

鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组四段 神木-志丹低古隆起的发现及油气勘探意义

于洲^{1,2,3},周进高³,罗晓容^{1,2},李永洲⁴,于小伟⁵,谭秀成⁶,吴东旭³

(1. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学,陕西 西安 710069;2. 西北大学 地质学系,陕西 西安 710069;3. 中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023;4. 中国石油 煤层气有限责任公司,北京 100028;5. 中国石油 东方地球物理公司研究院 长庆分院,陕西 西安 710021;6. 西南石油大学 地球科学与技术学院,四川 成都 610500)

摘要:米探1井油气勘探突破展示出盆地东部奥陶系马四段具有良好的勘探前景,由于盆地东部奥陶系马四段时期古构造格局认识不清,制约了该层系的天然气勘探。根据磁力资料、地震剖面、钻井资料、野外露头和地球化学特征分析等资料,发现了鄂尔多斯盆地东部奥陶系马四段神木-志丹低古隆起,研究了古隆起形成机制及对马四段沉积和储层的控制作用。研究结果表明:①神木-志丹低古隆起呈北东向展布,宽约140 km,长约250 km,面积为 3.8×10^4 km²。②神木-志丹低古隆起发育于奥陶系马四段沉积。古隆起的形成受古基底组成差异和同沉积正断层共同控制。同沉积正断层下盘的古基底在正断层作用下演变为地势相对较高的低古隆起,同沉积正断层上盘的古基底在同沉积正断层作用下向下沉降并转变为地势相对较低的拗陷或凹陷。③神木-志丹低古隆起地势相对较高,发育微生物丘、灰泥丘和砂屑滩,经准同生白云化作用后可形成优质白云岩储层。④神木-志丹低古隆起广泛沉积了一套厚度为1~12 m的硬石膏岩层,低古隆起带上的马四段白云岩储层在侧向致密灰岩和纵向硬石膏岩的封堵作用下,可形成封闭性能较好的岩性圈闭。⑤神木-志丹低古隆起马四段白云岩岩性圈闭位于现今构造高部位,断层发育,遮挡条件好,有利于天然气运移和富集。

关键词:沉积储层;断层;古基底;神木-志丹低古隆起;马四段;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Discovery and implications for hydrocarbon exploration of the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift in the 4th member of the Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin

YU Zhou^{1,2,3}, ZHOU Jingao³, LUO Xiaorong^{1,2}, LI Yongzhou⁴, YU Xiaowei⁵, TAN Xiucheng⁶, WU Dongxu³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 4. Coalbed Methane Company Limited, PetroChina, Beijing 100028, China; 5. Changqing Branch of Geophysical Research Institute, BGP Inc., CNPC, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 6. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Breakthroughs in hydrocarbon exploration in well Mitan 1 demonstrate that the 4th member of the Ordovician Majiagou Formation (also referred to as the Ma 4 Member) in the eastern Ordos Basin has great potential for hydrocarbon exploration. However, the limited understanding of the paleotectonic framework of the Ma 4 Member in this region has restricted natural gas exploration in this member. Using aeromagnetic data, seismic sections, and drilling data, outcrop observation, and geochemical analysis, we identify the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift within the Ma 4 Member in the eastern Ordos Basin, as well as the formation mechanisms of the paleo-uplift. The controlling effects of the paleo-uplift on the sedimentary reservoirs of the Ma 4 Member are thereby discussed. The results indicate that the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift extends in the NE direction, with a width of approximately 140 km, a length of around 250 km, and an

收稿日期:2024-02-08;修回日期:2024-09-30。

第一作者简介:于洲(1986—),男,博士研究生、高级工程师,海相碳酸盐岩沉积储层。E-mail: yuz_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:罗晓容(1959—),男,博士、研究员,石油地质学基础和应用、油气成藏动力学。E-mail: luoxr@mail.iggcas.ac.cn。

基金项目:中国石油集团公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ16YJ01);长庆油田公司重大科技专项(ZDZX2021)。

area of $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$. This low paleo-uplift was formed during the deposition of the Ma 4 Member under the combined influence of the compositional differences of the paleobasement and syndepositional normal faults. Specifically, under the effects of syndepositional normal faulting, the paleobasement in the footwall of the normal faults evolves into relatively high-lying low paleo-uplifts, while that in their hanging wall underwent subsidence and evolves into relatively low-lying depressions or sags. The Shenmu-Zhidan low paleo-uplift is relatively high-lying, containing microbial mounds, mud mounds, and psammitic shoals, which can develop into high-quality dolomite reservoirs in the presence of penecontemporaneous dolomitization. Additionally, this paleo-uplift exhibits a sequence of widely developed anhydrite layers with thicknesses varying from 1 to 12 m. The dolomite reservoirs in the Ma 4 Member within the low paleo-uplift zone are sealed by tight limestones laterally and anhydrite layers vertically, allowing them to form lithologic traps with excellent sealing performance. The lithologic traps of dolomites in the Ma 4 Member within the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift, located in present-day structurally high parts, exhibit well-developed faults and effective sealing ability, which create favorable conditions for natural gas migration and enrichment.

Key words: sedimentary reservoir, fault, paleobasement, Shenmu-Zhidan low paleo-uplift, Ma 4 Member, Ordovician, Ordos Basin

引用格式:于洲,周进高,罗晓容,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组四段神木-志丹低古隆起的发现及油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2024,45(5):1383-1399. DOI:10.11743/ogg20240513.

YU Zhou, ZHOU Jingao, LUO Xiaorong, et al. Discovery and implications for hydrocarbon exploration of the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift in the 4th member of the Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1383-1399. DOI: 10.11743/ogg20240513.

古隆起指在盆地形成演化过程中,某一地质历史阶段的隆起构造^[1]。在后期,这些构造可继承性发育,也可逐渐消失,甚至演变为坳陷^[2]。油气勘探实践证明,古隆起不仅是沉积盆地内重要的正向构造单元,还是油气运移的有利方向和富集区^[1]。近年来,中国在围绕克拉通盆地古隆起区域的油气勘探中取得了一系列重大突破。例如,部署于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起的轮探1井在深度8 200 m以下的下寒武统白云岩中,获日产油134 t和日产气45 917 m³^[3];四川盆地川中古隆起震旦系灯影组、寒武系龙王庙组和沧浪铺组相继取得勘探新发现^[4-5],成功探明了安岳气区和蓬莱气区2个万亿立方米级大气区;鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段横山隆起区,发现了莲92井和统74井等一批高产工业气流井^[6-7]。

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,油气资源丰富,为近十年来中国油气新增探明储量做出了巨大贡献^[8-9]。下古生界海相碳酸盐岩是鄂尔多斯盆地天然气勘探的重点领域之一,截至目前,奥陶系马家沟组五段(马五段)白云岩中已发现了万亿方储量规模^[10],为中国石油长庆油田分公司连续3年油气当量突破6 000×10⁴ t作出了重要贡献。为进一步夯实持续高效稳产、上产的资源基础,该公司加大了对马家沟组四段(马四段)新层系的勘探力度,并在盆地东部神木地区

论证并部署了1口专门钻探马四段白云岩储层的风险探井——米探1井。2021年,米探1井首次在马四段获得35.24×10⁴ m³/d的高产工业气流^[11],并证实盆地东部存在地势相对较高的古隆起或古凸起且发育台内丘滩体,有望推动盆地东部马四段成为继马五段后的又一重要天然气勘探新领域。截止目前,已有较多学者对马四段古构造格局进行过研究^[12-16],但取得的成果认识存在着较大的分歧,如何发歧等认为盆地东部在奥陶纪马四期为—个水体较深的大坳陷^[12];周进高等通过马五⁶亚段—马四段地层厚度法恢复古地貌认为盆地东部在奥陶纪马四期存在“两凹夹—凸”的东西向结构分异,其中两凹分别为桃利庙凹陷和米脂凹陷,—凸为南北向展布的横山凸起^[13-14];郭绪杰等通过马五⁶亚段—马四段地层厚度法恢复古地貌认为盆地东部由两凸两凹组成,除横山凸起外,该区域还存在—个南北向展布的神木—米脂低隆^[15];魏柳斌等认为盆地中部寒武系发育—个向西弯头镰刀状外形、总体呈北东向展布的乌审旗古隆起,该隆起在奥陶纪继承性发育,其东、西两侧分别为靖西洼陷和米脂洼陷^[16]。古构造格局认识不清势必导致岩相古地理恢复及有利微相分布预测难,从而制约马四段下步勘探进程。为此,本文基于磁力异常、地震、钻井、测井和野外剖面等资料,利用地层厚度值法对鄂尔多斯盆地奥陶纪马四期古构造格

局进行了精细恢复,认为盆地东部在奥陶系马四段存在一个北东向展布、古地势逐渐降低的神木-志丹低古隆起,并探讨了该低古隆起的形成机制及演化过程,分析了该低古隆起对马四段沉积分异和储层发育的控制作用,以期为盆地东部奥陶系马四段的下一步天然气勘探提供技术支撑。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是在太古宙—古元古代结晶基底的基础上发展起来的多旋回克拉通盆地^[8]。磁力异常和钻井资料揭示,鄂尔多斯盆地结晶基底按构造走向可粗略地划分为北部、西北部及中南部3个大区^[17-19]:北部杭锦旗—鄂尔多斯地区以乌拉山群(Ar_2)为主,大体呈近东西向;西北部以贺兰山群(Ar_3)为主,大致呈北北东走向;中南部则分别由北东向分异的集宁群、太华群和吕梁群构成,其中盆地东南缘吉县—黄龙—西安一带为太华群(Ar_2),佳县—志丹—庆阳一带为吕梁群(Ar_3),鄂托克旗—乌审旗—一定边一带为集宁群(Ar_1 — Ar_2)(图1a)。自吕梁运动(1 800 Ma前)之后,在伸展性区域构造背景下,鄂尔多斯盆地沿鄂托克旗—鄂托克前旗北侧、乌审旗—靖边地区、吴起—环县地区和麟游地区发育与基底构造有一定继承性的北东向裂陷槽,并进入了第一套沉积盖层——长城系砂岩的发育阶段^[17]。受陆内裂陷控制,长城系广泛沉积于盆地中西部裂陷及其边缘地区,且沉积厚度由盆地西侧向盆地中部地区逐渐减薄,盆地东部神木—志丹地区缺失长城系地层(图1b,c)。蓟县纪,鄂尔多斯盆地演化为边缘拗陷,沉积物以海相碳酸盐岩建造为主,受后期剥蚀作用影响,现今蓟县系残余地层主要位于盆地西南缘^[17];青白口纪—南华纪,鄂尔多斯盆地整体抬升,缺失相应沉积地层^[17];进入震旦纪,鄂尔多斯盆地再次形成边缘拗陷,以冰碛砾岩沉积为主,但分布范围较为局限,在盆地西缘银川地区野外露头和南缘钻井中可见该套地层^[17];前寒武纪,在构造挤压应力作用下,鄂尔多斯盆地乌审旗—横山—靖边地区演化为乌审旗古隆起^[20-23]。寒武纪,受古基底和长城系裂陷继承性影响,该古隆起西侧鄂托克旗、乌审旗、靖边和定边等西部地区地势较东侧的神木—志丹地区低,初始沉积地层为下寒武统馒头组,且沉积地层由盆地西缘向乌审旗—靖边地区逐渐超覆沉积(图1b,c);神木—志丹地区由于地势相对较高,初始沉积地层为中寒武统毛庄组且分布范围较窄,仅在大宁—吉县地区和府谷地区呈北东向展布(图1b,c)。进入奥陶纪马家沟期,鄂托

克旗—一定边—庆阳一带在构造作用下演化为一个“L型”展布的南北向中央古隆起^[20]。自此,鄂尔多斯盆地形成了“两陆两隆两拗”的古构造格局^[13],其中两陆为伊盟古陆和阿拉善古陆;两隆为中央古隆起和吕梁低隆起;两拗为西南边缘拗陷和东部米脂拗陷。受隆—拗格局控制,马(马家沟组)一段、马二段和马三段地层呈现出“由西南边缘拗陷和东部米脂拗陷向中央古隆起逐渐超覆沉积、地层厚度逐渐减薄”的变化特征(图1c)。

本次研究目的层马四段位于马三段之上,为马家沟组内最大海侵期沉积,在盆地中、东部地区是一套以碳酸盐岩为主,上部夹多套硬石膏岩和膏质白云岩的地层。根据岩性差异和勘探需求,马四段又细分为马四³亚段、马四²亚段和马四¹亚段:盆地东部马四³亚段岩性主要为石灰岩和白云质石灰岩;马四²亚段岩性主要为白云岩、灰质白云岩、白云质石灰岩和石灰岩互层;马四¹亚段岩性由白云质硬石膏岩、膏质白云岩、白云岩、灰质白云岩、白云质石灰岩和石灰岩组成,其中白云质硬石膏岩和膏质白云岩主要分布于该亚段中、下部(图1b)。

2 神木-志丹低古隆起发育特征及识别依据

基于地震、钻井、测井和野外剖面等资料,利用地层厚度法恢复了奥陶纪马四期古构造格局,明确了奥陶系马四段神木—志丹低古隆起的存在及其发育特征,并论证了该低古隆起的地震、岩相和野外剖面识别依据。

2.1 神木-志丹低古隆起发育特征

以往研究采用整个马家沟组地层厚度法或以马五⁶亚段—马四段地层厚度法来认识或恢复马四段构造古地理格局,但上述研究方法存在一个假设的前提条件——马家沟组沉积阶段相对稳定或后期未发生构造事件。但马家沟组沉积期并不稳定,其内部存在同沉积断层^[24]或盐构造^[25]等构造分异过程。已有学者研究显示,马四段局部地势相对较低区域存在填平补齐沉积,沉积地层总体呈现出“古地貌高部位地层厚度薄、丘滩体白云岩发育,低部位地层厚度大、丘滩体白云岩欠发育”的分异特征^[26-27]。基于此,本文综合盆地内二维骨架地震大剖面和三维连片地震剖面、钻井和野外剖面资料,选取马四段地层厚度法对鄂尔多斯盆地奥陶纪马四期古构造格局进行精细恢复。结果显示,鄂尔多斯盆地在奥陶纪马四期具有“两陆三隆四拗”的古构造格局,分别为伊盟古陆、阿拉善古陆、中央

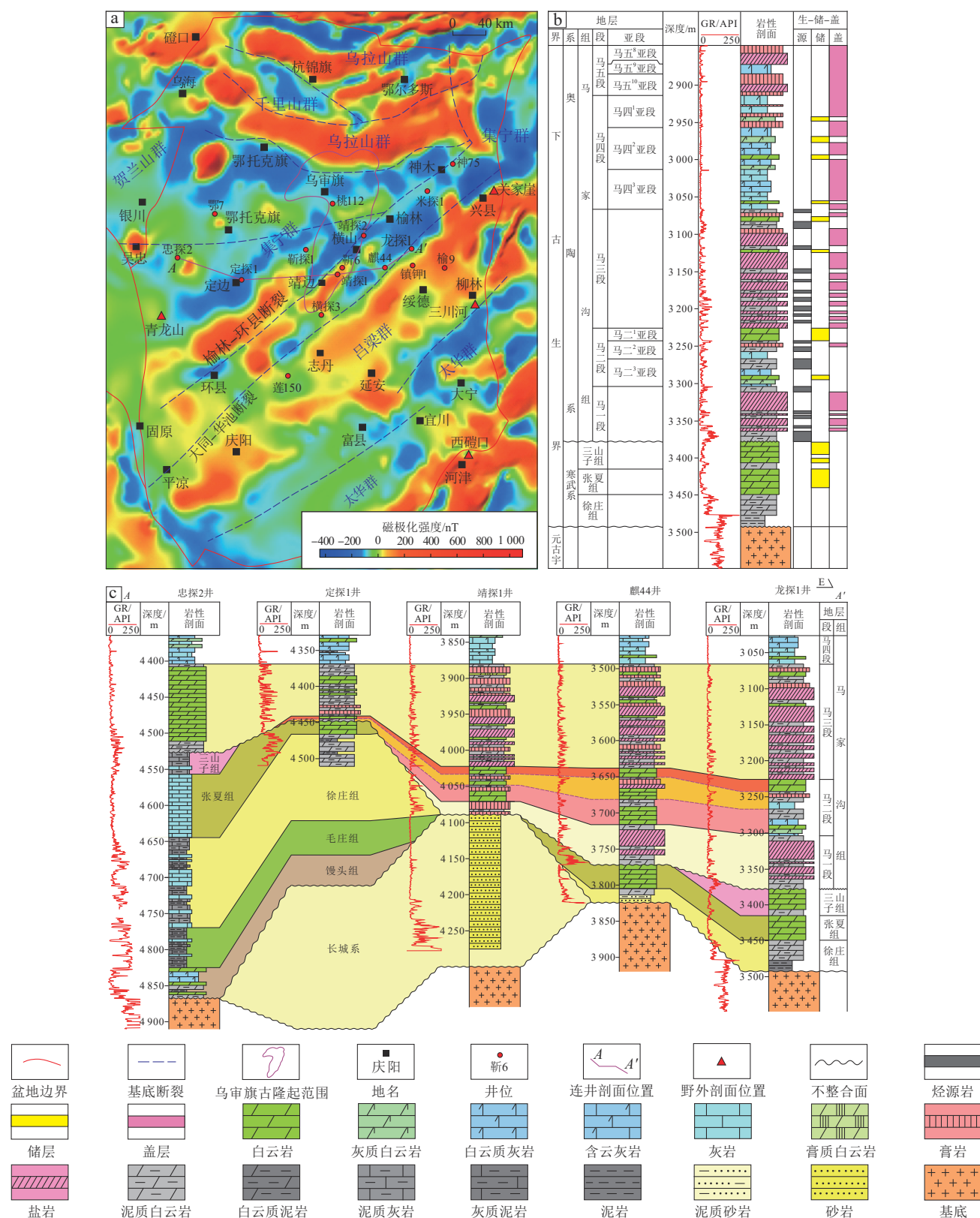


图1 鄂尔多斯盆地古基底航磁异常(a)(据文献[17-20]修改)、龙探1井长城系—奥陶系马五段地层综合柱状图(b)及忠探2井—定探1井—靖探1井—麒44井—龙探1井长城系—奥陶系马三段连井剖面(c)

Fig. 1 Aeromagnetic anomaly map of the paleobasement of the Ordos Basin (modified after references [17-20]) (a), composite stratigraphic column of the Changchengian-Ordovician Ma 5 Member in well Longtan 1 (b), and cross-well correlation of the Changchengian-Ordovician Ma 3 Member through wells Zhongtan 2, Dingtian 1, Jingtian 1, Qi 44, and Longtan 1 (c) (c图剖面位置见a图。)

马五⁶亚段—马四段地层厚度法恢复马四期构造古地理格局并识别出假古隆起”的问题。

2.2 神木—志丹低古隆起识别依据

2.2.1 地震依据

为论证鄂尔多斯盆地奥陶纪马四期神木—志丹低古隆起的存在,笔者对盆地东部2条连接桃利庙坳陷和神木—志丹低古隆起的東西向地震剖面进行了井—震标定精细层位解释。从解释结果可看出(图3),2条剖面地层厚度由东向西逐渐增加。在剖面东侧地层厚度较薄的区域,马四段反射轴由1.5个波谷和1个波峰组成,往往呈现出中等振幅、欠连续反射特征,具有丘滩体的地震反射特征;在剖面西侧地层厚度明显增厚的区域,马四段的反射轴由2.5个波谷和2个波峰组成,往往呈现出强振幅、连续反射特征,其中多出的反射轴由1个波峰和1个波谷组成,该反射轴位于马四段底部,超覆在马三段顶部界面之上。这些特征反映出剖面西侧是1个地势相对较低的坳陷,其在奥陶纪马四初期存在填平补齐沉积;而位于剖面东侧的神木—志丹地区在奥陶纪马四期是1个地势相对较高的低古隆起,并在奥陶纪马四初期未接收沉积物,存在短暂性暴露。

2.2.2 沉积地层依据

为进一步论证神木—志丹低古隆起的存在,笔者对盆地内钻穿马四段的钻井进行了系统对比分析,并编制了2条过神木—志丹地区的“十”字形马四段连井层序地层对比剖面(图4)。结果显示,神木—志丹地区在奥陶纪马四期存在明显的相对构造高点。从桃83井—桃112井—麒44井—镇钾1井—石北1井奥陶系马四段连井层序地层对比剖面来看,马四³亚段沉积早期,位于低古隆起核部的麒44井和镇钾1井存在间歇暴露未接收沉积物,而位于坳陷区的桃112井和石北1井由于古地貌相对较低,在马四初期存在填平补齐沉积,沉积地层厚度由坳陷向隆起逐渐减薄(图4a);从莲150井—横探3井—麒44井—米探3井—神75井奥陶系马四段连井层序地层对比剖面来看(图4b),神木—志丹地区在奥陶纪马四期具有由西南向东北方向古地势逐渐降低、沉积水体逐渐加深的变化特征,其中神75井马四段地层厚度明显增加是由于该井所在位置在马四³亚段沉积初期存在填平补齐沉积所致。

2.2.3 岩相依据

岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,

它是沉积相的主要组成部分^[28]。不同沉积环境下的沉积物特征差异明显,因此可以用岩相类型判识不同位置的沉积古环境。研究表明,马四段白云岩为准同生白云石化作用形成,具有古地貌高地白云石化程度高、低部位云化程度低的分布特征^[26]。从马四段来看,该亚段白云岩主要位于鄂托克旗—定边—西磴口一带,其中鄂托克旗—定边—环县一带的白云岩厚度厚薄不一致,存在多个厚值区,反映出该隆起内部存在次级凹陷—凸起相间的地势差异特征;神木—志丹地区白云岩主要呈北东向展布,其厚度虽不及鄂托克旗—定边—西磴口一带厚,但仍比其西北侧乌审旗—定边地区、东北侧府谷地区及东侧的柳林地区厚(图5a),且白云石化程度高(图5b)。此外,钻井岩心和微观薄片显示,该区域白云岩岩性主要为形成于高能环境下的砂—砾屑白云岩(图6a)、粗粉晶白云岩(图6b)和蒸发潮坪环境形成的含膏泥晶白云岩(图6c)、含膏藻纹层白云岩(图6d)。上述两项特征均反映出神木—志丹地区在奥陶纪马四期地势相对较高。另外,神木—志丹地区奥陶系马四¹亚段普遍发育形成于常暴露于地表的蒸发潮坪环境、具有鸡笼铁丝构造的膏质白云岩(图6e)和白云质膏岩(图6e,f)。这些白云质膏岩和膏质白云岩向西侧减薄并相变为灰岩和灰质白云岩(图4a),也进一步证实神木—志丹地区在奥陶纪马四期是一个地势相对较高的低古隆起。

2.2.4 野外露头依据

在碳酸盐台地沉积体系中,坳陷或凹陷等古地貌低部位常淹没于水下,沉积物往往缺乏明显的暴露标志及溶蚀特征;而古隆起或古凸起由于地势相对较高,易于受到海平面波动变化的影响,纵向上频繁发生准同生暴露溶蚀。为进一步证实神木—志丹低古隆起的存在,笔者选取位于该隆起带上的关家崖剖面进行了野外调研。结果显示,关家崖剖面马四段地层存在明显的多期次短暂、高频暴露溶蚀特征(图7):①在向上变浅高频旋回顶部,可观察到小型暴露溶蚀侵蚀面和近原地岩溶角砾岩,并在侵蚀面之上可观测到下一个高频旋回的超覆沉积特征;②旋回顶部的碳、氧同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)呈现出负偏,反映了沉积物在准同生期受到了大气淡水溶蚀作用的影响,从而导致 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值减小。

3 神木—志丹低古隆起成因机制

前人研究表明,鄂尔多斯盆地在奥陶纪马一期—

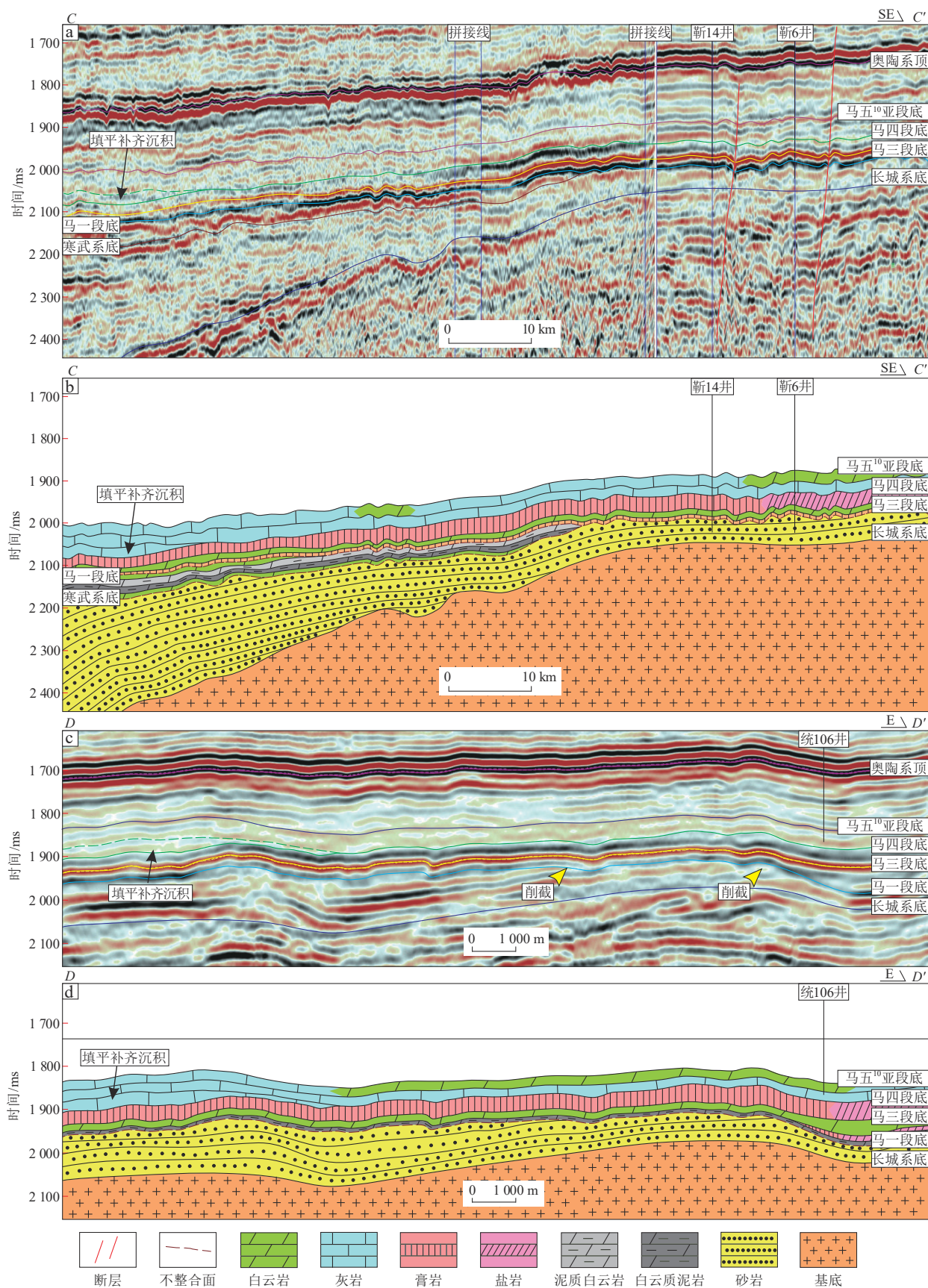


图3 鄂尔多斯盆地典型东西向地震剖面反射特征(a,c)及对应马四段底部“填平补齐”解释(c,d)(剖面位置见图2b)

Fig. 3 Typical reflection characteristics of the EW-striking seismic sections and the interpretations of filling at the bottom of Ma 4 Member (see Fig. 2 for the section locations)

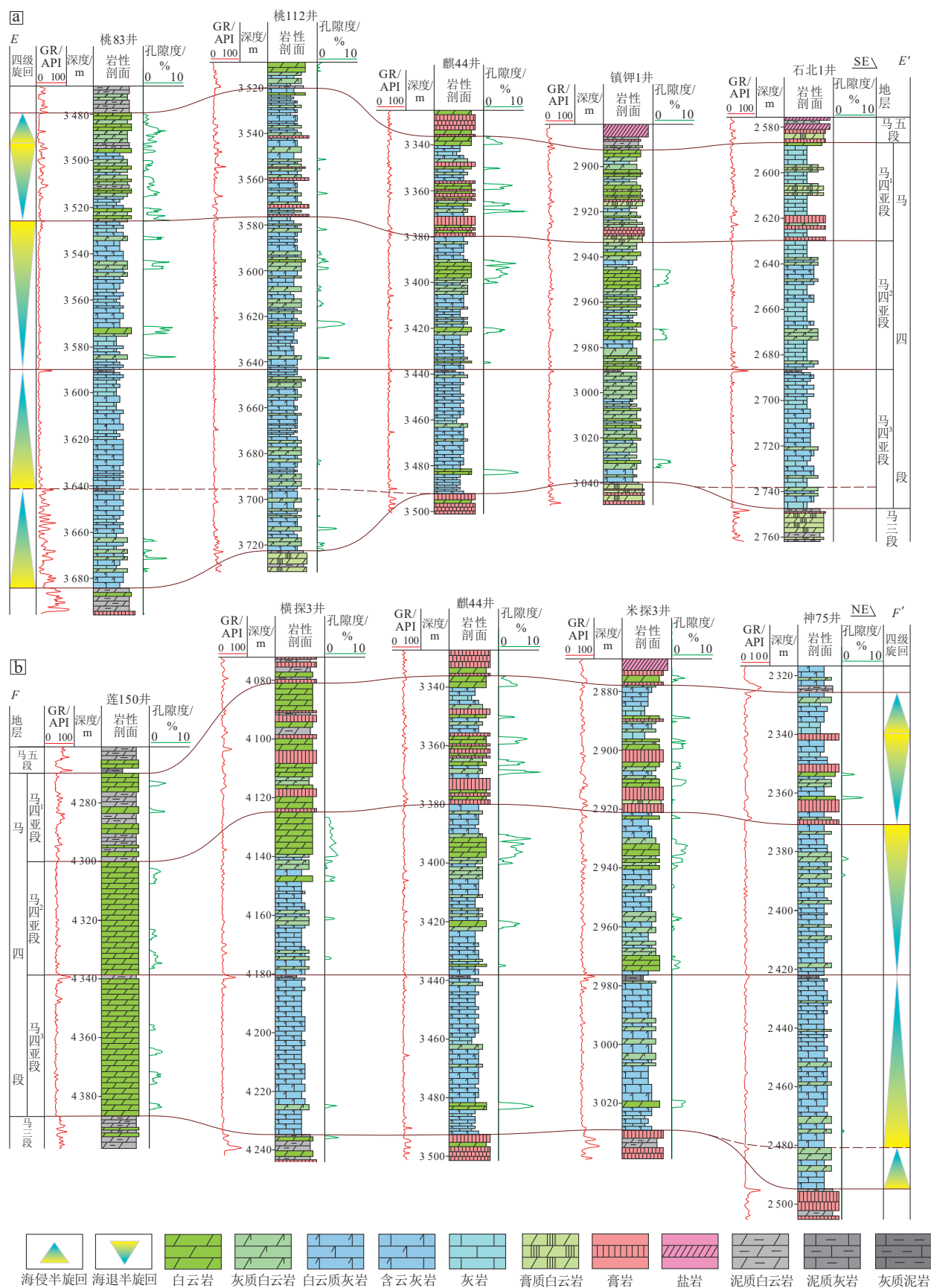


图4 鄂尔多斯盆地过神木—志丹地区典型奥陶系马四段地层连井剖面(剖面位置见图2b)

Fig. 4 Typical cross-well correlation profiles of the Ordovician Ma 4 Member crossing the Shenmu—Zhidan area in the Ordos Basin (see Fig. 2 for the section locations)

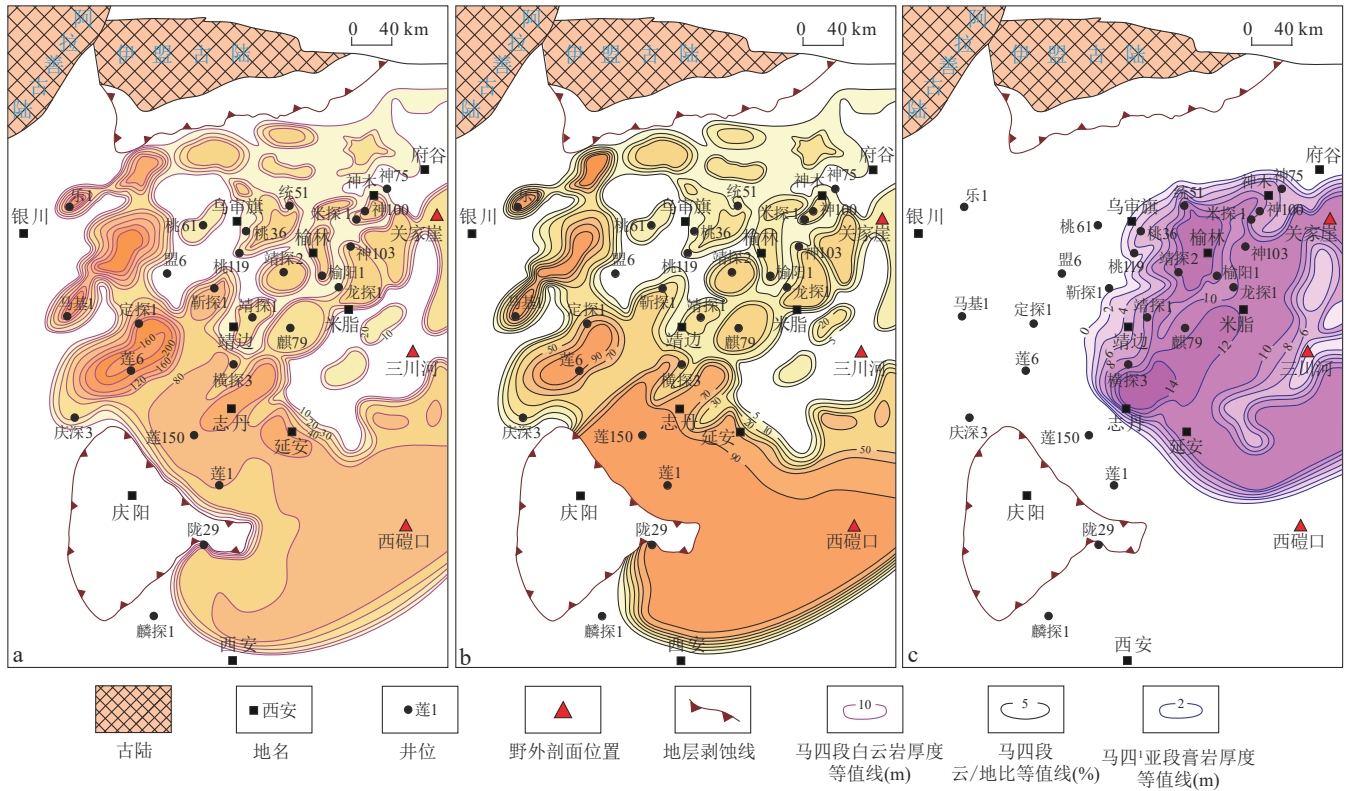


图5 鄂尔多斯盆地奥陶系马四段白云岩厚度(a)、云/地比值(b)与马四¹亚段膏岩厚度(c)等值线图

Fig. 5 Isopach map of dolomite (a), contour map showing the ratio of dolomite to gross thickness (b), and isopach map of the gypsum rock in the 1st sub-member (c) of the Ma 4 Member, Ordos Basin

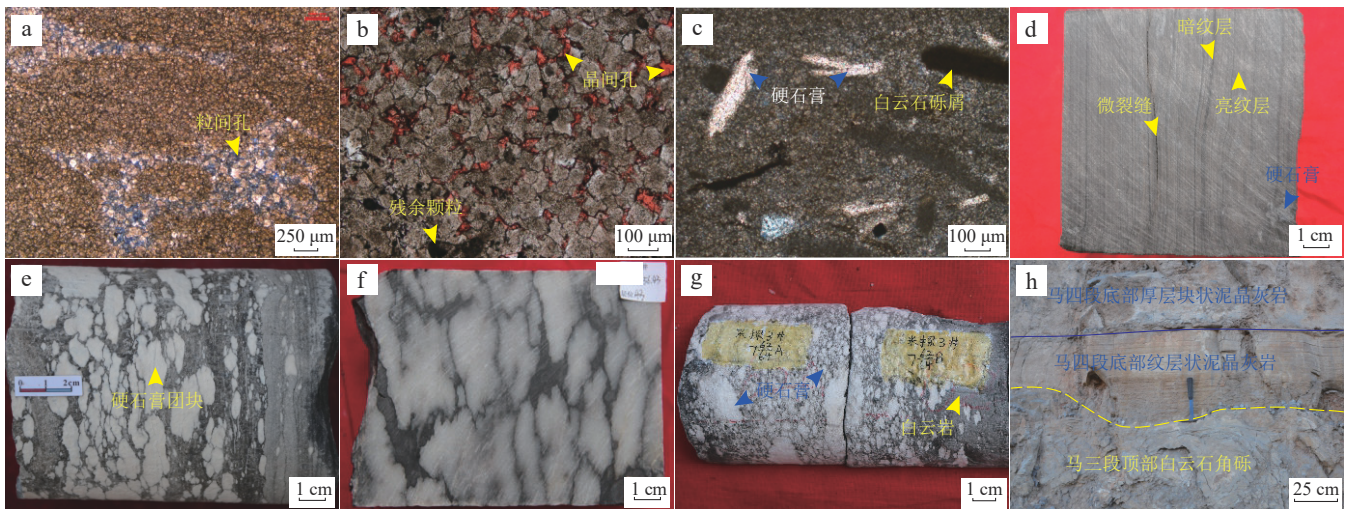


图6 鄂尔多斯盆地奥陶系马四段及马三段沉积物岩石学特征照片

Fig. 6 Petrology of sediment in the Ordovician Ma 4 and Ma 3 members, Ordos Basin

a. 砂-砾屑白云岩,粒间孔发育,马四¹亚段,埋深3 614.26 m,桃112井,蓝色铸体,单偏光;b. 粗粉晶白云岩,见残余颗粒幻影,晶间孔发育,马四²亚段,埋深3 688.43 m,靳6井,红色铸体,单偏光;c. 含膏泥晶白云岩,马四²亚段,埋深3 084.98 m,榆阳1井,蓝色铸体,单偏光;d. 纹层白云岩,发育微裂缝,马四²亚段,埋深3 123.30 m,榆阳1井,岩心;e. 膏质白云岩逐渐过渡为含白云质膏岩,硬石膏呈团块状,马四¹亚段,埋深3 614.26 m,靳6井,岩心;f. 含白云质膏岩,硬石膏呈团块状,马四¹亚段,埋深3 556.43 m,桃112井,岩心;g. 膏质白云岩逐渐过渡为含白云质膏岩,硬石膏呈团块状,马三段,埋深3 031.87 m,米探3井,岩心;h. 膏溶角砾岩(下)/纹层状泥晶灰岩(上),假整合接触,马三段/马四段,三川河剖面

马三期具有“两陆两隆两坳”的古构造格局^[30-31],其中盆地东部神木-志丹地区为一个地势较低的米脂坳

陷,海侵期主要以泥晶灰岩和灰质白云岩沉积为特征,海退期以膏盐岩沉积为主,沉积地层厚度明显较周缘

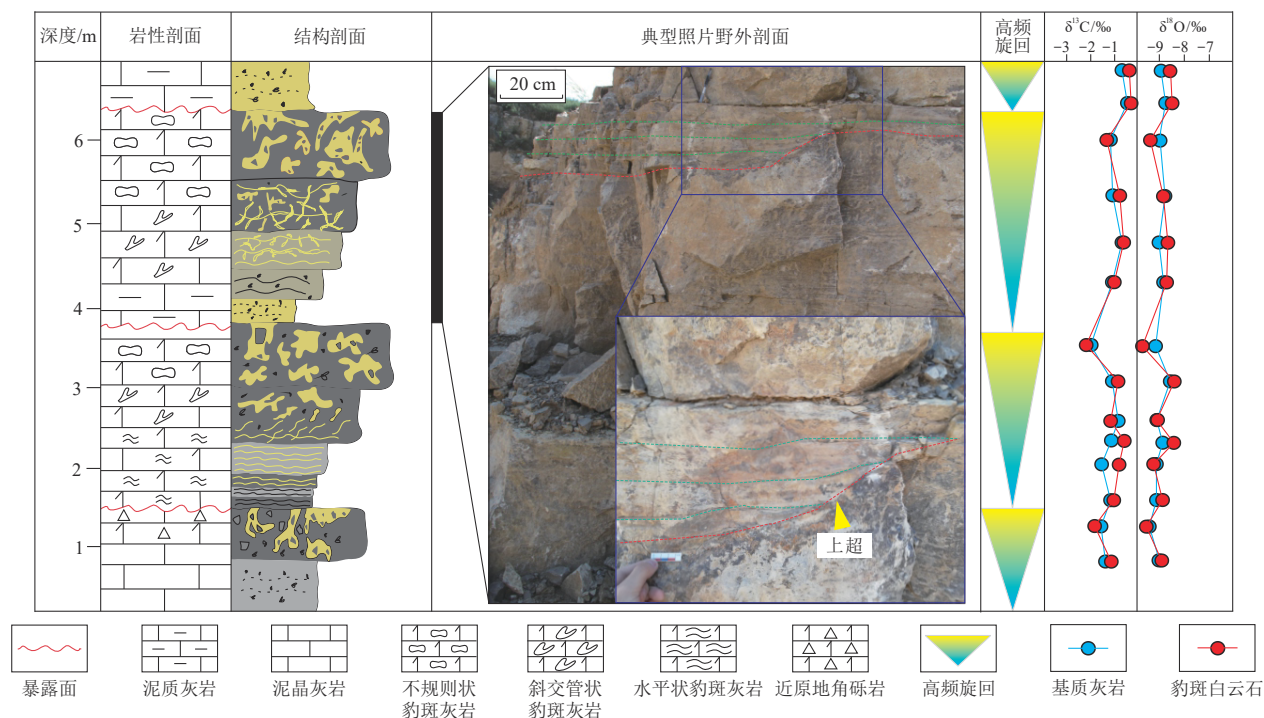


图7 鄂尔多斯盆地关家崖剖面奥陶系马四段高频旋回沉积特征柱状图(剖面位置见图1a,据文献[29]修改)

Fig. 7 Column showing the depositional characteristics of high-frequency cycles in the Ordovician Ma 4 Member on the Guanjiaoya outcrop section (see Fig. 1b for the section location; modified after reference [29])

隆起大(图1c),地震剖面上可见填平补齐沉积反射特征^[32];而该特征与新恢复出的马四期古构造格局恰好相反(图4b),这表明鄂尔多斯盆地在奥陶纪马三期末或马四期初发生了明显的古构造格局反转,从而导致由马一期一马三期的东低西高转变为东高西低。

3.1 古基底结构差异为神木-志丹低古隆起形成奠定了基础条件

基底的组成、强度与活动性对构造-沉积分异有明显的控制作用。基底组成差异制约基底的强弱、活动性与活动方式,从而制约上覆盖层的构造-沉积分异^[33]。以火成岩变质为主的基底因其多富含铁磁性矿物(如磁铁矿等副矿物),常表现为高磁性异常体;而以沉积变质的基底因其所含磁性矿物通常很少,常表现为低磁性的异常区^[16]。因此,磁异常可反映区域构造异常特征,并推断磁性基底的性质。鄂尔多斯盆地磁异常图显示(图1a),该盆地主要存在北部东西向正磁异常和南部北东向正、负磁异常相间的2大磁异常区,其中沿大同-华池北东向基底断裂存在1条航磁异常梯度带,其南、北的航磁异常形态、地壳速度结构和基底物质组成显著不同^[16-18,34-35]。

马四段神木-志丹低古隆起主要发育于中南部呈北东向正磁异常的吕梁群基底岩系之上,其北侧为北

东向负磁异常区(图1a)。正、负磁异常区以大同-华池基底断裂为界,断裂南侧钻遇基底岩系的庆深1井、龙探2井、镇钾1井和米131井发现了黑云二长片麻岩、黑云二长花岗片麻岩和夕线黑云母片麻岩等岩石^[17]。Rb-Sr和锆石U-Pb定年均指示岩体形成于古元古代2.2~2.0 Ga,并经历了1.96~1.85 Ga时期的变质作用改造,其中花岗片麻岩类与北东向航磁异常带延伸至东缘吕梁山地区花岗片麻岩的形成年龄一致,表明该磁异常带存在1期古元古代中期的花岗岩岩浆活动带^[17];毗邻断裂北侧基底与其北缘孔兹岩带分布区基底片麻岩和变质表壳岩的物质组成和演化过程十分类似,是一主要由新太古代和古元古代陆壳物质构成的地块^[16-17]。奥陶系马四段与古基底之间虽隔了长城系、寒武系和奥陶系马一段一马三段等地层单元,但从新恢复出的马四段古构造格局展布特征来看,神木-志丹低古隆起形态(图3)与吕梁群基底岩系平面分布范围(图1a)高度相似,表明古基底的组成差异对奥陶系马四段神木-志丹低古隆起的形成具有明显控制作用,为该隆起的形成奠定了基础条件。

3.2 神木-志丹低古隆起形成时间及构造反转依据

构造分异势必影响沉积环境演变,继而控制沉积

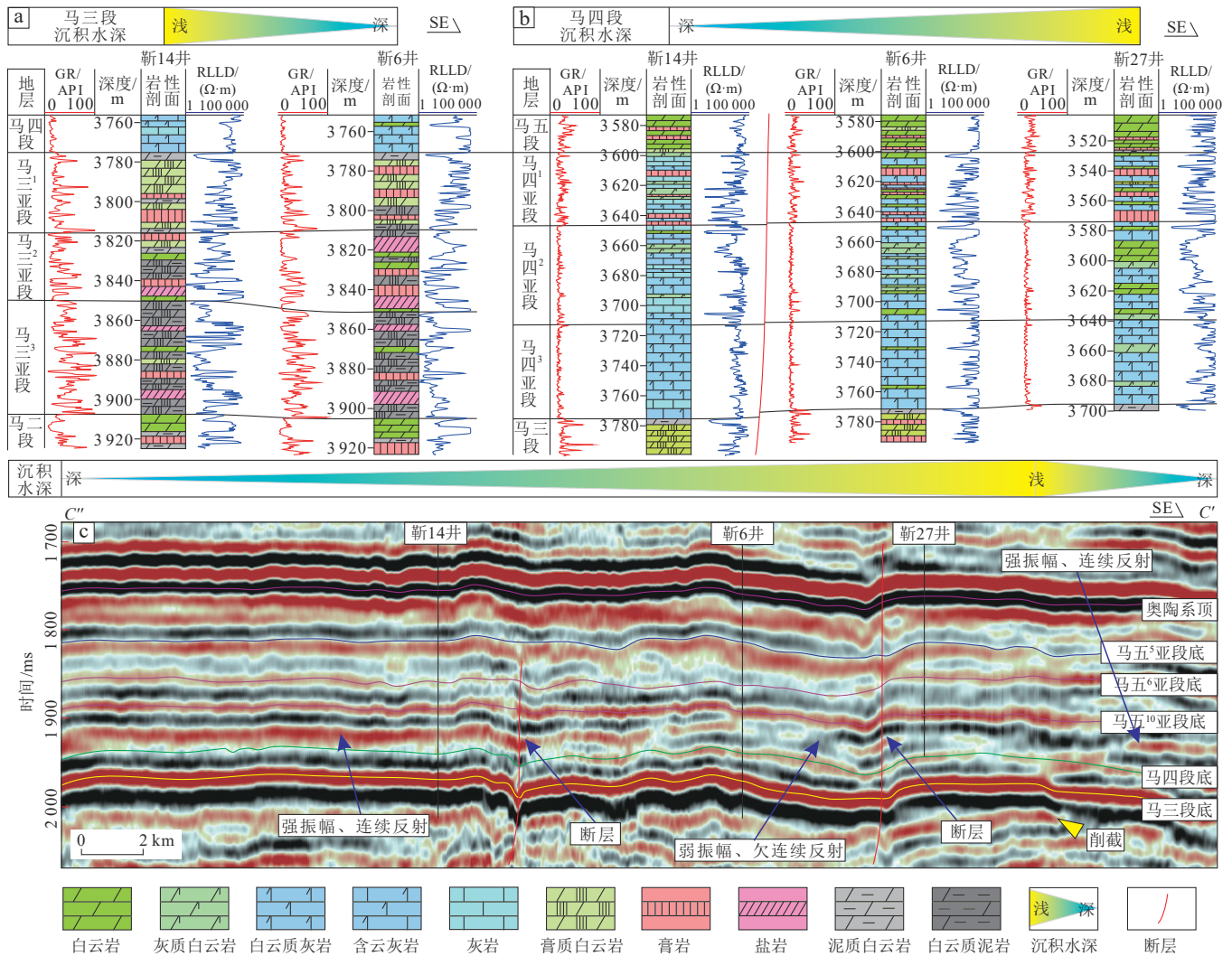


图8 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马四段构造反转地震及沉积地层依据(剖面位置见图2b)

Fig. 8 Seismic and stratigraphic evidences for identifying the tectonic inversion of the Ordovician Ma 4 Member, eastern Ordos Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 靳14井—靳6井奥陶系马三段地层连井剖面对比; b. 靳14井—靳6井—靳27井奥陶系马四段地层连井剖面对比;
c. 过靳14井—靳6井—靳27井地震剖面

物岩性及其厚度的差异变化。首先从盆地东部马三段岩性来看,米探3井马三段顶部发育具有鸡笼铁丝构造的膏质白云岩,反映出该区域在马三期末为蒸发潮坪环境且常暴露于地表,并非一个传统认为的坳陷;另外,三川河剖面奥陶系马三段顶部岩性为膏溶角砾岩,并且与马四段纹层状泥晶灰岩假整合接触,反映出盆地东部在奥陶纪马三期末或马四期初经历了短暂性暴露溶蚀。

从盆地中部过靳6井的东西向连井地层对比剖面来看(图8a, b),靳6井奥陶系马三段地层厚度为134.6 m,岩性主要为泥质白云岩和膏岩,夹4套累计厚度为21.8 m的盐岩;靳14井奥陶系马三段地层厚度132.7 m,岩性主要为泥质白云岩和膏岩,夹3套累计厚度为7.9 m的盐岩。综合马三段地层厚度和沉积物

岩性研究表明,马三期,位于该剖面东侧的靳6井水体相对较深,总体位于膏盐潟湖边缘;而位于剖面西侧的靳14井水体相对较浅,主要形成于常暴露于地表的膏云坪微相。靳14井奥陶系马四段地层厚度为177.3 m,地震剖面具强振幅连续反射特征(图8c),岩性主要为灰岩和白云质灰岩,夹少量灰质白云岩和膏岩薄层;靳6井和靳27井奥陶系马四段地层厚度分别为170.5 m和167.7 m,地震剖面具弱振幅欠连续反射特征(图8c),岩性主要为云质灰岩和白云岩薄互层,其中马四¹亚段夹较多形成于潮上带环境中且具鸡笼铁丝构造的白云质膏岩(图8e)。综合马四段地层厚度、沉积物岩性和地震反射特征研究表明,位于剖面东侧的靳6井和靳27井在马四期水体相对较浅,台内丘滩体白云岩储层发育;而位于剖面西侧的靳14井水体相对

较深,主要为丘滩间海沉积。从图4a和图9c来看,靳14井和靳6井之间存在1条向西倾且断至古基底的高角度断层,且位于断层的两侧的马四段地层厚度和岩性特征具有明显差异,具有亚段地层厚度差值由老到新逐渐减小的特征。但因该类断层断距较小,且沿该断层叠加后期构造作用改造,形成了具有挤压、走滑性质的断层,从而掩盖了马四期同沉积正断层性质。

上述特征显示,鄂尔多斯盆地古构造格局在奥陶系马三段沉积期末、马四段沉积期前发生了由“西高东低”到“西低东高”的构造反转。前人研究表明,鄂尔多斯地块在寒武纪—中奥陶世整体处于NS向拉张环

境^[36]。结合区域大地构造背景认为,奥陶纪马四期,鄂尔多斯盆地古基底断层在拉张力作用下活化并形成同沉积正断层(图9c),位于断层下盘、航磁正异常带上的古基底分布区在拉张力作用下不易发生位移演变为地势相对较高的低古隆起;而位于断层上盘的古基底分布区域在正断层作用下向下沉降从而转变为地势相对较低的坳陷或凹陷。从而也导致正断层上盘沉积厚度较断层下盘大,且断距随深度加大,地层时代愈老,断距愈大(图8b)。因此,受古基底和古断裂活化作用控制,马四段古构造格局显得与古基底形态具有明显的相似性,总体表现为盆地东部磁力正异常区为

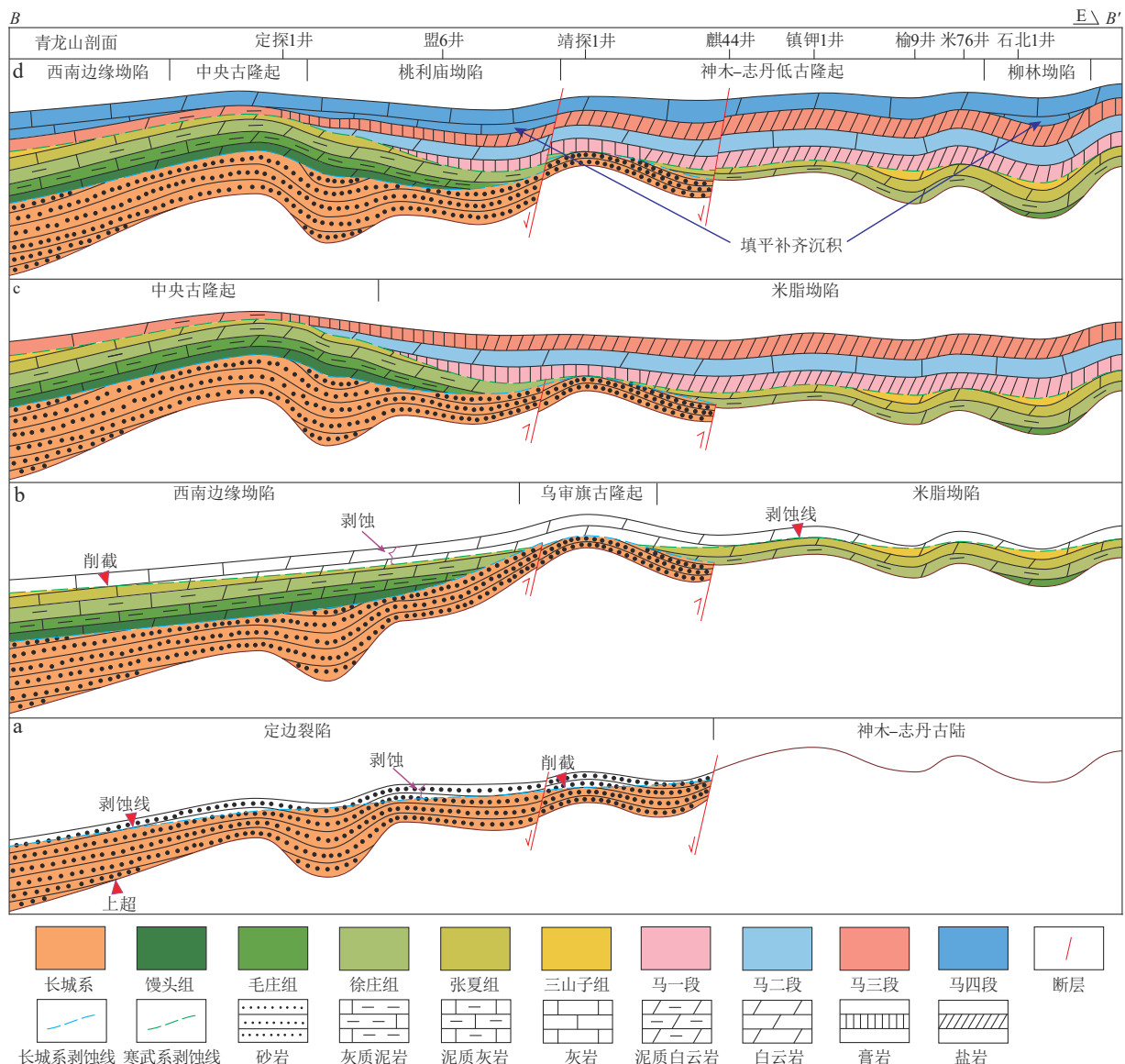


图9 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马四段神木-志丹低古隆起东西向演化示意图(剖面位置见图2a)

Fig. 9 Schematic diagrams showing the east-west evolution of the Shenmu-Zhidan low paleo-uplift in the Ordovician Ma 4 Member, eastern Ordos Basin

a. 长城系沉积—长城纪晚期剥蚀;b. 前寒武纪乌审旗古隆起形成—寒武系沉积—寒武纪晚期剥蚀;c. 前奥陶纪中央古隆起形成—奥陶系马一段、马二段和马三段沉积;d. 中央古隆起和神木-志丹低古隆起形成—奥陶系马四段沉积

奥陶系马四段低古隆起分布区,磁力负异常区为马四段拗陷或凹陷分布区。

3.3 神木-志丹低古隆起形成演化过程

基于古航磁、地震和钻井资料,结合区域地质背景和前人研究成果,恢复了鄂尔多斯盆地东部奥陶系马四段神木-志丹低古隆起的形成演化过程(图9)。

中元古代长城纪,受古基底和伸展背景下的正断层作用控制,鄂尔多斯盆地形成“西低东高”的古构造格局,盆地西南缘向神木—志丹地区逐渐超覆沉积(图1c,图9a)。长城系沉积之后,鄂尔多斯盆地在构造应力作用下发生构造抬升,长城系砂岩开始接受剥蚀并呈现出削截地震反射特征(图8c,图9a);前寒武纪,乌审旗地区在应力作用下形成了呈一个向西弯头、镰刀状外形的古隆起(图1b,图9b),该隆起位于乌拉山群(Ar_2)、集宁群(Ar_1-Ar_2)和吕梁群(Ar_3)3个不同性质基底块体的接触带,其形成可能与基底断裂的发育相关,初步认为是一个不同性质基底块体在挤压作用下形成的边界隆起。随着海平面上升,鄂尔多斯盆地再次接受海相地层沉积,华北海域和祁连海域的海水分别由东、西两侧向漫入。由于盆地西部地势较东部神木—志丹地区地势低,初始沉积地层为下寒武统馒头组,神木—志丹地区初始沉积地层为中寒武统毛庄组(图1c,图9b)。受怀远运动影响,鄂尔多斯盆地再次发生构造抬升,从而导致上寒武统三山子组和中寒武统张夏组被强烈剥蚀(图1c,图9b);前奥陶纪,盆地中部鄂托克旗—定边—环县—庆阳一带在应力作用下形成了一个呈“L型”展布并分隔华北海域和祁连海域的中央古隆起(图9c)。至此,鄂尔多斯盆地形成了“两陆两隆两拗”的古构造格局。早奥陶世,华北海域和祁连海域的海水越过盆地周缘古隆起漫入盆地中东部,鄂尔多斯盆地中东部开始接受奥陶系马一段、马二段和马三段蒸发岩和碳酸盐岩沉积。但值得注意的是,马一期至马三期,由盆地东部神木—志丹地区向盆地中央古隆起逐渐超覆沉积,形成于相对海退期的马三段沉积范围反而比形成于相对海侵期的马二段沉积范围广(图1c,图9c),表明盆地中部地区在马三期已经开始发生沉降。马四期,在古基底断裂活化背景下形成的同沉积正断层和古基底差异结构共同作用下,乌审旗—靖边—环县地区、府谷地区和柳林地区等磁力负异常的古基底分布区进一步向下沉降,形成了地势相对较低、水体相对较深的拗陷或凹陷,并在马四段底部发育填平补齐沉积(图3,图4,图9d);而位于磁力正异常区域的神木—志丹地区在正断层作用下发生古

构造格局反转,由马一期—马三期的米脂拗陷演变为呈北东西展布的低古隆起(图9d)。

4 油气勘探意义

4.1 神木-志丹低古隆起有利于丘滩体白云岩储层发育

油气勘探实践表明,古构造格局对海相碳酸盐岩沉积分异具有明显的控制作用,古地貌高部位易于发育微生物丘、礁滩体和含膏云坪等有利储集相;而古地貌低部位地势较低,往往形成不利于储层发育的丘滩间海、灰质潟湖和膏盐潟湖等微相^[37-41]。综合地震、野外剖面、钻井岩心和薄片等资料,恢复出马四段岩相古地理。结果显示,“两陆三隆四拗”古构造格局对马四段岩相古地理展布具有明显的控制作用(图10a),其中神木-志丹低古隆起地势相对较高,广泛发育微生物丘、灰泥丘和砂屑滩三类有利微相,为马四段白云岩储层的发育奠定了良好的物质基础。

前人研究表明,鄂尔多斯盆地奥陶系马四段白云岩由准同生白云石化作用形成,白云石化作用对马四段白云岩储层发育发挥着重要的积极作用:①促使灰泥颗粒形成白云石颗粒,增强了储层的抗压能力,有利于孔隙的保存;②白云石化作用使得生物潜穴中充填的灰泥转变为粉晶白云石并发育晶间孔,是斑状白云岩储层发育的关键因素^[26,29,32,42-43]。中央古隆起的凸起带和神木-志丹低古隆起地势相对较高,易于发育微生物丘、灰泥丘和砂屑滩(图10a)。3类微相中的沉积物经准同生白云化作用后可形成优质白云岩储层;桃利庙拗陷、府谷拗陷和柳林拗陷地势相对较低,与祁连广海或华北广海循环通畅,海水盐度值正常,丘滩体不发育且生物扰动作用相对较弱,难以形成发育白云岩储层的地质条件,仅在海平面下降幅度较大时发育少量薄层白云岩储层。

4.2 神木-志丹低古隆起发育规模岩性圈闭,有利于天然气富集

受丘滩体和白云石化作用共同控制,鄂尔多斯盆地神木-志丹低古隆起规模发育白云岩储层(图10b);该低古隆起带东侧柳林拗陷和东北侧府谷拗陷发育的泥晶灰岩、泥质灰岩和含云斑石灰岩岩性致密可形成良好的遮挡层;当海平面下降幅度较大且进入蒸发潮坪环境时,神木-志丹低古隆起又广泛沉积了一套厚度为1~12 m的硬石膏岩层(图4,图5c)。因此,分布于神木-志丹低古隆起带上的马四段白云岩储层在侧向

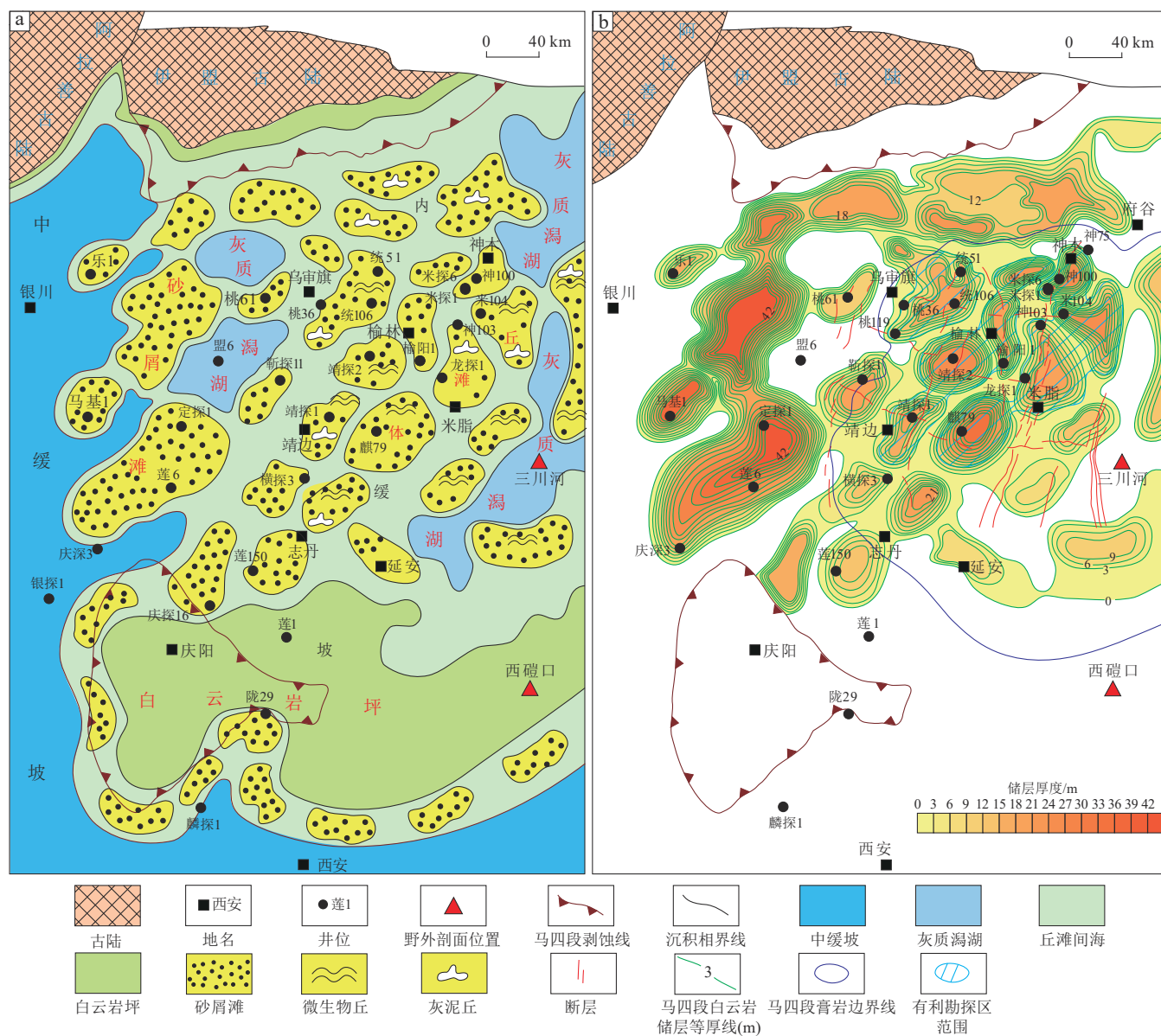


图10 鄂尔多斯盆地奥陶系马四段岩相古地理(a)及白云岩储层厚度和有利勘探区预测(b)

Fig. 10 Lithofacies paleogeography (a) and dolomite reservoir isopach map for predicting play fairways for natural gas exploration (b) in the Ordovician Ma 4 Member, Ordos Basin

致密灰岩和纵向硬石膏岩的封堵作用下,可形成封闭性能较好的岩性圈闭群。储层研究新进展显示,马四段白云岩储层储集空间以晶间孔为主。该类孔隙形成于准同生期,定型于浅埋藏期,距今时间大致为 $(350.0 \pm 33.0) \text{ Ma}^{[43]}$,早于海相烃源岩三叠纪末期的初始生、排烃时间^[44]。这表明马四段储层中的晶间孔隙为有效储集空间,源、储配置关系好,可为天然气聚集提供了规模储集空间。天然气成藏研究显示,马四段具有“自生自储、断裂疏导、构造-岩性/岩性圈闭富集天然气”的成藏地质条件^[11,45]。神木-志丹低古隆起马四段白云岩岩性圈闭体位于现今构造高部位,断层发育,遮挡条件好,有利于天然气运移和富集。为此,基于前人关于马四段烃

源岩、断裂体系分布和盖层等成藏要素的配置关系,预测出神木—榆林—靖边地区是马四段天然气有利勘探区,面积为 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图10b)。截止目前,该有利勘探区钻至马四³亚段的井位共计35口,测试产气井20口,其中米探1井和米探6井获得 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上高产天然气无阻流量,统106井获得 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上工业气流,榆阳1井、靖探2井和统51井等17口井获得低产天然气流。从产气层特征来看,纵向主要集中于马四²亚段,马四³亚段顶部和马四¹亚段下部也有少量分布;岩性主要为斑状(灰质)粉晶白云岩、粗粉晶白云岩(图6b)和叠层石白云岩(图6d);储集空间主要为晶间孔(图6b),含少量微裂缝(图6d)。

5 结论

1) 基于地震、钻井、测井、野外剖面和地球化学分析测试等资料认为,鄂尔多斯盆地东部在奥陶纪马四期存在一个呈北东向展布的神木-志丹低古隆起,宽约140 km,长约250 km,面积为 $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2) 神木-志丹低古隆起形成于拉张背景,其发育受古基底和基底断层活化后的同沉积正断层共同控制。位于断层下盘的古基底分布区域在基底断层活化后的沉积正断层作用下演变为地势相对较高的古隆起;而位于断层上盘的古基底分布区域在同沉积正断层作用下向下沉降,从而在空间上形成地势相对较低的坳陷或凹陷。

3) 神木-志丹低古隆起对盆地东部奥陶系马四段沉积分异和储层发育具有明显的控制作用,易于发育受微生物丘、灰泥丘和砂屑滩微相与白云石化作用共同控制的白云岩储层。基于烃源岩、储层、盖层和输导体系等成藏条件综合认为,神木—榆林—靖边地区是马四段天然气有利勘探区,面积为 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

参 考 文 献

- [1] 何登发,周新源,杨海军,等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 207-221.
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (2): 207-221.
- [2] 何登发,伍顺利. 天山山古隆起的“前世今生”: 论古隆起的构造复原[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 86-101.
HE Dengfa, WU Shunli. The “past and present” of the Tianjingshan palaeo-uplift: Discussion on structural restoration of paleo-uplift [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 86-101.
- [3] 杨海军,陈永权,田军,等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62-72.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72.
- [4] 杨雨,文龙,宋泽章,等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the North of central Sichuan paleo-uplift [J]. Acta Petroli Sinica, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
- [5] 严威,罗冰,周刚,等. 川中古隆起寒武系沧浪铺组下段天然气地质特征及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 290-302.

- YAN Wei, LUO Bing, ZHOU Gang, et al. Natural gas geology and exploration direction of the Cambrian Lower Canglangpu Member in central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48 (2): 290-302.
- [6] 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.
- [7] 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]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(3): 1-12.
- [8] 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, 2018.
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, 2018.
- [9] 周立明,韩征,张道勇,等. 中国新增石油和天然气探明地质储量特征[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(1): 115-121.
ZHOU Liming, HAN Zheng, ZHANG Daoyong, et al. Characteristics of incremental proven oil and natural gas geological reserves in China [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43 (1): 115-121.
- [10] 张才利,刘新社,杨亚娟,等. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 253-263.
ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42 (3): 253-263.
- [11] 付金华,于洲,李程善,等. 鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 17-27.
FU Jinhua, YU Zhou, LI Chengshan, et al. New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 17-27.
- [12] 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 Liguang, 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.
- [13] 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.
- [14] 周进高, 尹陈, 曾联波, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段颗粒滩发育特征及天然气勘探有利区[J]. *天然气工业*, 2022, 42(7): 17-30.
- ZHOU Jingao, YIN Chen, ZENG Lianbo, et al. Development characteristics of grain shoals and favorable gas exploration areas in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 17-30.
- [15] 郭绪杰, 吴兴宁, 金武弟, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组四段岩相古地理新认识及勘探区带优选[J]. *古地理学报*, 2023, 25(1): 105-118.
- GUO Xujie, WU Xingning, JIN Wudi, et al. New analysis of lithofacies palaeogeography and exploration area selection of the Member 4 of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(1): 105-118.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张成立, 苟龙龙, 白海峰, 等. 鄂尔多斯地块基底研究新的思考与认识[J]. *岩石学报*, 2021, 37(1): 162-184.
- ZHANG Chengli, GOU Longlong, BAI Haifeng, et al. New thinking and understanding for the researches on the basement of Ordos Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(1): 162-184.
- [19] 范立勇, 单长安, 李进步, 等. 基于磁力资料的鄂尔多斯盆地氦气分布规律[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(10): 1780-1789.
- FAN Liyong, SHAN Chang'an, LI Jinbu, et al. Distribution of helium resources in Ordos Basin based on magnetic data[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(10): 1780-1789.
- [20] 包洪平, 何登发, 王前平, 等. 鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及其油气控藏意义的差异[J]. *古地理学报*, 2022, 24(5): 951-969.
- BAO Hongping, HE Dengfa, WANG Qianping, et al. Four main paleoupilts evolution in Ordos Basin and their differences in significance of oil and gas reservoir control[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(5): 951-969.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 张春林, 邢凤存, 张月巧, 等. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 89-100.
- ZHANG Chunlin, XING Fengcun, ZHANG Yueqiao, et al. Tectonic evolution of Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts during the Early Paleozoic and its control on Cambrian lithofacies paleogeography in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 89-100.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 左滔, 胡忠贵, 杨威, 等. 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组盐下构造-沉积响应特征[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(2): 141-149.
- ZUO Tao, HU Zhonggui, YANG Wei, et al. Characteristics of structural-sedimentary response of the subsalt reservoir of Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(2): 141-149.
- [25] 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.
- [26] 周进高, 张涛, 于洲, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段沉积岩相古地理及其控储效应[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(4): 61-74.
- ZHOU Jingao, ZHANG Tao, YU Zhou, et al. Lithofacies paleogeography in the deposition period of the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation and its reservoir control effect, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(4): 61-74.
- [27] 于洲, 牛小兵, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地米脂地区奥陶系马家沟组四段岩相成因与分布[J]. *天然气工业*, 2021, 41(12): 38-48.
- YU Zhou, NIU Xiaobing, ZHANG Caili, et al. Genesis and distribution of reservoirs of the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 38-48.
- [28] SCHOLLE P A, BEBOUT D G, MOORE C H. Carbonate depositional environments[J]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1983.
- [29] 许杰, 肖笛, 苏文杰, 等. 鄂尔多斯盆地东缘奥陶系马家沟组四段豹斑状云质灰岩特征及成因: 以关家崖剖面为例[J]. *古地理学报*, 2022, 24(2): 261-277.
- XU Jie, XIAO Di, SU Wenjie, et al. Characteristics and genesis of leopard-spotted dolomitic limestone in the Member 4 of

- Ordovician Majiagou Formation: A case study from Guanjiaya section in eastern margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(2): 261-277.
- [30] 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(增刊2): 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.
- [31] 于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积相演化模式研究[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(3): 12-22.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WU Dongxu, et al. Sedimentary facies evolution model of Ordovician Majiagou Formation, Central-Eastern Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(3): 12-22.
- [32] 于洲, 胡子见, 王前平, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系深层白云岩储集层特征及主控因素[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 931-944.
- YU Zhou, HU Zijian, WANG Qianping, et al. Characteristics and main controlling factors of the Ordovician deep dolomite reservoirs in mid-eastern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 931-944.
- [33] 何登发, 包洪平, 高山林, 等. 构造-沉积分异原理及其地质意义[J]. *古地理学报*, 2022, 24(5): 920-936.
- HE Dengfa, BAO Hongping, GAO Shanlin, et al. Principles of tectonic-depositional differentiation and its geological significance [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2022, 24(5): 920-936.
- [34] GAO Guoming, KANG Guofa, LI Guangquan, et al. Crustal magnetic anomaly in the Ordos region and its tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 109: 63-73.
- [35] 马润勇, 朱浩平, 张道法, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂及其现代活动性[J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(4): 400-408.
- MA Runyong, ZHU Haoping, ZHANG Daofa, et al. Basement faults and their recent activity in Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(4): 400-408.
- [36] 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.
- [37] 于洲, 周进高, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶纪克里摩里期-乌拉力克期构造-岩相古地理特征[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(6): 816-825.
- YU Zhou, ZHOU Jingao, LI Chengshan, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Ordovician Kelimoli and Wulalike stages in the western edge of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(6): 816-825.
- [38] 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 884-897.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, CHEN Zhiyong, et al. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the Middle-Upper Yangtze region, South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 884-897.
- [39] 周雁, 付斯一, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界构造-沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 264-275.
- ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 264-275.
- [40] 王振宇, 曾浩, 屈海洲, 等. 四川盆地北部地区寒武系沧浪铺组沉积演化[J]. *断块油气田*, 2023, 30(5): 808-815.
- WANG Zhenyu, ZENG Hao, QU Haizhou, et al. Sedimentary evolution of the Cambrian Canglangpu Formation in northern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(5): 808-815.
- [41] 邓志强, 胡明毅, 左洛滔. 开江-梁平海槽南段长长期沉积格局认识及油气勘探意义[J]. *断块油气田*, 2022, 29(6): 780-787.
- DENG Zhiqiang, HU Mingyi, ZUO Mingtao. The understanding of sedimentary pattern in Changxing period and significance for oil-gas exploration in the southern section of Kaijiang-Liangping trough [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(6): 780-787.
- [42] 牟春国, 许杰, 古永红, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组四段储层特征及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 780-790.
- MOU Chunguo, XU Jie, GU Yonghong, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in the central and eastern Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 780-790.
- [43] 于洲, 罗晓容, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段优质白云岩储层发育特征及成因机制[J]. *天然气工业*, 2024, 44(2): 30-39.
- YU Zhou, LUO Xiaorong, ZHOU Jingao, et al. Development characteristics and genetic mechanisms of high-quality dolomite reservoirs in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(2): 30-39.
- [44] 郭彦如, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成藏特征与模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 393-403.
- GUO Yanru, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas accumulation and models in Ordovician carbonates, Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 393-403.
- [45] 周进高, 李明瑞, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统马家沟组盐下含气系统特征与勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 34-45.
- ZHOU Jingao, LI Mingrui, WU Dongxu, et al. Characteristics and exploration potential of subsalt gas-bearing system in Majiagou Formation of Middle Ordovician in the eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 34-45.