

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

周雁^{1,2}, 付斯一^{3,4}, 张涛^{1,2}, 陈洪德^{3,4}, 苏中堂^{3,4}, 张军涛^{1,2}, 张成弓^{3,4}, 刘子铭^{3,4}, 韩晓宇^{3,4}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化深部地质与资源重点实验室, 北京 102206; 3. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学深时地理环境重建与应用自然资源部重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:鄂尔多斯盆地地下古生界是重要的天然气勘探层位, 相继发现了奥陶系顶部风化壳、古隆起周缘中组合和马家沟组盐下等多套含气层系, 证明了盆地地下古生界具有良好的勘探开发潜力, 也揭示出深化古地理重建工作的紧迫性。在分析鄂尔多斯盆地构造-沉积演化过程的基础上, 对早古生代重点时期的古地理进行了重建, 进而提出了成藏区带划分的新思路。研究表明, 鄂尔多斯盆地经历了太古宙—元古宙裂陷沉积、寒武纪—奥陶纪沉积-剥蚀、石炭纪—三叠纪拗陷稳定沉积、侏罗纪—白垩纪挤压成藏和晚白垩纪—现今调整定型等5大阶段。盆地地下古生界古地理格局经历了早—中寒武世的古陆消减、沉积增长、边缘裂陷阶段和早奥陶世的隆—坳相间阶段, 并控制了优质成藏区带的分布。结合近期勘探研究进展, 依据源-储组合和空间分布, 划分出了基于主控因素的4类成藏区带: 潮缘滩白云岩成藏区、奥陶系盐下台内丘滩成藏区、西部双滩白云岩和页岩成藏区以及岩溶-滩相白云岩成藏区。不同区带显示出了不同的成藏条件和主控因素, 需要选择针对性的勘探策略。

关键词: 油气勘探; 古地理重建; 构造-沉积演化; 下古生界; 成藏区带; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin

ZHOU Yan^{1,2}, FU Siyi^{3,4}, ZHANG Tao^{1,2}, CHEN Hongde^{3,4}, SU Zhongtang^{3,4}, ZHANG Juntao^{1,2},
ZHANG Chenggong^{3,4}, LIU Ziming^{3,4}, HAN Xiaoyu^{3,4}

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Geology and Resources in Deep Stratum, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Lower Paleozoic has been an important target for natural gas exploration in the Ordos Basin. Several suites of gas-bearing sequences, such as weathering crust reservoir on top of the Ordovician, middle assemblage dolomite and sub-salt dolomite, have been discovered successively, which proves that the Lower Paleozoic in the basin is of good exploration and development potentials, and thus paleo-geographic reconstruction there is in urgent need. The study proposes a new idea of play fairway delineation of the Lower Paleozoic in the Ordos Basin from the perspective of tectono-sedimentary evolution and paleo-geographic reconstruction therein. The research shows that Ordos Basin experienced five stages of evolution, namely, the Archean-Proterozoic fault depression-deposition stage, the Cambrian-Ordovician deposition-denudation stage, the Carboniferous-Triassic stable depression-deposition stage, the Jurassic-Cretaceous compressional hydrocarbon accumulation stage and the adjustment and finalization stage from the Late Cretaceous till present. The paleo-geographic pattern of the Lower Paleozoic Ordos Basin underwent the stages of paleo-land reduction, sediment filling, margin rifting and the alternated uplift-depression during the Early Ordovician, which

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2023-01-08。

第一作者简介: 周雁(1967—), 男, 教授级高级工程师, 油气地质。E-mail: zhouyan_syky@sinopec.com。

通讯作者简介: 付斯一(1990—), 男, 副研究员、硕士生导师, 碳酸盐岩沉积学。E-mail: fusiya@cdu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202131, U19B6003, U20B6001); 中国石化科技开发项目(P20043-1, P22209-1)。

controlled the distribution of quality play fairways. Besides, the latest exploration achievements help us identify four types of quality play fairways in terms of source-reservoir assemblage, spatial distribution and major controlling factors, that is, hydrocarbon accumulation within dolomite of marginal tidal-flat facies, hydrocarbon accumulation within the Ordovician pre-salt layer of intra-platform mound shoal facies, hydrocarbon accumulation within dolomite and shale of marginal tidal-flat and intra-platform mound shoal facies in the west, hydrocarbon accumulation within dolomite of karstification and shoal facies. The play fairways of different types feature separate hydrocarbon play elements and major controlling factors, and thereby targeted exploration strategies are in need.

Key words: hydrocarbon exploration, paleo-geographic reconstruction, tectono-sedimentary evolution, Lower Paleozoic, Ordos Basin

引用格式:周雁,付斯一,张涛,等. 鄂尔多斯盆地古生界构造-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. DOI: 10. 11743/ogg20230202.

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. DOI: 10. 11743/ogg20230202.

碳酸盐岩地层中蕴藏着丰富的油气资源,在中东、北美和中亚地区^[1-2],已发现了多个可采石油储量亿吨级和可采天然气储量万亿方级的大型油气田^[3-5]。伴随着油气勘探开发理论和技术的日益完善,碳酸盐岩地层将显现出更大的油气勘探潜力^[6]。鄂尔多斯盆地古生界海相碳酸盐岩广泛发育,除在北部伊盟古陆区有少量缺失以外,盆地大部分区域均有分布,碳酸盐岩累积厚度一般在200~500 m,局部可达1 500 m以上^[7],是良好的碳酸盐岩油气勘探主战场。

鄂尔多斯盆地古生界勘探始于20世纪70年代^[8],并在岩溶古地貌理论的指导下于1989年首次取得重大突破,发现了奥陶系(马家沟组五段,简称马五段)顶部的古风化壳靖边气田^[4],证明了盆地古生界碳酸盐岩领域具有良好的勘探前景。进入21世纪以来,油气勘探不断取得新的发现,在中央古隆起边缘中组合(马五⁵亚段—马五¹⁰亚段)的白云岩层系^[9]和盆地东部奥陶系盐下层系^[10-12]中相继取得了重大勘探突破。

针对鄂尔多斯盆地古生界的进一步勘探与开发,不同学者相继提出了很多勘探目标区,例如盆地西部海相页岩^[13]、陇东地区前石炭系风化壳^[14]、盆地南部生物礁^[15]和寒武系古风化壳^[16]等。笔者在综合前人研究的基础上,从全盆地构造-沉积演化的角度出发,结合本次古地理格局重建,基于“构造控盆、盆地控相、相控储层”的思想,划分了鄂尔多斯盆地古生界的成藏区带,讨论了不同区带的形成演化和主控因素,并分析了各区带的勘探潜力。

1 盆地构造-沉积演化

鄂尔多斯盆地属于华北克拉通盆地的一部

分^[17-18],是在元古宇基底上发育起来的大型沉积盆地^[19]。东起吕梁山,南抵渭河盆地和秦岭,西达六盘山、银川地堑、贺兰山和巴彦浩特盆地,北至河套盆地和阴山,盆地本部总体为一向西缓倾 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的块体。目前,盆地本部依据构造形态和地层发育特征,划分为伊盟隆起、西缘冲断带、伊陕斜坡、晋西挠褶带、天环坳陷带和渭北隆起等6个构造单元(图1)。除了缺失志留系、泥盆系和部分石炭系以外,相对完整地保留了寒武系-奥陶系、石炭系中上统-二叠系以及中生界等层系的沉积(图2)。

对于克拉通盆地而言,其构造-沉积演化受控于板块构造间的相互作用及其所产生的板内应力在克拉通盆地内的有效作用范围^[20-21],当然也受不同的构造动力体系控制^[22]。在这些作用力下所形成的古构造(内裂陷、古隆起、古坳陷和深大断裂等)对层序地层、沉积物类型、古地理展布和断裂输导体系等具有重要的意义^[23],进而深刻影响着现今成藏区带的划分。

根据鄂尔多斯盆地构造演化和沉积物充填物特征,笔者将鄂尔多斯盆地构造-沉积演化划分为5个阶段:太古宙—元古宙裂陷沉积阶段、寒武纪—奥陶纪沉积-剥蚀阶段、石炭纪—三叠纪坳陷稳定沉积阶段、侏罗纪—白垩纪挤压成藏阶段和晚白垩纪—现今调整定型阶段(图3)。

1.1 太古宙—元古宙裂陷沉积阶段

鄂尔多斯盆地的基底形成于太古宙—早元古代,属于华北克拉通基底的7个微陆块之一^[19,24]。主要的岩石类型为经历了强变质作用的花岗片麻岩、片麻岩、石英岩、大理岩和片岩等。U-Pb年代学、Hf同位素和Nd同位素数据反映出在太古宙—早元古代盆地经历

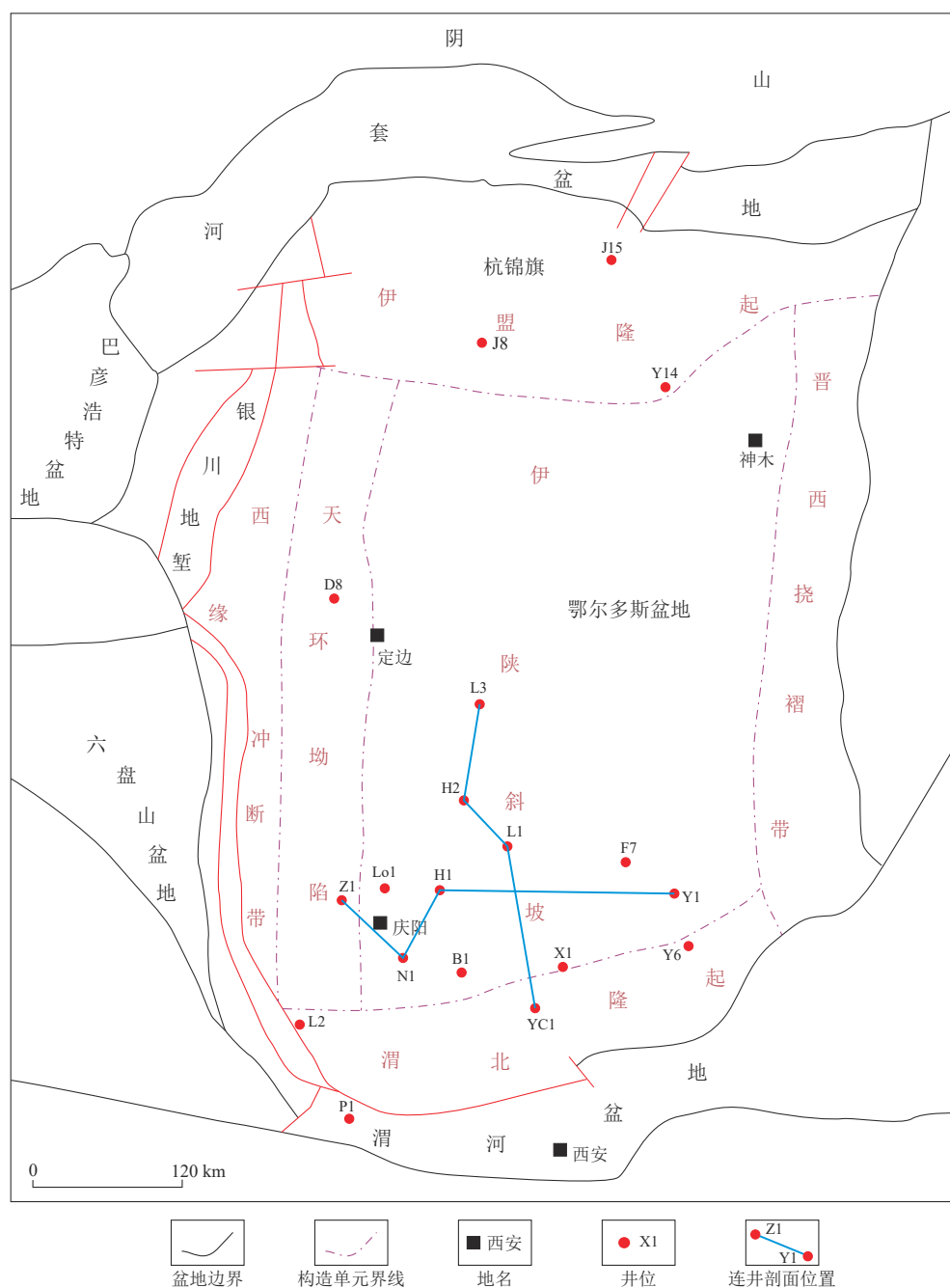


图1 鄂尔多斯盆地及邻区构造单元划分

Fig. 1 Map showing the tectonic units in the Ordos Basin and adjacent areas

了两期岩浆活动和一期变质作用的改造^[25],在盆地内形成了北部、西北部和中南部3大基底发育区,整体走向以NE向为主。到中元古代,鄂尔多斯盆地进入裂谷作用活跃期^[26],发育大陆边缘裂谷及陆内裂陷槽。在大陆岩石圈热冷却收缩的驱动下,在裂陷活动最强烈的地区形成了稳定的沉积与沉降中心。此时,鄂尔多斯盆地西部、南部与秦祁海槽相连,东部为吕梁古陆,北部为伊盟古陆和阿拉善古陆,南缘由南向北发育有伸向盆地内部的晋豫陕拗拉槽、晋陕拗拉槽、定边拗

拉槽和贺兰山拗拉槽^[27]。到新元古代(1 000 Ma左右),盆地南缘与北秦岭之间的洋盆逐渐关闭^[21],盆地北缘古亚洲洋向华北板块俯冲^[28],盆地南缘和北缘进入了被动大陆边缘-碰撞挤压造山阶段。太古宙-元古宙沉积的裂陷槽,对寒武系和奥陶系,甚至是上古生界的沉积都有着深远的影响。

1.2 寒武纪—奥陶纪沉积-剥蚀阶段

寒武纪—奥陶纪,鄂尔多斯盆地的古构造格局基

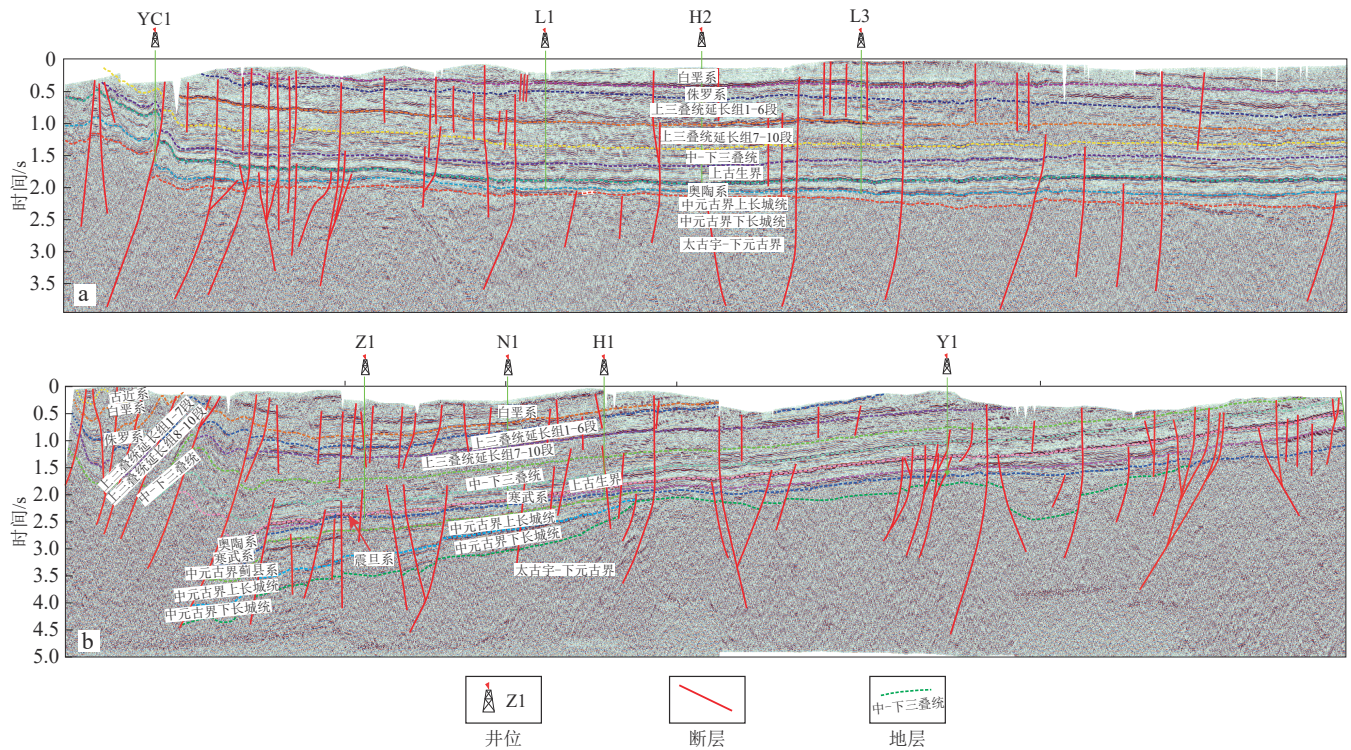


图2 鄂尔多斯盆地地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Seismic sections of the Ordos Basin

a. 南北向剖面; b. 东西向剖面

本继承了新元古代的特征,盆地内部表现为古陆与洼地并存的特征。在Rodinia超大陆裂解所形成的拉张背景下,受祁连-秦岭洋和古亚洲洋的影响^[29],在早-中寒武世辛集期-张夏期,盆地内部随着东南方向海水的入侵,古陆面积不断缩小,沉积范围扩大,但在杭锦旗地区整体缺失寒武系沉积,出现了伊盟隆起、庆阳隆起和吕梁隆起3块古陆,鄂尔多斯盆地内整体古地貌呈北高南低的特征。

晚寒武世,秦岭洋壳开始俯冲,盆地南缘由被动大陆边缘向主动大陆边缘转换,构造应力开始由拉张向挤压转化,鄂尔多斯盆地整体开始隆升,西南部的庆阳隆起继续向北延伸构成相对独立的中央古隆起。中奥陶统马家沟组沉积期,南北向挤压加剧,盆内发生拗陷^[30],早期的中央古隆起在快速海侵的作用下被分割为伊盟隆起和庆阳古隆起,盆地中东部发育米脂拗陷和吕梁水下古陆,杭锦旗南部地区接受浅海碳酸盐岩沉积。

晚奥陶世,秦祁洋和兴蒙洋的俯冲导致了盆地南北向挤压的进一步加剧,鄂尔多斯盆地整体抬升^[31],盆地主体不再接收沉积,仅盆地西缘和南缘发育海相地层。由于构造性质转变,盆地西缘和南缘具有弧后前陆盆地性质,从盆地边缘向海盆内形成一系列同沉

积正断层,使盆地边缘地形变陡。

1.3 石炭纪—三叠纪拗陷稳定沉积阶段

石炭纪—三叠纪,鄂尔多斯盆地进入内克拉通盆地演化阶段。晚二叠世之前,古亚洲洋动力体系控制着整个华北地台^[32],当然也包括鄂尔多斯盆地在内的构造-沉积演化,兴蒙洋壳的俯冲,导致盆地北部在挤压的构造背景下发生隆升,形成了北高南低的古构造格局,杭锦旗地区接受海-陆过渡相的沉积,东西向断裂呈分段式发育。二叠世末期古亚洲洋封闭^[33],鄂尔多斯盆地的构造-沉积转换为受古特提斯动力体系的控制,区域构造动力也由早期的南北向伸展转变为南北向的挤压。此时,秦岭海槽向北发生俯冲、消减,以及兴蒙海槽因西伯利亚板块与华北板块拼合而消亡,华北地台整体抬升。自此,海水完全退出了鄂尔多斯盆地,沉积环境演变为了内陆湖盆拗陷沉积体系。到中-晚三叠世,印支运动是盆地演化重要的构造事件,整个华北克拉通盆地由此前的南北向挤压,转变为东部和西部构造应力场的联合作用体制。印支运动使得华北内陆盆地整体抬升^[34],三叠系遭受长时间的剥蚀,此时的古地貌具有北高南低、西高东低的特征。

育有3个强烈的隆升阶段^[37-38]。

1.5 晚白垩纪—现今调整定型阶段

晚白垩世以来,鄂尔多斯盆地的构造-沉积演化受到太平洋动力体系的控制,青藏高原的隆升作用影响日益明显。鄂尔多斯盆地整体大规模抬升、湖盆消失,此后缺失了区域性的广泛沉积,盆地进入了后期调整定型阶段。盆地周缘河套、银川和渭河等一系列新生断陷盆地相继形成,第四系大多直接覆盖在上白垩统或更老的地层之上。

2 下古生界古地理格局重建

古地理格局的重建可以为深部油气的勘探提供基础和前提^[39-40],不少学者对鄂尔多斯盆地地下古生界的岩相古地理开展过不同程度的研究,取得了丰硕的成果。笔者收集了近年来最新的下古生界钻井和野外新资料,重建了鄂尔多斯盆地寒武世—奥陶世的古地理格局。

2.1 早—中寒武世古地理格局

早—中寒武世构造格局(图4)对基底断裂具有继承性,特别是西南边缘形成伸向盆地内的裂陷槽,盆地内部相对低洼区域亦呈NE向展布,表现出基底断裂影响的痕迹。故在此时期,盆地内部格局表现为古陆与沉积洼地并存,西南边缘因裂陷楔向盆内而呈齿状边界。早—中寒武世构造-沉积分异古地理格局特征为:古陆消减、沉积增长、边缘裂陷。该时期鄂尔多斯古陆逐渐消减为北部伊盟古陆、乌审古陆、东部吕梁古陆和西南部镇原古陆,古陆间发育海相碳酸盐岩沉积,其中不乏近NE向洼地;盆地西缘和南缘继承基底断裂,形成了伸入盆地内部的裂陷洼地。西缘裂陷近NE向雁列式排布,延伸最远者为同心—定边裂陷;南缘发育一较宽NE向裂陷,主要沿淳化—富县一带展布。这种构造-沉积分异格局控制了早—中寒武世的古地理格局及其沉积体系演化过程。

其中,在张夏组重点储层段沉积时期,古地理平面呈现出盆地南部与西部为陆棚、潮下坪相间,盆地中部与东部广泛分布潮云坪,同时在古陆周围发育泥云坪或潮坪的古格局(图5)。其中陆棚位于盆地西部银川一带、同心大小罗山一带以及盆地南部岐山二郎沟—富平赵老峪一线,沉积物以泥岩和泥页岩为主;潮下带则位于盆地西部的石嘴山陶思沟—平凉三道沟一线和南部的岐山二郎沟—河津西磴口一线,发育潮下坪微相,沉积以泥晶灰岩和鲕粒灰岩为主;在盆地西南部和



图4 鄂尔多斯盆地早—中寒武世古地理格局

Fig. 4 Map showing the paleo-geographic pattern of the Ordos Basin during the Early-Middle Cambrian

东部的古陆周围则发育有潮坪,沉积主要为泥晶白云岩、鲕粒白云岩和灰质白云岩等;在盆地北部的古陆周围则发育泥云坪,大致位于鄂尔多斯—鄂托克旗一线以及E6-T100-T86一带,呈环状分布;潮云坪则发育于盆地中部至东部的大部分地区。

2.2 晚寒武世古地理格局

自晚寒武世始,鄂尔多斯盆地构造格局与早—中寒武世迥然不同,基底断裂影响几乎消失,盆地北部伊盟隆起、乌审旗隆起与西南部镇原隆起相接,在盆地中、西部形成横亘南北的古隆起,仅在隆起周缘发生沉积,晚寒武世吕梁古陆依旧存在于盆地东部,古地理格局总体以“隆—坳”相间为特色,呈现古隆起与沉积拗陷共存特征(图6)。

从沉积物的角度来看,晚寒武世(三山子组沉积



图5 鄂尔多斯盆地寒武纪张夏期古地理格局

Fig. 5 Map showing the paleo-geographic pattern of the Ordos Basin during the deposition of the Cambrian Zhangxia Formation

期)东、西部海域没有贯通,环绕中央古隆起发育潮上泥灰坪、潮间云坪和潮下灰坪。鄂尔多斯—榆林—靖边—庆城一带为陆表海沉积,受华北海影响,主要沉积一套含泥白云岩、泥质白云岩和白云岩,发育潮上泥云坪和潮间云坪。原吕梁隆起位置处发育泥质白云岩,为泥云坪。古隆起西缘主要发育白云岩和灰岩的空间岩相组合,为潮上泥灰坪、潮间云坪和潮下灰坪的沉积体系组合。

2.3 早奥陶世古地理格局

早奥陶世构造格局与晚寒武世相似,但亦有不同:东部吕梁古陆沉没于水下并接收沉积,中、西部中央古隆起在不同时期发育范围有消减,甚至在最大海泛期(马四段沉积期)定边一带淹没水下,仅北部伊盟隆起和西南部镇原隆起出露水上。盆地西南边缘沉积大套厚层碳酸盐岩,向外部深水区域转变为硅质岩;盆地东



图6 鄂尔多斯盆地晚寒武世古地理格局

Fig. 6 Map showing the paleo-geographic pattern of the Ordos Basin during the Late Cambrian

部在米脂一带形成坳陷,海退期发育膏盐岩,海进期形成各类灰岩组合(图7)。

在重点层段马四段沉积期,东、西部海域完全连通,仅存西南部隆起和北部隆起,围绕古隆起周缘形成潮坪环境,盆地东部与西南缘沉积体系存在差异。盆地东部发育白云质灰岩、灰岩、白云岩和泥质灰岩,为开阔台地沉积环境。盆地西南缘主要形成了灰岩、灰质白云岩和白云质灰岩组合,从盆地向秦祁海依次发育云坪—开阔海—陆棚沉积体系(图8a)。

在马五段沉积期,东部华北海和西部秦祁海不再连通,围绕古隆起周缘形成环陆潮坪环境。盆地东部主要受华北海影响,形成了一套白云岩、灰质白云岩、含泥白云岩及膏盐岩相组合,为局限台地相沉积。吴起—乌审旗一带潮间云坪中发育滩相沉积,在榆林—柳林三川河一带形成膏盐湖。盆地西南缘形成灰岩、白云岩和含泥白云岩的沉积组合体,表明海水局限在



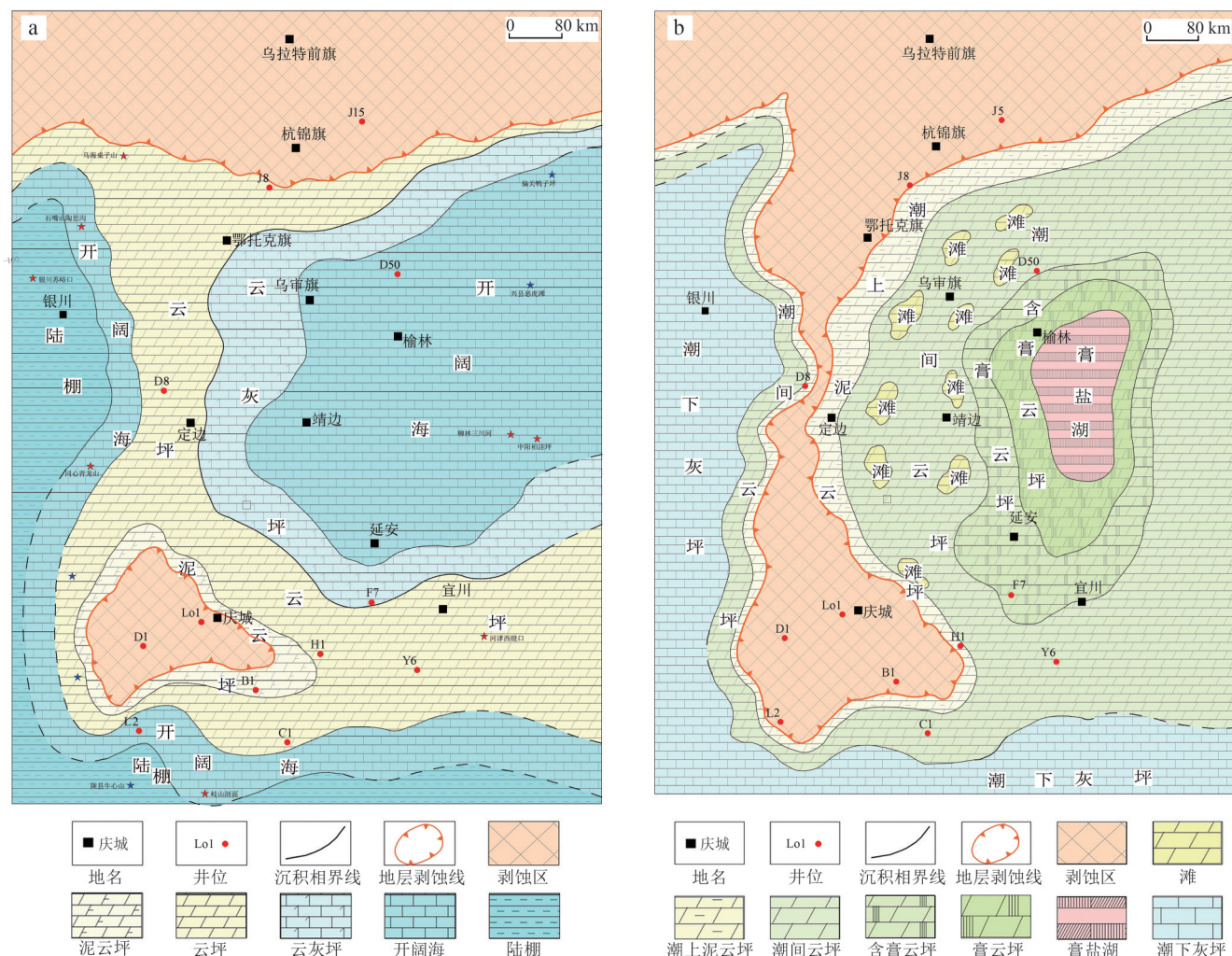


图8 鄂尔多斯盆地马家沟组沉积期古地理格局

Fig. 8 Maps showing the paleo-geographic pattern of the Ordos Basin during the deposition of Majiagou Formation

a. 马四段; b. 马五段

作用强烈,其中双滩带白云岩是指桌子山组与克里摩里组叠加的颗粒白云岩储层。储集空间主要为晶间溶孔、粒间溶孔、溶缝和溶洞。储层的发育受沉积相、白云岩化强度和溶蚀作用共同控制,与北部潮缘滩形成于不同的背景,盆地西部的滩相白云岩中主要见珊瑚礁和海绵礁,礁内为灰泥充填,砂屑之间同样也为灰泥充填,而非亮晶胶结。因此,盆地西部的滩带是形成于低能环境之下的。克里摩里组之上通常与上古生界的泥岩相接触,这类泥岩可以作为良好的盖层,形成岩性圈闭。气源可以来自于上古生界的煤系烃源岩和乌拉力克组黑色页岩,部分地区的克里摩里组或桌子山组直接与上古生界接触,气源可沿断裂体系向下运移,而乌拉力克组泥页岩已被证实具有良好的生烃潜力。对于乌拉力克组本身而言,泥页岩中发育的有机质孔可以作为良好的储层,区内泥页岩有机质含量高,沉积厚度大,其本身可以成为自生自储型的有利勘探目标区。

3.4 岩溶-滩相白云岩成藏区

分布于盆地南部,形成于秦祁构造体系的控制之下。晚奥陶世,鄂尔多斯盆地南侧的秦祁洋向北发生俯冲,直至晚三叠世闭合,导致了华北地台的整体抬升,海水逐渐退出全区,盆地属性由海相沉积体系逐渐演变为了陆相沉积体系,尤其是秦祁洋的演化控制了盆地南部的沉积与成藏。在秦祁洋向北俯冲的过程中,鄂尔多斯盆地南部抬升明显,寒武系张夏组和三山子组大范围暴露剥蚀,形成了大量的岩溶缝洞体系,为有利成藏区的形成提供了先决条件,主要储层岩石类型为细-中晶白云岩和砂屑白云岩^[46-47]。在靠近庆阳古隆起的地区,张夏组或三山子组直接与上古生界煤系地层相接触,后者为成藏区提供气源,区域内的寒武系顶部风化壳储层是良好的勘探目标^[16, 48]。除寒武系之外,奥陶系平凉组和背锅山组还发育有重要的生物

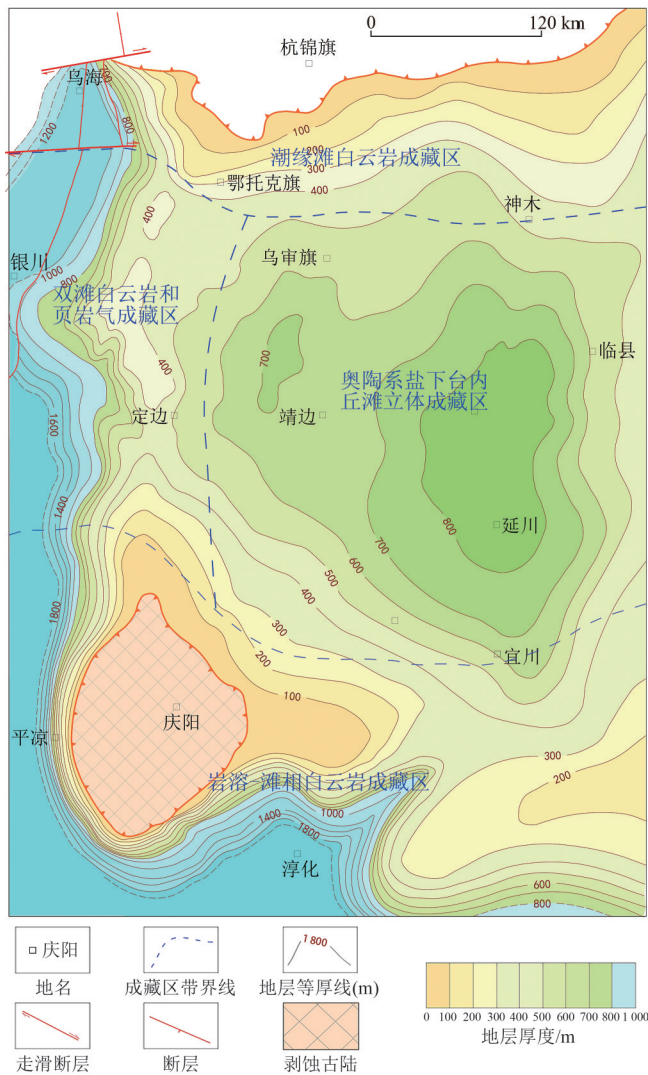


图9 鄂尔多斯盆地古生界成藏区带划分(据文献[41]修改)

Fig. 9 Map showing the delineation of the Lower Paleozoic play fairways in the Ordos Basin

滩(礁)相储层,主要的生物碎屑包括海绵、珊瑚和藻类等,储集空间主要为晶间孔、溶孔和溶缝。这类礁滩相储层的白云岩化程度并不高,首先应查明区内白云岩的成因机理和分布。

4 结论

1) 下古生界是海相沉积阶段,北部兴蒙构造体系和南部秦祁构造体系的发展演化控制了盆地沉积充填,奠定了生-储-盖基本条件。后期叠加了复杂的改造,但是仍然保持了前期成藏格局。

2) 依据源-储组合和空间分布,结合最新的勘探成果和研究进展,划分出了4个成藏区带。不同区带显示出了不同的成藏条件,需要针对性的勘探策略。在盆地北部,要关注兴蒙构造体系的主控作用,聚焦研

究潮缘滩白云岩成藏区;在盆地东部,要重视分析差异性联合及转换复合控制作用,聚焦研究奥陶系盐下台内丘滩成藏区;在盆地西部,要重视研究南、北体系的复合叠加作用,关注双滩白云岩和页岩成藏区;在盆地南部,要重视研究秦祁构造体系主控下的岩溶-滩相白云岩成藏区,关注三山子组和张夏组等层位。

参考文献

- [1] 谷志东,汪泽成,胡素云,等. 全球海相碳酸盐岩巨型油气田发育的构造环境及勘探启示[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 106-118.
GU Zhidong, WANG Zecheng, HU Suyun, et al. Tectonic settings of global marine carbonate giant fields and exploration significance [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 106-118.
- [2] 马永生,何登发,蔡勋育,等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007-1020.
MA Yongsheng, HE Dengfa, CAI Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1007-1020.
- [3] KENNEDY H T, DARDAGANIAN S G, CLANTON J L. Equilibrium calculations on the Kelly-Snyder reservoir [J]. Journal of Petroleum Technology, 1959, 11(9): 92-94.
- [4] 何自新,郑聪斌,王彩丽,等. 中国海相油气田勘探实例之二 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 37-44.
HE Zixin, ZHENG Congbin, WANG Caili, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 2): Jingbian Gas Field, Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(2): 37-44.
- [5] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 元坝气田长兴组—飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1001-1011.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba Gas Field [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 35(6): 1001-1011.
- [6] 马永生. 中国海相碳酸盐岩油气资源、勘探重大科技问题及对策(摘要)[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1/2): 15.
MA Yongsheng. Major scientific and technological problems and countermeasures for oil and gas resources and exploration of marine carbonate rocks in China (abstract) [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(1/2): 15.
- [7] 杨华,付金华,魏新善,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740.
YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(5): 733-740.
- [8] 杨俊杰,裴锡古. 中国天然气地质学(卷四): 鄂尔多斯盆地[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1-291.
YANG Junjie, PEI Xigu. Natural gas geology in China (Volume 4): Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 1-291.
- [9] 杨华,付金华,包洪平. 鄂尔多斯盆地古生界碳酸盐岩新领域研究与勘探进展[C]//第四届中国石油地质年会论文集. 北京: 中国石油学会, 2011: 232-243.

- YANG Hua, FU Jinhua, BAO Hongping, et al. Research and exploration progress in the new field of Lower Paleozoic carbonate rocks in Ordos Basin [C]//Proceedings of the Fourth China Petroleum Geology Annual Conference. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2011: 232-243.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 33-44.
- FU Suotang, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 33-44.
- [14] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 820-835.
- DU Jinhu, LI Xiangbo, BAO Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 820-835.
- [15] 夏明军, 郑聪斌, 毕建霞, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系生物礁及其天然气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 178-182, 271.
- XIA Mingjun, ZHENG Congbin, BI Jianxia, et al. Ordovician reefs and the prospect of gas, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(2): 178-182, 271.
- [16] 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.
- [17] KUSKY T M. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 26-35.
- [18] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1335-1349.
- ZHAI Mingguo. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1335-1349.
- [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] LI Sanzhong, ZHAO Guochun, DAI Liming, et al. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 64-79.
- [21] 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 Petroli Sinica, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [22] 党犇. 鄂尔多斯盆地构造沉积演化与下古生界天然气聚集关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2003.
- DANG Ben. The tectonic and sedimentary evolution and its relationship to gas accumulation of Lower Paleozoic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2003.
- [23] 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等. 克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用——以四川盆地震旦系—三叠系为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 9-23.
- WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: A case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 9-23.
- [24] ZHAI Mingguo, SANTOSH M. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview [J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 6-25.
- [25] 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.
- [26] 陈友智, 付金华, 杨高印, 等. 鄂尔多斯地块中元古代长城纪盆地属性研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 856-864.
- CHEN Youzhi, FU Jinhua, YANG Gaoyin, et al. Researches on basin property of Ordos Block during Mesoproterozoic Changcheng period[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(3): 856-864.
- [27] 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.
- [28] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.
- ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.
- [29] 陈安清. 鄂尔多斯地块早古生代盆地演化与物质聚集规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- CHEN Anqing. Basin evolution and sediments accumulation during Eopaleozoic in Ordos continental block [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [30] 王雪莲, 王长陆, 陈振林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩

- 溶储层研究[J]. 特种油气藏, 2005, 12(3): 32-35.
- WANG Xuelian, WANG Changlu, CHEN Zhenlin, et al. Study of Ordovician weathering crust karst reservoirs in Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(3): 32-35.
- [31] 翟明国. 鄂尔多斯地块是破解华北早期大陆形成演化和构造体制谜团的钥匙[J]. 科学通报, 2021, 66(26): 3441-3461.
- ZHAI Mingguo. Ordos Block (Basin) is a key to understand early continental evolution and tectonic regime of the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(26): 3441-3461.
- [32] 雷开宇, 刘池洋, 张龙, 等. 鄂尔多斯盆地北部中生代中晚期地层碎屑锆石 U-Pb 定年与物源示踪[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1522-1541.
- LEI Kaiyu, LIU Chiyang, ZHANG Long, et al. Detrital zircon U-Pb dating of Middle-Late Mesozoic strata in the Northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1522-1541.
- [33] XIAO Wenjiao, WINDLEY B F, SUN Shu, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2015, 43(1): 477-507.
- [34] MENG Qingren, WU Guoli, FAN Longgang, et al. Late Triassic uplift, magmatism and extension of the northern North China Block: Mantle signatures in the surface [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 547: 116451.
- [35] 汤锡元, 郭忠铭, 王定一. 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带特征及其演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(1): 1-10.
- TANG Xiyuan, GUO Zhongming, WANG Dingyi. The characteristics and evolution of the thrust nappe tectonic belt and its petroleum potential in the West Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(1): 1-10.
- [36] 任战利, 祁凯, 刘润川, 等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1213-1234.
- REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [37] 赵俊峰, 刘池洋, 王晓梅, 等. 吕梁山地区中-新生代隆升演化探讨[J]. 地质论评, 2009, 55(5): 663-672.
- ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, WANG Xiaomei, et al. Uplifting and evolution characteristics in the Lüliang mountain and its adjacent area during the Meso-Cenozoic [J]. Geological Review, 2009, 55(5): 663-672.
- [38] 黄志刚, 郑庆荣, 孙二虎, 等. 吕梁山脉中北段元古代花岗岩体隆升演化的裂变径迹证据[J]. 地质学报, 2018, 92(6): 1216-1227.
- HUANG Zhigang, ZHENG Qingrong, SUN Erhu, et al. Fission track evidence of tectonic evolution of the Paleoproterozoic granitic pluton in the north-central part of Lüliang mountain [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(6): 1216-1227.
- [39] 陈启林, 白云来, 马玉虎, 等. 再论鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理及沉积构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1697-1715.
- CHEN Qilin, BAI Yunlai, MA Yuhu, et al. Further study on lithofacies palaeogeography and sedimentary-tectonic evolution of Cambrian in Ordos Basin, North China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1697-1715.
- [40] 张光亚, 童晓光, 辛仁臣, 等. 全球岩相古地理演化与油气分布(一)[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 633-652.
- ZHANG Guangya, TONG Xiaoguang, XIN Renchen, et al. Evolution of lithofacies and paleogeography and hydrocarbon distribution worldwide (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 633-652.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 付斯一. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段盐下白云岩成因及储层形成机理[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- FU Siyi. Formation mechanism and dolomitization of pre-salt reservoir: The Ordovician Majiagou Fifth Formation, east-central Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [44] 张道锋, 刘新社, 高星, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系海相碳酸盐岩地质特征与成藏模式研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 92-101.
- ZHANG Daofeng, LIU Xinshe, GAO Xing, et al. Geological characteristics and accumulation model of Ordovician marine carbonate in western Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 92-101.
- [45] LI Jian, LI Jin, LI Zhisheng, et al. Characteristics and genetic types of the Lower Paleozoic natural gas, Ordos Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89(Part 1): 106-119.
- [46] 谢庆宾, 韩德馨, 陈方鸿, 等. 鄂尔多斯盆地古生界三山子白云岩体成因及储集性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(6): 6-12.
- XIE Qingbin, HAN Dexin, CHEN Fanghong, et al. Origin and reservoir of Sanshanzi dolomite in Lower Paleozoic of Ordos Basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(6): 6-12.
- [47] FU Siyi, ZHANG Chenggong, CHEN Hongde, et al. Geochemistry characteristics and dolomitization mechanism of the Upper Cambrian dolomite, eastern Ordos Basin, China [J]. Geological Journal, 2020, 55(4): 3070-3082.
- [48] 陈启林, 白云来, 廖建波, 等. 鄂尔多斯盆地深层寒武系烃源岩展布特征及其勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 397-407.
- CHEN Qilin, BAI Yunlai, LIAO Jianbo, et al. Distribution characteristics and exploring significance of Cambrian source rock in the deep of Ordos Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 397-407.