

DOI: 10.12401/j.nwg.2023139

鄂尔多斯盆地中部寒武纪岩相古地理研究

郑萌¹, 梁积伟^{1,*}, 冯振伟¹, 冯昆明², 宗浩¹, 李汉林¹, 常小斌¹, Tsogochir Tungalag¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国石油长庆油田公司第九采油厂, 陕西 西安 710200)

摘要: 鄂尔多斯盆地寒武系是一套海相沉积地层, 岩性以碳酸盐岩为主夹少量碎屑岩。近年来, 该地区的寒武系被认为具有很大的勘探潜力, 但迄今为止尚未发掘到大型储层。以往的研究主要集中在东、西和南部, 而中部的研究严重缺乏, 这阻碍了该区油气勘探的突破。笔者通过对 56 个钻孔岩心和 13 条野外露头进行单井划分, 根据 120 块镜下薄片和岩石组合特征, 识别出 2 种沉积相: 斜坡相和台地相 2 种沉积相。在此基础上, 开展联井对比, 以盆地中部为中心划分出东西、南北 2 条贯穿盆地的连井剖面, 探讨不同时期的沉积厚度和沉积相变规律。研究认为, 鄂尔多斯盆地寒武系形成于海侵背景下, 在经历了辛集期后, 海水从盆地的西部和南部向内部推进。到张夏期, 海进达到鼎盛, 盆地绝大部分区域被海水淹没, 只留下零星低矮的古陆。到三山子期, 海进由盛转衰, 开始发生海退。笔者重建了“一隆四凹”的古地理沉积格局, 还原了盆地中部寒武纪构造沉积演化过程。

关键词: 岩相古地理; 寒武系; 鄂尔多斯盆地; 构造沉积演化

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0352-17

Lithofacies Paleogeography of the Cambrian in the Central Ordos Basin

ZHENG Meng¹, LIANG Jiwei^{1,*}, FENG Zhenwei¹, FENG Kunming², ZONG Hao¹,
LI Hanlin¹, CHANG Xiaobin¹, Tsogochir Tungalag¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. PetroChina Changqing Oilfield Co, No. 9 Oil Production Plant, Xi'an 710200, Shaanxi, China)

Abstract: The Cambrian System in the Ordos basin is a set of marine sedimentary formations dominated by carbonate rocks and interbedded with a small amount of clastic rocks. In recent years, the Cambrian System in this area has been considered to have great exploration potential, but so far no large reservoirs have been discovered. Previous research has mainly focused on the eastern, western, and southern parts, while research on the central part has been severely lacking, which has hindered breakthroughs in oil and gas exploration in the region. In this study, single-well divisions were conducted on 56 drill cores and 13 outcrop sections, and based on the characteristics of 120 thin sections and rock combinations, two sedimentary facies were identified: slope facies and platform facies. Based on this, inter-well comparisons were carried out, and two cross-well sections run-

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2023-04-23; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 第二次青藏高原科学考察研究国家专项“碰撞以来高原古地理格局与构造地貌演化”(2019QZKK0704), 中国地质调查局项目(0716-1641DK900365/07), 国际地科联国际地层对比计划(IGCP652)联合资助。

作者简介: 郑萌(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事沉积盆地分析和构造地质学。E-mail: 2021127054@chd.edu.cn。

* 通讯作者: 梁积伟(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为沉积学和盆地分析。E-mail: jjiwei@chd.edu.cn。

ning through the east-west and north-south of the basin were delineated with the center of the basin as the focus, to explore the sedimentary thickness and facies changes in different periods. The study suggests that the Cambrian in the Ordos basin was formed under a transgression background, and after the Xijian period, seawater advanced from the western and southern parts of the basin towards the interior. By the Zhangxia period, the sea had reached its peak and most of the basin was submerged by seawater, leaving only sporadic low-lying ancient land. During the sedimentation period of the Sanshanzi Formation, the sea transgressed to regress. This study also reconstructed the paleogeographic pattern of “one uplift and four depressions” and restored the tectonic and sedimentary evolution process of the Cambrian period in the central part of the basin.

Keywords: lithofacies paleogeography; Cambrian; Ordos basin; tectonic and sedimentary evolution

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,也是早期油气勘探的重要目标之一(Dai et al., 2005; Hu et al., 2009; Duan, 2012; 赵龙梅等, 2023)。大量的研究资料表明,在鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩、上古生界煤系和中生界页岩中有丰富的油气资源显示(何自新等, 2003; 赵文智等, 2005; 武富礼等, 2007; Zhao et al., 2014; Liu et al., 2016; Yang et al., 2017; 唐玮玮等, 2022; 肖玲等, 2022; 欧阳明华等, 2023; 张瑶瑶等, 2023)。近年来,随着寒武系也出现良好的油气显示(黄军平等, 2020),如四川安岳特大气田、塔里木盆地玉尔吐斯组高有机质丰度烃源岩的发现,使寒武系的勘探潜力受到越来越多的重视(陈建平等, 2013; 赵文智等, 2018; 周进高等, 2020a, 2020b)。寒武系和元古界是鄂尔多斯盆地油气勘探向深部突破的关键,而现有的研究主要集中于通过岩性、沉积特征和测井曲线等去划分沉积相。虽然很多学者做了鄂尔多斯盆地寒武系的沉积厚度图,但研究往往集中于西部和南部,由于缺乏可靠的钻井资料导致盆地中部的研究程度很低,且仅有的研究对沉积相和古地理构造格局的认识也有差异,严重阻碍了该区油气勘探工作的突破。为了解决相关问题,笔者统计分析鄂尔多斯盆地的56口钻井岩心,13条野外剖面和120块镜下薄片,对鄂尔多斯盆地中部寒武系进行沉积特征和地层展布规律的研究。根据中国地层委员会的地层清理成果,划分寒武系为辛集组、朱砂洞组、馒头组、张夏组和三山子组,原有的毛庄组和徐庄组都合并在了馒头组内(马润华, 1998)。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地现今位于华北板块西南部,内部划

分为伊陕斜坡、伊盟隆起、晋西褶皱带、渭北隆起、天环凹陷及西缘冲断带6个一级构造单元(图1a),是一个以整体升降为主的稳定克拉通沉积盆地(杨遂正等, 2006; 陈启林等, 2013)。目前勘探结果表明,经一套抬升和下降过程,沉积的地层从下至上主要有:辛集组、朱砂洞组、馒头组、张夏组和三山子组(图1b)。

盆地内发育几个大的裂陷槽,主要因为中元古代—新元古代华北克拉通(包括鄂尔多斯盆地)受罗迪尼亚超大陆裂解的影响(Zhao et al., 2018),一系列裂陷槽在上地幔浅层热对流控制的拉张应力背景下形成,包括南缘及西南缘发育的晋陕、甘陕及贺兰裂陷槽(杜金虎等, 2019)。在早寒武世起,盆地内产生了一套全区稳定可追踪的盖层沉积(郝松立等, 2016),寒武系在此基础上沉积,故其沉积格局同中元古代—晚元古代沉积格局有一定继承性(杨遂正等, 2006; 张春林等, 2021)。构造和岩浆活动较弱且大多分布在盆地边缘,岩浆岩在盆地内不发育,仅在岐山二郎沟位置的徐庄组发现有两层粗面安山玢岩(苏中堂等, 2022),表示当时有局部的岩浆喷出事件,岩浆岩分布十分有限。

由于盆地位于热带—亚热带暖流区,位于赤道周围30°以内(万天丰, 2006; McKenzie et al., 2019)(图2),当时全球处于大海泛时期,海侵沉积序列富含磷质,不整合超覆在前寒武地层之上(Peters et al., 2012; 张兴亮, 2021),气候温暖或炎热(张兴亮, 2021; Scotese et al., 2021),非常有利于烃源岩的广泛发育。寒武纪时期生物大爆发,大量生物繁衍(Shu et al., 2006; Fu et al., 2019),是烃源岩发育的有利时期。华北板块在寒武纪时富含热带生物群,以三叶虫、软体动物群和高肌类为特征(万天丰, 2006; Lee et al., 2015; Li et al., 2019a, 2019b, 2020)

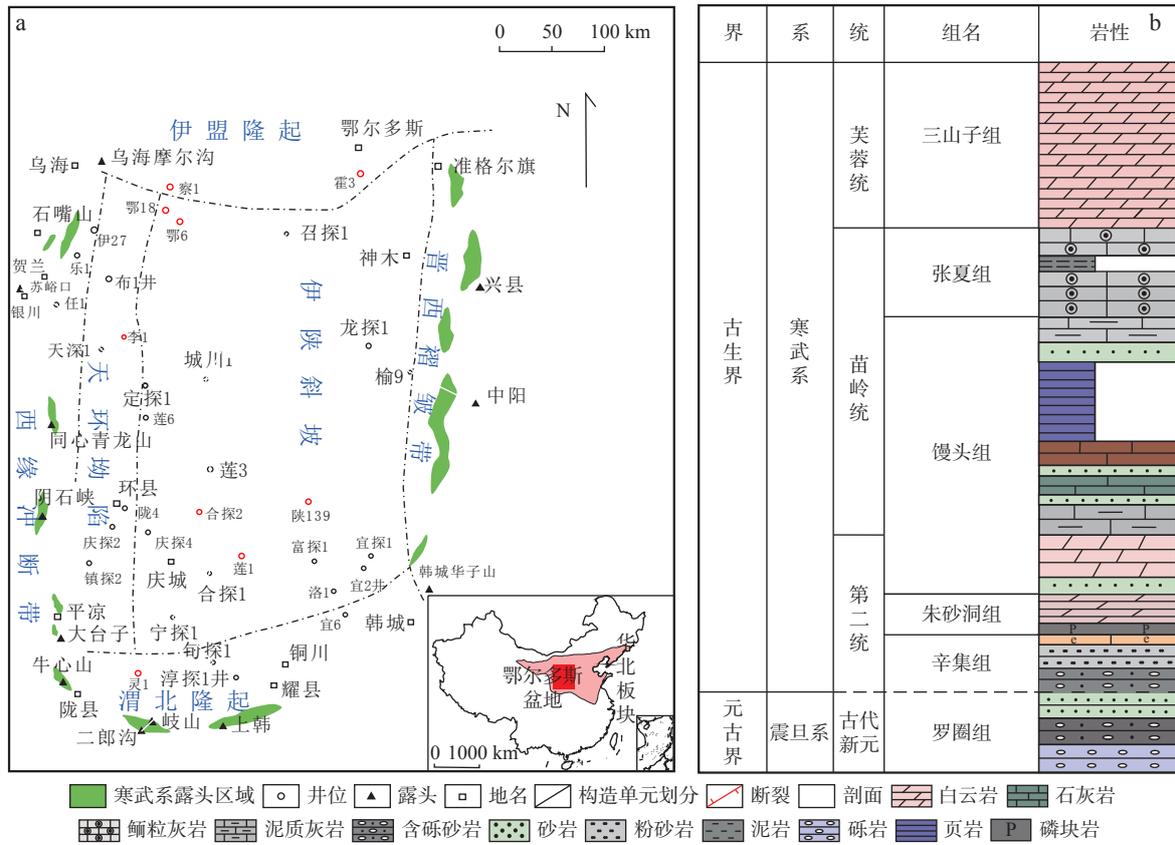


图1 鄂尔多斯盆地寒武系露头位置及综合岩性柱状图

Fig. 1 Outcrop locations and lithostratigraphic column of the Cambrian in the Ordos Basin

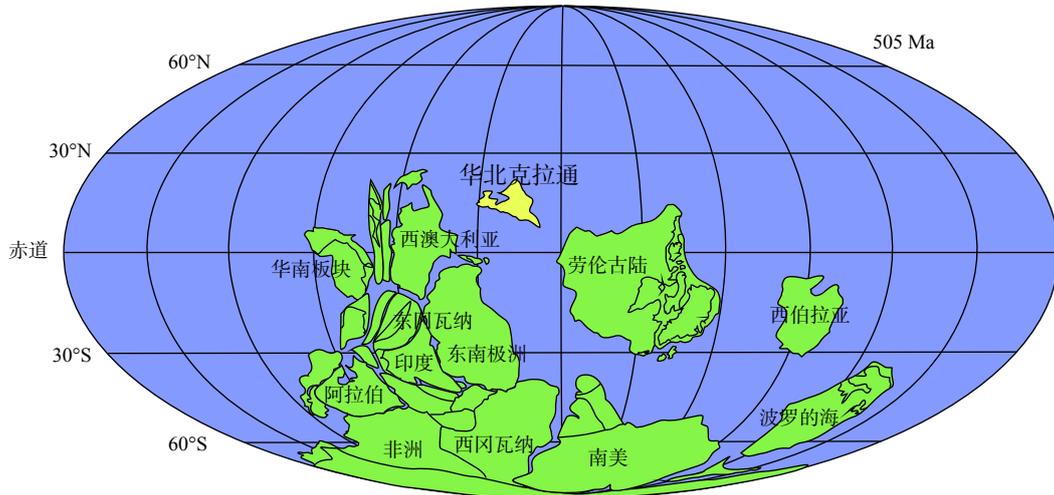


图2 寒武纪早期古板块位置图(据 Zhao et al., 2021 修改)

Fig. 2 Paleogeographic map of early Cambrian Paleoplates

2 研究思路和研究方法

通过吸取前人划分经验,从构造控制沉积理念出发,用沉积-沉降补偿原理来恢复古地貌,即在相对稳

定的沉降速度和沉积速度下,稳定的沉积环境可以将地壳厚度近似等于地层沉积厚度(许化政等, 2005; 久凯等, 2012; 张春林等, 2017),通过古地貌反推当时产生的裂隙和隆起位置,探究其构造格局,精细刻画当时盆地的抬升与沉积过程,以露头、钻井岩心-连井剖

面-地层厚度图综合分析为手段, 点-线-面结合, 以单因素分析-综合编图方法作为划分沉积相和有利勘探区的依据, 以寒武纪构造-沉积演化为主线, 以寻找储层为终极目标, 编制了鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理图。

文中所有图件都是由石文软件和 CorelDraw 软件

做成, 数据来源为廊坊中石油科学技术研究院提供的钻井资料。地层厚度图件是通过将 56 口钻井和 13 个野外露头的地层信息录入石文软件生成并通过 Corel-Draw 软件美化得到。通过录入石文的钻孔信息经过连井剖面做成, 但是因其图件过长导致岩性显示不够清晰, 故用 CorelDraw 软件进行重绘、美化(图 3)。

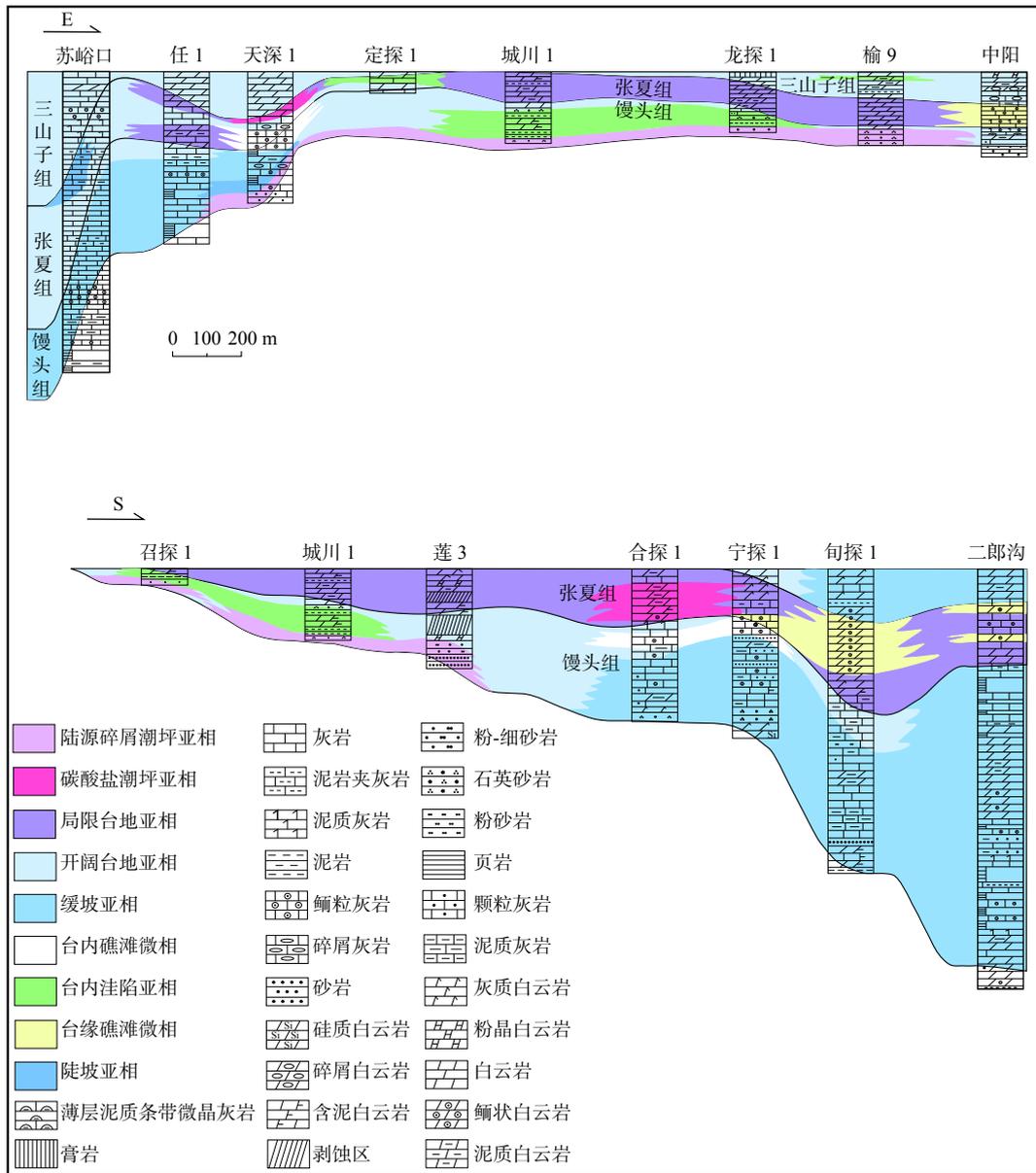


图 3 鄂尔多斯盆地中部寒武系沉积相对比图(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Sedimentary facies comparison of the Cambrian in the central Ordos basin (profile position is shown in Fig. 1)

3 研究结果

3.1 地层特征

由于晋宁运动使得整个华北古陆在震旦纪—寒

武纪早期处于隆升阶段, 导致缺失了四川盆地和塔里木盆地寒武系富含烃源岩的震旦纪和纽芬兰世相应沉积, 到寒武纪黔东世(第二世)南帛期才开始下降沉积, 形成了辛集组和朱砂洞组(陈启林等, 2012, 2013)(表 1), 辛集组与下伏震旦系罗圈组平行不整合接触,

表1 鄂尔多斯盆地寒武系地层划分沿革表

Tab. 1 Evolution table of stratigraphic division of Cambrian in Ordos basin

系	统	四川盆地 (邹才能等, 2014)	塔里木盆地 (韩浩东等, 2018)	鄂尔多斯盆地 (马润华, 1998)
寒武系	芙蓉统	洗象池群	下丘里塔格群	三山子组
			阿瓦塔格群	
	苗岭统	高台组	沙依里克组	张夏组
				上段
				馒头组
	第二统(黔东统)	陡坡寺组	吾松格尔组	馒头组
		龙王庙组		下段
	纽芬兰统	沧浪铺组	肖尔布拉克组	朱砂洞组
		筇竹寺组		辛集组
		麦地坪组		玉尔吐斯组

顶部与朱砂洞组整合接触。鄂尔多斯盆地辛集组分布主要在陇县、岐山一带,厚度自西向东减薄,盆地东部无沉积(祝有海等, 2008; Liang et al., 2020)。辛集组由薄层磷质含砾砂岩、粉砂岩、和生物碎屑灰岩组成(图1b)。朱砂洞组顶部与馒头组整合接触,继承了辛集组的沉积格局,主要分布于鄂尔多斯盆地西南部,地层厚度同样为向东减薄,以白云岩为主,底部含磷块岩,预示当时环境较为温暖稳定(陈启林等, 2013)。辛集组和朱砂洞组由于其零星分布、厚度小、岩性以砂岩为主,油气勘探价值相对较低,故不进行重点研究。

馒头组与下伏朱砂洞组、上覆张夏组呈整合接触。馒头组在盆地西缘苏峪口地区和盆地南缘二郎沟地区沉积厚度较大,由南向北、由西向东地层厚度急剧减小(图3)。馒头组岩性较为复杂,包括灰岩、白云岩、砂岩、粉砂岩、泥岩和鲕粒灰岩等(图3)。

根据岩性组合,馒头组可以分为馒头组下段、中段、上段3段。馒头组下段最大地层厚度为220 m,岩性由灰岩和泥质白云岩组成。馒头组中段主要由一套碎屑岩夹碳酸盐岩组成,最大厚度为300 m。馒头组上段地层最大厚度为300 m(图4a),主要岩性为灰岩、白云岩和黑色泥岩(图5a~图5c、图5e、图5k、图5l、图5n),泥地比在盆地南部最高可达80%(图4b)。根据各省地层概况整理出了地层划分沿革表(表1),依据最新的地层清理成果,将徐庄组、毛庄组和馒头组进行了合并,新的地层名称保留馒头组(马润华, 1998)。原徐庄组称馒头组上段,毛庄组称馒头

组中段,传统意义上的馒头组称馒头组下段(表1)。

张夏组分布较广,除北部的伊盟古陆和西南部的镇原古陆外,盆地其他地区均有分布(图4c)。张夏组与上覆三山子组和下伏馒头组均为整合接触,最大地层厚度为300 m(图4c),该层位岩性主要为鲕粒灰岩、鲕粒白云岩、砾屑灰岩、砂屑灰岩夹泥质页岩和泥灰岩,以鲕粒灰岩和鲕粒白云岩广泛发育为主要特征(图5f~图5j),鲕地比在盆地东南部韩城地区最高可达90%(图4d)。

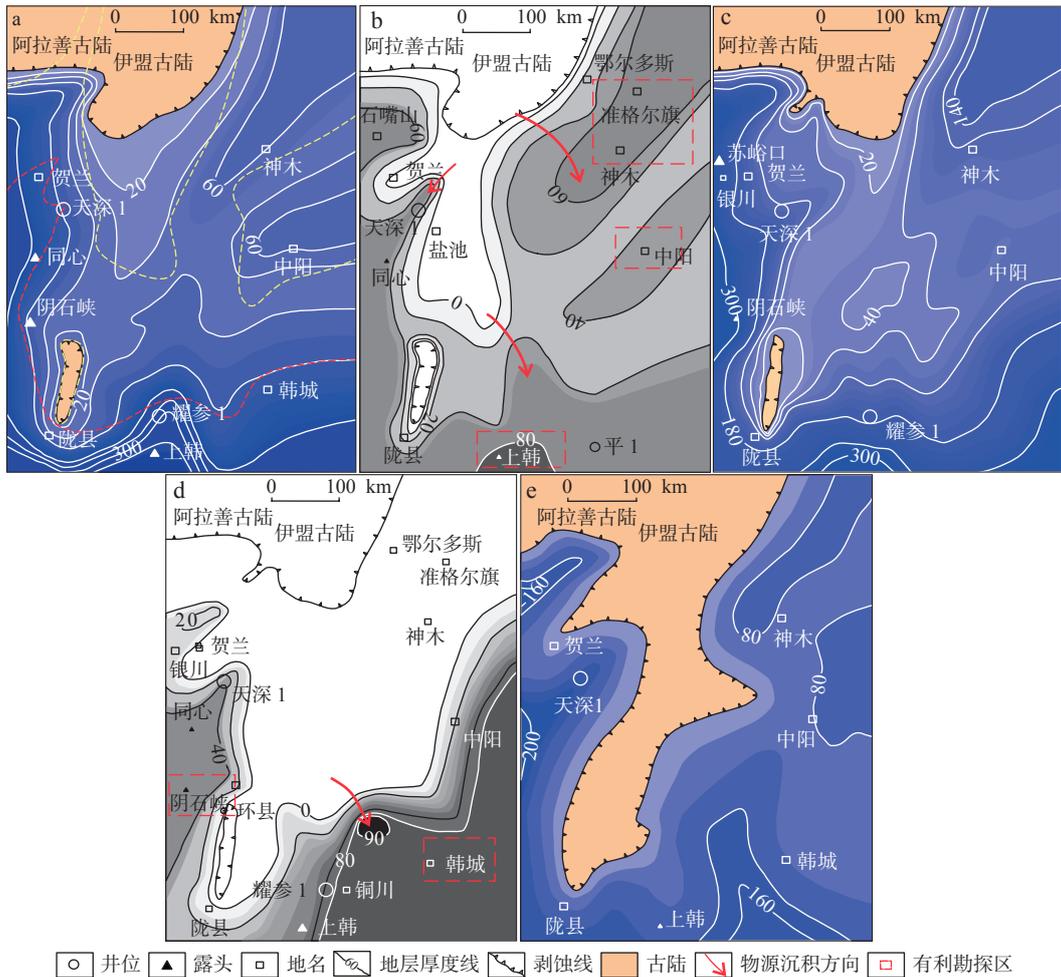
三山子组分布于盆地东部、西部和南部,被由SN向展布的中央古隆起分隔(图4e)。三山子组顶界和奥陶系冶里组角度不整合接触,与下伏张夏组整合接触,最大地层厚度为200 m(图4e)。三山子组主要岩性为灰岩、泥质细晶白云岩、颗粒白云岩、钙质白云岩和白云质灰岩(图5m、图6g)。

3.2 沉积相的划分讨论

笔者根据野外剖面和钻井岩心的岩石学、沉积构造特征和区域地质特征,并结合金振奎(2013)和Read(1985)划分方法对鄂尔多斯盆地中部寒武系沉积相进行划分,共划分为斜坡相、台地相2种沉积相。

3.2.1 斜坡相

根据有无明显坡折带,将斜坡相分为缓坡亚相和陡坡亚相。缓坡亚相由陆向海平缓倾斜,处于正常浪基面以下,其相带展布平坦开阔,在缓坡下部可见平行层理,是碳酸盐稳定沉积的理想场所(金振奎等, 2013)。缓坡亚相岩性以薄层泥晶灰岩、砂屑灰岩为



a. 馒头组上段厚度等值线图; b. 馒头组上段泥地比等值线图; c. 张夏组厚度等值线图;
d. 张夏组泥地比等值线图; e. 三山子组厚度等值线图

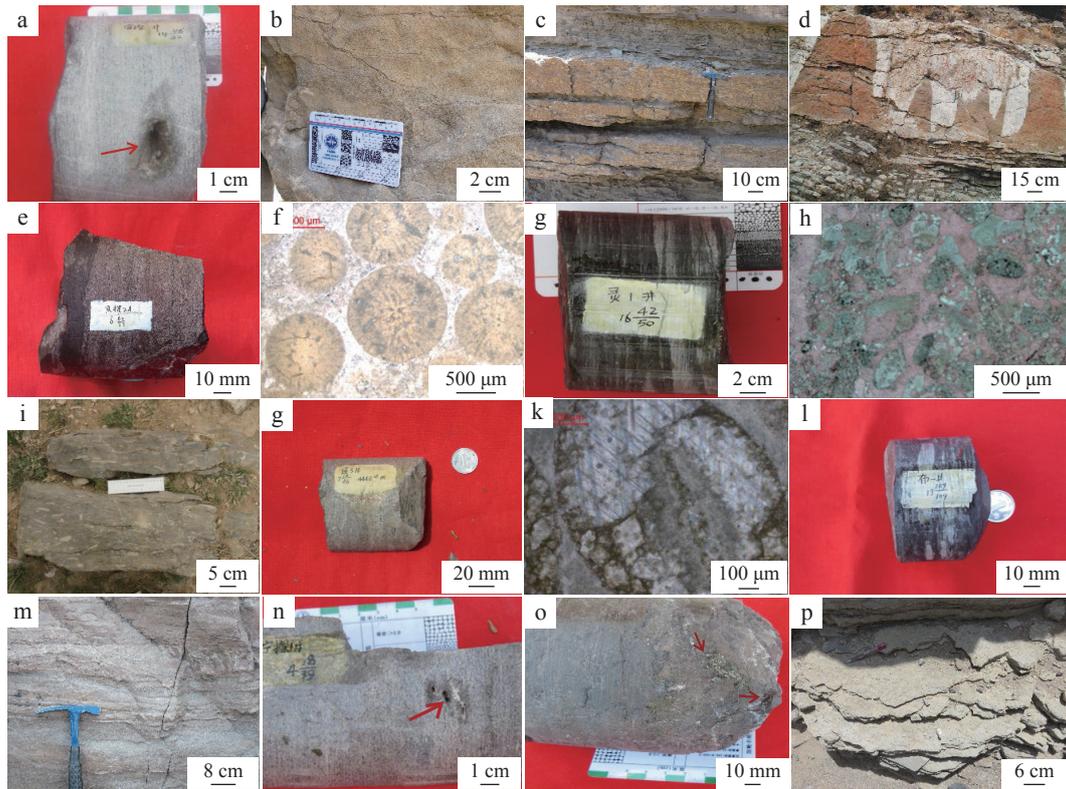
图 4 鄂尔多斯盆地中部寒武纪地层厚度图和泥/地等值线图

Fig. 4 Cambrian strata thickness map and mud/ground contour map in central Ordos basin

主, 偶含竹叶状灰岩和藻灰岩(图 6f), 在馒头组中段、上段和张夏组广泛发育(图 7a、图 7b)。准同生变形构造常见于缓坡亚相, 体现为岩石中产生部分不连续、撕裂和拉长的透镜形状。张春林等(2017)在文中提到深缓坡相中岩心观察表现为“似断非断、藕断丝连、断而未乱”的特征(图 5I), 笔者认为可以将其列入缓坡亚相的特征里。“似断非断”是在缓坡的前端, 由于重力作用于成岩之前富含孔隙水半固结的泥粒和粉砂颗粒上, 其受到一定的拉张, 呈块状断续分布, 但因坡度有限使其实则在边缘处有相连。“藕断丝连”是在缓坡的中部, 由于重力分量加大, 孔隙水携带泥粒和粉砂颗粒继续向下迁移, 外观被拉长呈长条透镜状, 其上与未滑下来的连接处像泡泡糖被拉成丝状。“断而未乱”指在缓坡亚相末端快至浅盆区域, 坡度角增加重力分量继续加大, 致泥粒和砂粒滑落速度加

快, 与上部的泥、砂粒在距离上呈明显分层, 但是并没有因为滑脱而扰乱层序, 故成岩后观察黑色的泥岩和粉砂岩从远处看为“似断非断、藕断丝连”近看实则依旧连贯为“断而未乱”(图 5I)。在旬探 1 井三山子组 3920.15 m 岩心段中发现砾屑呈分层排列(图 6g), 砾屑层下部见磨圆较好的粒序层, 上覆有趋于水平展布的泥晶灰岩, 整体有风暴浊流沉积的特征, 对应师宇翔等(2022)划分风暴岩的标准, 判定属于 II 类风暴沉积序列, 原文中将此区域划分进台缘斜坡段深水沉积区域。笔者认为由于三山子组沉积时期构造较为稳定, 其所处位置在张夏期并不属于高角度陡坡位置, 故将此划分进缓坡亚相的后缓坡微相。

陡坡亚相是指倾斜角度明显大于缓坡亚相, 有明显坡折带。一般发育深水重力流沉积、风暴沉积, 平行层理不可见, 常位于同沉积断层发育地带(一般为



a.宁探一井,馒头组上段,灰色灰岩发育溶蚀孔隙,溶孔直径2 cm,块状构造,开阔台地亚相;b.环县阴石峡,馒头组上段,鲕粒灰岩,粒屑结构,缓坡亚相;c.乌海摩尔沟野外剖面,馒头组上段,砾屑灰岩,粒屑结构,块状构造,碎屑滨岸潮坪亚相;d.乌海,张夏组,藻礁灰岩构造,台缘礁滩微相;e.庆探2井,馒头组上段,灰黑色泥岩和鲕粒灰岩接触,台内礁滩微相;f.镇探2,张夏组,亮晶鲕粒灰岩,台缘礁滩微相;g.灵1井,张夏组,紫红色泥岩夹灰白色鲕粒灰岩,台缘礁滩微相;h.环县阴石峡野外剖面,张夏组,砾屑灰岩,晶间孔,台缘礁滩微相;i.青龙山,张夏组,砾屑灰岩,陡坡亚相;j.莲3井,张夏组,灰白色白云岩,局限台地亚相;k.环县堡子梁,馒头组上段,鲕粒白云岩,晶间孔、微裂隙发育,台内礁滩微相;l.布1井4553 m,馒头组上段,灰色灰岩夹泥质条带,缓坡亚相;m.乌海摩尔沟野外剖面,三山子组,鱼骨状交错层理,碎屑滨岸潮坪亚相;n.宁探1井,馒头组上段,灰岩,发育溶孔,溶孔直径0.2~0.5 cm,开阔台地亚相;o.庆探4井,馒头组上段,自生黄铁矿,开阔台地亚相;p.乌海摩尔沟野外剖面,张夏组,生物扰动构造,局限台地亚相

图5 鄂尔多斯盆地寒武纪露头、岩心及镜下照片

Fig. 5 Outcrop and rock cores and microscope photos of Cambrian in Ordos Basin

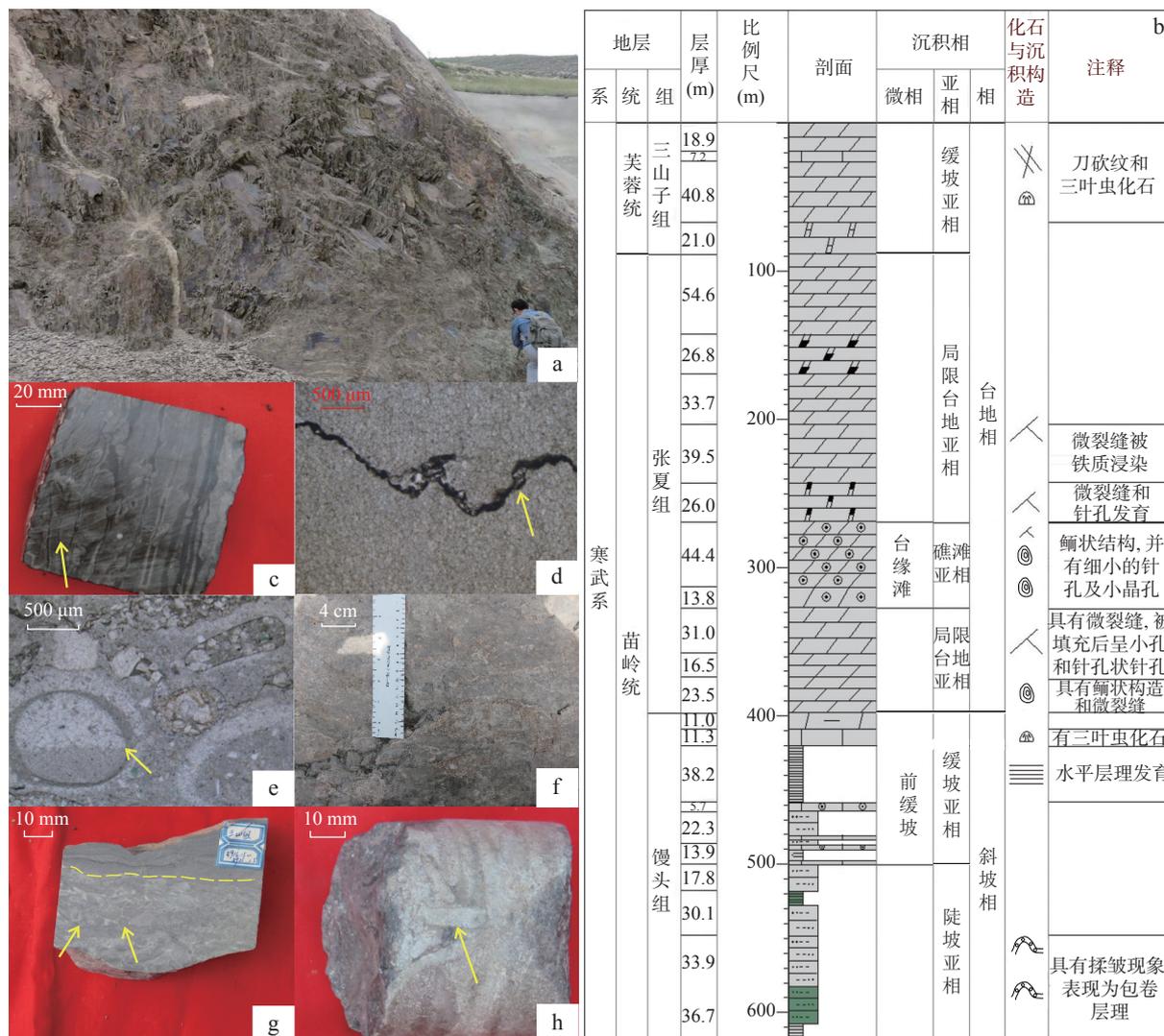
正断层),和台缘礁滩亚相相伴共生,其沉积往往滞后于其他亚相,是烃源岩发育的有利相带(金振奎等,2013;熊伟东等,2022)。陡坡亚相呈带状分布在盆地周缘,由于物源供给充足所以岩性较为复杂,以泥晶灰岩、深色泥岩为主。陡坡亚相在盆地内分布较为局限,仅仅发育于馒头组中段、上段的盆地南部和张夏组盆地西部。在馒头组上段沉积时期,陡坡亚相发育于上韩区域。在张夏组沉积时期,陡坡亚相分布于银川、阴石峡西部、青龙山地区(图7a)。礼泉上韩地区的野外剖面图(图6a、图6b),图中底部在馒头组上段有厚层的灰绿色砂质泥岩,具有因流水剪切力和重力作用产生的揉皱和同心卷曲现象(图6b),是较为典型

的包卷层理,代表了高角度斜坡环境。在青龙山野外剖面上张夏组沉积时期,还发育风暴沉积,可见砾屑明显呈近水平分散展布,此时砾屑可能是风暴衰减至停息期的产物,应该此时处于较深的相对平静的水体环境,应处于陡坡下段区域(图5i)。

3.2.2 台地相

(1) 潮坪亚相

潮坪亚相按岩性分为碎屑岩滨岸潮坪亚相和碳酸盐潮坪亚相,根据最大高潮带、平均高潮带、平均低潮带为界依次分为潮上带、潮间带。潮下带因为位置较为靠下,与局限台地和开阔台地性质较为相似,故合并到局限台地和开阔台地中去(金振奎等,



a. 上韩野外剖面; b. 上韩剖面岩性柱状图; c. 陇 4 井 4 573 m, 泥质灰岩, 张夏组, 缓坡亚相; d. 乐 1 井 2 838.47 m, 馒头组上段, 灰绿色泥质白云岩, 局限台地亚相; e. 李 1 井 4 301 m, 张夏组内碎屑鲕粒灰岩, 示底构造, 局限台地亚相; f. 苏峪口野外剖面, 馒头组上段, 藻礁灰岩, 缓坡亚相; g. 旬探 1 井 3 920.15 m, 风暴碎屑灰岩, 三山子组, 缓坡亚相; h. 庆探 1 井 4 096.136 m, 馒头组上段, 内碎屑团块鲕粒灰岩, 台内礁滩微相

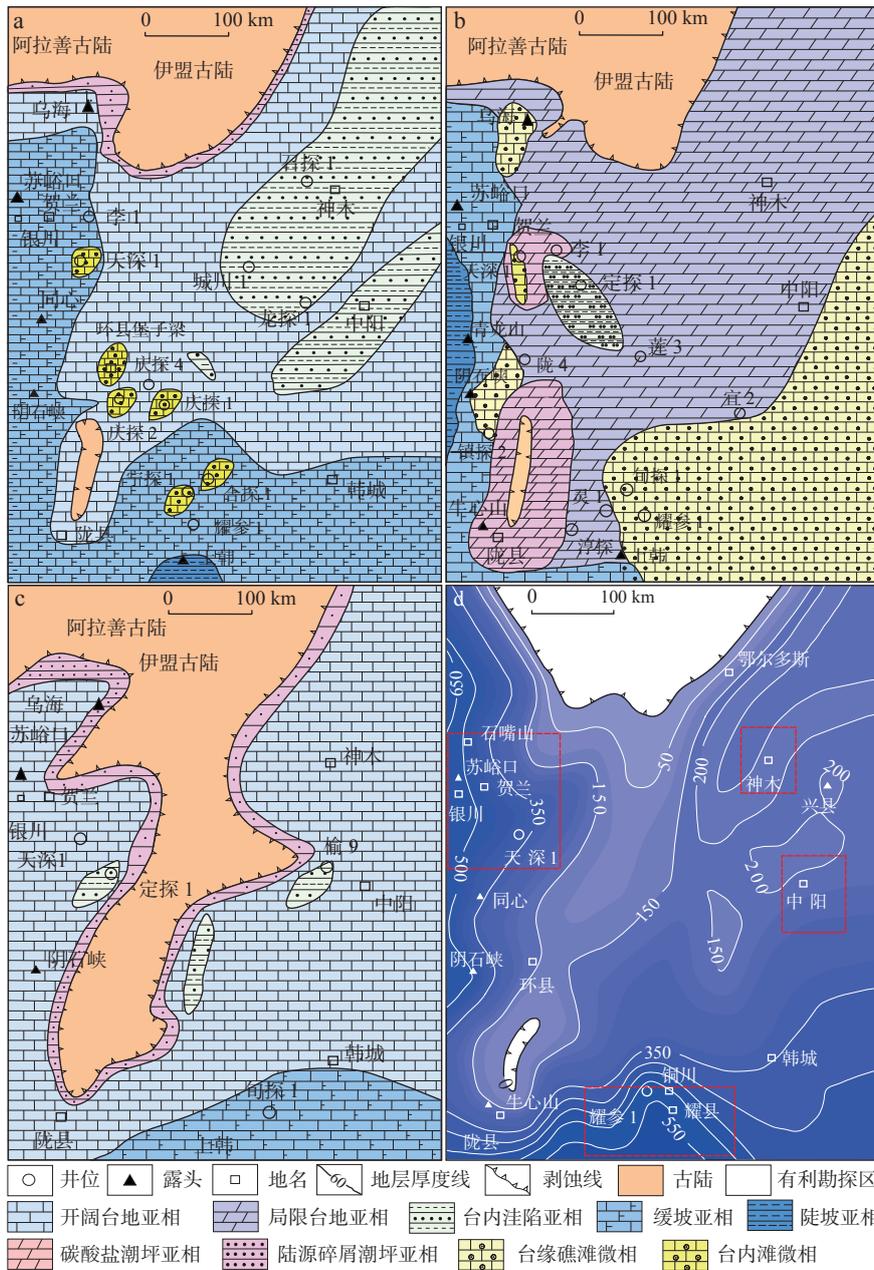
图 6 礼泉上韩地区野外剖面及部分岩心和镜下照片

Fig. 6 Liquan Shanghan area field profile, some core and microscopic photos

2013)。

碎屑滨岸潮坪亚相沉积物以陆源碎屑物质为主, 成分主要为石英砂岩等, 是水动力较强时期的产物, 多发育在海侵初期和海平面快速上涨阶段, 主要在辛集组和馒头组上段的剥蚀区周围分布。张春林等 (2017) 在文中提到碎屑岩发育的滨岸相是古陆隆起存在范围的直接证据, 也就是确定了碎屑滨岸潮坪亚相的范围, 就确定了古陆的隆起范围。在莲 3 井馒头组中段 4 532.72 m 和 4 535.81 m 处岩心中发现灰绿色细砂与泥岩互层 (图 8a、图 8d), 泥质成分呈不均匀的

细条带, 自然伽马曲线 (GR) 高位表示泥质含量高, 声波测井曲线 (AC) 低位显示低密度高孔隙度, 显示动荡的水环境, 应属于潮间带靠上部。同样在莲 3 井馒头组中段 4 533 m 和 4 535.34 m 处发现深灰色厚层粉砂岩, 自然伽马 (GR) 显示低位表示泥质含量少, 声波测井曲线 (AC) 高位显示高密度低孔隙度, 代表了相对稳定的水动力环境应属于潮间带靠下部 (图 8b、图 8c)。在乌海摩尔沟剖面, 三山子组地层中可以看到粉砂和细砂组成的鱼骨状交错层理, 夹有薄层泥岩, 是由周期性双向水流的情况下产生, 一般为潮间带下



a. 馒头组上段岩相古地理图; b. 张夏组岩相古地理图; c. 三山子组岩相古地理图; d. 寒武系厚度等值线图

图7 鄂尔多斯盆地中部寒武纪岩相古地理图及地层厚度图

Fig. 7 Cambrian lithofacies paleogeographic map and stratigraphic thickness map of Ordos basin

部特征(图 5m)。

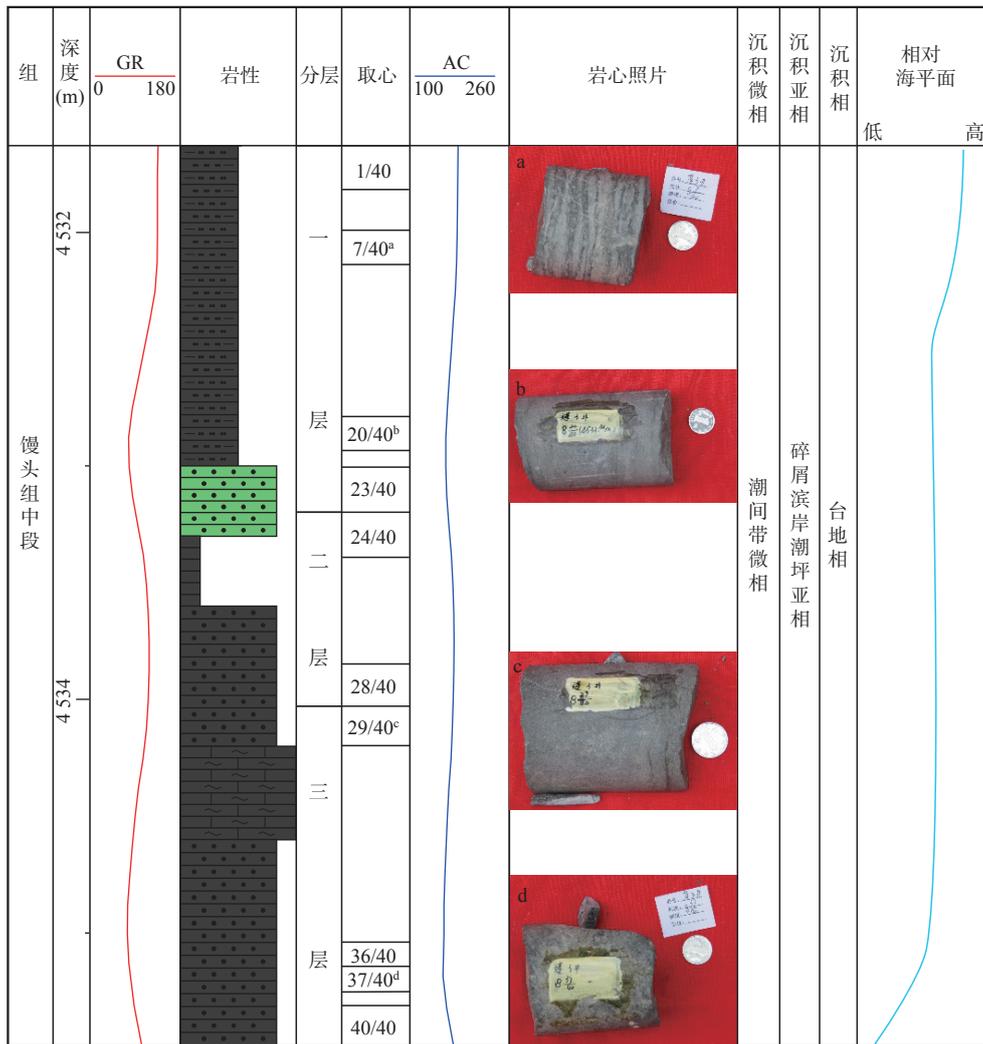
碳酸盐潮坪亚相常相伴局限台地亚相出现(图 7b), 主要岩性为细晶白云岩、泥质白云岩、鲕粒灰岩、鲕粒白云岩、生物碎屑灰岩, 主要分布于张夏组沉积时期的镇原古陆和鲕粒滩之间。

通过观察李1井4301 m处张夏组岩心薄片(图 6e)时发现鲕粒内有明暗分层, 暗处为泥晶方解石, 为沉积底部, 是由上覆盖层遭淋滤作用时由淋滤水沉淀而成; 明处为亮晶方解石充填, 为沉积顶部, 是后期充填

的产物; 明暗交界处为当时的海平面的位置, 是典型的示底构造。示底构造的产生代表当时的水体交流并不顺畅, 而鲕粒的产生也是有一定的盐度要求(金振奎等, 2013), 侧面证实张夏组沉积时期水体盐度较大, 水体流动受限。

(2) 礁滩亚相

因礁和滩的形态较为相似, 且都限制了台地内水体的流动, 文中将“礁、滩”合为一体, 指水体持续或间歇动荡, 以颗粒灰岩组成和造礁生物原地生长形成



a.灰绿色泥岩与细砂互层; b.深灰色粉砂岩; c.深灰色粉砂岩; d.灰绿色泥岩与细砂互层, 夹少量砂质团块被泥质包裹

图 8 莲 3 井 4 531~4 536 m 处岩心柱状图

Fig. 8 Core histogram at 4 531~4 536 m of Lian 3 well

的具有抗击海浪作用的碳酸盐岩沉积块体。根据颗粒灰岩沉积规模和位置分为台内礁滩微相和台缘礁滩微相。

台内礁滩微相是指发育在障壁岛内的礁滩, 地处平缓, 岩性为鲕粒灰岩、鲕粒白云岩、泥晶鲕粒灰岩、砾屑灰岩和生物碎屑灰岩, 含三叶虫和腕足类化石, 三叶虫化石的产生表明台内滩可以在海水盐度正常的时期沉积。台内礁滩微相在馒头组上段集中发育(图 7a)。台内滩厚度薄且处于台地内部, 鲕粒粒径也没有台缘滩大(李凌等, 2011; 李维岭等, 2021), 因其靠近剥蚀区, 且水动力小, 具有较多的陆源物质使得泥晶鲕粒灰岩更发育(图 6f), 其阻隔水体能力有限, 也常在开阔台地亚相中出现。在庆探 2 井馒头组上段 4 848.91 m 处岩心(图 5e), 可见棕褐色鲕粒灰岩和黑

色泥岩渐变接触, 鲕粒灰岩中方解石占 80% 以上, 泥质及其他矿物占 15%, 鲕粒灰岩粒径为 1~3 mm, 大多为圆形, 厚度薄, 符合台内礁滩亚相特征。在庆探 1 井馒头组上段 4 096.136 m 岩心处, 发现内碎屑团块状鲕粒灰岩, 团块充填于碎屑之间并未进入碎屑内部, 一般团块状鲕粒灰岩较为少见, 推测可能和蓝藻生物的粘结作用有关(李凌等, 2013)(图 6h), 而蓝藻的生长喜欢较为温暖的温度, 可能当时气候已经有转暖的趋势。根据台内礁滩沉积特征和等值线图定义: 在台地内分布, 鲕粒灰岩厚度在 0~10 m, 鲕/地比在 50% 以下的为台内礁滩微相(图 4d、图 7a、图 7b)。

台缘礁滩微相是指在台地边缘分布的礁滩, 也可以作为障壁岛存在, 是张夏组主要的沉积特征, 张夏期晚期由于兴凯运动和怀远运动, 东边隆起, 古陆周

边以厚层的鲕粒灰岩为标志且在岸边成带状分布(图 5d、图 5f~图 5h)。为了更直观清楚地说明,定义绕岸分布鲕粒灰岩厚度超过 100 m,且鲕/地比大于 50% 的区域为台缘礁滩微相,分布于盆地东南部,而西南部的阴石峡区域也发育台缘礁滩微相,是因为附近镇探 2 井岩心中的鲕粒间呈亮晶胶结(图 5f),反映了强水动力特点(李维岭等, 2021),这和台缘礁滩的特征相符,所处区域沉积厚度将近 300 m,和地处平缓的台内礁滩定义不符,所以纳入到台缘礁滩微相中(图 4c、图 7b)(通过地层厚度和单因素图来划分沉积相也要结合岩性等多因素考虑,该方法可以作为沉积相定量划分的参考)。台缘礁滩的孔隙和裂缝较台内礁滩更发育,可能和水动力有关,台缘礁滩地处台地边缘靠海一侧,水动力较大,容易将海底粗碎屑颗粒和砾石带到礁滩上,粒径大,导致台缘礁滩孔隙较多,而台内礁滩地处浅水,水动力小,只能搬运和沉积的颗粒都较细小,所以其孔隙和裂缝较台缘礁滩的不明显,这一特征在镜下薄片上尤为明显(图 5e、图 5h、图 5k)。台缘礁滩亚相主要发育粒间溶孔、溶蚀孔隙、裂缝,岩性以鲕粒灰岩为主,夹灰岩、生物碎屑灰岩和残余鲕粒灰岩(图 5g~图 5h、图 5j)。根据台缘礁滩沉积特征定义:绕岸分布的鲕粒灰岩厚度在 10 m 以上,鲕/地比在 50% 以上的为台缘礁滩亚相。

(3) 局限台地亚相

文中的局限台地亚相是指水体受限的台缘礁滩(障壁岛)内区域,一般贫氧或者缺氧,盐度一般较高,主要发育在张夏组沉积时期。在乐 1 井馒头组上段 2 838.47 m 钻孔处发现灰绿色泥质白云岩(图 6d),薄片中方解石空隙和裂缝中充填有少量泥质杂质,表明当时应处于水动力不强局限环境。在莲 3 井 4 440.12 m 深度处发现灰白色白云岩,厚层状,层中夹有极细的泥质层理,弯曲并不规则(图 5j),为温暖局限的稳定水环境。在乌海摩尔沟剖面的张夏组地层中发现灰色灰岩层,表面有生物扰动构造(图 5p),底部有印模,印模整体凹凸较为平缓,反映了当时水动力并不强,当时应处于一定深度且较为温暖平静的水体环境,符合局限台地亚相特征。

(4) 开阔台地亚相

开阔台地亚相是指台地边缘无障壁岛等凸起,不影响台地内部水体交流的宽缓沉积相带(张友等, 2021),属浅水高能沉积环境,无台缘礁滩微相等限制水体流动障壁岛(图 7a、图 7c),是鄂尔多斯地区馒头

组和三山子组沉积时期的主要沉积环境。岩性以大套灰岩为特点,偶夹泥岩和鲕粒灰岩(图 5a、图 5n)。在平面上,表现为地层厚度等值线稀疏,灰岩厚度大,沉积范围广。在乌海摩尔沟野外剖面的馒头组上段地层中见类似风暴砾屑灰岩沉积,整体只见厚层砾屑灰岩,杂乱排列,磨圆中等多为次棱角状,并未见泥晶灰岩等表示稳定沉积的标志,风暴扰动强烈,故根据师宇翔等(2022)划分标准判定属于 V 类风暴沉积序列,应处于正常浪基面附近,属于开阔台地亚相。

(5) 台内洼陷亚相

台内洼陷亚相指位于台地内地形相对低洼,盐度、泥岩厚度都较周缘大,水动力不强的区域。台内洼陷亚相发育于馒头组、张夏组及三山子组,围绕剥蚀区出露,厚度薄且出露面积有限(图 7a~图 7c),岩性主要为深灰色泥岩、泥质灰岩。在馒头组龙探 1、城川 1、召探 1 井中有厚层泥岩出现,在张夏组定探 1 井、三山子组榆 9 井有厚层泥质白云岩和厚层深色泥岩出现,为台内洼陷亚相的沉积特征(图 3)。笔者定义台地内地层厚度大于 30 m,泥岩厚度大于 20 m,泥地比值大于 40% 区域为台内洼陷亚相(图 4a~图 4d、图 7a~图 7b)。鄂尔多斯盆地张夏期沉积模式图(图 9),中央古隆起靠近台地边缘,地理上位于鄂尔多斯盆地西南部,再往南为台缘礁滩和深水盆地。碳酸盐潮坪在古陆周缘分布,位于最大高潮带和平均低潮带之间。台缘礁滩微相和台内礁滩微相位于平均低潮面和正常浪基面之间,台内礁滩分散于台地内,台缘礁滩大规模厚层分布于台缘区域,常和陡坡亚相相伴出现。台内洼陷区在盆地内常沿古陆成点状分布。中央古隆起张夏组周围发育众多鲕粒滩,颗粒间多发育孔隙:晶间孔、溶孔(图 5a、图 5h、图 5k、图 5n)。这可能和淋滤作用有关,CO₂ 溶解于地下水,形成碳酸酸化地下水,再与岩石中钙质矿物(方解石和白云石)发生溶解反应,将矿物中的钙离子溶解出来,逐步形成孔洞,为油气运移提供了流通条件。

3.3 沉积凹陷分布

通常含油气盆地存在许多沉积凹陷,而沉积凹陷是油气勘探的重点目标(刘池洋等, 2014)。所以笔者主要通过研究沉积凹陷区的分布来预测油气的有利勘探区,以此思想为指导通过搜集地层数据整理后,通过石文软件录入绘制了鄂尔多斯盆地寒武纪各个时期地层厚度等值线图、泥地比、鲕地比等值线图及寒武纪地层总厚度等值线图(图 4a~图 4e、图 7d)。

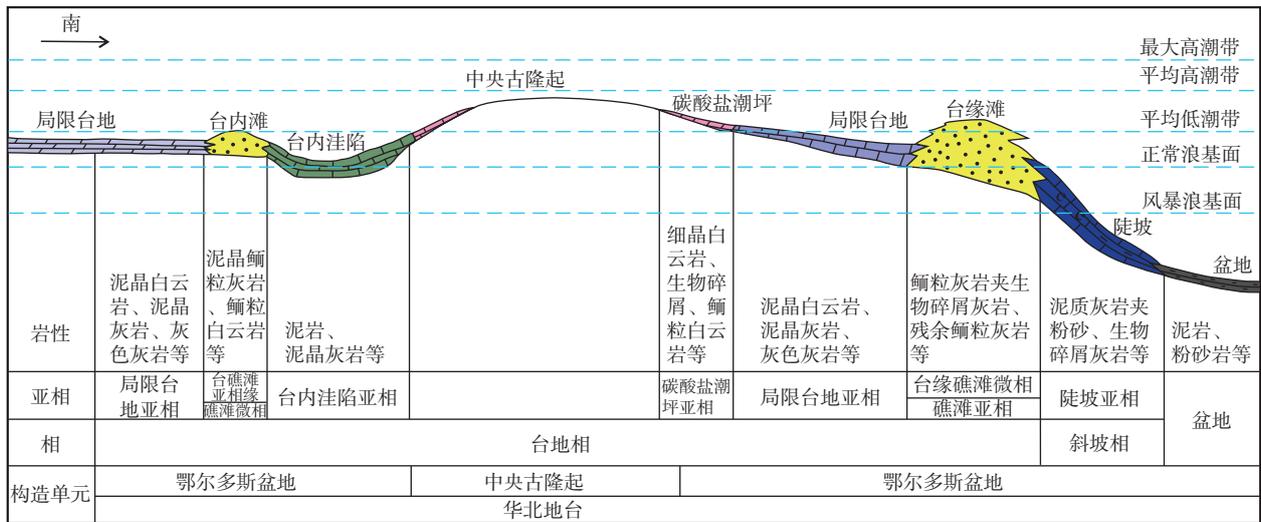


图 9 张夏组中央古隆起剖面沉积示意图

Fig. 9 Sedimentary schematic diagram of central paleo-uplift section of Zhangxia Formation

张春林等(2017)认为鄂尔多斯盆地寒武纪构造格局为“三槽两陆一洼”，三槽为贺兰拗拉槽、定边固原拗拉槽、富县淳化拗拉槽，两陆为伊盟和镇原古陆，一洼为榆林洼地。陈启林(2013)认为可以划分为“一隆两凹”的古地理格局。包洪平等(2019)认为鄂尔多斯盆地地下古生界寒武系是继承了银—杭、环—定、晋—陕、豫—陕 4 个 NE 向的分支拉张裂陷的沉积地形。盆地的西部和南部分别与祁连海槽和秦岭海槽相邻，地层厚度等值线密集，地层从西、南向东、北发育，东、北部地层逐渐变新、变薄。笔者通过绘制寒武纪地层厚度图发现以贺兰地区和南部耀县地区最为突出，总沉积厚度近 500 m(图 7d)，以陡坡亚相为特征，沉积以泥岩、泥晶灰岩，发育深水重力流和风暴沉积，有包卷层理和风暴岩沉积序列出现。贺兰地区在馒头组中段泥地比为 40%，耀县地区泥地比达近 60%，馒头组上段贺兰地区泥地比达 60%，耀县附近的上韩区域泥地比近 80%(图 4b)，定为盆地主要凹陷区，分别命名为“贺兰凹陷”，许多学者也称其为“贺兰拗拉槽”或者“贺兰奥拉谷”(陈启林等, 2013; 张春林等, 2017; 李文厚等, 2020)和“耀县凹陷”。在神木和中阳地区常发育台内洼陷亚相(图 7a)，在馒头组上段沉积时期盆地东北部的神木和中阳地区沉积厚度约为 60 m(图 4a)，神木地区泥地比达 60%，中阳地区泥地比达 40%，是小型沉积拗陷地区(图 4b)。在张夏组沉积时期沉积中心上移到准格尔旗地区，沉积厚度达 140 m，沉积速度激增，海侵达到顶峰(图 4c)。在三山子组沉积时期，东北部沉积中心向下移动，重新

回到神木地区，神木、中阳凹陷沉积厚度达 80 m，沉积速度开始缓慢降低，开始海退(图 4e)。神木、中阳凹陷虽然相对贺兰和耀县凹陷较浅，但沉积厚度和泥地比值仍然较突出，以黑色泥岩、泥晶灰岩为主，具有沉积凹陷区的特征，定为“神木次凹”和“中阳次凹”。

笔者认为中央古隆起、贺兰凹陷、耀县凹陷、神木次凹、中阳次凹共同将鄂尔多斯盆地寒武系划分为“一隆四凹”的古地理格局。因前者贺兰和耀县凹陷研究较早，但并未发现优质储层，认为神木次凹和中阳次凹可以考虑列为新的潜在有利勘探区。

4 讨论

4.1 重建寒武纪构造—沉积演化过程

在寒武纪初，受晋宁运动的影响，使得鄂尔多斯古陆以至于整个华北板块都处于隆升阶段，导致缺失相对应的震旦纪和纽芬兰世沉积，只在其边部有冰水沉积(陈启林等, 2013)。从辛集组沉积时期开始沉积一套可追溯的沉积盖层，海水由西向东、由南向北涌入盆地，沉积过程表现为自西向东、自南向北的超覆沉积，沉积范围仅限于盆地的西缘和南缘，气候炎热干燥，整体为海相—咸水沉积环境(陶文星等, 2020)。朱砂洞期基本上继承了辛集期的沉积模式，且剥蚀区周围的高能陆源碎屑潮坪已经开始向低能的碳酸盐潮坪转换，显示陆源碎屑减少，海侵速度降低，海平面此阶段基本无变化。陈启林等(2012)在陇县牛心山

地区的朱砂洞组发现了厚为50~83 m的白云质石英粉砂岩-含藻屑粉晶白云岩-粉细晶白云岩,显示海水在逐渐变浅,和辛集组可以形成一个小的旋回,由于和前人认识较为一致,文中不做重点研究。

馒头期早期,海侵向北、东方向扩展,形成“L”型海域,西部海水向东侵入至贺兰-天深1-阴石峡-牛心山地区,南部海岸线延伸至牛心山-建1-韩城地区(图4a),显示为祁连海的扩张。地层厚度等值线图中馒头期早期海深达220 m等值线较为密集,在连井剖面中显示盆地西部的任1井和天深1井沉积厚度较大,由西至东沉积厚度逐渐减小,盆地中部至南部的钻孔合探、宁探、旬探和二郎沟地区沉积厚度依次增加,由北至南沉积厚度逐渐增大,显示古陆西、南部和坡度较大,岩性以灰岩为主,沉积格局保持了前寒武的古地理格局(图3)。但在二郎沟野外剖面和盆地中部的莲3、旬探1井、宁探1井、天深1、龙探、榆9钻井岩心底部仍有少量砂岩、石英砂岩,代表此处海侵速度仍较快,但海侵速率未达到最高点(图3)。随着海侵的持续进行,馒头期中期,海水分布范围继续扩大到整个鄂尔多斯盆地,古陆第一次被海水分隔开,完整的鄂尔多斯古陆被海水分隔为西北部的阿拉善古陆、中部的伊盟古陆、东北部的吕梁古陆和西南部出露有限的镇原古陆,秦岭洋和祁连海以及亚洲洋三大洋水体在子洲海峡形成了会合,鄂尔多斯海初现(陈启林等,2013)。此时,钻孔岩心中灰岩数量急剧上升,代表水体已经覆盖了盆地大部分区域,且达到一定深度。在召探、城川、龙探1井区域,有局部泥岩的出现,显示台内洼陷微相发育,根据钻孔得到的岩性数据判定台缘礁滩相还处于发育初期,鲕粒灰岩沉积厚度有限,未成规模(图3)。银川、贺兰区域等值线密集,显示高角度斜坡,沉积厚度最厚为300 m,由于鄂尔多斯地块持续沉降的原因,伊盟古陆和吕梁古陆中间以开阔水环境为特点(张春林等,2017),沉积地层厚度约为20 m(图4a)。莲3井馒头组中段,在莲3井4535.81 m处见灰绿色泥岩和细砂互层,且有少量砂质团块被泥质包裹,可能是规律动荡的潮坪环境将陆源物质和原地沉积物混合而成。自然伽马测井曲线(GR)此处显示较高,有较多放射性强的泥岩混合其中,且较为平滑,显示较强的水动力特点;声波测井曲线(AC)低位显示低密度高孔隙度,显示动荡的海进期环境(图8a);在井深4533 m和4535.34 m处见深灰色粉砂岩,自然伽马曲线(GR)显示低位表示泥质含量少,成分较均一,声波测井曲线(AC)高位显示

高密度低孔隙度,代表此时水动力不强,未能将陆源碎屑物和下层原地沉积物混合在一起,应为海平面稳定期(图8b、图8c);在井深4532.72 m处又见灰绿色泥岩和细砂互层但并未见砂质团块,水动力未能将下部沉积物完全搅动,显示海侵速度较前期变小,此时应为新一轮海侵阶段(图8d)。在馒头期晚期,吕梁古陆完全被淹没,只留下了北部的阿拉善古陆、伊盟古陆和西南部的镇原古陆,在原伊盟古陆和镇原古陆区域水体进一步加深,沉积厚度为40 m,神木和中阳区域地势低缓,沉积厚度为60 m,为地形凹陷区(图4a),在城川1、宁探1井、龙探1井、榆9井中馒头组沉积顶部有石英砂岩再次出现代表海侵仍在持续进行。而在张夏组、三山子组再未出现大面积石英砂岩代表在馒头组沉积的晚期海侵速率已经达到最高点。在庆探4井馒头组上段4461.28 m处的灰色灰岩岩心顶端0.26 cm处,发现有分散的草莓状黄铁矿出现(图5o),是典型的缺氧还原环境标志(宁泽等,2022),证明当时该地区在馒头组上段沉积时期已经有向局限台地发展的趋势。在二郎沟、中阳、合探1井和庆探2井岩心中发现了薄层鲕粒灰岩,证明此时已经达到从混积的陆源碎屑沉积向清澈的碳酸盐岩沉积转变的中晚期(图3、图5e)。

到张夏期,海侵达到顶峰,古陆区域进一步减小,整个鄂尔多斯盆地基本上被海水覆盖,秦岭洋、祁连海和古亚洲洋继续相连,其根本原因是西部的祁连洋壳向鄂尔多斯古陆俯冲的结果(陈启林等,2013)。在张夏组沉积时期,合探1井、旬探1井和苏峪口地区沉积厚度较大,达200~300 m不等,沉积厚度以从西到东逐步减小,从南到北逐步增大(图3),这和寒武纪盆地西、南部以继承性斜坡为主的地形有一定关系。在中阳、旬探1和苏峪口、二郎沟野外剖面中发现有很厚的鲕粒白云岩和鲕粒灰岩,显示张夏组的显著特征为盆地的东南部和阴石峡区域发育大量鲕粒滩,是正式从开阔台地亚相过渡为局限台地亚相的标志(图7b)。在盆地西南部等值线变化大,大量泥砂从陆搬运至海底,并向前推进,在环县附近的陇4井中发现一定厚度的泥质碎屑流沉积(图6c),且碎屑流中泥质碎屑有一定的磨圆和撕裂边,表示当时富泥的沉积物是由重力和一定地形坡度作用向下携带颗粒沉积物慢速搬运堆积产生,但是下部的泥岩和粉砂岩水平互层沉积,整体为正粒序,代表张夏组沉积环境已经较为稳定,海侵速率降到最低点。环县部分已经处于前缓坡微相区域,沉积灰岩夹泥岩、粉砂岩和生物碎

屑泥晶灰岩,可以见到少量陆相化石,代表此处海水动力不强,海侵达到顶峰。

在晚寒武世三山子期,海水向西南退去,中央古陆重现,但是吕梁古陆下沉消失,这可能和古太平洋板块向古亚洲板块俯冲导致区域应力变化有关。中央古陆向南延伸至陇县,北接伊盟、阿拉善古陆,呈带状分布于盆地中部,将盆地的东西部分隔开来(图4e),表明海侵结束,开始海退。在盆地连井剖面中显示从西到东仅苏峪口、任1、天深1、榆9、龙探、中阳区域有三山子组沉积,从北到南仅有宁探、旬探、二郎沟地区有三山子组沉积,盆地北部和中部缺失三山子组沉积,代表此时古陆重现,进入剥蚀期。韩城和礼泉上韩区域沉积作用减小,沉积的地层厚度降至100 m,神木、中阳区域降低至80 m,该区域盆地内广泛发育泥质白云岩、紫红色白云岩、砾屑灰岩,代表低能的氧化水环境,气候较为温暖。

综上所述,从辛集期到三山子期,鄂尔多斯盆地经历了一次完整的海侵-海退过程,辛集期至张夏期陆域面积逐渐减小,至三山子期重新扩大,中央古陆重现。而神木和中阳地区长期处于沉积凹陷区域,沉积厚度大,水动力不强,有机质发育,泥地比高,沉积物质雄厚,具备自生自储气藏的良好条件,是产生烃源岩的潜在有利勘探区。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地寒武系是海侵背景下形成的一套海相沉积地层,以组为单位恢复了寒武纪海侵海退的整个过程,并且识别出了斜坡相和台地相2种沉积相,在馒头组沉积时期以开阔台地亚相大面积展布为特征,在张夏组沉积时期由于台缘礁滩的崛起变为局限台地亚相占主导,并在三山子组沉积时期海水退去重新变为以开阔台地亚相占主导。

(2)运用钻孔和野外剖面绘制了鄂尔多斯盆地中部的寒武系地层厚度图,划分出2个主凹和2个次凹:盆地西缘的贺兰凹陷、南缘的耀县凹陷、东北部的神木次凹和中阳次凹,其中神木次凹和中阳次凹被认为是新的潜在有利勘探区。

参考文献(References):

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.

陈建平,梁狄刚,张水昌,等.泥岩/页岩:中国元古宙—古生代海相沉积盆地主要烃源岩[J].地质学报,2013,87(7):905-921.

CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Shale and Mudstone: Essential Source Rocks in the Proterozoic to Paleozoic Marine Basins in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(7): 905-921.

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(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(2): 82-94.

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.

杜金虎,李相博,包洪平,等.鄂尔多斯盆地中新元古界—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.

韩浩东,塔里木盆地寒武系储层成因及白云石化机理[D].成都:西南石油大学,2018.

HAN Haodong, Dolomitization Mechanism and Genesis of Cambrian Reservoirs in Tarim Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

郝松立,孙六一,包洪平,等.鄂尔多斯盆地中—新元古界勘探方向及潜力[J].天然气地球科学,2016,27(12):2127-2135.

HAO Songli, SUN Liuyi, BAO Hongping, et al. Exploration direction and potential of the Middle-Upper Proterozoic in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2127-2135.

何自新,付金华,席胜利,等.苏格里大气田成藏地质特征[J].石油学报,2003,24(2):6-12.

HE Zixin, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 6-12.

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.
- 金振奎, 石良, 高白水, 等. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 965-979.
- JIN Zhenkui, SHI Liang, GAO Baishui, et al. Carbonate Facies and Facies Models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 965-979.
- 久凯, 丁文龙, 李春燕, 等. 含油气盆地古构造恢复方法研究及进展[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 13-19.
- JIU Kai, DING Wenlong, LI Chunyan, et al. Advances of paleostructure restoration methods for petroliferous basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(1): 13-19.
- 李凌, 谭秀成, 丁熊, 等. 四川盆地雷口坡组台内滩与台缘滩沉积特征差异及对储层的控制[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 70-76.
- LI Lin, TAN Xiucheng, DING Xiong, et al. Difference in depositional characteristics between intra-platform and marginal-platform shoals in Leikoupo Formation, Sichuan Basin and its impact on reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 70-76.
- 李凌, 谭秀成, 曾伟, 等. 四川盆地震旦系灯影组灰泥丘发育特征及储集意义[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 666-673.
- LI Lin, TAN Xiucheng, ZENG Wei, et al. Development and reservoir significance of mud mounds in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 666-673.
- 李文厚, 张倩, 陈强, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区早古生代沉积演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 456-479.
- LI Wenhui, ZHANG Qian, CHEN Qiang, et al. Sedimentary evolution of Early Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(3): 456-479.
- 李维岭, 周进高, 吴兴宁, 等. 鄂尔多斯盆地南缘中寒武统张夏组鲕粒滩相储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 25-34.
- LI Weiling, ZHOU Jingao, WU Xingning, et al. Characteristics of oolitic shoal reservoir and its main controlling factors of Zhangxia Formation in the southern margin of Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(1): 25-34.
- 刘池洋, 赵俊峰, 马艳萍, 等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 75-88.
- LIU Chiyang, ZHAO Junfeng, MA Yanping, et al. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 75-88.
- 马润华. 陕西省岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1998.
- 宁泽, 徐磊, 林学辉, 等. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 58-69.
- NING Ze, XU Lie, LIN Xuehui, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 58-69.
- 欧阳明华, 史建南, 赵地, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田苏5区块盒8段-山1段波形约束建模反演及模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 560-568+587.
- OUYANG Minghua, SHI Jiannan, ZHAO Di, et al. Waveform constrained modeling inversion and simulation of He-8 and Shan-1 Members in Su-5 Block, Sulige Gas Field, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(5): 560-568+587.
- 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): 513-532.
- 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): 513-532.
- 师宇翔, 路向伟, 李国斌, 等. 鄂尔多斯盆地西缘徐庄组风暴沉积特征及沉积模式[J/OL]. 沉积学报, 2022: 1-21.
- SHI Yuxiang, LU Xiangwei, LI Guobin, et al. Sedimentary Characteristics and Model of Storm Deposits in the Xuzhuang Formation at the Western Margin of the Ordos Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022: 1-21.
- 唐玮玮, 吴晓明, 王为林, 等. 鄂尔多斯盆地环县北地区延长组72亚段重力流特征及油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 561-569+585.
- TANG, Weiwei, WU Xiaoming, WANG Weilin, et al. Gravity flow characteristics and geological significance of oil and gas of the Chang 72 sub-member of the Yanchang Formation in the northern Huanxian area, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(5): 561-569+585.
- 陶文星, 梁积伟, 杨光, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘寒武系辛集组碳酸盐岩地球化学特征及古环境重建[J]. 非常规油气, 2020, 7(3): 8-15.
- TAO Wenxing, LIANG Jiwei, YANG Guang, et al. Geochemistry Characteristics of Carbonate and Paleoenvironment Reconstruction of Cambrian Xinji Formation, Southwest Ordos Basin [J].

- Unconventional oil & Gas, 2020, 7(3): 8–15.
- 万天丰. 中国大陆早古生代构造演化[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 30–42.
- WAN Tianfeng. Tectonic evolution in the Chinese continent from Middle Cambrian to Early Devonian[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 30–42.
- 武富礼, 赵靖舟, 闫世可, 等. 鄂尔多斯盆地延长区上古生界储集层地质特征及天然气勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 401–405.
- WU Fuli, ZHAO Jingzhou, YAN Shike, et al. Geological characteristics and exploration prospect of Upper Paleozoic reservoirs in Yanchang area, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 401–405.
- 肖玲, 胡榕, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地新安边地区长7页岩油储层孔隙结构特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 284–293.
- XIAO Lin, HU Rong, HANG Yonglin, et al. Characteristics of pore throat structure of Chang 7 shale oil sandstone reservoir in the western Xin'anbian area, Ordos Basin, China [J], Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(3): 284–293.
- 熊伟东, 肖安成, 魏国齐, 等. 鄂尔多斯盆地南缘寒武纪同沉积伸展断裂系统及其成因机制分析[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 305–313.
- XIONG Weidong, XIAO Ancheng, WEI Guoqi, et al. Characteristics of a Cambrian normal fault system in the Southern Ordos Basin and its formation mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 305–313.
- 许化政, 周新科, 高金慧, 等. 华北早中三叠世盆地恢复与古生界生烃[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 329–336.
- XU Huazheng, ZHOU Xinke, GAO Jinhui, et al. Reconstruction of early Middle Triassic basin in North China and hydrocarbon generation in Palaeozoic[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 329–336.
- 杨遂正, 金文化, 李振宏. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地形成与演化[J]. 天然气地球科学, 2006, (4): 494–498.
- YANG Suizheng, JIN Wenhua, LI Zhenhong. Multicycle Superimposed Basin Form and Evolution of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, (4): 494–498.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278–293.
- ZOU Caineng, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, S W China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278–293.
- 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.
- 张春林, 张福东, 朱秋影, 等. 鄂尔多斯克拉通盆地寒武纪古构造与岩相古地理再认识[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 281–291.
- ZHANG Chunlin, ZHANG Fudong, ZHU Qiuying, et al. New understanding of the Cambrian palaeotectonic and lithofacies palaeogeography in the Ordos Craton Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 281–291.
- 张兴亮. 寒武纪大爆发的过去、现在与未来[J]. 古生物学报, 2021, 60(1): 10–24.
- ZHANG Xingliang. Cambrian Explosion: past, present, and future[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2021, 60(1): 10–24.
- 张瑶瑶, 杨水胜, 刘宇琪, 等. 鄂尔多斯盆地靖边油田沙洼沟地区延安组延9油藏富集规律[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 213–224.
- ZHANG Yaoyao, YANG Shuisheng, LIU Yuqi, et al. Enrichment Enrichment Regularity of Y-9 Reservoir of Yan'an Formation in Shawagou Area of Jingbian Oilfield, Ordos Basin[J]. North-western Geology, 2023, 56(2): 213–224.
- 张友, 李强, 郑兴平, 等. 塔里木盆地东部古城—肖塘地区寒武纪—奥陶纪台地类型、演化过程及有利储集相带[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 447–465.
- ZHANG You, LI Qiang, ZHENG Xingping, et al. Types, evolution and favorable reservoir facies belts in the Cambrian-Ordovician platform in Gucheng-Xiaotang area, eastern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 447–465.
- 赵龙梅, 吴和源, 黄力, 等. 鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块及邻区山西组山2段物源分析[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 322–331.
- ZHAO Longmei, WU Heyuan, HUANG Li, et al. Material Source Analysis of Daning–Jixian Exploration Area and Its Adjacent Shan-2 Member in the Eastern Margin of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 322–331.
- 赵文智, 汪泽成, 朱怡翔, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 5–9.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, ZHU Yixiang, et al. Forming mechanism of low-efficiency gas reservoir in Sulige Gas Field of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 5–9.
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 1–13.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 1–13.

- 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, 2020a, 40(11): 20–30.
- ZHOU Jingao, FU Jinhua, YU Zhou, et al. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020a, 40(11): 20–30.
- 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深層海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. 天然气工业, 2020b, 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*, 2020b, 40(2): 41–53.
- 祝有海, 马丽芳. 华北地区下寒武统的划分对比及其沉积演化[J]. 地质论评, 2008, 54(6): 731–740.
- ZHU Youhai, MA Lifang. Division and correlation of Lower Cambrian and its sedimentary evolution in north China[J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 731–740.
- Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1617–1635.
- Duan Yi. Geochemical characteristics of crude oil in fluvial deposits from Maling oilfield of Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 52: 35–43.
- Fu Dongjing, Tong Guanghui, Dai Tao, et al. The Qingjiang biota—A Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China[J]. *Science*, 2019, 363(6433): 1338–1342.
- Hu Guoyi, Li Jin, Shan Xiuqin, et al. The origin of natural gas and the hydrocarbon charging history of the Yulin gas field in the Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 81(4): 381–391.
- Lee Jeong Hyun, Chen Jitao, Woo Jusun. The earliest Phanerozoic carbonate hardground (Cambrian Stage 5, Series 3): Implications to the paleoseawater chemistry and early adaptation of hardground fauna[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 440: 172–179.
- Li Luoyang, Skovsted Christian B., Yun Hao, et al. New insight into the soft anatomy and shell microstructures of early Cambrian orthothecids (Hyalolitha)[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 287(1933): 1–10.
- Li Luoyang, Zhang Xinliang, Skovsted Christian B., et al. Shell microstructures of the helcionelloid mollusc *Anabarella australis* from the lower Cambrian (Series 2) Xinji Formation of North China[J]. *Journal of Systematic Palaeontology*, 2019a, 17(20): 1699–1709.
- Li Luoyang, Zhang Xinliang, Skovsted Christian B., et al. Revisiting the molluscan fauna from the Cambrian (Series 2, stages 3–4) Xinji Formation of North China[J]. *Papers in Palaeontology*, 2019b, 7(1): 521–564.
- Liang Jiwei, Tao Wenxing, MA Xiaojun. Origin and paleoenvironmental reconstruction of phosphorus-bearing sandstones of the Cambrian Xinji Formation, southwestern margin of the Ordos Basin, China[J]. *Canadian Journal of Earth sciences*, 2020, 57: 903–917.
- Liu Dan, Zhang Wenzheng, Kong Qingfen, et al. Lower Paleozoic source rocks and natural gas origins in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 591–602.
- Mckenzie N. Ryan, Hughes Nigel C., Myrow Paul M., et al. Trilobites and zircons link north China with the eastern Himalaya during the Cambrian[J]. *Geology*, 2019, 39(6): 591–594.
- Peters S E, Gaines R., Formation of ‘the Great Unconformity’ as a Trigger for the Cambrian Explosion[J]. *Nature*, 2012, 484: 363–366.
- Read J F. Carbonate platform facies models[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(1): 1–21.
- Scotese C R, Song Haijun, Mills J W B, et al. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 215: 1–47.
- Shu D G, Morris S C, Han J, et al. Lower Cambrian Vendobionts from China and Early Diploblast Evolution[J]. *Science*, 2006, 312(5774): 731–734.
- Yang Renchao, Jin Zhijun J, Van Loon A J, et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development[J]. *AAPG Bulletin*, 2017, 101(1): 95–117.
- Zhao Guochun, Wang Yuejue, Huang Baochun, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262–286.
- Zhao Hanqing, Zhang Shihong, Zhu Maoyan, et al. Paleomagnetic insights into the Cambrian biogeographic conundrum: Did the North China craton link Laurentia and East Gondwana?[J]. *Geology*, 2021, 49(4): 372–376.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(10): 2498–2511.