

鄂尔多斯盆地寒武纪层序岩相古地理特征 及对储集体的控制作用

卢意^{1,2}, 张春林², 由雪莲¹, 聂宇晗³

1 中国地质大学(北京); 2 中国石油勘探开发研究院; 3 中国石油华北油田公司第四采油厂

摘要 鄂尔多斯盆地寒武系具有天然气勘探的潜力。为明确有利相带与储集体的分布规律,综合分析单井、野外露头、地震等资料,在鄂尔多斯盆地寒武系识别出不整合面和岩性转换面2种层序界面,由此将寒武系划分为2个二级层序(SS1、SS2)和8个三级层序(SQ1—SQ8),每个三级层序由海侵体系域和高位体系域组成。并以三级层序为编图单元,系统编制了寒武系三级层序格架内的8张岩相古地理图,分析三级层序格架下的岩相古地理展布特征。鄂尔多斯盆地寒武系经历2个沉积阶段:SQ1—SQ4为海进阶段,发育碳酸盐缓坡沉积;SQ5—SQ8为海退阶段,发育浅水型碳酸盐台地沉积。受控于层序岩相古地理演化,鄂尔多斯盆地寒武系储层纵向上主要分布于SQ6—SQ8,储层类型主要包括白云石化鲕粒滩储层、表生岩溶储层及断溶体储层。受控于台缘相和高位体系域白云石化作用、古隆起的分布及断裂作用,平面上白云石化鲕粒滩储层主要分布于盆地西部、南部的台缘带,表生岩溶储层分布于古隆起周缘,断溶体储层孤立地分布于盆地中。

关键词 层序; 岩相古地理; 沉积体系; 储集体; 寒武纪; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

引用: 卢意, 张春林, 由雪莲, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪层序岩相古地理特征及对储集体的控制作用[J]. 海相油气地质, 2025, 30(2): 119-132.

LU Yi, ZHANG Chunlin, YOU Xuelian, et al. Lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian sequence and their control over reservoir in Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(2): 119-132.

0 前言

鄂尔多斯盆寒武系海相碳酸盐岩沉积厚度大且在盆地内分布广泛,油气地质条件优越。目前,已发现在鄂尔多斯盆地南缘的一些地区发育烃源岩^[1-2],而且庆阳古陆周缘的钻井已获低产气流^[3-4],说明鄂尔多斯盆地寒武系具有天然气勘探的潜力。但鄂尔多斯盆地寒武系非常复杂,不同的学者对寒武系的层序划分建立了各种不同的方案:陈方鸿等^[5]依据成岩作用与层序界面的关系将盆地东南部寒武系划分为13个三级层序;朱如凯^[6]依据地层的旋回特点将下寒武统至下奥陶统划分为4个二级层序;蔡忠贤等^[7]依据地层的古生物学特征将寒武系划分为14个三级层序;陈启林等^[8]以不整合面、沉积间断面及沉

积转换面为层序界面将寒武系划分为6个三级层序。但受资料局限性的限制,尚未形成全盆地可对比的寒武系层序划分方案。并且前人在研究寒武系三级层序格架下的岩相古地理时主要应用单因素分析法^[9],即以某种特定的岩性代表某种沉积相类型,如以泥晶白云岩代表潮坪相沉积,该方法缺乏对层序格架下的沉积体系类型及特征的整体研究,所得到的各类沉积相分布范围结果偏粗,导致对寒武系储集体的认识存在局限性,从而制约了油气勘探进程。本次研究以大量单井和野外露头剖面层序地层划分和沉积相研究为基础,系统编制鄂尔多斯盆地寒武系层序格架内的岩相古地理图,从而预测有利储集体分布,为鄂尔多斯盆地寒武系下一步的油气勘探奠定地质认识基础。

收稿日期: 2024-08-28; 改回日期: 2024-10-12

本文受中国石油“十四五”重大科技项目“鄂尔多斯盆地风险勘探领域和目标研究、工程技术攻关及现场试验”(编号: 2023YQX10105)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)“深层油气形成与分布预测”(编号: XDA14010403)和国家科技重大专项“大气田富集规律与勘探关键技术”(编号: 2016ZX05007-002)联合资助

第一作者: 卢意, 硕士, 主要从事地质学研究。通信地址: 100083 北京市海淀区学院路29号; E-mail: ly12345678901104@163.com

通信作者: 张春林, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积储层与油气勘探目标评价研究。通信地址: 100083 北京市海淀区学院路20号; E-mail: mike_zcl@163.com

1 地质概况

鄂尔多斯盆地受前寒武晋宁—兴凯运动的影响,长期处于抬升状态,形成鄂尔多斯盆地古陆。古陆不仅分布范围广且地形地貌差异较大、夷平程度差。直到沧浪铺晚期和龙王庙期,海水才从鄂尔多斯盆地西部和南部侵入,因此盆地在这一时期内沉积的东坡组、辛集组和朱砂洞组分布都非常局限。之后受古亚洲洋和古秦祁洋演化的控制作用,鄂尔多斯盆地早—中寒武世处于被动大陆边缘构造背景,一直到张夏期均为沉降期。随后海平面开始下降,晚寒武世由拉伸应力向挤压应力过渡,发育中央古隆起。鄂尔多斯盆地寒武系沉积格局受控于寒武系沉积前的古地形以及中央古隆起的控制作用,平面上呈现西部和南部厚、中部薄的“隆洼相间”的沉积格局^[3,10](图1)。盆地西缘和南缘地区裂陷槽发育部位,寒武系的沉积厚度大于500 m,最厚达1 500 m以上,而在裂陷槽之间的隆起部位沉积厚度小于300 m;东部的神木洼陷和宜川洼陷,沉积厚度大于400 m,其他部位沉积厚度介于100~300 m。

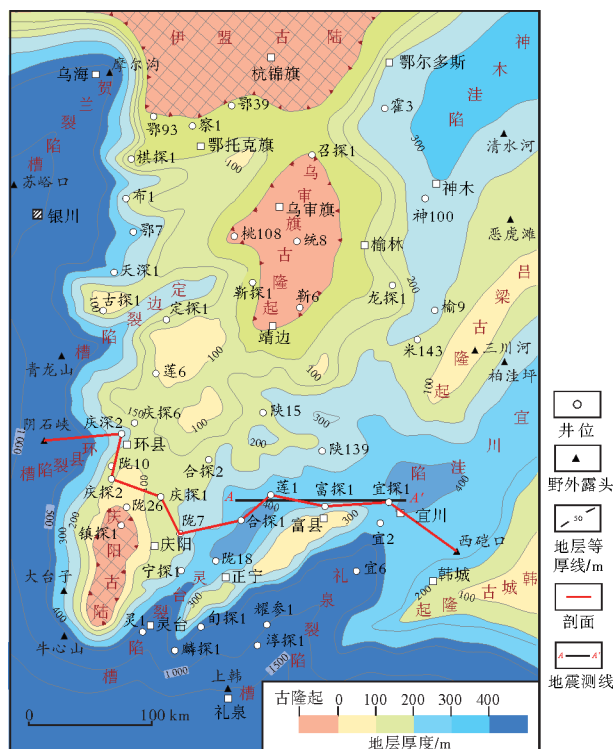


图1 鄂尔多斯盆地寒武系残余地层厚度图(据文献[3]修改)
Fig. 1 Residual thickness contour map of Cambrian in Ordos Basin
(cited from reference [3], modified)

鄂尔多斯盆地寒武系自下而上沉积了东坡组、辛集组、朱砂洞组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组和三山子组,但未沉积与扬子地台下寒武统梅树村阶相对应的地层^[3,11]。下寒武统的东坡组、辛集组和朱砂洞组在盆地内分布非常局限,因此本次研究不将其纳入层序划分中。馒头组—徐庄组以泥岩、页岩沉积为主,张夏组和三山子组以碳酸盐沉积为主。鄂尔多斯盆地主体及其周缘地区,由于岩性、岩相差异,不同地区采用的岩石地层名称不完全一致,对比关系见表1。

2 层序地层划分及特征

2.1 层序界面识别

2.1.1 不整合面

不整合面为Ⅰ型层序界面,此类界面广泛地发育于寒武系的顶、底部。蓟县运动导致了鄂尔多斯盆地寒武系底部地层的缺失程度不一,不同区域寒武系的不同地层单元不整合于前寒武系之上,形成了明显的区域性角度不整合^[12-13]。盆地西部和南部主要表现为馒头组、朱砂洞组、辛集组等前毛庄组与前寒武系不整合接触;盆地中部、东部及北部主要为毛庄组与前寒武系不整合接触;庆阳古隆起、乌审旗古隆起及吕梁古隆起等高部位主要为徐庄组与前寒武系呈不整合接触。在盆地西北部的野外剖面中可见下寒武统的陶思沟组砂岩与下部中元古界王全口组的白云岩呈平行不整合接触(图2a)。寒武系顶部的不整合面由怀远运动造成。怀远运动的抬升作用使寒武系顶部遭受剥蚀产生风化碎屑^[9,14-15],这些风化碎屑混入奥陶系马一段,形成了一套富含泥质的沉积物,在盆地内主要表现为三山子组与马家沟组的平行不整合接触。该类不整合面主要分布于盆地中东部主体部位,西、南部发育较少^[16-17],盆地西北部野外剖面中可见上寒武统的三山子组与奥陶系三道坎组石英砂岩呈平行不整合接触(图2b)。

2.1.2 岩性岩相转换面

岩性岩相转换面为Ⅱ型层序界面,此类界面的形成主要是由于海平面的上升速度超过了碳酸盐的沉积速度,沉积环境突然转变,抑制了碳酸盐岩的发育,因此界面上下岩性通常有明显的差异。在

表1 鄂尔多斯盆地寒武系对比及层序划分
Table1 Stratigraphic correlation and sequence division of the Cambrian system in Ordos Basin

系	统	阶	年龄/Ma	不 同 区 域				二级层序	三级层序
				西缘	中部	南缘	东缘		
寒 武 系	上 统	凤山阶	488.3	阿不切亥组	三山子组	三山子组	三山子组	SS2	SQ8
		长山阶							SQ7
		崑山阶							SQ6
	中 统	张夏阶	521.0	张夏组	张夏组	张夏组	张夏组		SQ5
		徐庄阶		胡鲁斯台	徐庄组	徐庄组	徐庄组	SS1	SQ4
									毛庄阶
		馒头组		馒头组	馒头组	SQ2			
		下 统		龙王庙阶	542.0	陶思沟组	馒头组		
	沧浪铺阶		五道淌组	朱砂洞组		朱砂洞组	霍山组		
			苏峪口组	辛集组		辛集组			
	筇竹寺阶					东坡组			
	梅树村阶								

鄂尔多斯盆地,寒武系SQ1—SQ4层序界面在全盆地范围内,主要以上部的泥页岩与下伏碳酸盐岩呈突变接触为典型特征(图2c),从下到上GR、AC测井曲线由低值向高值突变,R_h测井曲线由高值向低值突变,层序界面下部的Sr/Ba、Mn/Fe和Th/U的值表现为突变(图3)。全盆地范围内,SQ5—SQ8层序界面之下主要发育高能鲕粒滩相的鲕粒灰岩,界面之上发育泥灰岩、泥晶白云岩等细粒沉积(图2d,2e),

体现了海平面上升,沉积环境由高能相带向低能相带的转变,GR、AC测井曲线由微齿低值转变为齿化高值,R_h测井曲线由齿化高值突变为微齿低值,Sr/Ba、Mn/Fe和Th/U的值表现为突变特征(图3)。层序内部海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)的分界面为最大海泛面,岩性上表现为TST泥页岩、泥灰岩等低能相带沉积向HST鲕粒灰岩、鲕粒白云岩等高能相带沉积的转换(图2f)。

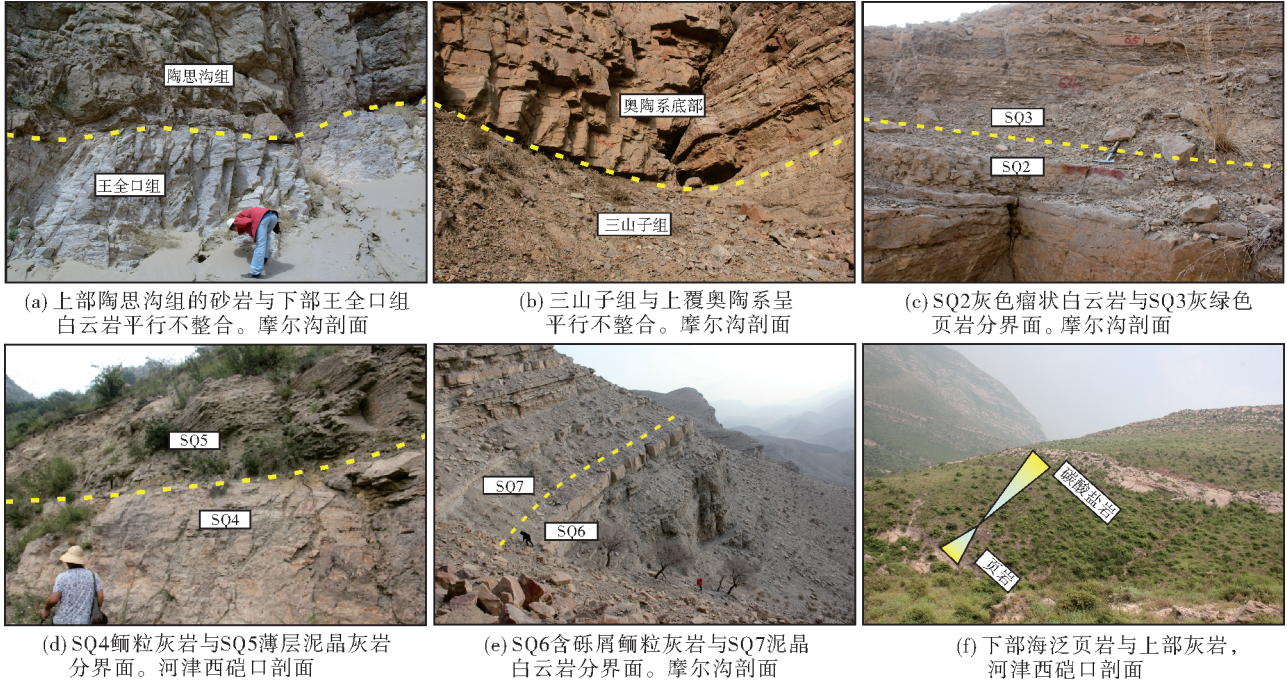


图2 鄂尔多斯盆地寒武系层序界面野外识别标志

Fig.2 Field section markers of Cambrian sequence boundaries in Ordos Basin

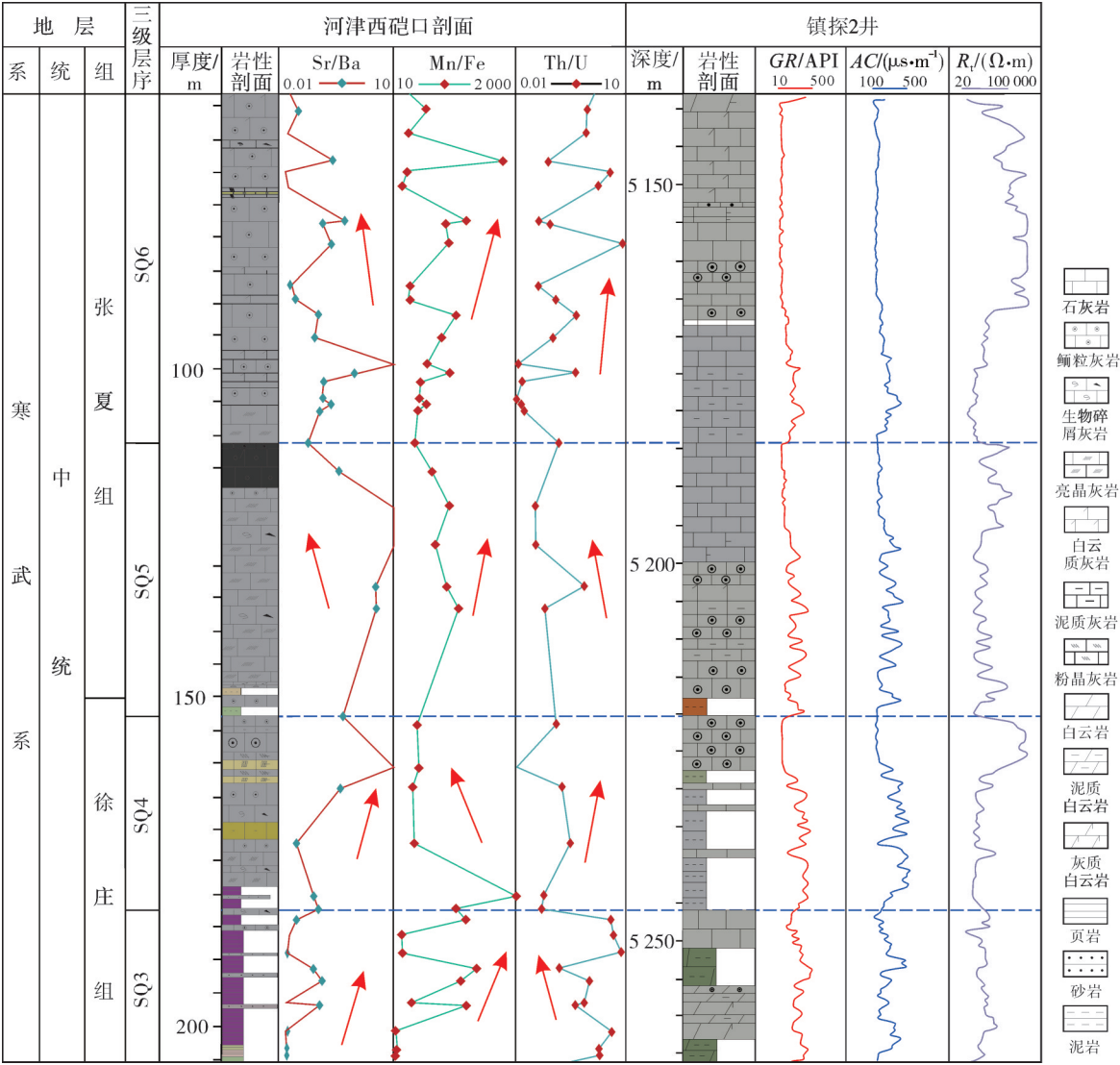


图3 鄂尔多斯盆地寒武系层序界面的地球化学及测井响应特征
Fig. 3 Geochemical and logging response characteristics of sequence boundaries of Cambrian in Ordos Basin

2.2 层序划分与对比

2.2.1 层序划分

应用野外剖面、钻井及测井等资料,结合前人的研究成果,将鄂尔多斯盆地寒武系馒头组—三山子组划分为2个二级层序SS1和SS2,SS1可进一步划分成4个三级层序SQ1—SQ4,SS2也可进一步划分成4个三级层序SQ5—SQ8(表1)。三级层序具有跨组的特点:SQ1层序相当于馒头组下部,SQ2层序包括馒头组上部及毛庄组,SQ3层序相当于徐庄组下部,SQ4层序相当于徐庄组上部,SQ5层序相当于徐庄组顶部和张夏组下部,SQ6层序相当于张夏组的中上部,SQ7层序相当于三山子组中下部,SQ8层序相当于三山子组上部。

2.2.2 地层格架

由于盆地主体位于台地内部,没有大面积的斜坡发育,且海平面下降幅度较小,因此每个三级层序由海侵体系域和高位体系域组成,低位体系域不发育。以平1井为例(图4),SQ1—SQ4发育碳酸盐缓坡沉积体系,主要发育泥岩和泥晶灰岩,层序界面表现为下部灰岩和上部泥页岩的突变面,体现了沉积相由中缓坡和内缓坡向外缓坡的转变,测井曲线上表现为自然伽马和声波时差由低值向高值的突变;SQ5—SQ8发育碳酸盐台地沉积体系,主要发育鲕粒灰岩和粉晶白云岩,层序界面表现为鲕粒灰岩与泥晶灰岩的突变面以及粉晶白云岩与泥质白云岩的突变面,测井曲线上表现为自然伽马和声波

时差由低值向高值的突变,体现了台缘滩相向斜坡相的转变以及潮坪与潟湖之间的转变(图4)。

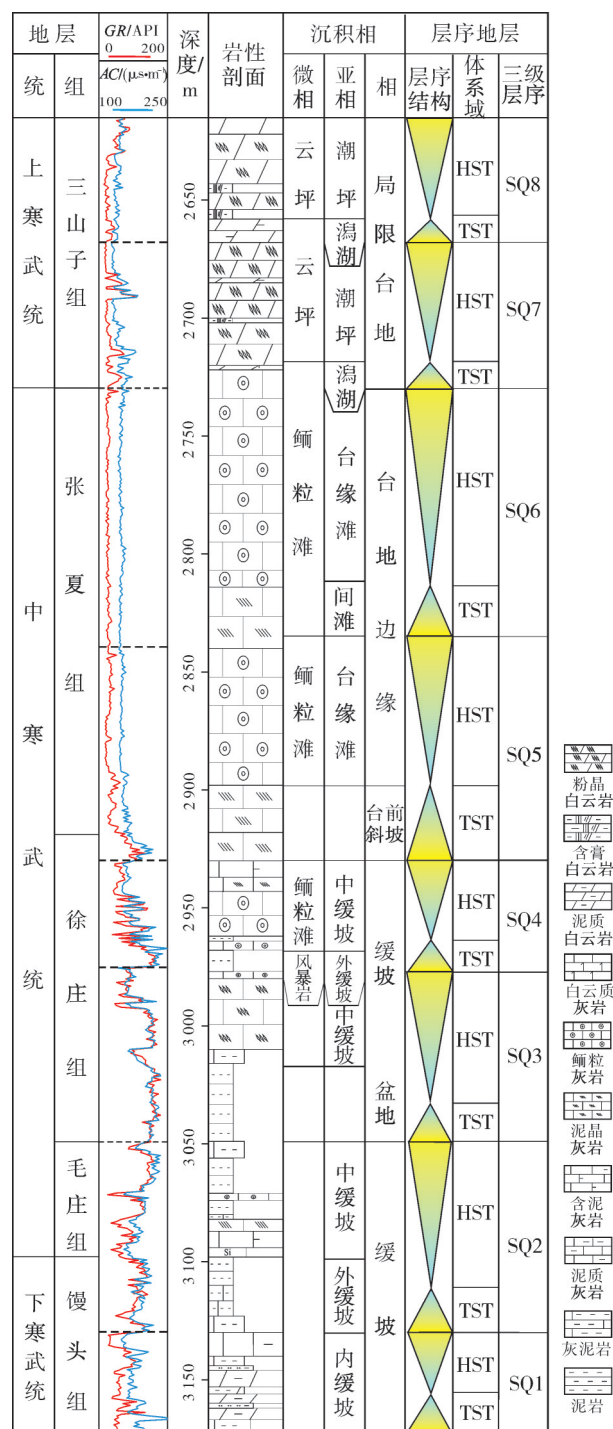


图4 鄂尔多斯盆地平1井寒武系综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive stratigraphic column of Cambrian of Well Ping-1 in Ordos Basin

SQ1基本为一对称旋回(图4),以泥岩、灰岩为主,在盆地内分布较局限,主要分布于盆地的西部和南部。SQ2—SQ4均为不对称旋回,高位体系域

更发育(图4),岩性以海侵体系域泥页岩和高位体系域灰岩、鲕粒灰岩为主,夹杂少量鲕粒白云岩,在地震剖面上层序界面表现为同相轴的突变或不协调接触,总体呈现高频、中等振幅、中—低连续反射(图5)。经过SQ1—SQ4层序的填平补齐作用,其后盆地内不同区域的地层沉积厚度相差较小,因此SQ5—SQ8在横向上分布较均匀。相对于SQ1—SQ4, SQ5—SQ8白云岩更为发育,这与其沉积期水体较浅、地形更加平整化有关。SQ5—SQ8层序均为不对称旋回,高位体系域比较发育。高位体系域中主要发育鲕粒白云岩、泥晶白云岩,也是寒武系重要的储集体。低位体系域主要发育泥岩和灰岩。层序界面为岩性转换面,地震上表现为同相轴的突变或不协调接触。SQ5由海侵体系域泥晶灰岩和高位体系域鲕粒灰岩组成,地震上表现为高频、弱振幅、低连续反射;SQ6由海侵体系域泥质灰岩和高位体系域鲕粒灰岩、鲕粒白云岩组成,地震上表现为中—高频、强振幅、高连续反射;SQ7和SQ8由海侵体系域白云质灰岩、泥质白云岩和高位体系域粉晶白云岩夹含膏白云岩组成。地震上连1井—富探1井之间表现为高频、弱振幅、低连续反射,富探1井—宜探1井之间的宜川洼陷区各层序内部表现为中—低频、强振幅、高连续发射特征(图5)。

3 层序格架内岩相古地理特征

3.1 沉积体系与沉积相

鄂尔多斯盆地寒武系主要为海相碳酸盐沉积,但在环古陆区局限地分布碎屑岩沉积,因此可将寒武系划分为碎屑岩沉积体系和碳酸盐岩沉积体系。碎屑岩主要发育于寒武纪的早期,平面上呈环古陆分布的特点,岩性主要为泥岩和砂岩,发育波痕构造。碳酸盐岩沉积体系在鄂尔多斯盆地寒武系发育广泛,可进一步划分为碳酸盐缓坡沉积体系和碳酸盐台地沉积体系,前者分布于SQ1—SQ4,后者分布于SQ5—SQ8(图6)。

沉积相类型与沉积期古地貌格局密切相关。受中央古隆起的控制作用,盆地中部的古地貌高部位主要发育潮坪相沉积,而古地貌高部位之间的洼陷地区为较低能的、以灰质和泥质为主的潟湖沉积,西、南部的深水地区以外缓坡相、斜坡相和陆棚相沉积为主,高能的颗粒滩沉积与正古地貌密切相关。盆地中部共识别出5种典型的沉积亚相:

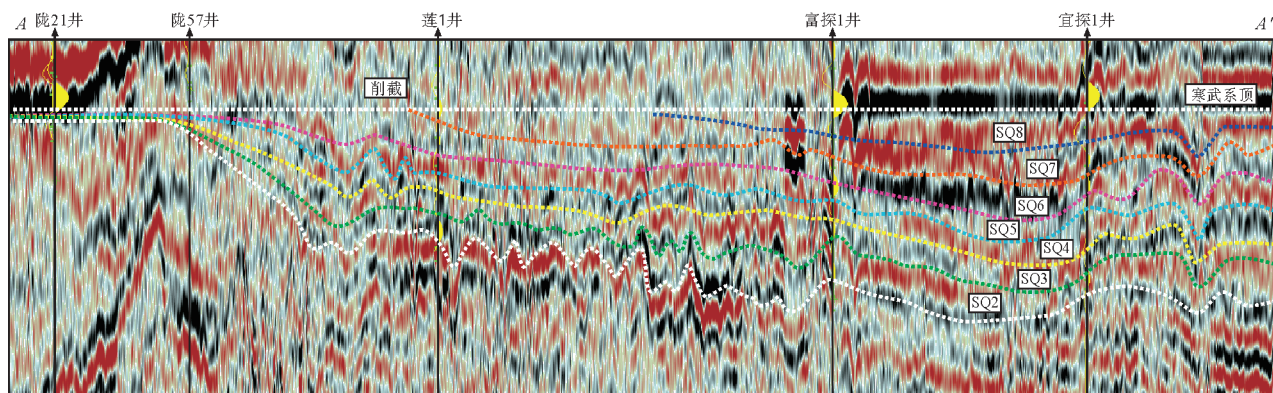


图5 鄂尔多斯盆地寒武系地震层序划分(剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic sequence division of Cambrian in Ordos Basin (location is shown in Fig. 1)

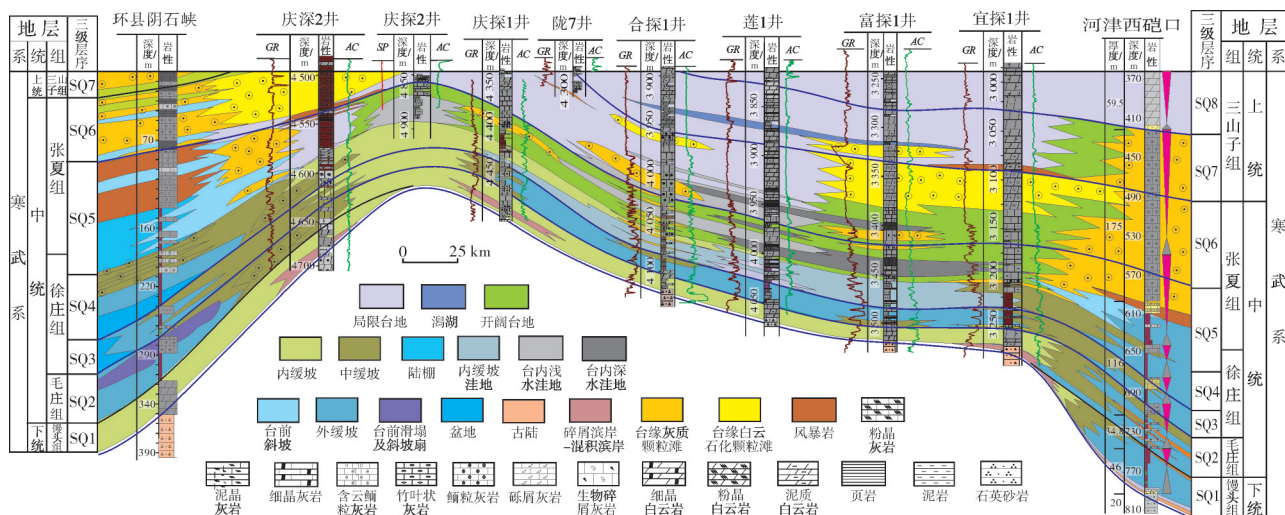


图6 鄂尔多斯盆地环县阴石峡—河津西碛口寒武系沉积相对比剖面图(剖面位置见图1)

Fig. 6 Cambrian sedimentary facies comparison profile from Yinshi Gorge in Huan County to Xiweikou in Hejin in Ordos Basin (location is shown in Fig. 1)

SQ1—SQ4 主要发育内缓坡相和中缓坡相, SQ5—SQ8 主要发育局限台地相、开阔台地相和台地边缘相;盆地西部和南部共识别出 3 种典型沉积亚相: SQ1—SQ4 主要发育外缓坡相, SQ5—SQ8 主要发育斜坡相和陆棚。

内缓坡和中缓坡以发育深灰色、灰绿色、黄灰色泥质白云岩(图 7a—7c)、白云质鲕粒灰岩、鲕粒灰岩(图 7d, 7e)等岩性为主, 遗迹化石发育, 局部波痕构造(图 7f);外缓坡主要发育紫红色页岩为主(图 7g), 部分地区发育风暴岩沉积(图 7h), 鲕粒滩沉积较少;局限台地相主要发育灰色中—薄层粉晶白云岩(图 7i)、鲕粒灰岩及薄层状泥晶灰岩等岩性, 见生物钻孔, 发育水平、波状纹层;开阔台地相以发育石灰岩类为主, 如灰色薄层泥晶灰岩(图 7j)、生物碎屑灰岩及砂

屑灰岩, 发育生物垂直钻孔(图 7j);台地边缘的沉积环境水动力条件强, 主要发育鲕粒灰岩(图 7k)、亮晶鲕粒白云岩(图 7l), 鲕粒分选性较好, 发育板状交错层理;斜坡沉积环境是台地周围地形上具有明显坡度且水体较深, 位于正常浪基面之下, 主要发育紫红色中层竹叶状灰岩、灰绿色页岩(图 7m)、滑塌角砾岩;陆棚为位于风暴浪基面之下的深水区域, 水动力条件弱, 岩性以泥岩、页岩及粉砂质页岩为主。

3.2 层序岩相古地理特征

基于野外剖面分析、单井相分析、连井相分析及滩体的综合测井识别, 综合考虑古地形与岩性岩相的关系, 以三级层序为编图单位, 编制了 8 张(SQ1—SQ8)三级层序格架下的岩相古地理图。

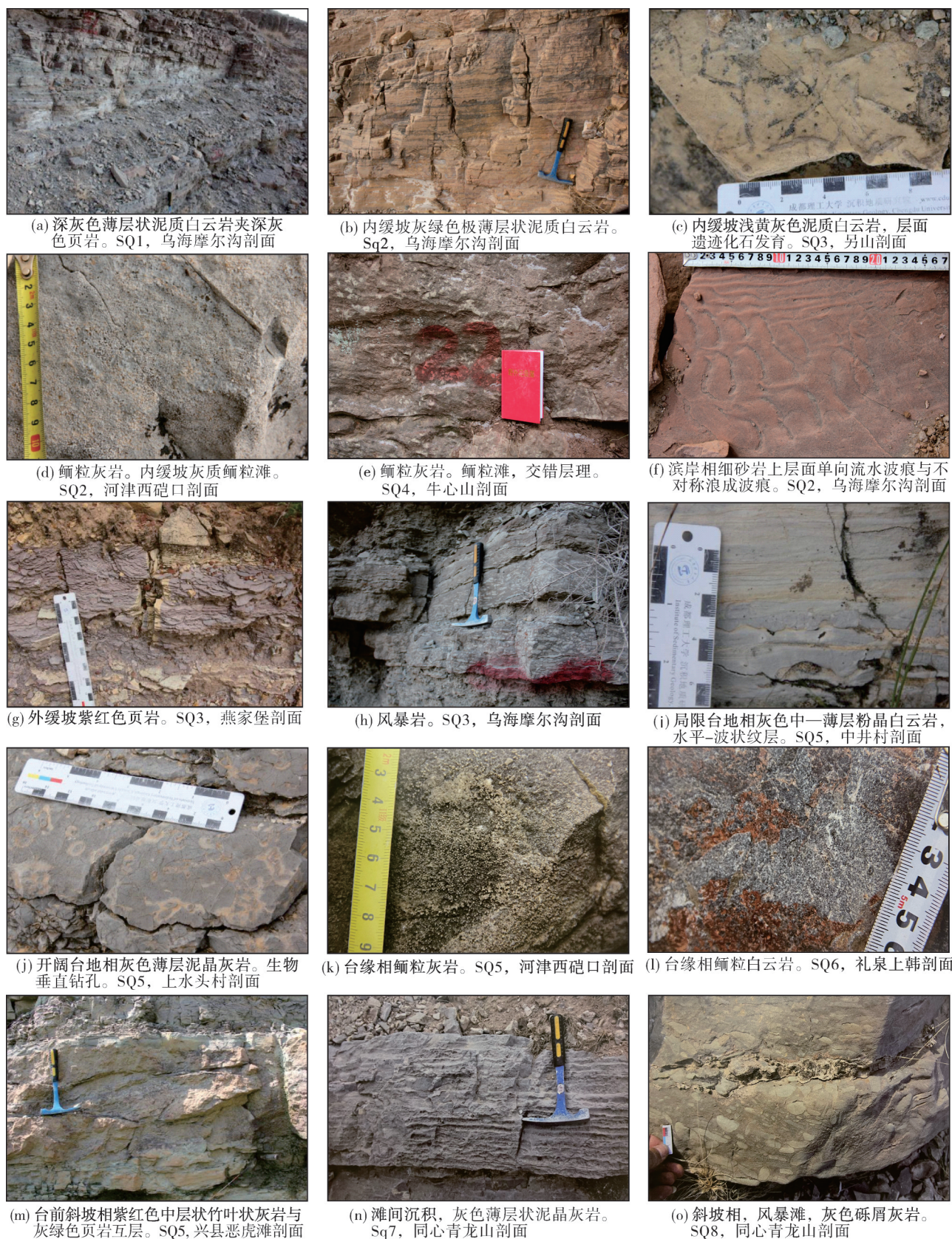


图7 鄂尔多斯盆地寒武系沉积相野外典型照片

Fig. 7 Typical field photos showing the characteristics of sedimentary facies of Cambrian in Ordos Basin

3.2.1 SQ1岩相古地理特征

受晋宁—兴凯运动的影响,鄂尔多斯盆地在寒武纪之前长期处于抬升状态,陆源物质丰富,为寒武纪早期的碎屑岩沉积提供了基础^[9]。该沉积期古陆出露面积仍然较大,盆地主体区无明显沉积,沉积区主要分布于盆地的西、南缘,总体上为混积滨岸—潮坪—内缓坡的沉积背景(图8a),主要发育石灰岩、白云岩、石英砂岩、页岩。

3.2.2 SQ2岩相古地理特征

该沉积期海水进一步自西南部向盆地内侵入,盆地内大部分区域已被海水淹没,自古陆向海依次发育滨岸、内缓坡潮坪、中缓坡、外缓坡及盆地相沉积(图8b)。滨岸相环古陆分布,发育波痕构造(图7f);潮坪沉积广泛发育,以云坪为主,岩性主要为泥质白云岩;在鄂托克旗、庆城、宁县、灵台、河津的内缓坡边缘、洼地周围古地貌较高处受强水动力控制发育灰质颗粒滩(图7d);内缓坡洼地的岩石类型以泥岩、泥质白云岩及泥质灰岩为主;盆地西、南缘发育深水沉积。

3.2.3 SQ3岩相古地理特征

该沉积期盆地内西南部海水和东北部海水开始连通(图8c),各古陆孤立分布,滨岸相沉积范围进一步缩小。内缓坡潮坪沉积呈北东向展布于盆地中部,发育泥质白云岩,可见生物钻孔;从内缓坡向盆地方向依次发育中缓坡、外缓坡相沉积,自然伽马表现为锯齿形;盆地相分布于盆地西、南缘。

3.2.4 SQ4岩相古地理特征

该沉积期盆地中部的古陆已全被淹没,主体为缓坡沉积,西侧和南侧发育盆地相沉积(图8d)。总体上沉积空间展布呈现,由东向西依次为古陆—滨岸—洼地—内缓坡—外缓坡—盆地,由北向南依次为古陆—滨岸—内缓坡—洼地—中缓坡—外缓坡—颗粒滩—潮坪—盆地。富县—大宁一带SQ3时期的缓坡相沉积在该沉积期转变为内缓坡洼地沉积,发育黑色泥岩、泥质灰岩等岩性;颗粒滩发育于内缓坡边缘及洼地周围的古地貌高处,发育范围增大,岩性主要为鲕粒灰岩(图7e);盆地西部仍为缓坡相沉积,乌海摩尔沟、苏峪口及环县阴石峡处发育风暴岩沉积(图7h);盆地内受陆源碎屑的影响减小,内缓坡边缘滩非常发育,已开始逐渐向清水碳酸盐台地转化。

3.2.5 SQ5岩相古地理特征

该沉积期沉积格局总体呈“北陆南台”(图9a),盆地内几乎不发育碎屑岩,盆地主体发育大面积的镶边型碳酸盐台地沉积,以局限台地相为主,主要发育泥晶白云岩,可见水平—波状纹层;局限台地向海方向与外海连通性较好的区域为开阔台地相,发育泥灰岩、鲕粒灰岩等岩性;台内以神木洼陷和宜川洼陷为主的台内洼地成北东向展布,水动力较弱,发育泥岩、泥质灰岩、白云质泥岩;台内洼地周围的微古地貌高部位及台缘区发育鲕粒滩沉积(图7k),总体上分选较差、生物碎屑多、泥质含量高,自然伽马曲线和声波时差曲线表现为高幅指状;盆地西部、南部的台地之外发育斜坡—陆棚相沉积(图7m),斜坡处发育风暴岩,南部斜坡处存在台前滑塌沉积。

3.2.6 SQ6岩相古地理特征

该沉积期台地分布范围进一步扩大,盆地内在SQ5沉积之后被填平补齐,更加平整(图9b)。开阔台地向东部迁移,岩性以颗粒灰岩、鲕粒灰岩等石灰岩为主;台内洼地面积减小,仅剩神木洼陷和宜川洼陷两处,以发育泥岩、泥质灰岩为主。该时期由于水深较浅,台缘滩、台内滩发生明显的白云石化作用,发育鲕粒白云岩(图7l)。台缘滩沿台缘呈“L型”分布于台地的西部和南部,总体分选好、生物碎屑少、泥质含量少,自然伽马值较高,呈锯齿状,自然电位显示波状起伏,声波显示齿状低值,井径曲线呈齿状;台内滩滩体自然伽马曲线和声波时差曲线响应呈低幅指状。台地向海方向发育斜坡—陆棚相沉积,西部斜坡上发育风暴岩,南部礼泉上韩剖面发育台前滑塌沉积。

3.2.7 SQ7与SQ8岩相古地理特征

SQ7沉积期台地内部更加平整化,并在局部低洼区形成了潟湖沉积,盆地的西部和南部为台前斜坡相沉积(图9c)。盆内以局限台地相沉积为主,主要发育泥晶白云岩、细粉晶白云岩、泥质白云岩等岩性;之前的台洼区演化为台内潟湖相沉积,主要发育泥岩;乌海摩尔沟剖面和清水河剖面发育风暴岩;白云石化鲕粒滩主要分布于台缘,滩间发育薄层泥晶灰岩沉积(图7n),台内滩相对减少;盆地西侧、南侧发育台前斜坡相,以石灰岩为主,南部礼泉上韩见台前滑塌沉积。

SQ8岩相古地理发育特征与SQ7相似,但与SQ7相比具有向外围扩展、更加平整化的特点,局限台地相几乎分布于整个盆地,台前斜坡相沉积范围很小(图9d)。该沉积期不发育台内滩,鲕粒滩只发

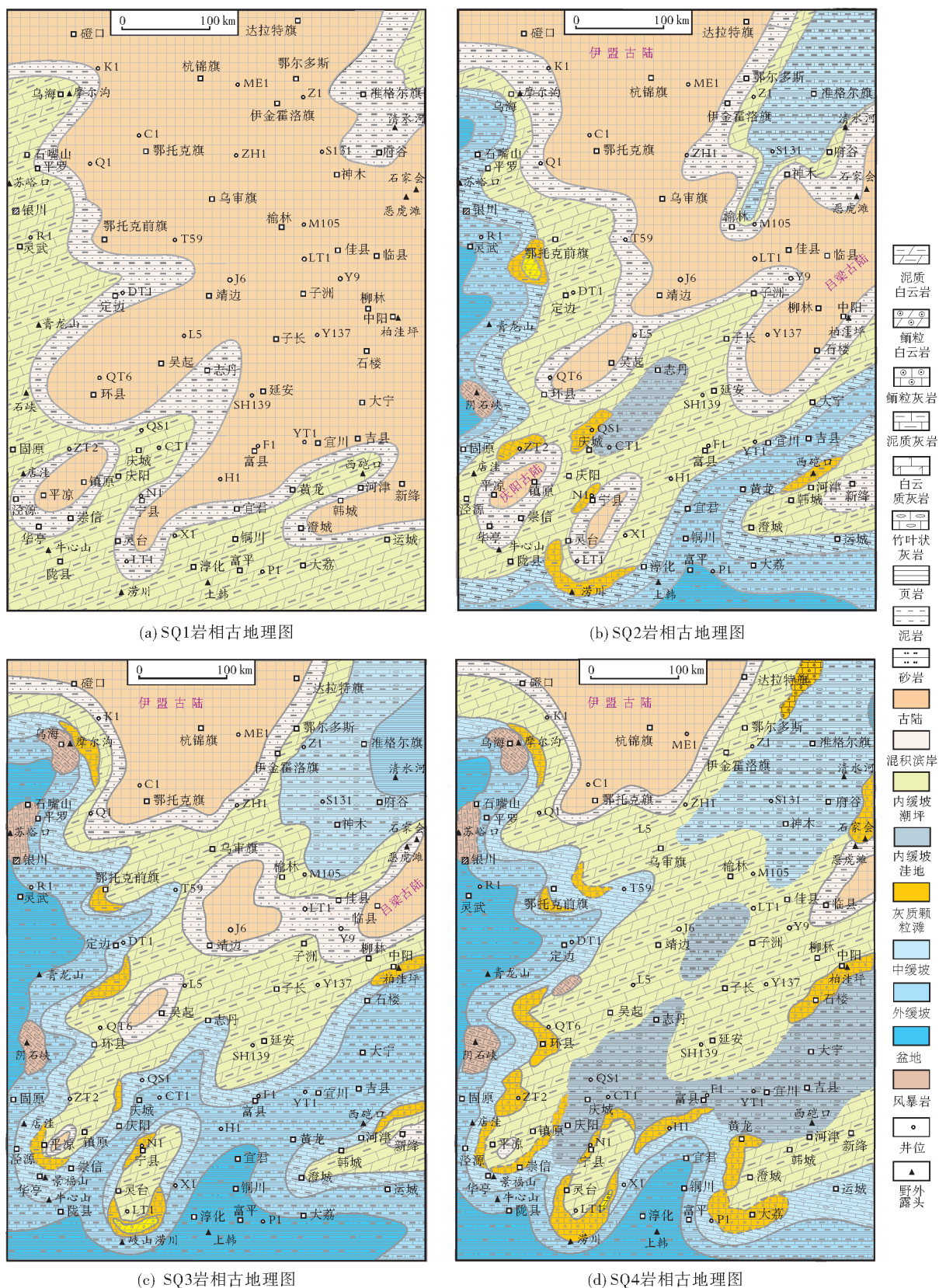


图8 鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理图(SQ1—SQ4)

Fig. 8 Lithofacies paleogeographic maps of Cambrian in Ordos Basin (SQ1—SQ4)

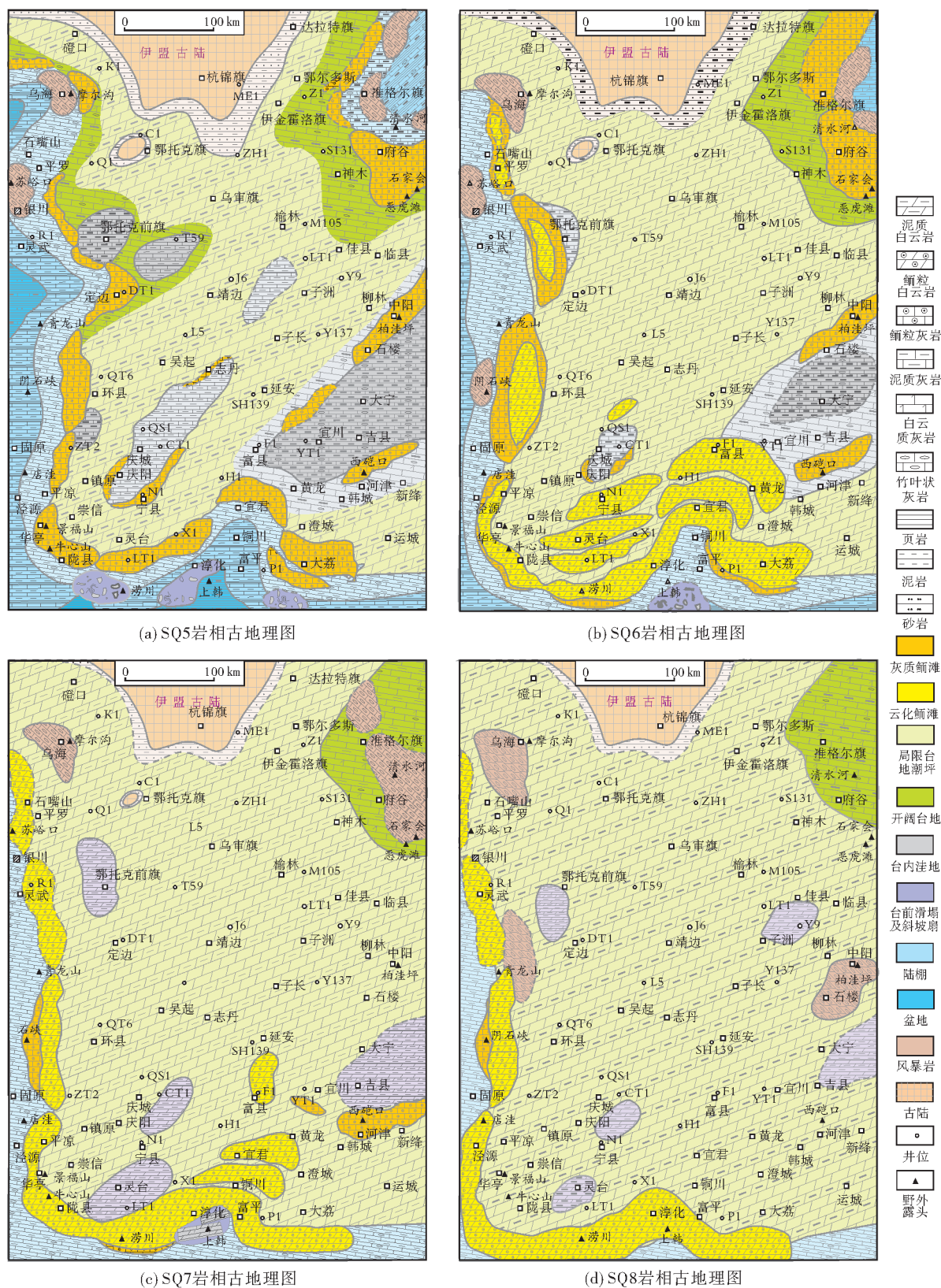


图9 鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理图(SQ5—SQ8)

Fig.9 Lithofacies paleogeographic maps of Cambrian in Ordos Basin(SQ5—SQ8)

育于台缘处,乌海摩尔沟、同心青龙山及中阳柏洼坪处发育灰色砾屑灰岩等风暴岩类(图7o)。

3.3 岩相古地理演化

鄂尔多斯盆地寒武系沉积期古地理总体上表现为北部、中部高,西部、南部低的格局,早寒武世海水开始从西部、南部向盆地侵入,至SQ5期海侵范围达到最大,之后发生海退,纵向上可划分为两个沉积阶段,SQ1—SQ4为碳酸盐缓坡沉积阶段,SQ5—SQ8为碳酸盐台地沉积阶段。

SQ1期只在盆地西部和南部发生沉积作用,盆地内主要发育内缓坡沉积亚相,碎屑岩较发育。SQ2期古秦岭洋、古祁连洋与古亚洲洋连成一片,海水快速进入到鄂尔多斯盆地内部,古陆面积减小,盆地内主要发育内缓坡、中缓坡及外缓坡沉积。SQ3期海水进一步向盆地侵入,沉积格局与SQ2期具有继承性。SQ4期海水进一步向盆地侵入,盆地中部古陆被完全淹没,只剩北部的伊盟古陆和东部的吕梁古陆孤立分布,南部宜川洼陷和礼泉裂陷槽处由中、外缓坡向内缓坡洼陷转变,内缓坡与中缓坡分界处有鲕粒滩分布,盆地开始向清水碳酸盐台地转变。SQ5期海侵范围达到最大,盆地内基本上被广阔的浅海覆盖,只剩北部的伊盟古陆部分出

露,此时沉积背景由之前的混水碳酸盐缓坡转变为大面积的清水碳酸盐台地沉积,以局限台地相沉积为主,盆地东南部发育大面积台内洼陷沉积。SQ6期较SQ5沉积期地形逐渐平整,洼陷面积减小,台缘滩、台内滩发育,且出现明显的白云石化现象。SQ7期台地内被进一步填平补齐,盆地以发育局限台地相为主,滩体以台缘鲕粒滩为主,台内滩几乎不发育;SQ8期与SQ7期具有继承性。

4 古地理演化对储集体的控制作用

储层发育主要受沉积作用、成岩作用及构造作用等因素控制,沉积作用控制了原始孔隙的发育程度,成岩作用中的白云石化作用可以减弱胶结物对原始粒间孔的充填作用,使原生孔隙得以保存^[18]。一般来说沉积物的孔隙度和渗透率越高,则白云石化作用越强,形成白云岩厚度越大。较纯的滩相灰岩比泥晶灰岩脆性大,在构造作用下更容易产生裂缝。

鄂尔多斯盆地寒武系发育白云岩的相带主要有局限台地云坪、白云石化台内滩及白云石化台缘滩。云坪中主要发育泥晶白云岩、细—粉晶白云岩,储集空间类型主要为晶间孔(图10a);白云石化台内滩和白云石化台缘滩主要发育鲕粒白云岩,储集

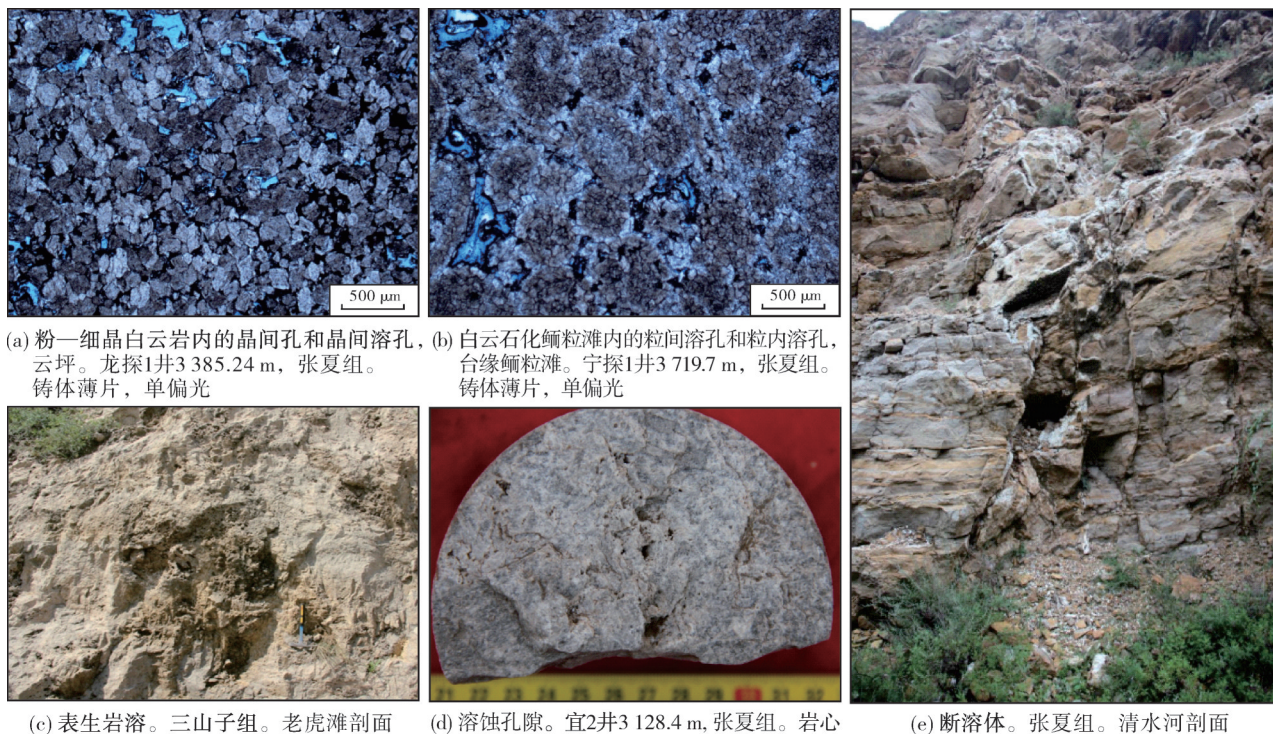


图10 鄂尔多斯盆地寒武系储层孔隙类型

Fig. 10 Pore types of the Cambrian reservoir in Ordos Basin

空间类型主要为晶间(溶)孔和粒间(溶)孔(图10b)。台缘高能相带的鲕粒白云岩受较高水动力的影响,分选性好、磨圆度高,原生孔隙发育,且白云石化程度高,为鄂尔多斯盆地寒武系主要的储集体类型^[3]。纵向上,台缘白云石化鲕粒滩储层的分布与沉积演化密切相关,主要分布于SQ6—SQ8的高位体系域中。这是因为高位体系域沉积期水体较浅,台地边缘频繁地暴露在海平面之上,且鲕粒滩孔隙度和渗透性较好,与白云石化流体沟通较好,易发生混合白云石化作用^[19]。

此外,鄂尔多斯盆地寒武系还发育表生岩溶储层和断溶体储层两类储层。表生岩溶储层受寒武纪晚期的怀远运动的控制。怀远运动导致盆地发生抬升作用,使寒武系顶部遭受暴露和剥蚀(图10c),白云岩和石灰岩受大气淡水改造及破裂作用产生溶蚀

孔缝(图10d),形成岩溶储层。除鲕粒白云岩之外,SQ6—SQ8台地内地形平整,云坪微相发育大面积泥晶白云岩、泥质白云岩,为岩溶作用提供了物质基础。岩溶储层平面上主要分布于盆内的古隆起周缘区,纵向上主要分布于SQ6—SQ8。断溶体储层(图10e)主要受寒武纪晚期断裂的控制作用,在怀远运动期间盆地受到来自南、北的非共轴挤压,盆地内部发育断裂或裂缝,在后期的风化剥蚀阶段,沿着早期的断裂或裂缝形成了良好的断溶体储层^[15]。

在储集体研究的基础上,结合各层序沉积微相的分布特点,揭示鄂尔多斯盆地寒武系有利储集体主要分布于SQ6—SQ8(图11)。白云石化颗粒滩储集体主要沿着位于盆地西部和南部的台缘分布,在SQ6期分布范围最广;表生岩溶型储集体沿盆地西南部、中部及北部的古隆起区发育;断溶体储层在盆内呈孤立发育。

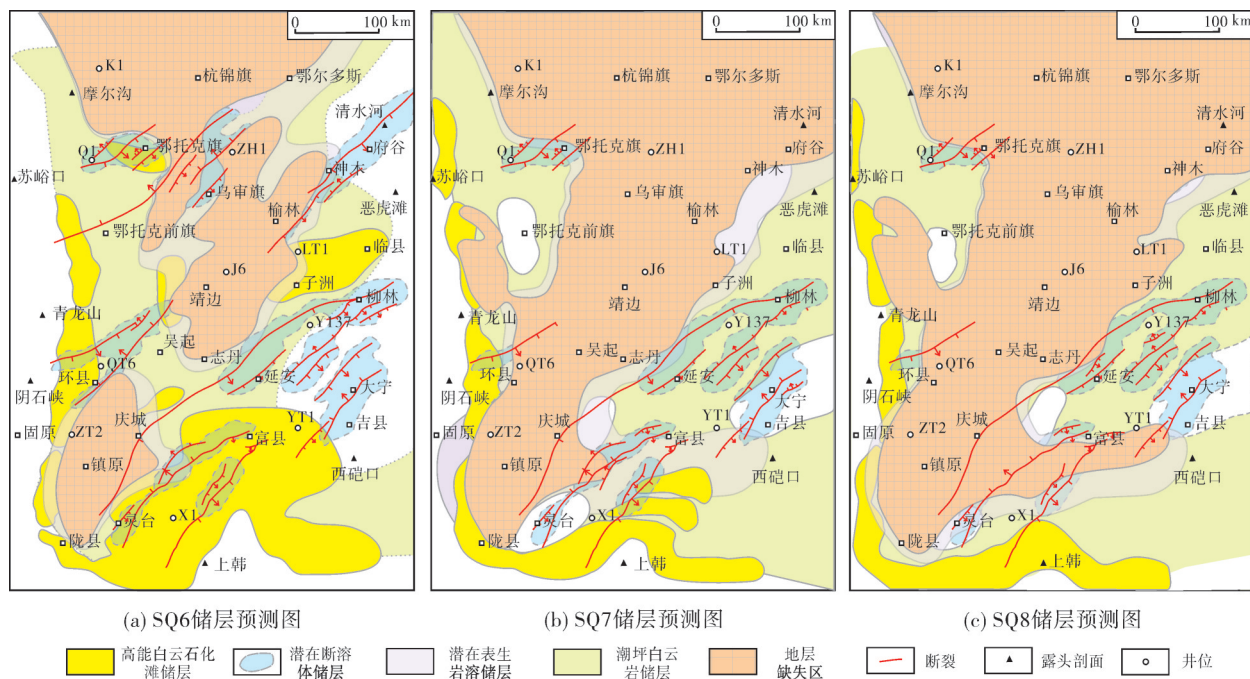


图11 鄂尔多斯盆地寒武系储层预测图
Fig.11 Reservoir prediction map of Cambrian in Ordos Basin

5 结论

(1)在鄂尔多斯盆地寒武系中识别出2个二级层序界面和8个三级层序界面,包括不整合面和岩性转换面2种层序界面,并以此为依据将寒武系的馒头组—三山子组划分为2个二级层序(SS1、SS2)、8个三级层序(SQ1—SQ8),每个三级层序由海侵体

系域和高位体系域组成,缺少低位体系域。

(2)鄂尔多斯盆地寒武纪经历了2个沉积阶段:SQ1—SQ4为海侵阶段,SQ5—SQ8为海退阶段。SQ1—SQ4为缓坡沉积体系,盆内主要发育内缓坡和中缓坡相沉积;SQ5—SQ8为镶边型台地沉积体系,盆内主要发育滨岸、局限台地、开阔台地、台地边缘、陆棚、斜坡等沉积相类型。

(3)鄂尔多斯盆地寒武系储层类型主要发育白云石化鲕粒滩储层、表生岩溶储层及断溶体储层。受相带、高位体系域白云石化作用、表生岩溶作用及断裂作用的控制,平面上白云石化鲕粒滩储层主要分布于台缘,表生岩溶储层主要分布于古隆起周缘,断溶体储层孤立地分布于盆地内。寒武系储层纵向上主要发育于三级层序SQ6—SQ8。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 黄军平,李相博,何文祥,等.鄂尔多斯盆地南缘下寒武统高丰度烃源岩发育特征与油气勘探方向[J].海相油气地质,2020,25(4):319-326.
HUANG Junping, LI Xiangbo, HE Wenxiang, et al. Development characteristics of high abundance source rocks of the Lower Cambrian and direction of oil and gas exploration in southern margin of Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4): 319-326.
- [3] 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.
- [4] 黄军平,林俊峰,张艳,等.鄂尔多斯盆地南缘下寒武统海相烃源岩有机地球化学特征与成藏贡献[J].天然气地球科学,2022,33(3):461-471.
HUANG Junping, LIN Junfeng, ZHANG Yan, et al. The organic geochemical characteristics of Lower Cambrian marine source rocks and its contribution to hydrocarbon accumulation in the southern margin of Ordos Basin[J]. Natural gas geoscience, 2022, 33(3): 461-471.
- [5] 陈方鸿,谢庆宾,王贵文.碳酸盐岩成岩作用与层序地层学关系研究:以鄂尔多斯盆地寒武系为例[J].岩相古地理,1999,19(1):20-24.
CHEN Fanghong, XIE Qingbin, WANG Guiwen. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: an example from the Cambrian Strata in the Ordos Basin[J]. Sedimentary facies and palaeogeography, 1999, 19(1): 20-24.
- [6] 朱如凯.贺兰山中段早古生代地层旋回层序研究[J].岩相古地理,1993,13(6):26-33.
ZHU Rukai. Cyclic sequences of the Early Palaeozoic Strata in the middle part of the Helan mountain area[J]. Sedimentary facies and palaeogeography, 1993, 13(6): 26-33.
- [7] 蔡忠贤,秦玉娟,贾振远.鄂尔多斯地区南缘寒武纪层序地层和海平面变化[J].地球科学,1997,22(5):41-47.
CAI Zhongxian, QIN Yajuan, JIA Zhenyuan. Sequence stratigraphy and sea level change of the Ordovician in the southern margin of Ordos region[J]. Earth science, 1997, 22(5): 41-47.
- [8] 陈启林,白云来,黄勇,等.鄂尔多斯盆地寒武纪层序岩相古地理[J].石油学报,2012,33(增刊2):82-94.
CHEN Qilin, BAI Yunlai, HUANG Yong, et al. Sequence lithofacies palaeogeography of the Cambrian in Ordos Basin, China[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(S2): 82-94.
- [9] 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.
- [10] 苏中堂,胡孙龙,刘国庆,等.鄂尔多斯盆地早古生代构造分异作用对碳酸盐岩沉积与规模性储层发育的控制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(5):513-519, 521-532.
SU Zhongtang, HU Sunlong, LIU Guoqing, et al. Carbonate deposition and scale reservoir development controlled by tectonic differentiation in Early Paleozoic in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(science & technology edition), 2022, 49(5): 513-519, 521-532.
- [11] 魏国齐,朱秋影,杨威,等.鄂尔多斯盆地寒武纪断裂特征及其对沉积储集层的控制[J].石油勘探与开发,2019,46(5):836-847.
WEI Guoqi, ZHU Qiuying, YANG Wei, et al. Cambrian faults and their control on the sedimentation and reservoirs in the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(5): 836-847.
- [12] 何登发,包洪平,开百泽,等.鄂尔多斯克拉通地块活化了吗?[J].石油与天然气地质,2022,43(6):1271-1291.
HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated?[J]. Oil & gas geology, 2022, 43(6): 1271-1291.
- [13] 王峰,陈洪德,赵俊兴,等.鄂尔多斯盆地寒武系一二叠系层序界面类型特征及油气地质意义[J].沉积与特提斯地质,2011,31(1):6-12.
WANG Feng, CHEN Hongde, ZHAO Junxing, et al. Sequence boundary and petroleum geology of the Cambrian-Permian Strata in the Ordos Basin[J]. Sedimentary geology and Tethyan geology, 2011, 31(1): 6-12.
- [14] 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 tecton-

- ic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area[J]. *Acta petrolei sinica*, 2021, 42(10): 1255–1269.
- [15] 毛丹凤, 何登发, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起的分布、演化及构造属性[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 755–766.
- MAO Danfeng, HE Dengfa, BAO Hongping, et al. Distribution, evolution and structural properties of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin[J]. *Petroleum exploration and development*, 2023, 50(4): 755–766.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] BURCHETTE T P, WRIGHT V P. Carbonate ramp depositional systems[J]. *Sedimentary geology*, 1992, 79(1/4): 3–57.
- [19] 徐桂芬, 林畅松, 李振涛. 南哈萨克区块下石炭统层序岩相古地理及其对有利储层的控制[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(6): 1–11.
- XU Guifen, LIN Changsong, LI Zhentao. Lithofacies paleogeography and favorable reservoir of Lower Carboniferous in southern Kazakhstan[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, 38(6): 1–11.

编辑: 韦东晓

Lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian sequence and their control over reservoir in Ordos Basin

LU Yi^{1,2}, ZHANG Chunlin², YOU Xuelian¹, NIE Yuhan³

1. *China University of Geosciences (Beijing)*; 2. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development*;

3. *The Fourth Oil Production Plant of PetroChina North China Oilfield Company*

Abstract: The Cambrian in Ordos Basin has the potential for natural gas exploration. To clarify the distribution pattern of favorable sedimentary facies zones and reservoirs, by comprehensively analysing core, outcrop and seismic data, two types of sequence boundaries, unconformities and lithological transition surfaces are have been identified in the Cambrian of the Ordos Basin. The Cambrian strata can be divided into two 2nd-order sequences (SS1, SS2) and eight 3rd-order sequences (SQ1–SQ8), each 3rd-order sequence consists of a TST and a HST, lacking a LST. The unconformity surfaces of the bottom and top of the Cambrian system serve as the bottom and top boundaries of SS1 and SS2. The lithological transition surface is the 3rd-order sequence boundary. Eight lithofacies palaeogeographic maps were systematically compiled to analyze the lithofacies paleogeographic distribution characteristics under 3rd-order sequence stratigraphic framework of Cambrian in Ordos Basin. The Cambrian in the Ordos Basin has gone through two sedimentary stages. SQ1–SQ4 is the stage of transgression, developing carbonate ramp sedimentary system. SQ5–SQ8 is the stage of regression, developing shallow water carbonate platform sedimentary system. Controlled by the evolution of sequence lithofacies paleogeography, the Cambrian reservoirs in Ordos Basin are mainly distributed longitudinally in SQ6–SQ8, and the good reservoirs of Cambrian in Ordos Basin include three types: dolomitizatonal oolitic shoal reservoir, supergene karst reservoir and fault–dissolution reservoir. Due to the control of the platform margin and high-level system tract, as well as the distribution and faulting of ancient uplifts, the oolitic shoal reservoir is mainly distributed in the western and southern platform margin of the basin, the supergene karst reservoir is distributed in the periphery of the palaeouplift, and the fault–dissolution reservoir is isolated in the basin.

Key words: sequence; lithofacies palaeogeography; sedimentary system; reservoir; Cambrian; Ordos Basin

LU Yi, First author: MSc, engaged in geological research. Add: No. 29 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: ly12345678901104@163.com

ZHANG Chunlin, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, engaged in sedimentology and reservoir geology and evaluation of oil and gas exploration targets. Add: No.20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: mike_zcl@163.com