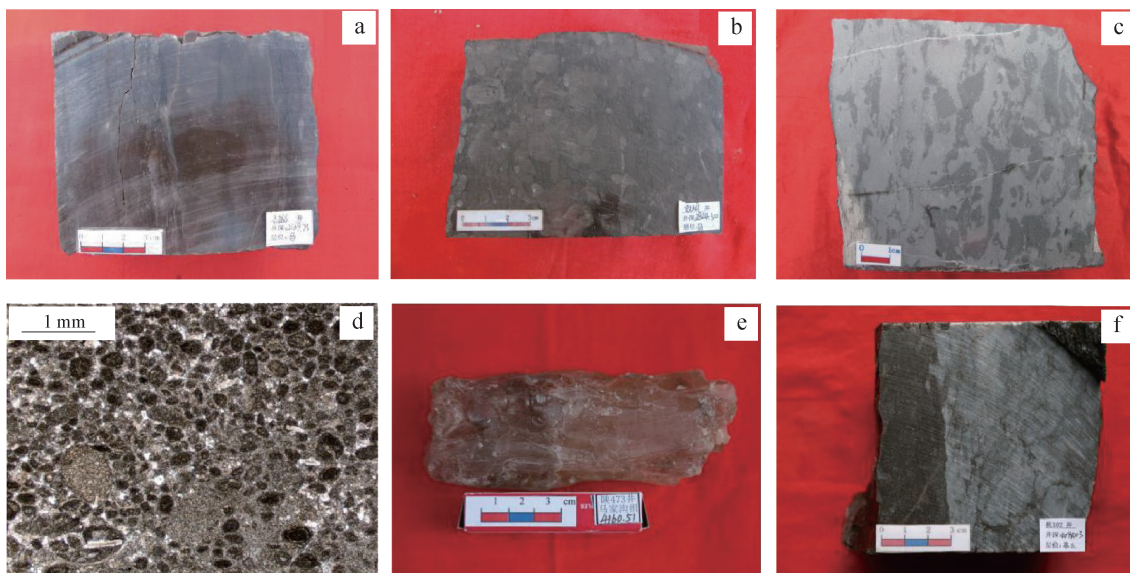


图9 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下岩石学特征

Fig. 9 Petrology characteristics of the Ordovician subsalt rocks in the Ordos Basin

a. 神66井,埋深2 169.73 m,马五⁷,泥晶灰岩; b. 双141井,埋深2 824.23 m,马五⁷,生物潜穴白云岩; c. 靳7井,埋深3 734.50 m,马五⁷,生物扰动灰岩; d. 靖探1井,埋深3 643.00 m,马五⁷,砂屑白云岩; e. 陕473井,埋深4 160.51 m,马三段,粉红色石盐岩; f. 桃102井,埋深3 094.03 m,马三段,结块状硬石膏岩

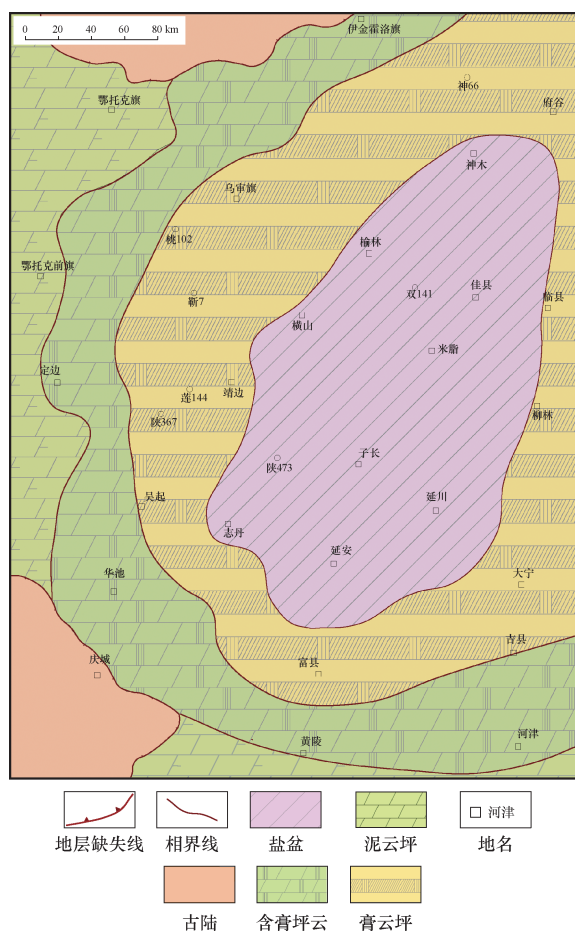


图 10 鄂尔多斯盆地马三段岩相古地理
Fig. 10 Lithofacies paleogeography of the Ma 3 Member in the Ordos Basin

旗-靖边古隆起沉积期局部高部位处于潮上带以膏云坪沉积为主,古隆起的缓坡带位于潮间带,水体能量较高,是丘滩相碳酸盐岩发育的有利部位,丘滩体主要围绕靖西洼陷呈环带状分布。其次,古隆起带刚好位于海退蒸发岩旋回石盐岩与硬石膏岩的岩相转换带,其东侧为米脂石盐岩的沉积区,其西为靖西硬石膏岩沉积区(图 10),古地理格局上构成了一个明显的区域岩性相变带,也为后期渗透白云岩化作用的发生提供了基本的成岩环境。

3.2 乌审旗-靖边古隆起海退期易于形成溶孔型储层

乌审旗-靖边古隆起海退蒸发岩层序也发育较好的白云岩储层,岩性以富含膏(盐)模孔的泥粉晶白云岩为主,形成于马五⁶亚段、马三段等大规模海退沉积期。虽然整体上表现为振荡性的海退过程,但是其内部也发育米级的白云岩夹层,纵向上发育向上变浅的岩石序列,由多个石盐岩-硬石膏岩-含硬石膏(石盐)结核的泥粉晶白云岩的岩性旋回组成。含硬石膏(石盐)结核的泥粉晶白云岩本身缺乏储集性能,但靖边-乌审旗古隆起处于较高的古地貌背景,在海退蒸发岩沉积期长时间、大面积暴露,遭受了准同生期大气淡水淋滤^[23-25],导致含硬石膏(石盐)结核的泥粉晶白云岩发生组构选择性溶蚀作用,易溶膏盐矿物组构发生溶解,形成含膏(盐)模孔的泥粉晶白云岩储层(图 11c,f)。

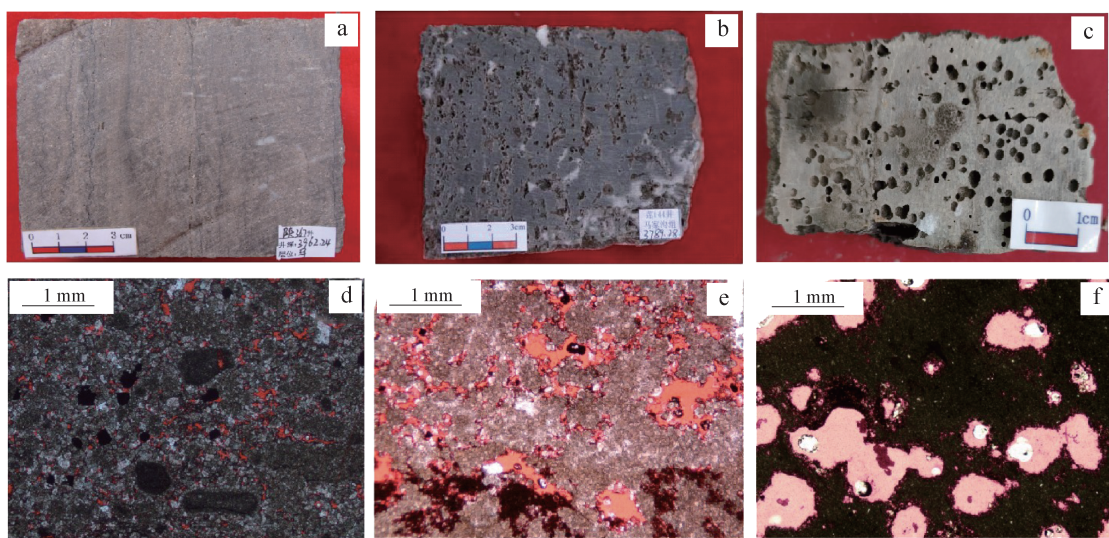


图 11 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下储层类型及岩石学特征

Fig. 11 Types and petrology characteristics of subsalt reservoirs in the Ordovician in the Ordos Basin

a. 陕 367 井,马五⁷,埋深 3 762.24 m,颗粒白云岩; b. 莲 144 井,埋深 3 789.28 m,马五⁹,藻格架白云岩; c. 陕 473 井,马三段,埋深 4 130.80 m,泥晶白云岩,溶孔; d. 陕 367 井,马五⁹,埋深 3 946.63 m,砂屑白云岩,晶间溶孔; e. 莲 144 井,埋深 3 803.90 m,马五⁷,晶间溶孔; f. 陕 473 井,马三段,埋深 4 172.59 m,泥晶白云岩,溶孔

4 古隆起控制的沉积及储层发育模式

依据上述古隆起对奥陶系岩相古地理格局及储层分布规律控制作用的研究,建立了鄂尔多斯盆地中东部马家沟组多重障壁的台地沉积模式(图12)。受海平面升降变化的影响,海侵期与海退期的沉积相分异作用明显,海侵期自西向东由台缘斜坡-台缘丘滩-灰质洼地-台内滩丘-云灰洼地-台内丘滩构成;海退期自西向东由台缘斜坡-台缘丘滩-膏质洼地-膏云坪-盐岩洼地-膏云坪构成。盆地中部乌审旗-靖边地区奥陶系盐下钻探证实,乌审旗-靖边古隆起奥陶纪为低幅度的水下古隆起,具有较高的古地貌背景,海侵期古隆起及其缓坡带有利于高能颗粒滩及微生物丘等有利储层沉积相带的发育;海退期古隆起上长时间暴露,遭受准同生期岩溶作用,导致富含硬石膏结核的泥晶白云岩发生组构选择性溶蚀,易于形成溶孔型白云岩储层。

该模式与鄂尔多斯盆地马家沟组早期建立的台地模式存在显著差异。早期认为鄂尔多斯盆地中东部为统一的台内坳陷,随着乌审旗-靖边古隆起的发现转变为“隆洼相间”的古构造格局的新认识,即盆地中东部由乌审旗-靖边古隆起及其东西两侧的米脂洼陷和靖西洼陷构成。从沉积及储层发育的角度来说,该模式凸显了奥陶系盐下碳酸盐岩油气勘探潜力,以往的勘探主要集中于中央古隆起为主的台地边缘相区,尽管该区也发育较好的白云岩储层,但由于白云岩发育厚度大,缺乏有效圈闭条件,中央古隆起区厚层白云岩体试气均产水,勘探效果不佳。该模式的建立,将鄂尔多斯盆地奥陶系天然气勘探区带由以往的中央古隆起周边地区拓展到盆地东部的台地内部,勘探层系由以往的奥陶系风化壳拓展到奥陶系盐下。这对于鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探具有重大理论和实际勘探意义。

乌审旗-靖边古隆起位于海退期硬石膏岩-石盐岩的岩性相变附近。该区马家沟组纵向上发育硬石膏岩与白云岩交互沉积,马五⁷亚段、马五⁹亚段及马四段等海侵层序是白云岩储层的主要发育层段,马五⁶亚段及马三段等海退层序发育的硬石膏岩是主要封盖层。尤其是奥陶系马五⁶亚段膏盐岩具有“地层厚度大、分布面积广”的特点,厚度约70~120 m,面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是奥陶系盐下碳酸盐岩的主要封盖层,直接披覆于乌审旗-靖边古隆起之上,形成了良好的储盖组合(图12)。古隆起控制作用下的沉积及储层综合模式的建立,不仅可以有效预测有利储集相带的空间展布,更重要的是揭示了奥陶系盐下也具有良好的油气勘探潜力,推动了奥陶系马五段盐下天然气勘探的突破。目前已有多口井试气获得高产气流,有望形成千亿方的含气区,实现长庆油田“靖边气田”之下找“靖边气田”的夙愿。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地中东部寒武系由老到新依次向乌审旗-靖边地区超覆减薄直至尖灭缺失,寒武系缺失面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,该区中元古界长城系与奥陶系马家沟组直接接触,证实乌审旗-靖边古隆起的存在。

2) 乌审旗-靖边古隆起奥陶纪仍为低幅度的水下古隆起,对奥陶系沉积的控制作用显著,具有“三隆两洼”的古构造格局,受中央古隆起、吕梁隆起及乌审旗-靖边古隆起的共同障壁作用,控制了盆地东部奥陶系米脂洼陷的形成。

3) 乌审旗-靖边古隆起上奥陶系马家沟组海侵期发育丘滩体等有利储集相带,海退期则由于间歇性暴露,利于溶孔型储层的形成。继承性古隆起控制了区域岩性相变带的形成,有利于天然气圈闭成藏,是奥陶系盐下天然气勘探的有利区带。

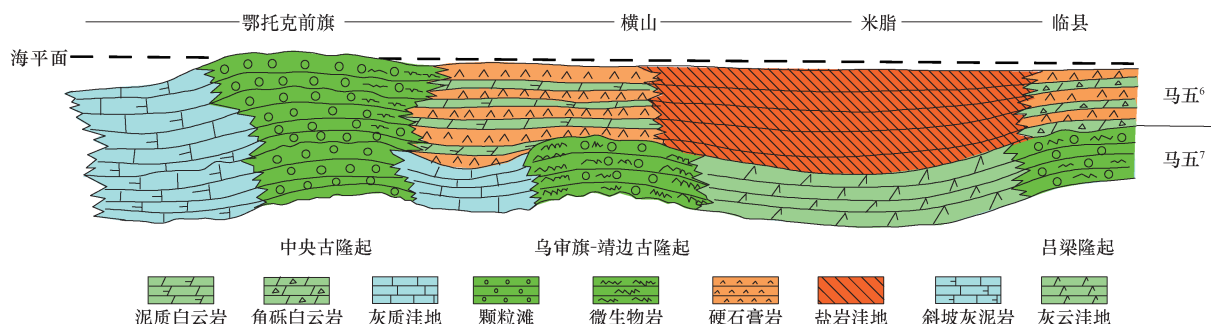


图12 鄂尔多斯盆地马五⁶与马五⁷沉积演化模式

Fig. 12 Evolutionary model showing the deposition of the Ma 5⁶ and Ma 5⁷ Sub-members in the Ordos Basin

参考文献

- [1] 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.
- [2] 何登发,谢晓安.中国克拉通盆地中央古隆起与油气勘探[J].中国石油勘探,1997,2(2):11-19.
He Dengfa, Xie Xiaonan. Petroleum exploration in central paleouplifts of Cratonic basins in China[J]. China Petroleum Exploration, 1997, 2(2): 11-19.
- [3] 杜金虎,邹才能,徐春春,等.川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J].石油勘探与开发,2014,41(3):268-277.
Du Jinghu, Zhou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.
- [4] 杨跃明,文龙,罗冰,等.四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J].石油勘探与开发,2016,43(2):179-188.
Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, et al. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnvsi paleohigh, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 179-188.
- [5] Arabian American Oil Company, Ghawar oilfield, Saudi Arabia[M]. AAPG Bulletin, 1959, 43: 434-454.
- [6] Ayres M G, Bilal M, Jones R W, et al. Hydrocarbon habitat in main producing areas, Saudi Arabia[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 1-9.
- [7] 王玉新.鄂尔多斯地块早古生代构造格局及演化[J].地球科学,1994(6):778-786.
Wang Yuxin. Tectonic framework and evolution of Ordos Massif in early paleozoic[J]. Journal of Earth Science, 1994(6): 778-786.
- [8] 黄建松,郑聪斌,张军.鄂尔多斯盆地中央古隆起成因分析[J].天然气工业,2005,25(4):23-26.
Hang Jiansong, Zheng Congbin, Zhang Jun. Origin of the central Paleouplift in Ordos basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(4): 32-45.
- [9] 邓昆,张哨楠,周立发,等.鄂尔多斯盆地古生代中央古隆起形成演化与油气勘探[J].大地构造与成矿学,2011,35(2):190-197.
Deng Kun, Zhang Xiaonan, Zhou Lifa, et al. Formation and tectonic evolution of the Paleozoic central paleouplift of Ordos basin and its implications for oil-gas exploration[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 190-197.
- [10] 何治亮,马永生,张军涛,等.中国的白云岩与白云岩储层:分布、成因与控制因素[J].石油与天然气地质,2020,41(1):1-14.
He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhang Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 1-14.
- [11] 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].天然气工业,2011,31(12):11-20.
Yang Hua, Bao Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 11-20.
- [12] 黄正良,陈调胜,任军峰,等.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合白云岩储层及圈闭成藏特征[J].石油学报,2012,33(a02):118-124.
Huang Zhengliang, Chen Tiaosheng, Ren Junfeng, et al. The characteristics of dolomite reservoir and trap accumulation in the middle assemblages of Ordovician in Ordos Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(a02): 118-124.
- [13] 包洪平,杨帆,白海峰,等.细分小层岩相古地理编图的沉积学研究及油气勘探意义-以鄂尔多斯地区中东部奥陶系马家沟组马五段为例[J].岩石学报,2016,33(4):1094-1106.
Bao Hongping, Yang Fan, Bai Haifeng, et al. Sedimentology study on sub-member lithofacies paleogeography mapping and its petroleum exploration significance: Taking Ma⁵ member of Lower Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin for example[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1094-1106.
- [14] 席胜利,熊鹰,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五盐下沉积环境与海平面变化[J].古地学报,2017(5):773-790.
Xi Shengli, Xiong Ying, Liu Xianyang, et al. Sedimentary environment and sea level change of the subsalt interval of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in central Ordos Basin[J]. JOPC, 2017(5): 773-790.
- [15] 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. doi:10.11743/ogg20180611.
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. doi: 10.11743/ogg20180611.
- [16] 刘耘,谭秀成,刘显岩,等.鄂尔多斯盆地中部马五⁷亚段颗粒滩沉积特征及空间分布[J].沉积学报,2018,36(4):796-806.
Liu Yun, Tan Xiucheng, Liu Xianyan, et al. Sedimentary characteristics and distribution of grain shoals of Ma⁵⁷ sub-member in the central Ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 796-806.
- [17] 杨华,包洪平,马占荣.侧向供烃成藏-鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J].天然气工业,2014,34(4):19-26.
Yang Hua, Bao Hongping, Ma Zhanrong. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: A new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 19-26.

- filling by normal drag structure, caused by contemporaneous reverse fault[J]. *Geological Review*, 2014, 60(2): 310–320.
- [26] 冯文杰, 吴胜和, 刘忠保, 等. 逆断层正牵引构造对冲积扇沉积过程与沉积构型的控制作用: 水槽沉积模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2017, 24(6): 1–11.
- Feng Wenjie, Wu Shenghe, Liu Zhongbao, et al. The controlling effects on depositional process and sedimentary architecture of alluvial fan by drag structure caused by thrust fault: Insights from flume tank experiments[J]. *Earth Science Frontier*, 2017, 24(6): 1–11.
- [27] 蔺鹏, 吴胜和, 张佳佳, 等. 尼日尔三角洲盆地陆坡逆冲构造区海底扇分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 1073–1086.
- Lin Peng, Wu Shenghe, Zhang Jiajia, et al. Distribution of submarine fans in the thrust fault zone of continental slope, Niger Delta Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 1073–1086.
- [28] 刘忠保, 龚文平, 张春生, 等. 坡折带上深切谷的形成及发育沉积模拟试验研究[J]. *石油天然气学报*, 2006, 28(6): 32–34.
- Liu Zhongbao, Gong Wenping, Zhang Chunsheng, et al. Simulation on the formation and development of deep valley in slope break zone[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(6): 32–34.
- [29] 张春生. 冲积体系及三角洲物理模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2001.
- Zhang Chunsheng. Physical modeling on alluvial system and delta[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001.
- [30] Yin X, Huang W, Wang P, et al. Sedimentary evolution of overlapped sand bodies in terrestrial faulted lacustrine basin: Insights from 3D stratigraphic forward modeling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 1(13): 1–11.
- [31] 伊振林, 吴胜和, 杜庆龙, 等. 冲积扇储层构型精细解剖方法——以克拉玛依油田六中区下克拉玛依组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4): 939–946.
- Yi Zhenlin, Wu Shenghe, Du Qinglong, et al. An accurate anatomizing method for structure of reservoir of alluvial fan: A case study on lower Karamay Formation, Liuzhong area, Karamay oilfield[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 939–946.

(编辑 梁 慧)

(上接第400页)

- [18] 姚泾利, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(3): 1–12.
- Yao Jingli, Bao Hongping, Ren Junfeng, et al. Exploration of Ordovician subsalt natural gas reservoirs in Ordos basin[J]. 2015, 20(3): 1–12.
- [19] 包洪平, 邵东波, 郝松立, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 33–43.
- Bao Hongping, Shao Dongbo, Hao Songli, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 33–43.
- [20] 冯增昭, 鲍志东, 康祺发, 等. 鄂尔多斯早古生代古构造[J]. *古地理学报*, 1999, 1(2): 84–91.
- Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Kang Qifa, et al. Palaeotectonics of Ordos in the early paleozoic[J]. *JOPC*, 1999, 1(2): 84–91.
- [21] 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2012, 14(1): 85–100.
- Li Wenhou, Chen Qiang, Li Zhichao, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area[J]. *JOPC*, 2012, 14(1): 85–100.
- [22] 解国爱, 张庆龙, 潘明宝, 等. 鄂尔多斯盆地两种不同成因古隆起的特征及其在油气勘探中的意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(4): 373–377.
- Xie Aiguo, Zhang Qinglong, Pan Mingbao, et al. Two different genetic types of paleouplift in the Ordos basin and its significance in oil and gas exploration. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(4): 373–377.
- [23] Grimes K G. Syngenetic karst in Australia: A review[J]. *Helveticite*, 2006, 39(2): 27–38.
- [24] 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 Jinggao, Fu Jinghua, 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.
- [25] 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. doi:10.11743/ogg20200110.
- 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. doi:10.11743/ogg20200110.

(编辑 董 立)