

文章编号: 1000-0550(2014)01-0044-17

鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架^①

郭彦如¹ 赵振宇¹ 徐旺林¹ 史晓颖² 高建荣¹ 包洪平³ 刘俊榜¹
张延玲¹ 张月巧¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 100083; 3. 长庆油田勘探开发研究院 西安 710021)

摘要 通过大量露头、钻井与地震层序地层学综合分析,建立了全盆地奥陶系层序地层格架。研究提出了“碳酸盐岩层序地层划分与对比五要素”分析方法。应用该分析方法在奥陶系识别出3个二级层序界面、6个三级层序界面,将奥陶系划分为2个二级层序和8个三级层序。盆地不同构造环境形成不同的层序地层格架:在盆地西部窄大陆边缘北部奥陶系发育层序 O_{sq}3—层序 O_{sq}7 五套地层,持续时间从早奥陶世弗洛阶到晚奥陶世桑比阶末,南部发育层序 O_{sq}1—层序 O_{sq}7 七套地层,持续时间从早奥陶世特马道克阶到晚奥陶世桑比阶末,总体上西部地层西厚东薄,南北向条带状展布,向伊盟隆起—庆阳古隆起上超覆尖灭;在盆地南部宽大陆边缘奥陶系发育盆地所发现的8个层序,持续时间从早奥陶世弗洛阶到晚奥陶世凯特阶早期,地层南厚北薄,向庆阳古隆起上超覆尖灭;在盆地中东部台内洼陷奥陶系仅发育层序 O_{sq}3—层序 O_{sq}5 TST,以盆地东部洼陷东侧最厚向伊盟隆起—庆阳古隆起上超覆尖灭;盆地北部伊盟古隆起、西南部庆阳古隆起主体一直处于隆起剥蚀状态,二者的鞍部仅发育 O_{sq}4 TST 层序,表明盆地西部的祁连海槽与盆地东部的华北海在中奥陶世晚期有过短暂连通。

关键词 鄂尔多斯盆地 层序地层 等时地层格架 层序界面 碳酸盐岩 奥陶纪

第一作者简介 郭彦如 男 1962年出生 博士 高级工程师 石油地质学 E-mail: gyr2005@petrochina.com.cn

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

0 引言

鄂尔多斯盆地位于中国中西部地区,为中国第二大沉积盆地,横跨陕、甘、宁、蒙、晋5省区,盆地本部面积 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1)。其内部基底稳定,构造简单,地层平缓。早古生代发育海相碳酸盐岩沉积,是天然气的重要产层。

自二十世纪八十年代鄂尔多斯盆地地下古生界奥陶系碳酸盐岩天然气勘探取得突破以来,不同学者开始关注奥陶系层序地层研究,研究内容涉及层序地层研究方法、层序地层划分方案、层序地层沉积模式以及与油气的关系等方面^[1-15]。关于层序地层方法研究,包洪平等提出了碳酸盐岩—蒸发岩地层界面识别的微相方法^[1];李斌等提出了空间数据库技术定量研究方法^[2,3]。关于层序地层划分方案主要有四种:贾振远等将鄂尔多斯地区南缘奥陶纪可划分为12个层序^[4];姚泾利将盆地西部奥陶系划分为19个三级层序,其中马家沟组包含了8个三级层序^[5];雷卞军等将马家沟组划分为4个三级层序^[6];曹金舟等将盆地南部奥陶系划分为7个层序^[7]。关于层序地

层模式,魏魁生等认为鄂尔多斯盆地奥陶纪是一种碳酸盐岩—碎屑岩缓坡模式和镶边陆架与末端陡倾缓坡的综合模式^[8-10];周进高等将盆地中东部马家沟组沉积模式总结为障壁泻湖、咸化泻湖和膏盐湖三个沉积阶段不同的沉积模式^[11];黄丽梅等在研究了盆地中东部马家沟组后,提出了低海平面时期沉积模式和高海平面时期沉积模式^[12];另外,有学者还探讨了层序地层与油气的关系等问题^[13-15]。然而,由于盆地西缘、南缘秦祁被动大陆边缘与盆地中东部华北陆表海受庆阳古隆起的分隔,导致不同构造环境的奥陶纪地层特征差异较大,且后期破坏严重,盆地周边地层出露不连续,造成奥陶系地层对比困难,尚未形成全盆地统一的奥陶系层序地层格架,基础研究并不牢靠。因此建立一套全盆地可对比的奥陶系层序地层格架十分必要。“十一五”期间,笔者依托国家重大攻关项目,在综合应用各种地质、地震资料的基础上,通过大量的野外露头剖面的实测与观察,盆地内典型井的层序地层分析,总结出鄂尔多斯盆地碳酸盐岩层序地层分析方法,重新进行了奥陶系层序地层格架划分与对比,系统建立了鄂尔多斯盆地奥陶系二、三级

^①国家重大科技专项大型油气田及煤层气开发项目(编号:2011ZX05004-002)资助
收稿日期:2012-06-28;收修改稿日期:2013-03-21

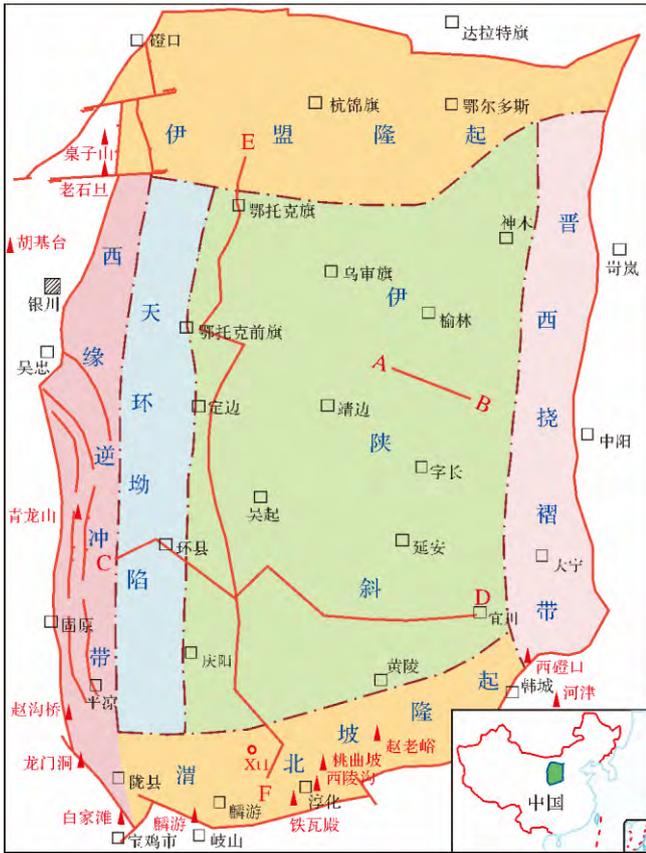


图 1 鄂尔多斯盆地位置图
Fig. 1 Location of Ordos Basin

层序地层格架。

1 层序地层等时格架的建立方法

传统的层序地层学研究主要强调对地震层序及其层序界面、凝缩段、体系域的识别与分析,重点在于从地震剖面中识别出有意义的超覆面(上超、下超、顶超)、截切面、以及沉积体系的退积—加积—进积特征^[16],由此来划分不同的三级层序及其体系域。

鄂尔多斯盆地地震资料品质较差,分辨率低,难以作为层序地层研究的主要手段^[17]。根据层序地层学原理,寻找等时意义的地质证据将成为鄂尔多斯盆地碳酸盐岩层序地层划分与对比的主要手段。因此,奥陶系碳酸盐岩层序地层划分必须建立在全盆地地层系统对比基础上。针对鄂尔多斯盆地地表与地下地质条件复杂、奥陶系层序地层划分方案繁多、盆地周缘与盆地本部难以对比的难题,主要构造层不整合面的等时对比成为解决这一问题的关键。笔者提出以下主要基于露头与钻井资料的“碳酸盐岩层序地层划分与对比五要素”分析方法进行奥陶系碳酸盐

岩层序地层划分与对比。层序地层划分的思路是首先根据奥陶系发育齐全的剖面作为标准剖面进行层序地层划分;然后运用上述方法在全区寻找有共同特征的主要三级层序界面作为等时层序地层对比的标志层;其次,以此标志层为限定,通过测井和剖面岩性旋回性特征进行其他三级层序的对比,最后建立盆地不同构造背景下可对比的奥陶系三级层序地层格架。

1.1 古生物地层是基础

古生物用于层序地层对比的核心是关键地层的等时对比。鄂尔多斯盆地奥陶系露头剖面化石丰富,而盆地钻井缺乏化石。所以,主要依据地面露头剖面建立不同地层区的古生物地层剖面。

在华北地台内部(唐山地区),奥陶系内有 4 个重要的全区性 I 型不整合面(SB-1 至 SB-4)可作为层序地层对比的重要参考标准^[18]。另外在冶里组近底部的 SB-0 虽不是很显著,但也可普遍辨识^[19]。这些层序界面在鄂尔多斯盆地西部和南部边缘均可识别,但盆地边缘的上奥陶统还有几个重要的层序界面。因此,综合起来鄂尔多斯盆地自上而下可识别的重要层序界面及关键性化石带控制如下:

- ~~~~~ SB-8 (区域性不整合) —— 以上地层在全区内均缺失
- 背锅山组: *Protopanderodus insculptus* 带
- ~~~~~ SB-7 (水下滑塌截切面)
- 平凉组上部: *Climacograptus bicornis* 带
- ~~~~~ SB-6 (水下滑塌截切面) —— 拉什仲组底部,金粟山组底部,峰峰组顶部(风化壳)
- 平凉组下部: *Husterograptus teretiusculus* 带
- ~~~~~ SB-5 (古风化壳残余) —— 乌拉里克组,平凉组,龙门洞组之下,山字沟组底部
- 马家沟组: *Lenodus variabilis* 带
- ~~~~~ SB-3 (喀斯特角砾岩) —— 三道沟组,米钵山组及桌子山组底部
- 北庵庄组: *Paroisdotus originalis* 带
- ~~~~~ SB-2 (喀斯特角砾岩) —— 水泉岭组,三道坎组底部
- 亮甲山组: *Serratognathodus bilobatus* 带
- ~~~~~ SB-1 (古风化壳) —— 青龙山,铁瓦殿,胡基台;麻川组和天景山组中
- 冶里组: *Monocostodus servierensis* 带
- SB-0 (近底部风化面) —— 青龙山,铁瓦殿,麻川组近底部;胡基台下岭南沟组底。

上述重要界面(SB-0至SB-5)均有较好的生物地层约束,可以在华北地台各个地区进行良好的对比。在鄂尔多斯盆地西缘和南缘台地边缘不同地区,界面的表现有所不同。要根据其他识别标志综合判断。

通过对盆地西缘和南缘14条奥陶系野外露头剖面的地层对比,发现最重要的层序界面(SB-5)分别位于乌拉力克组之底、三道沟组顶部、山字沟组底部以及泾河组顶部,代表了本区地质演化与沉积发展史的重要转折。这个层序界面具有很好的生物地层控制,位于笔石 *Husterograptus teretiusculus* 带和 *Pterograptus elegans* 带之间,或牙形石 *Pygodus serra* 带(DW3)中部。这个层序界面位于华北地台中部位于峰峰组与马家沟组之间,低于中—上奥陶统界线一个笔石

带,但厚度变化不等^[18]。在盆地东西各不同地区,这个层序界面都构成重要的岩相变化界面,是辅助识别中—上奥陶统界线的重要参考标志。在这个层序界面附近普遍存在一个显著的碳同位素正向异常(MDICE),并被解释为可能与大气CO₂浓度下降有关,同时也伴生有一个重要的锶同位素变化异常,被认为可能与陆源风化向海洋输入的锶含量升高有关^[20]。

1.2 层序界面识别是关键

在奥陶系地面露头剖面上可见到风化暴露面(图2a-g-i)、不整合面(图2c)、能量转换面(图2e)、底砾岩(图2f)、水下截切面(图2f)等标志,这些标志是层序界面的主要识别标志。通过这些识别标志识别出三级层序界面。

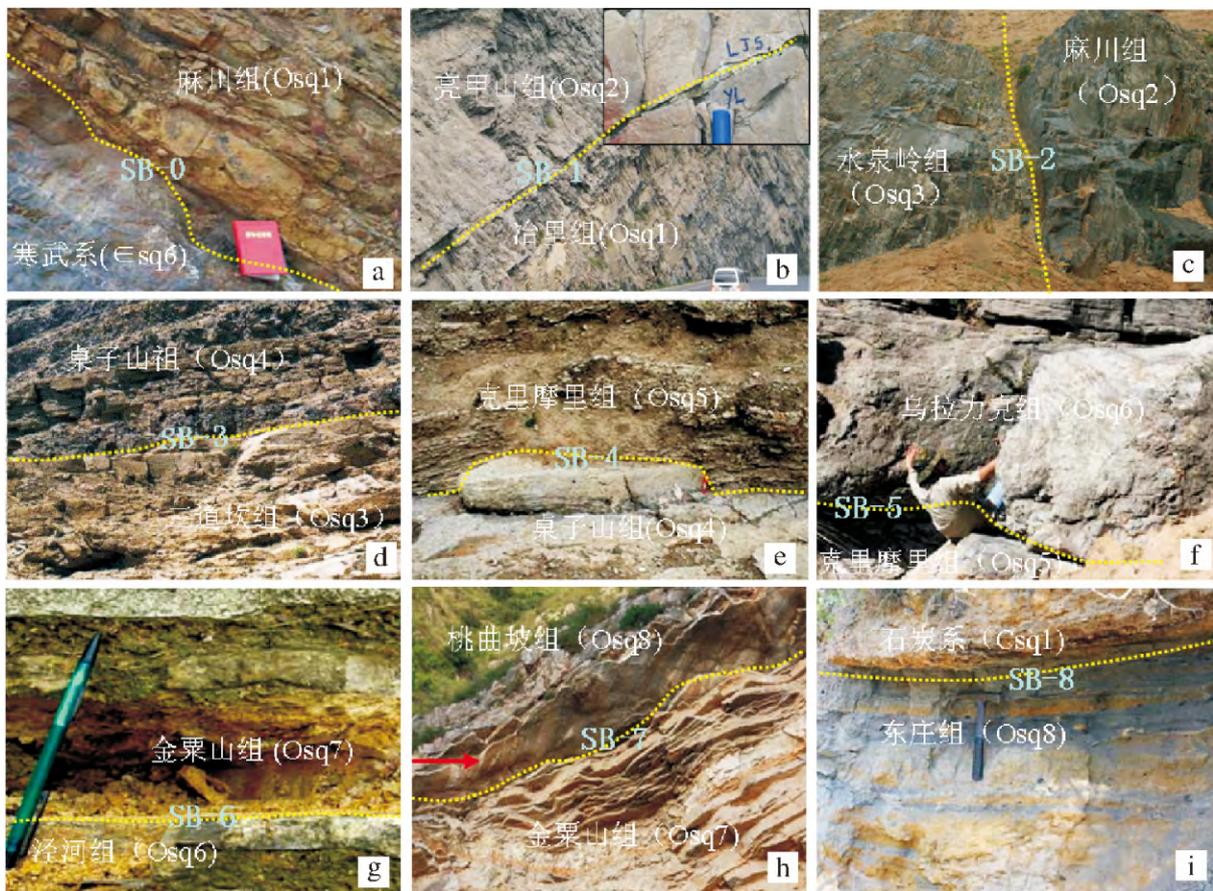


图2 地面露头奥陶系剖面三级层序界面识别标志

a. 南缘铁瓦殿剖面麻川组下部泥晶灰岩与粉砂岩的风化暴露面; b. 山西河津剖面亮甲山组与冶里组不整合面; c. 西缘宁夏青龙山剖面水泉岭组与麻川组不整合面; d. 内蒙古桌子山剖面桌子山组深灰色中层灰岩与三道坎组含云石英砂岩不整合接触; e. 内蒙古西缘老石旦剖面桌子山组厚层灰岩与克里摩里组底部薄层瘤状灰岩能量转换面; f. 西缘酸枣沟剖面克里摩里组顶部层序界面上的厚层滑塌灰岩(水下滑塌截切面); g. 南缘赵老峪剖面金粟山组斑脱岩与泾河组之间界面(陆上暴露面); h. 南缘西陵沟剖面桃曲坡组与金粟山组的界面; i. 南缘桃曲坡剖面东庄组顶部的古风化壳,上部为晚古生界砂砾岩,含煤线。

Fig. 2 Identification marks of Tertiary sequence interface in Ordovician outcrops profile

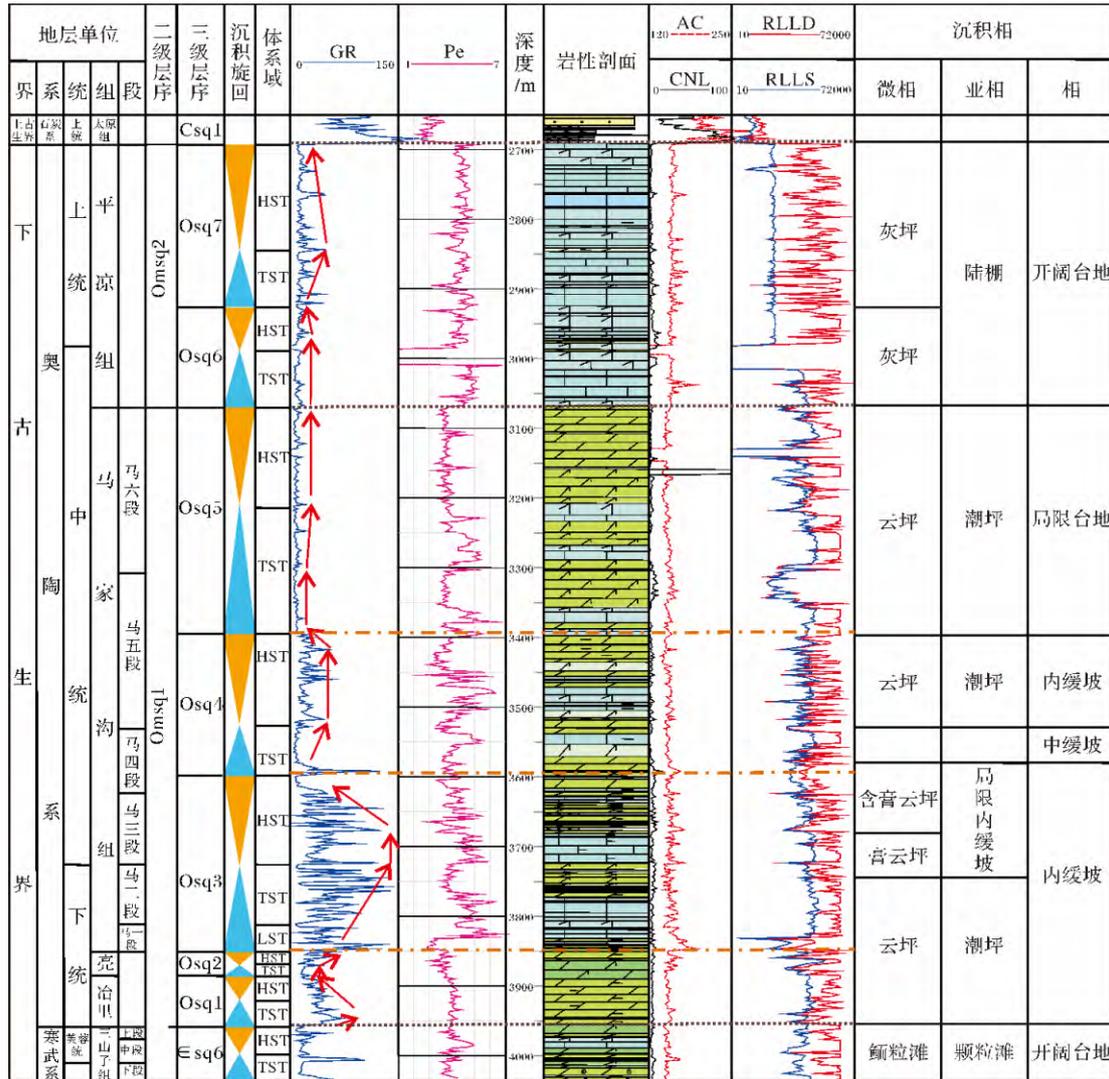


图 3 XT 1 井奥陶系层序地层综合柱状图(位置见图 1)

Fig. 3 Integrated Ordovician sequence stratigraphy chart of XT1 well(for its position Fig. 1)

在钻井剖面上,根据测井曲线的突变识别层序界面。碳酸盐岩剖面往往没有明显的曲线特征,但重大界面特征明显,如盆地南部二级层序界面 Osq1/esq1 (冶里组与寒武系)、Osq6/Osq5(相当于平凉组与马家沟组)、Csq1/Osq7(相当于石炭系与平凉组)、三级层序界面 Osq3/Osq2(马家沟组与亮甲山组)、Osq4/Osq3(相当于马四段与马三段)、Osq5/Osq4(相当于马六段与马五段)等界面是沉积环境突变面,界面上下自然伽马、Pe 曲线和 AC 曲线特征差异明显(图 3)。

在地震剖面上,由于讯噪比差、分辨率低等原因,内部反射杂乱,不宜区分。但在盆地台缘区和古隆起周边可见大的不整合界面引起的同相轴的削截、收敛等接触关系,如在盆地东部可见 Osq2/εsq6、Osq3/

Osq2 和 Csq1/Osq4 等不整合面(图 4)。

1.3 重要地质事件是标志

鄂尔多斯盆地金粟山组发育斑脱岩(图 2g),其成分火山碎屑占 80%,陆源石英占 10%,杂基占 10%,基质以水云母为主,在盆地西缘与南缘广泛分布。该类火山岩的发育反映该时期是一个大的构造活动期。与全球其他地区对比,这类火山岩在晚奥陶世 Laurentia、Baltica、南中国大陆广泛分布^[21-22]。G. Gao 等(1996)研究发现该套火山岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 δ¹³C 在中奥陶世末出现明显的拐点^[23],表明鄂尔多斯盆地在奥陶系发育的斑脱岩属于中奥陶世末。因此可以断定,中奥陶世末是全球构造活动环境的重大转变期,其沉积界面应是二级层序 Omsq1 和 Omsq2 的层序界面,也是 Osq6/Osq5 的层序界面。

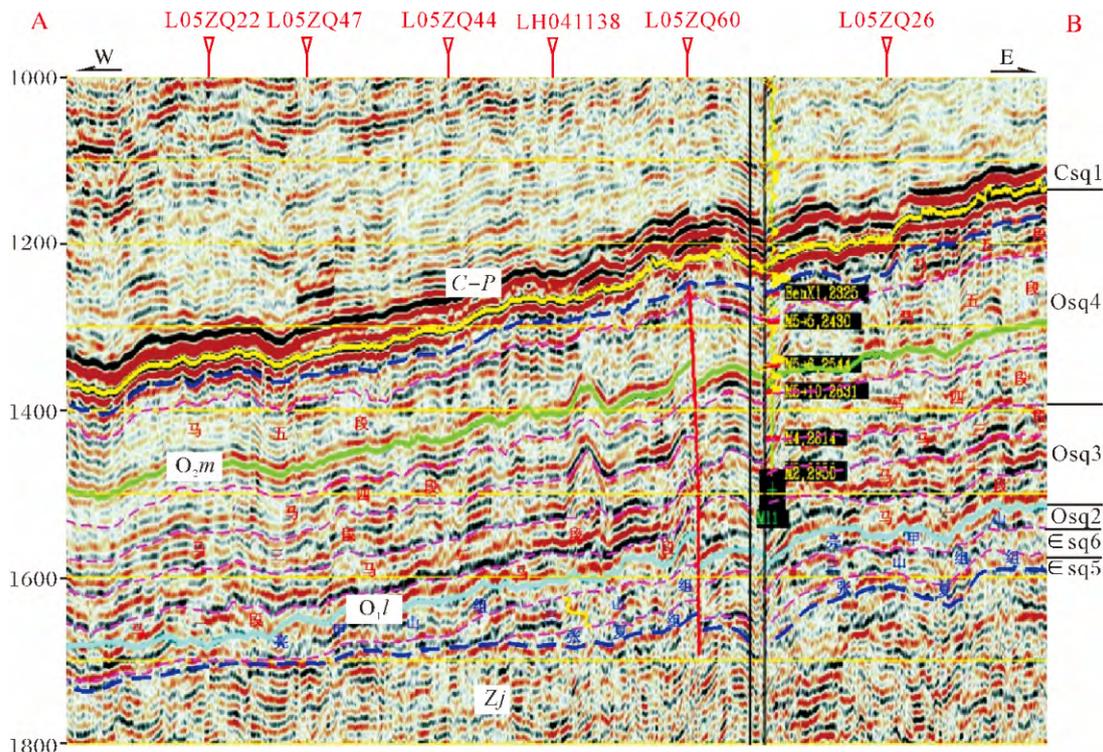


图4 鄂尔多斯盆地东部地震剖面层序结构剖面(位置见图1)

Fig. 4 Sequence stratigraphy of seismic profiles in the eastern part of Ordos Basin (for its position Fig. 1)

1.4 地球化学指标是补充

对地面露头剖面进行全剖面的 C/O 同位素曲线制作,用国际奥陶系标准同位素剖面进行标定。选择盆地南部和盆地东部多条奥陶系露头剖面进行了 C/O 同位素实测,其 C/O 同位素曲线与 Stig M. Bergstrom *et al.* 建立的奥陶系 C/O 同位素曲线可对比^[24],可识别七个层序界面,分别是 Osq2/Osq1(亮甲山组/冶里组)、Osq3/Osq2(马一段/亮甲山组)、Osq4/Osq3(马四段/马三段)、Osq5/Osq4(克里摩里组/马五段)、Osq6/Osq5(乌拉力克组/克里摩里组)、Osq7/Osq6(拉什仲组/乌拉力克组)和 Osq8/Osq7(背锅山组/公乌素组)(图5)。同时确定了盆地东部与南部马家沟组的地质时代,盆地内马一段至马三段应属于下奥陶统弗洛阶,马四段至马五段应属于中奥陶统大坪阶,不仅解决了马四三一马五段的地层划分问题,也为盆地东、西部不同构造背景的等时地层对比提供了有力佐证。

1.5 测井曲线对比是核心

在上述三级层序界面识别的基础上,与盆地钻井资料建立关系。以 XT 1 井为例,奥陶系划分为 8 个三级层序,各层序测井曲线变化韵律明显,特别是

GR 曲线,按照 LST—TST—HST 发育特征展现出低值—高值—低值的变化韵律,由此也可进一步证明层序地层划分的准确性。同时 Pe、RILD 和 RILS 曲线也展现了较为明显的变化韵律(见图3)。依据电性特征结合岩性变化规律,SB-2、SB-3、SB-5 三个重要的不整合界面的控制,在沉积学原理指导下,进行全盆地 17 条连井剖面层序地层等时对比(图6、7),最终建立了全盆地层序地层格架。

2 层序界面识别与对比

层序界面识别是层序地层划分与对比的关键,根据鄂尔多斯盆地“碳酸盐岩层序地层划分与对比五要素”总结出奥陶系层序界面的综合识别标志如下。

2.1 二级层序 OMsq1

二级层序 OMsq1 包括五个三级层序,涉及以下五个层序界面:

SB-0(Osq1/∈sq7)层序界面:分布在盆地西缘与南缘,为奥陶系与寒武系之间的二级层序界面。在盆地西缘青龙山鸽堂沟剖面表现清楚,位于麻川组底部 8 m 后的寒武系深灰色厚块状灰岩之上,以厚约 1.2 m 粉红色泥质粉砂岩为特征,与上下地层分隔明

显。在盆地南缘淳化铁瓦殿山北坡, 则出现在麻川组距底 12 m 的深灰色泥晶灰岩之上, 表现为厚约 0.5 m 的灰黄色泥质粉砂岩(图 2a), 这个特征与在华北唐山地区看到的情况相似。自然伽马曲线有明显变化, 界面之上表现为低值(图 3)。在二维地震剖面上有明显的地震同相轴超覆尖灭现象(图 4)。

SB-1(Osq2/Osq1)层序界面: 分布在盆地西缘与南缘。在华北唐山一带位于亮甲山组底部, 以古风化壳为特征, 在华北地台中部可以广泛追索^[18]。在盆地西缘青龙山地区则表现为麻川组中下部一个明显起伏的古喀斯特面, 其上存在 5~15 cm 不等的灰黄—紫红色粘结砂屑砾灰岩, 沿此面追索, 还见有切入下伏灰岩深 30 cm、宽 35 cm、长约 3 m 的典型潮道, 其中充填有灰黄色砾岩。在盆地南缘淳化县铁瓦殿山北坡, 该界面位于麻川组中下部含白云质厚层灰岩中, 也是一个很好的古风化面, 其上发育有厚约 50 cm 的灰黄色泥质粉砂岩以及铁质风化壳层。在陇县白家滩剖面上, 这个界面同样以泥质沉积的出现为标志。向西至山西河津剖面亮甲山组与冶里组之间

表现为明显的不整合面(图 2b)。自然伽马曲线有明显变化, 界面之上表现为锯齿状高值(图 3)。碳同位素曲线表现为一明显的负异常值($\delta^{13}\text{C}$ 值偏轻), 与全球奥陶系碳同位素曲线特征一致^[24](图 5)。

SB-2(Osq3/Osq2)层序界面: 分布在盆地西缘、南缘与盆地中东部。在盆地西缘西北部桌子山剖面三道坎组与崮山组之间不整合接触, 风化壳明显; 青龙山水泉岭组底部是一个区域性风化不整合面, 之下出现厚约 5~15 cm 不等的石英砂层和紫红色砾灰岩层(图 2c)。在盆地南缘岐山—麟游斜坡相带, 马家沟组底界发育一套 2~3 m 的大块底砾岩, 具有明显的氧化暴露特征。向西至铁瓦殿北坡则是一个显著的陆上风化壳, 以中厚层灰岩序列中出现厚约 5 m 的黄色泥质粉砂岩为特征, 成层性较差, 风化后形成明显的大沟。在华北地台马家沟组底部分布广泛, 以厚层喀斯特角砾岩、栉壳灰岩为重要特征, 个别地区见有不规则分布的砂岩体, 代表一个突出的古风化面。自然伽马曲线变化明显, 界面之上表现为锯齿状低值, 声波测井曲线出现高值, 电阻率迅速增高(图 3,

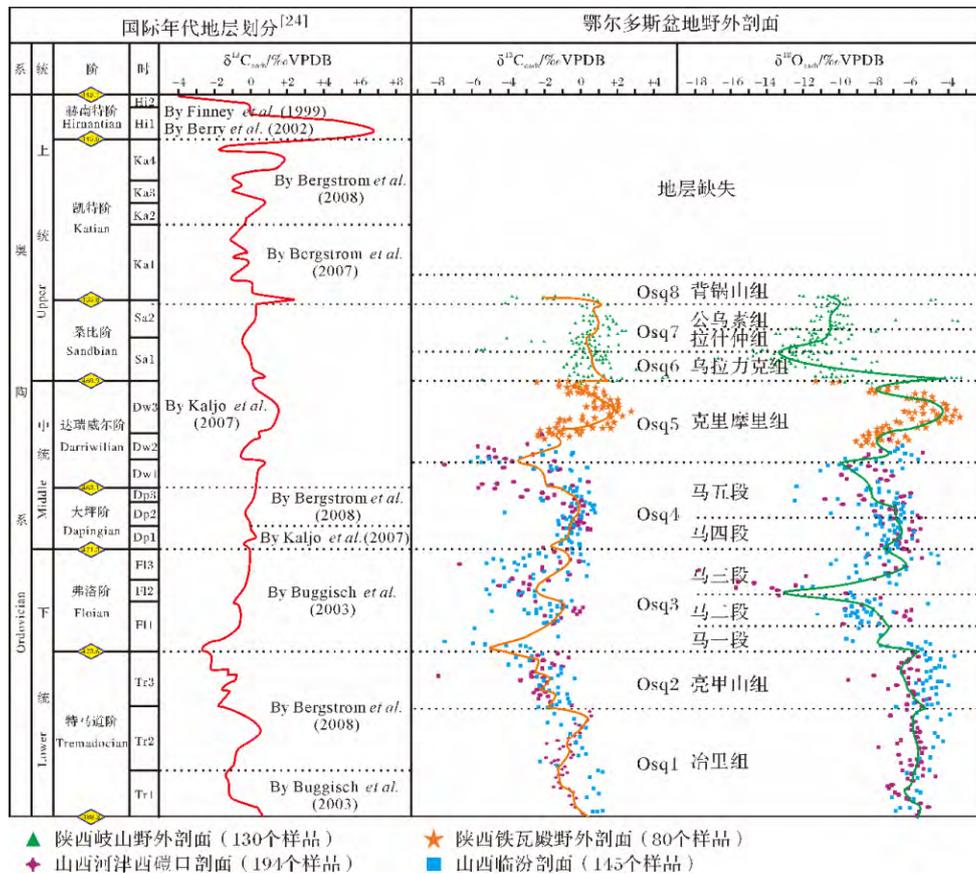


图 5 鄂尔多斯盆地东南部山西省河津县西碛口奥陶系碳氧同位素特征与标准奥陶系碳同位素特征对比
 Fig. 5 Comparison between Ordovician carbon isotope characteristics in Xiweikou village HeJin county Shanxi province in eastern Ordos Basin and the standard of Ordovician carbon isotope characteristics

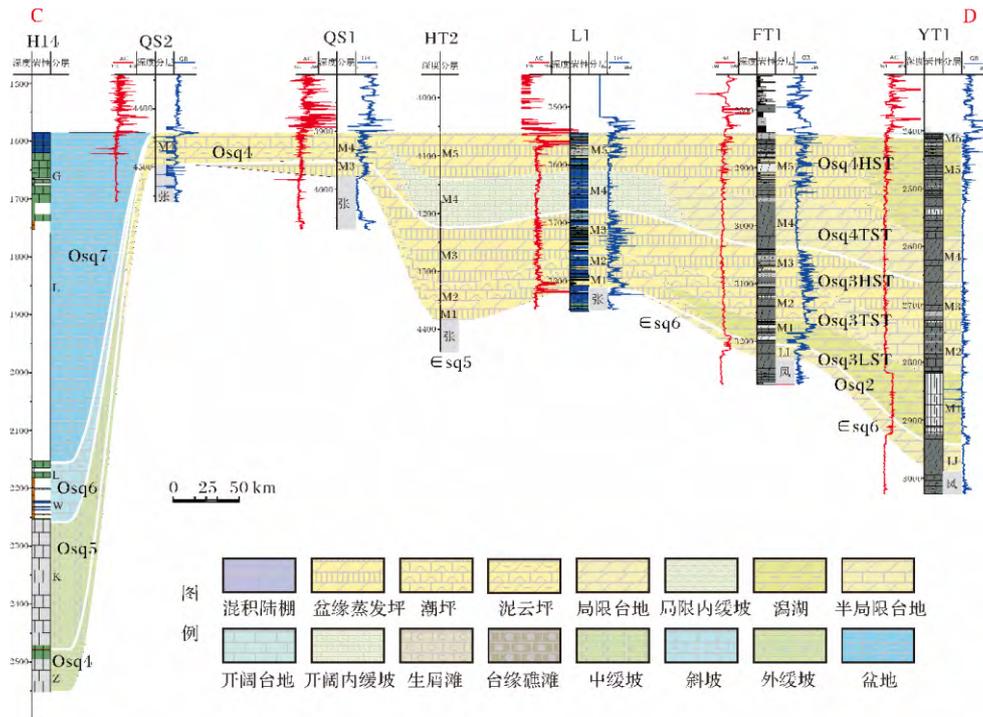


图 6 H14-YT1 井连井剖面奥陶系层序地层格架(位置见图 1)

Fig. 6 Ordovician sequence stratigraphy contrast of H14-YT1 Well(for its position Fig. 1)

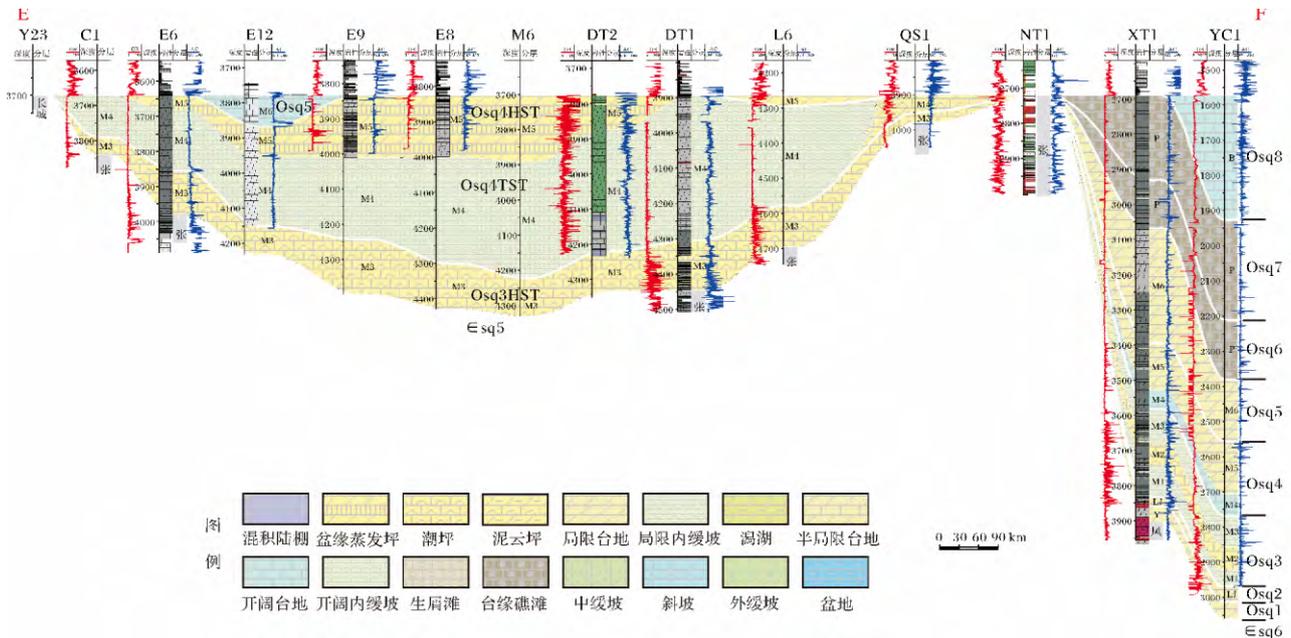


图 7 Y23-YC1 井连井剖面奥陶系层序地层格架(位置见图 1)

Fig. 7 Ordovician sequence stratigraphy contrast of Y23-YC1 Well(for its position Fig. 1)

3 β)。碳同位素曲线表现为一明显的负异常值(δ¹³C 值偏轻),与全球奥陶系碳同位素曲线可对比^[24], Osq3 氧同位素值也偏轻(图 5)。

SB-3(Osq4/Osq3)层序界面:分布在盆地西缘、

南缘与盆地中东部。在多数地区表现为陆上暴露风化面,不同程度地发育古风化壳或残积角砾。在盆地西缘桌子山组下部表现为起伏不平的暴露风化面(图 2d),其上发育有厚 5~10 cm 不等的红色泥质层

和钙质结壳层。在盆地中东部马三顶部膏岩层之上,自然伽马和电阻率曲线变化明显,层序界面均表现为齿状高值,而界面之下均表现为锯齿状高值,界面之上曲线均呈微齿状低值(图3、图6、图7)。

SB-4(Osq5/Osq4)层序界面:分布在盆地西缘和南缘。在鄂尔多斯盆地西缘北段,该界面位于克里摩里组底部薄层瘤状灰岩与桌子山组厚层灰岩之间,可见明显的古风化面与侵蚀下切穿层现象(图2e)。在桌子山组顶部出现多个薄的栉壳层和红色泥质层,代表小的暴露面。在贺兰山西坡胡基台以米钵山组底部的约9 m厚层砾屑灰岩为重要标志,其中具良好的滑动变形构造,代表近源滑塌沉积。由此点向东4 km至中梁子一带,该界面变化为明显的古风化面,其下的厚层灰岩顶起伏不平,其上存在有约1.3 m灰黄色泥质沉积。表明这个地区有明显的构造沉降叠加的影响,滑塌沉积启动较早,这也是西缘外带的共同特征,普遍早于内带。向南至在青龙山地区,该界面位于水泉岭组与三道沟组之间,表现为一个陆上风化面,其上存在约10 cm厚的灰白色钙结壳层和约15 cm褐灰黄色粘结砾灰岩。在盆地南缘铁瓦殿北坡表现为三道沟组底部一层厚约1.2 m的喀斯特角砾岩,其底部明显起伏不平,与水泉岭组顶部白云质厚层灰岩明显不同,喀斯特角砾横向可变化为砾屑灰岩。在盆地中东部,以马五段顶部膏岩发育为特征,代表了水体变浅的过程。自然伽马曲线出现明显的台阶状变化,界面之上表现为低值平滑曲线,而界面之下表现为锯齿状低值背景,在界面处电阻率迅速升高(图3)。碳氧同位素曲线均表现为一明显的负异常值,与全球奥陶系碳同位素曲线可对比^[24](图5)。在盆地本部大部分地区,该界面是石炭系与奥陶系马五段的风化壳不整合面,奥陶系顶部侵蚀沟槽明显(图4)。

2.2 二级层序 OMsq2

二级层序 OMsq2 包括三个层序,涉及以下四个层序界面:

SB-5(Osq6/Osq5)层序界面:为二级层序界面,是一个区域性大的构造不整合面,代表了大的构造运动的转换时期。沿该界面之上,盆地中东部处于侵蚀剥蚀状态,一直持续到石炭纪开始,而盆地西部、南部形成深海槽。因此在奥陶系地层中,该界面在有奥陶系的地区分布范围较小,仅分布在盆地西缘、南缘与盆地本部的东南部。在大部分地区表现为典型的水下滑塌截切面,与前述的各层序界面显著不同。在西

缘小区不同剖面上,界面之上为3~12 m不等的LST滑塌角砾灰岩(乌拉力克组底部,山字沟组底部和三道沟组顶部),是鄂尔多斯盆地边缘最突出的一个层序界面。在贺兰山西坡胡基台,界面之上是厚达18 m的滑塌巨角砾岩,砾石直径可达1 m,一般在5~15 cm,大小混杂,呈现出斜坡扇水道沉积的特点。在青龙山地区,以三道组顶部厚3.5 m的厚层含砾屑灰岩为特征,其中有明显的渐进变形构造(图2f),而界面之下则是薄板状泥晶灰岩,两者截然不同。在鄂尔多斯盆地南缘陇县,该界面出现在三道沟组顶部,其上发育厚约5 m厚层滑塌灰岩,含有近源大岩块,向下侵蚀地层深达2 m,再向上出现中薄层灰岩夹粉砂岩,向上过渡为含有*Husterograptus teretiusculus*的平凉组页岩。向东至富平赵老峪一带,表现为泾河组底部重大的陆上风化面。在起伏不平的厚层碳酸盐岩侵蚀面上发育有厚约1 m的黄色粉砂质泥岩。自然伽马曲线低值无变化,而自然电位曲线出现明显的负异常,在界面处电阻率迅速降低(图3)。碳氧同位素曲线均表现为一明显的正异常值,与全球奥陶系碳同位素曲线可对比^[24](图5)。在盆地本部东南部,该界面演变为石炭系与奥陶系马六段的风化壳不整合面。

SB-6(Osq7/Osq6)层序界面:分布在盆地西缘与南缘。在盆地西缘桌子山地区位于拉什仲组下部,以厚约25 m的厚层一块状含长石中一粗粒石英砂岩与下伏黑灰色泥质一黏土岩截然区分,砂岩底部含有细砾,代表一次大幅海平面下降。其下的泥质岩中含有笔石*Nemagraptus gracilis*,砂岩之上的页岩中含有*Climacograptus bicornis*,因此界面的时代可确定在SA2带之底。在盆地西南缘陇县龙门洞以及平凉赵沟桥剖面上的平凉组中上部,也发育有一层厚约0.4~4 m不等的砾屑灰岩,其性质与拉什仲组下部的层序界面一致,层位也接近于SA1/SA2带的边界,恰在界面之下的页岩中我们采获笔石*Nemagraptus gracilis*至少表明界线底界应高于此带。向西至泾阳西陵沟和耀县桃曲坡剖面相当于金粟山组之下的泾河组顶之下约5~8 m处,也发育有一个明显的界面,但均表现为陆上暴露面(图2g)。在西陵沟以一层紫红色铁质风化壳为标志,其上下出现砾屑灰岩层。而在桃曲坡,则表现为一层厚约40 cm的黄色泥质粉砂岩。在华北地台中部,峰峰组在各地保存情况不一。目前已知该组最高的层位含牙形石*Belodina compressa-Microelodus symmetricus*带,一般对比为*Proniodus alaba-*

tus 带下部或笔石 *Climacograptus bicornis* 带 (SA2) 底部^[25], 考虑到峰峰组沉积后经历了从晚奥陶世晚期至早石炭世长达数亿年的风化剥蚀, 其原始沉积的最高层位很可能接近 *bicornis* 带之底, 故其顶界的不整合可能相当于拉什仲组下部层序界面, 或略早于 SB-5 底界。自然伽马曲线在锯齿状中值背景中出现低值, 其他区县无明显变化 (图 3)。碳同位素曲线变化不大, 但氧同位素值明显偏轻 (图 5)。

SB-7 (Osq8/Osq7) 层序界面: 分布在盆地西缘与南缘。在不同的地区分别位于蛇山组底部、背锅山组底部、银川组底部以及桃曲坡组近底部。前两者表现为明显的水下滑塌截切面, 其上为厚层砂质砾屑灰岩和块状角砾岩, 其下则为页岩或黏土岩。而在贺兰山西坡胡基台则以银川组底部厚达 50~65 m 的厚层含钙屑长石石英砂岩 (重力流成因) 明显地区分于其下的薄层粉砂质泥岩和粉砂质页岩远源浊流沉积, 代表一次向盆方向的相迁移。在盆地南缘东段地区, 该界面出现在桃曲坡组与金粟山组之间或略高层位。这个层序界面有很好的生物地层控制, 其位置相当于笔石带 *Dicranograptus clingani* (KA1) 和 *Pleurograptus linearis* (KA2) 之间, 或相当于北美中大陆牙形石带 *confluens* 带和 *tenuis* 带之间的层序界面; 在华南出现在宝塔组之上, 或相当于 *Hamarodus europaeus* 和其上的临湘组 *Protopanderodus insculptus* 带之间, 在欧洲出现在 *Amorphognathus superbus* 和 *Prioniodus alobatus* 带之间, 大致与北美中大陆 Eureka 砂岩之下的层序界面相当^[25]。这个界面通常被认为代表了晚奥陶世冰川开始启动导致的第一个重大海平面下降事件, 而其上的 Eureka 砂岩则被认为代表了冰川启动导致的最重大的低海平面时期沉积, 具有全球的大致同时性^[25]。这个层序界面为本区上奥陶统与世界其它地区的地层对比提供了最重要的可靠的层序界面参考标志。

SB-8 (Csq1/Osq8) 层序界面: 为奥陶系与石炭系之间的二级层序界面, 有奥陶系存在的地区只分布在盆地西、南缘。所代表的海平面下降规模可能相对较小, 仅见于盆地南部桃曲坡剖面和龙门洞剖面, 分别位于桃曲坡组顶部和背锅山组顶部。在龙门洞剖面上, 该界面之上出现 5 m 紫红色钙质胶结角砾灰岩, 代表 LST 部分滑塌沉积, 向上被东庄组底部 TST 黄绿色页岩所覆盖。在桃曲坡剖面上, 以桃曲坡组顶部厚约 15 m 富含腹足、头足及珊瑚化石的中层状灰岩为标志, 代表 LST 期沉积, 其上被东庄组底部薄层泥

质灰岩为代表的 TST 所上覆。与此相当的界面在其它地区没有辨识, 可能主要是由于西缘外带水深较大, 一般规模海平面下降已经不足以引起海底沉积相的明显变化。但我们推测可能在银川组上部的一些薄层砾屑灰岩可能也是由于海平面下降所导致。这个层序界面的时代约束不很好, 但可以肯定在 *Orthograptus quadrimucronata* 的 FAD 之上 (出现在桃曲坡组上部), 故可能相当于 KA2 中上部。在桃曲坡剖面位于东庄组顶部, 代表一个长时期的古风化面 (图 2i)。其上被晚古生界含煤陆相地层所覆盖。在其它地区这个风化面所代表的时间可能更长, 是华北地台上规模巨大的区域性不整合面。考虑到该界面之下的东庄组沉积水深并不浅, 因此我们认为这个地区原始的沉积地层可能还会延续的晚一些, 只是被后期风化剥蚀掉了。

3 奥陶系层序地层格架

3.1 奥陶系层序地层纵向格架

上述 9 个层序界面是盆地奥陶系可识别出的层序界面。界面特征明显, 反映出 2 个二级层序和 8 个三级层序。各层序及其地层对比关系大致为: OMsq1 相当于中下奥陶统, 包括 Osq1 (相当于冶里组)、Osq2 (相当于亮甲山组)、Osq3 (LST: 相当于马一段; TST: 相当于马二段; HST: 相当于马三段)、Osq4 (TST: 相当于马四段; HST: 相当于马五段) 和 Osq5 (相当于马六段/克里摩里组); OMsq2 相当于上奥陶统, 包括 Osq6 (相当于平凉组下部/乌拉拉克组+拉什仲组下部)、Osq7 (相当于平凉组上部/拉什仲组上部+公务素组) 和 Osq8 (相当于背锅山组) (表 1、图 3)。

3.2 奥陶系层序地层横向格架

在单井和露头层序地层划分基础上, 开展了盆地奥陶系露头—钻井层序对比研究。研究表明, 盆地奥陶系三级层序地层格架以中央古隆起为界, 东西和南北层序地层格架明显不同。在东西向剖面上 (图 6), 盆地西部至少发育层序 Osq4—层序 Osq7 四套地层, 结合野外青龙山剖面可知, 该区地层发育层序 Osq1—层序 Osq7, 由于南部庆阳古隆起的存在, 地层尖灭于庆深 2 井处, 由下至上依次发育外缓坡、中缓坡、开阔台地、斜坡相; 盆地中部南北古隆起的鞍部主要发育层序 Osq4 地层, 由下至上依次为潮坪、蒸发台地相; 东部与中部地层关系对比良好, 保存状态基本一致, 发育层序 Osq3、Osq4, 由下至上蒸发潮坪、潟湖交替分布。从整个剖面来看, 在庆阳古隆起东侧, 相

变变化较快,以缓坡—台地相为主,东部以蒸发潮坪—潟湖相为主。由下至上,西部祁连海水深逐渐增加,东部华北海震荡加深。

在南北向剖面上(图7),也有类似的特点,但有差异。盆地北部为伊盟古隆起,缺失奥陶系全部地层;中部主要发育层序 Osq3、Osq4 两套地层,由下至上依次为潮坪、浅水台地、蒸发台地相;南部庆阳古隆起一直处于隆起剥蚀状态;南缘层序地层发育最全(层序 Osq1—层序 Osq8),由下至上依次发育潮坪、中缓坡、台缘礁滩相、开阔台地相、斜坡相,反映出秦岭海也存在水深逐渐增加的过程。

总体来看,在盆地西、南部“L”型秦祁海槽奥陶系层序发育齐全,表现出7~8次海进—海退的演化过程。在盆地西部窄大陆边缘北部奥陶系发育层序 Osq3—层序 Osq7 五套地层,南部奥陶系发育层序 Osq1—层序 Osq7 五套地层;盆地南部宽大陆边缘奥陶系发育层序 Osq1—层序 Osq8 八套地层。受伊盟古隆起—庆阳古隆起的分隔,盆地中东部台内凹陷只在海进最大时期中奥陶世出现3次海进—海退旋回,形成层序 Osq3—层序 Osq5 TST 层序。西部祁连海和东部华北海仅在 Osq4 LST 海侵最大时出现过短暂连通。

3.3 奥陶系层序地层平面分布特征

奥陶系8个层序的岩相古地理特征已撰文发表^[26],在此不再赘述。以下就其总体展布特征作一简介。

3.3.1 下奥陶统特马道克阶

由层序 Osq1 和层序 Osq2 组成。层序 Osq1 相当于冶里组,层序 Osq2 相当于亮甲山组。

早奥陶世开始,华北地台继承了寒武纪在其南缘、西缘的被动大陆边缘构造环境,在秦祁、兴蒙海槽的伸展构造背景下发生鄂尔多斯古陆西、南、东三个方向的海侵,形成层序 Osq1 和层序 Osq2。两层序厚度相近,沉积环境相似,分布较局限。岩性主要为白云岩、砂岩、灰质泥岩,分布于盆地周缘,呈“U”型展布,向中央古隆起一带超伏尖灭,沉积厚度0~160 m,由盆地向海依次发育内缓坡、中缓坡和外缓坡^[26]。

3.3.2 中下奥陶统弗洛阶—中奥陶统达瑞威尔阶

由下统弗洛阶的层序 Osq3(相当于马一段至马三段)、中统大坪阶的层序 Osq4(相当于马四段)和达瑞威尔阶的层序 Osq5(相当于马六段/克里摩里组)组成。

早奥陶世晚期,在向中奥陶世活动大陆边缘转化

的过程中,中央古隆起逐渐下沉,西、南、东三面海侵加剧。在一个大的海进背景下形成三个次级海进海退旋回,沉积了层序 Osq3—层序 Osq5。盆地西部和南部在层序 Osq2 基础上继承发育了内缓坡、中缓坡和外缓坡沉积,沉积范围向中央隆起带扩展,岩性从含生屑泥晶灰岩—泥晶灰岩—泥灰岩—灰泥岩—泥页岩由陆向海依次过渡,厚度0~1640 m。其中层序 Osq5 逐渐演变为弱镶边台地,厚度剧增,增幅达500~1000 m^[26]。盆地中东部出现内陆盐洼,在海平面下降期形成三期盐化泻湖沉积(层序 Osq3 LST 相当于马一段(图8a);层序 Osq3 HST 相当于马三段;层序 Osq4 HST 相当于马五段(图8c))。在海平面上升期形成三期局限台地—开阔台地相(层序 Osq3 TST 相当于马二段;层序 Osq4 TST 相当于马四段(图8b);层序 Osq5,相当于马六段)。盐化潟湖呈“O”字型,外围发育膏云坪,盆底发育盐化潟湖,沉积了大量的膏盐岩、盐泥岩、膏云岩等典型蒸发盐类。局限台地—开阔台地相主要由云质灰岩、含生物碎屑灰岩组成。内陆盐洼沉积厚度相对稳定,盆地东部洼陷中心最厚达800 m,向北、西、南三面减薄至0~400 m(其中层序 Osq5 遭大面积剥蚀,仅有零星沉积分布,厚度小于20 m)。

3.3.3 上奥陶统桑比阶—凯特阶下部

由上统桑比阶的层序 Osq6(相当于平凉组下部/乌拉力克组)、层序 Osq7(相当于平凉组上部/拉什仲组—公鸟素组)和凯特阶下部的层序 Osq8(相当于背锅山组/蛇山组)组成。

中奥陶世末,大地构造发生剧烈变化,随着古秦岭洋、古祁连洋俯冲消减的持续进行,包括鄂尔多斯盆地在内的华北盆地大幅度抬升,成为剥蚀古隆起(一直持续到早石炭世),仅在鄂尔多斯盆地的西、南缘形成了具有沟—弧—盆体系的主动大陆边缘弧后裂隙盆地,沉积了层序 Osq6—层序 Osq8。层序 Osq6 沉积期开始,盆地西部、南部形成深海槽,沉积环境演变为具有弱镶边台地边缘的开阔台地、斜坡和盆地沉积环境,沉积分布范围呈窄条带状,“L”型展布,沉积地层在盆地西部厚0~1000 m(西缘中段缺失层序8)在盆地南部厚0~2500 m。开阔盆地相以泥粉晶灰岩为主,其中西缘发育台地边缘滩亚相,南缘发育一定规模的台缘礁滩体。斜坡相发育泥页岩与泥灰岩互层,深水盆地与广海陆棚主要发育碎屑流和浊流^[27-31](图8d)。

表 1 鄂尔多斯盆地奥陶系重要化石带与层序地层划分对照表

Table 1 Cross-references between important fossils and sequence stratigraphic division of Ordovician in Ordos Basin

时间 /Ma	国际标准划分			鄂尔多斯盆地地层对比			层序地层		相对海平面变化						
	系	统	阶	段	南缘	西缘	东部	二级	一级	升	降				
445.6	奥陶系	上统	赫南特阶 Hirnantian	Hi2 Hi1	背锅山组	蛇山组 公乌素组	马六段	Osq8	OMsq2		455				
455.8			凯特阶 Katian	Ka4 Ka3 Ka2								平凉组	乌拉力克组	Osq7	
				Ka1											Osq6
				Sa2 Sa1											
460.9			桑比阶 Sandbian	达瑞威尔阶 Darriwilian								Dw3 Dw2 Dw1	三道坎组	克里摩里	马五段
		468.1			大坪阶 Dapingian	Dp3 Dp2 Dp1	水泉岭组	桌子山组	马四段						
471.8			弗洛阶 Floian	F13 F12 F11		三道坎组						马三段 马二段 马一段	Osq3		
				478.6										特马道阶 Tremadocian	Tr3 Tr2 Tr1
		480			Osq1										
485															

区域内主要不整合面类型: ~~~~ 风化壳不整合面 ~~~~ 海侵不整合面 - - - - 能量不整合面

奥陶纪末 鄂尔多斯地区整体抬升 经历了长达 1.2 亿年的风化剥蚀^[32] 形成了奥陶系顶面古岩溶地貌^[33]。

4 奥陶系碳酸盐岩台地层序地层发育模式

鄂尔多斯盆地处于华北地台西南部 早古生代西侧为古祁连洋 南侧为秦岭洋 盆地实际上是一个被南、西两侧洋盆所围限的大陆地台边缘。由于秦、祁洋具有不同的地质演化过程 因此在盆地南缘和西缘沉积层序各具特点。盆地中东部则受华北海控制 发育了封闭一半封闭沉积环境所具有的层序模式。

4.1 碳酸盐台地缓坡层序发育模式

中奥陶世晚期达瑞威尔期层序 Osq5(克里摩里组/马六段) 沉积之前 盆地西部延伸到贺兰山地区 南部延伸到秦岭地区。大地构造环境处于被动大陆

边缘发育阶段 其背景相似 构造活动弱 盆地西缘与南缘环境变化不大。三道坎组沉积期 为由碳酸盐岩和硅质碎屑岩组成的缓坡。

纵观盆地西缘和南缘垂向演化序列 早奥陶世—中奥陶世早期以内陆棚缓坡台地沉积为主(图 9a) , 大多数地区属潮坪—潮下带上部浅海环境 白云质碳酸盐岩沉积较为发育 生物化石相对较少 门类单一。低位体系域主要由滨岸砂岩组成。坡度很缓 低位期的砂岩覆盖面积较大 但愈近物源区愈薄或消失。随着海进的开始 台地重新发育 陆源物质受到抑制。首次洪泛面附近为具内源碎屑、含腕足壳的泥砂质沉积。海侵体系域在远源区(例如老石旦东山一带) 为陆架灰岩或滩相生物屑灰岩; 在近岸区(例如苏必沟) 潮坪沉积发育 剖面上见青鱼刺形等潮汐层理。在高位体系域一般岩层在不同程度地受到白云岩化作用 由外陆架的粒泥岩和内陆架的泥粒岩或颗粒岩组成。

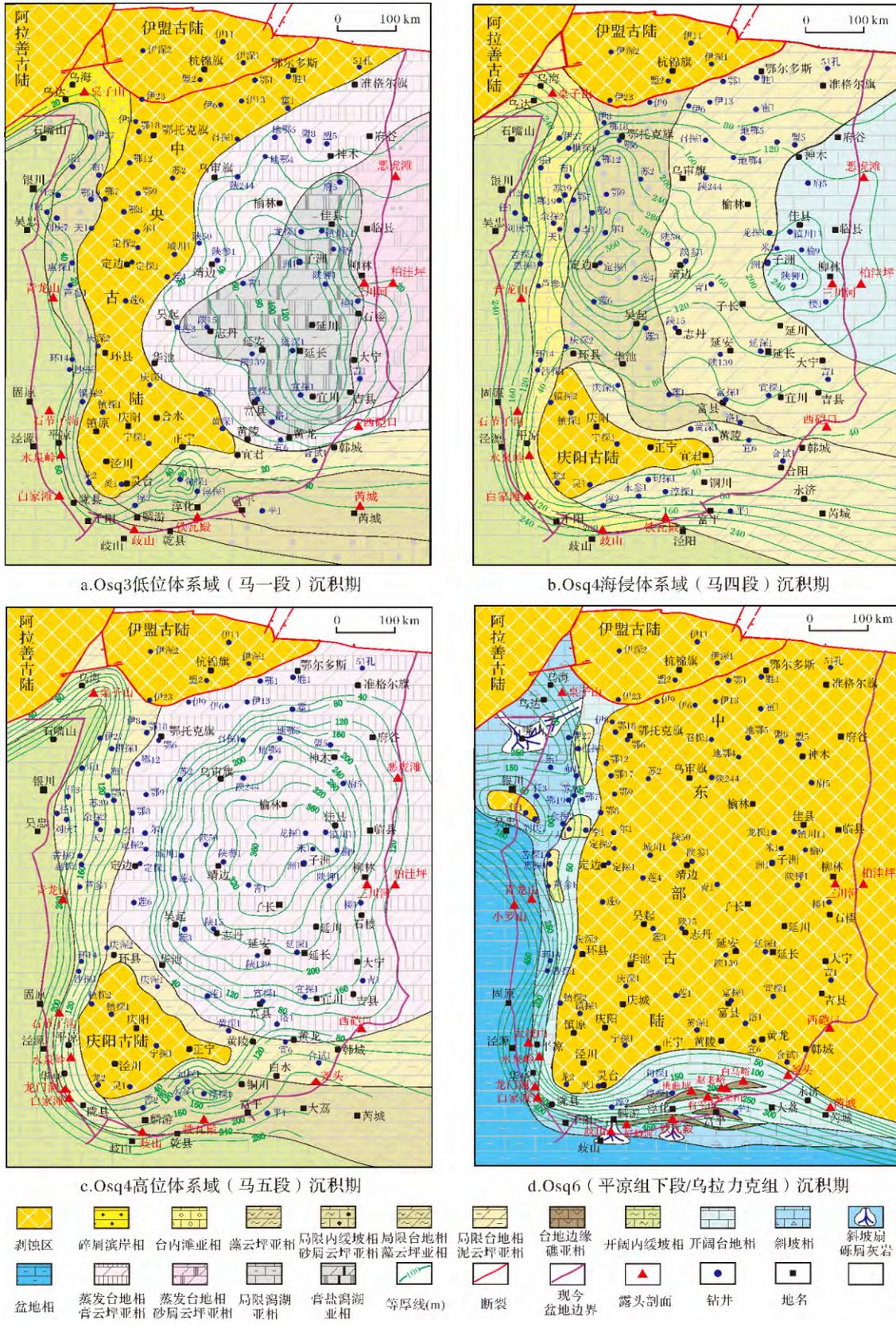


图 8 中晚奥陶纪主要层序沉积期岩相古地理

Fig. 8 The lithofacies paleogeography of main sequences in Middle-Late Ordovician, Ordos Basin

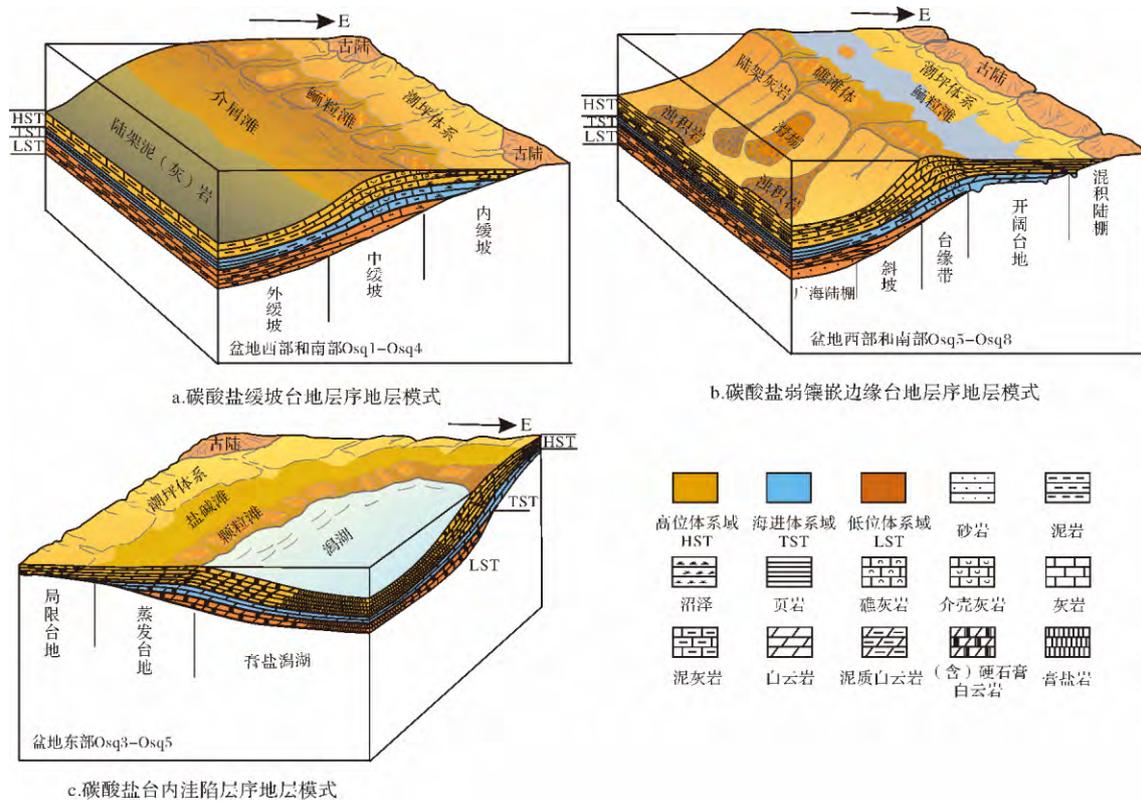


图 9 鄂尔多斯盆地西缘、南缘奥陶纪碳酸盐台地层序发育模式

Fig. 9 Sequence model of carbonate platform in Ordovician in the western and southern margin of Ordos

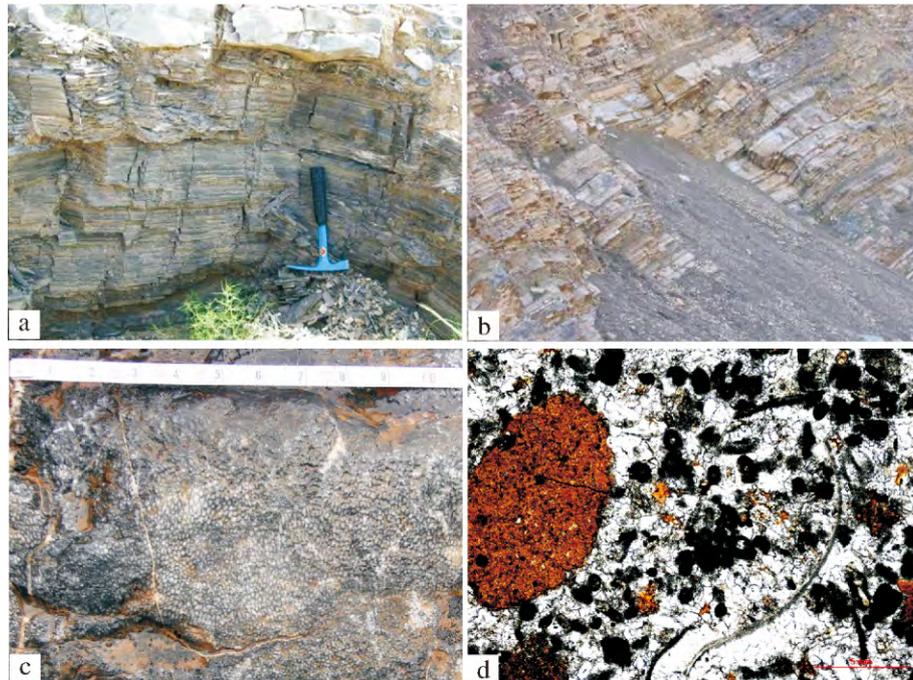


图 10 鄂尔多斯盆地西缘、南缘上奥陶统碳酸盐台地沉积特征

a. 盆地西缘桌子山剖面乌拉力克组 (Osq6) 下部黑色页岩, 富含密集的笔石类化石; b. 盆地西南缘平凉银洞官庄剖面平凉组上部 (Osq7) 深水相薄层泥岩, 含笔石; c. 盆地南缘永寿好峙河泾河组 (Osq6) 珊瑚礁藻纹层灰岩, 致密; d. 盆地南缘淳化东陵石马坪剖面泾河组 (Osq6) 含陆源碎屑球粒亮晶灰岩, 正交光。

Fig. 10 Sedimentary characteristics of carbonate platform of Upper Ordovician in the western and southern margin of Ordos Basin

4.2 碳酸盐台地镶边陆架层序发育模式

中奥陶世晚期达瑞威尔期层序 O_{sq5} (克里摩里组/马六段沉积期) 一晚奥陶世是鄂尔多斯盆地西、南边缘地质演化的新阶段, 大地构造环境由被动大陆边缘转化为主动大陆边缘活动阶段, 普遍发生强烈沉降, 岩相分异显著, 逐渐演化为弱镶边碳酸盐台地 (图 9b), 在台地边缘形成了典型的弱镶边型礁滩沉积体系, 垂向上生物礁体与藻灰岩互层, 礁核胶结致密, 很难形成有利储层, 典型沉积特征如好峙河露头剖面。在台缘斜坡环境中发育了滑塌、碎屑流和浊流沉积^[27~31]。在深水盆地相沉积中含有丰富的笔石动物群化石。

(1) 低位体系域 (LST)。LST 典型的沉积有两类, 一是浊流沉积, 二是碎屑流沉积。当台地下沉到透光带之下, 由于淹没而消亡, 继后的海平面下降, 发育陆源碎屑浊积岩, 见于乌拉力克组以上地层, 拉什仲组十分发育, 为斜坡扇体系。乌拉力克组发育碳酸盐沉积。克里摩里组见下切谷充填式碎屑流沉积, 公乌素组见碳酸盐泥屑岩沉积。低水位体系域还可以见到向下 (海) 建造的台地边缘滩或岩隆、砂质滨岸沉积和潮坪体系。

(2) 海侵体系域 (TST)。初期具有滞留砾岩和喀斯特 (台地) 沉积, 台内点礁或点滩常见; 岸带部位见沙滩、砂坝体系和宽阔的潮坪体系; 坡折部位原发育的岩隆部分淹没消失, 部分向上建筑。随着海平面的上升、可容纳空间的增大进入追补沉积阶段, 深水部位发育等深流沉积, 见低密度钙屑浊积岩。当海平面上升到最高点、可容纳空间最大时, 发育密集段。典型的密集段为黑色笔石页岩 (图 10a)。

(3) 高位体系域 (HST)。HST 有追补型和并进型两种重要的沉积体系。追补型往往为连续的暗色泥页岩沉积 (图 10b), 间夹低密度钙屑浊积岩和薄板状微晶灰岩, 泥粒岩或颗粒岩中早期海底胶结物很少。并进型早期沉积与追补型相似, 中晚期沉积大相径庭。其台地边缘岩隆、礁滩体 (图 10c)、台内浅滩 (图 10d) 发育, 范围较 TST 扩大; 坡折部位, 陆架灰岩沉积较为普遍。

4.3 碳酸盐台内洼陷层序发育模式

鄂尔多斯盆地中东部是华北地台内部典型的陆表海沉积环境, 早奥陶世晚期弗洛期—中奥陶世马家沟组沉积期发展成为台内洼陷, 并出现了 3 次蒸发膏盐化潟湖与局限潟湖/开阔台地交替发育的特征, 由此沉积了 3 套厚层蒸发膏盐岩。其中, 海侵体系域以

发育局限台地/开阔台地相为主, 层序 O_{sq4} 海侵体系域 (马四段) 沉积期海侵使得华北海与祁连海连通。高位体系域发育蒸发潮坪与盐化潟湖, 表现为典型的封闭—半封闭“同心圆”状潟湖沉积模式^[11, 12]。

5 结论

(1) 提出了鄂尔多斯盆地“碳酸盐岩层序地层划分与对比五要素”分析方法, 即针对地震资料分辨率低的资料特点, 提出强调古生物地层是基础、层序界面识别是关键、重要地质事件是标志、地球化学指标是补充、测井曲线对比是核心的分析方法。通过分析该方法在鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层对比中的应用, 建立了鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架。

(2) 将鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层划分为 2 个二级层序和 8 个三级层序: OM_{sq1} 包括 O_{sq1} (冶里组)、 O_{sq2} (亮甲山组)、 O_{sq3} (LST: 马一段; TST: 马二段; HST: 马三段)、 O_{sq4} (TST: 马四段; HST: 马五段) 和 O_{sq5} (马六段/克里摩里组); OM_{sq2} 包括 O_{sq6} (平凉组下部/乌拉力克组+拉什仲组下部)、 O_{sq7} (平凉组上部/拉什仲组上部+公乌素组) 和 O_{sq8} (背锅山组)。

(3) 盆地奥陶系受伊盟古隆起—庆阳古隆起发育演化的控制, 不同构造环境形成不同的层序格架: 在盆地西部窄大陆边缘奥陶系北部发育层序 O_{sq3} —层序 O_{sq7} 五套地层, 持续时间从早奥陶世弗洛阶到晚奥陶世桑比阶末, 南部发育层序 O_{sq1} —层序 O_{sq7} 七套地层, 持续时间从早奥陶世特马道克阶到晚奥陶世桑比阶末, 总体上西部地层西厚东薄, 南北向条带状展布, 向伊盟隆起—庆阳古隆起上超伏尖灭, 厚度 0~1 600 m; 在盆地南部宽大陆边缘奥陶系发育盆地所发现的 8 个层序, 持续时间从早奥陶世弗洛阶到晚奥陶世凯特阶早期, 地层南厚北薄, 向庆阳古隆起上超伏尖灭, 厚度 0~1 800 m; 在盆地中东部台内洼陷奥陶系仅发育层序 O_{sq3} —层序 O_{sq5} TST, 以盆地东部洼陷东侧最厚, 沉积厚度为 800 m, 向北、西、南三面减薄至 0~400 m; 盆地北部伊盟隆起、庆阳古隆起主体一直处于隆起剥蚀状态, 二者的鞍部仅在 O_{sq4} TST 时期有过西部祁连海与东部华北海的连通, 沉积厚度在 0~600 m。

(4) 建立了鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩台地缓坡、弱镶边陆架和碳酸盐岩台内洼陷层序地层发育模式。

参考文献 (References)

- 1 包洪平 杨承运. 碳酸盐岩层序分析的微相方法——以鄂尔多斯东部奥陶系马家沟组为例[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1/2): 153-157 [Bao Hongping, Yang Chengyun. The phase analysis method of carbonate sequence: As an example of Majiagou Formation in eastern Ordos [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(1/2): 153-157]
- 2 李斌 程长青. 空间数据库技术实现定量古地理研究——以鄂尔多斯盆地中奥陶统一个三级层序的形成时间为例[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 251-263 [Li Bin, Cheng Changqing. Application of spatial database in quantitative study of litho-palaeogeograph—A case study of a Middle Ordovician sequence interval in Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 251-63]
- 3 李斌 史晓颖 程长青. 等. 空间数据库技术在定量单因素作图法中的应用——以鄂尔多斯盆地奥陶系 SQ17 岩相古地理研究为例[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1): 1-6 [Li Bin, Shi Xiaoying, Cheng Changqing, et al. Application of spatial database in quantitative study of litho-palaeogeograph—A case lithofacies paleogeographic study of an Ordovician sequence SQ17 in Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(1): 1-6]
- 4 贾振远 蔡华 蔡忠贤. 等. 鄂尔多斯地区南缘奥陶纪层序地层及海平面变化[J]. 地球科学, 1997, 22(5): 491-503 [Jia Zhenyuan, Cai Hua, Cai Zhongxian, et al. stratigraphy and sea level change of the Ordovician in the southern margin of Ordos region [J]. Earth Science, 1997, 22(5): 491-503]
- 5 姚泾利 赵永刚 雷卞军. 等. 鄂尔多斯盆地西部马家沟组层序岩相古地理[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 33-37 [Yao Jingli, Zhao Yonggang, Lei Bianjun, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Majiagou Formation in western Ordos Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(1): 33-37]
- 6 雷卞军 付金华 孙粉锦. 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组层序地层格架研究——兼论陆表海沉积作用和早期成岩作用对相对海平面变化的响应[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2): 145-153 [Lei Bianjun, Fu Jinhua, Sun Fenjin, et al. Sequence stratigraphy of the Majiagou Formation, Ordos Basin: sedimentation and early diagenesis related to eustatic sea-level changes [J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(2): 145-153]
- 7 曹金丹 冯乔 赵伟. 等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶纪层序地层分析[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 286-292 [Cao Jinzhou, Feng Qiao, Zhao Wei, et al. Sequence stratigraphy of Ordovician strata in the south part of Ordos area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 286-292]
- 8 魏魁生 徐怀大 叶淑芬. 鄂尔多斯盆地北部奥陶系碳酸盐岩层序地层研究[J]. 地球科学, 1996, 21(1): 1-10 [Wei Kuisheng, Xu Huaida, Ye Shufen. Carbonate sequence stratigraphy of Ordovician in the northern Ordos Basin [J]. Earth Science, 1996, 21(1): 1-10]
- 9 魏魁生 徐怀大 叶淑芬. 鄂尔多斯盆地北部下古生界层序地层分析[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 130-135 [Wei Kuisheng, Xu Huaida, Ye Shufen. Sequence stratigraphic analysis of Lower Paleozoic in northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 130-135]
- 10 魏魁生 徐怀大. 鄂尔多斯盆地北部及北缘寒武—奥陶纪层序地层及海平面变化研究[J]. 地质科技通报, 1998(10): 6-7 [Wei Kuisheng, Xu Huaida. Sequence stratigraphy and eustatic sea-level changes study of Cambrian-Ordovician in northern Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 1998(10): 6-7]
- 11 周进高 张帆 郭庆新. 等. 鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组障壁潟湖沉积相模式及有利储层分布规律[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 64-71 [Zhou Jingao, Zhang Fan, Guo Qingxin, et al. Barrier-lagoon sedimentary model and reservoir distribution regularity of Lower Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 64-71]
- 12 黄丽梅 李建明 黄正良. 等. 鄂尔多斯盆地东部地区早奥陶世马家沟组沉积模式探讨[J]. 新疆地质, 2012, 30(1): 80-84 [Huang Limei, Li Jianming, Huang Zhengliang, et al. Discussion on the Lower Ordovician Majiagou Formation of eastern Ordos Basin [J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(1): 80-84]
- 13 雷清亮 徐怀大. 用层序地层学评价鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩油气聚集带[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(4): 334-340 [Lei Qingliang, Xu Huaida. Evaluation of Ordovician carbonate oil-gas accumulation zones based on sequence stratigraphy in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(4): 334-340]
- 14 朱创业. 陕甘宁盆地奥陶统马家沟组层序地层与天然气的关系[J]. 岩相古地理, 1999, 19(5): 47-52 [Zhu Chuangye. Sequence stratigraphy and its bearings on the gas accumulation in the Lower Ordovician Majiagou Formation, Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeology, 1999, 19(5): 47-52]
- 15 田景春 彭军. 长庆气田中区“马家沟组”高频旋回层序地层分析[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 31-34 [Tian Jingchun, Peng Jun. High frequency base-level cycle sequence stratigraphic analysis in Majiagou Formation in central area of Changqing gas field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(1): 31-34]
- 16 P. R. Vail. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy; Part 1, Seismic stratigraphy interpretation procedure (in Atlas of seismic stratigraphy) [J]. AAPG Studies in Geology, 1987, 27(1): 1-10
- 17 郭彦如 刘化清 李相博. 等. 大型拗陷湖盆层序地层格架研究方法体系——以鄂尔多斯盆地中生界延长组为例[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 385-390 [Guo Yanru, Liu Huaqing, Li Xiangbo, et al. Method system on studying sequence stratigraphic framework of large sagged lacustrine basin: A case study from Mesozoic Yanchang Fm., Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 385-390]
- 18 于炳松 陈建强 林畅松. 塔里木地台北部寒武纪—奥陶纪层序地层及其与扬子地台和华北地台的对比[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2001, 31(1): 17-26 [Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong. Cambrian-Ordovician sequence stratigraphy in the northern Tarim platform and contrast among its and Yangtz platform and north China platform [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(1): 17-26]

- 19 田树刚,章雨旭. 华北地台北部奥陶纪露头层序地层[J]. 地球学报,1997,18(1):87-97 [Tian Shugang, Zhang Yuxu. Outcrop sequence stratigraphy in northern China platform [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(1):87-97]
- 20 乔秀夫,季强. 华北地台中东部新元古界一下古生界露头层序地层及海平面变化研究[J]. 地质科技通报,1998(10):3-4 [Qiao Xiufu, Ji Qiang. Outcrop sequence stratigraphy of Neoproterozoic - lower Palaeozoic in The northeastern China platform and sea level change study [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 1998 (10):3-4]
- 21 Seth A. Young, Matthew R. Saltzman, Kenneth A. Foland, et al. A major drop in seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ during the Middle Ordovician (Darriwilian): Links to volcanism and climate? [J]. Geology, 2009, 37(10):951-954
- 22 Gahan A. Shields, Giles A. F. Carden, Jan Veizer, et al. Sr, C, and O isotope geochemistry of Ordovician brachiopods: a major isotopic event around the Middle-Late Ordovician transition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta 2003, 67(11):2005-2025
- 23 G Gao, S. I. Dworkin, L. S. Land, et al. Geochemistry of Late Ordovician Viola Limestone, Oklahoma; implications for marine carbonate mineralogy and isotopic compositions [J]. Journal of Geology, 1996, 104(3):359-367
- 24 Stig M. Bergstrom, Chen Xu, Birger Schmitz, et al. First documentation of the Ordovician Guttenberg $\delta^{13}\text{C}$ excursion (GICE) in Asia: chemostratigraphy of the Pagoda and Yanwashan Formations in south-eastern China [J]. Geological Magazine, 2009, 146(1):1-11
- 25 汪啸风. 全球奥陶系年代地层学的研究—进展与问题[J]. 地球科学进展,1993,8(1):28-34 [Wang Xiaofeng. Development and problems for study of global Ordovician chronostratigraphy [J]. Advance in Earth Sciences, 1993, 8(1):28-34]
- 26 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. Lithofacies palaeogeography under sequence stratigraphic framework of Ordovician in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl. 2):95-109]
- 27 许强,陈洪德,赵俊兴,等. 贺兰拗拉槽胡基台地区中奥陶统樱桃沟组深海重力流沉积特征[J]. 海相油气地质,2010,15(2):14-19 [Xu Qiang, Chen Hongde, Zhao Junxing, et al. The features of Middle Ordovician Yingtaogou deep-sea gravitational current deposits at Hujitai area in the Helan aulacogen, Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(2):14-19]
- 28 张抗. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶系滑塌堆积[J]. 沉积学报,1992,10(1):11-18 [Zhang Kang. Olistostrome in Ordovician system, western and southern margin of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(1):11-18]
- 29 吴胜和,冯增昭,张吉森. 鄂尔多斯地区西缘及南缘中奥陶统平凉组重力流沉积[J]. 石油与天然气地质,1994,15(3):226-234 [Wu Shenghe, Feng Zengzhao, Zhang Jisen. Sedimentology of gravity flow deposits of Middle Ordovician Pingliang Formation in west and south margins of Ordos [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(3):226-234]
- 30 高振中,罗顺社,何幼斌,等. 鄂尔多斯西缘奥陶纪海底扇沉积体系[J]. 石油与天然气地质,1995,16(2):119-125 [Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. Ordovician submarine fan systems in west margin of Ordos [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2):119-125]
- 31 刘成鑫,高振中,纪友亮,等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系深水牵引流沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):31-36 [Liu Chengxin, Gao Zhenzhong, Ji Youliang, et al. Ordovician deep-water traction current deposits on the southwestern margin of Ordos Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2):31-36]
- 32 史基安,邵毅,张顺存,等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学,2009,20(3):316-324 [Shi Ji'an, Shao Yi, Zhang Shuncun, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary environment in Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3):316-324]
- 33 张宏,董宁,郑浚茂,等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古沟槽三维地震识别方法[J]. 石油学报,2010,31(3):415-419 [Zhang Hong, Dong Ning, Zheng Junmao, et al. 3D seismic identification technique for Ordovician erosion flutes in the eastern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3):415-419]

Sequence Stratigraphy of the Ordovician System in the Ordos Basin

GUO Yan-ru¹ ZHAO Zhen-yu² XU Wang-lin¹ SHI Xiao-ying² GAO Jian-rong¹
BAO Hong-ping³ LIU Jun-bang¹ ZHANG Yan-ling¹ ZHANG Yue-qiao¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083;

2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development of Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 710021)

Abstract: Through comprehensive analysis of various outcrops, drilling and seismic sequence stratigraphy, Ordovician sequence stratigraphic framework in Ordos Basin has been established. In view of poor quality of Ordovician seismic data in the basin, a set of suitable sequence stratigraphic analysis method is very necessary. So, we meticulously researched Ordovician sequence stratigraphy of Ordos Basin in the eleventh five-year plan, and put forward "the five elements analysis method of carbonate strata sequence stratigraphic classification and correlation". Using the analysis method, 3 secondary sequence interface and 6 tertiary sequence interface have been identified in the Ordovician, and the Ordovician can be divided into 2 secondary sequences and 8 tertiary sequences. OMsq1 including Osq1 (equivalent to Yeli Group), Osq2 (equivalent to Liangjiashan Group), Osq3 (LST: equivalent to Majiagou 1 Formation; TST: equivalent to Majiagou 2 Formation; HST: equivalent to Majiagou 3 Formation), Osq4 (TST: equivalent to Majiagou 4 Formation; HST: equivalent to Majiagou 5 Formation) and Osq5 (equivalent to Majiagou 6 Formation / Kelimoli Group); OMsq2 including Osq6 (equivalent to lower Pingliang Group/Wulalike Group + Lower Lashizhong Group), Osq7 (equivalent to Upper Pingliang Group/Upper Lashizhong Group + Gongwusu Group) and Osq8 (equivalent to Baiguoshan Group). Different basin tectonic environment formed different sequence stratigraphic framework. Ordovician of the northern portion of western narrow continental margin in the basin can be divided into Osq3-Osq7 of sequence stratigraphy of which geologic time is from the Floian of Early Ordovician to the Sandbian of Late Ordovician. Ordovician of the southern portion of western narrow continental margin in the basin can be divided into Osq1-Osq7 of sequence stratigraphy of which geologic time is from the Tremadocian of Early Ordovician to the Sandbian of Late Ordovician. The sequence stratigraphy's thickness is 0 ~ 1 600 m which exhibit a bolt in shape extend in a north-south ward direction on the narrow edge which is sloped gently toward west and overlapping and pinching out to Yimen-Qingyang Ancient Uplift. In the southern wide continental margin of the basin, we have discovered eight sequence stratigraphy in Ordovician of which geologic time is from the Floian of Early Ordovician to the Early Katian of Late Ordovician. The sequence stratigraphy's thickness is 0 ~ 1 800 m which exhibit a bolt in shape extend in a west-east ward direction on the wide edge which is sloped gently toward south and overlapping and pinching out to Qingyang Ancient Uplift. In the eastern platform inner sag of the middle-eastern Ordos Basin, we only divided Ordovician into three sequence stratigraphies (Osq 3-Osq5 TST) which thickness is 800m in the east of the depression and overlapping and pinching out to Qingyang Ancient Uplift. Northern Yimeng Ancient Uplift and Qingyang Ancient Uplift have been uplifted in eroding state, which developed the only Osq4 TST, and show that the Qilian Sea in western Ordos Basin and the North China Sea in Eastern Ordos Basin have been fleetingly connected in the late of Middle Ordovician.

Key words: Ordos Basin; sequence stratigraphy; isochronous stratigraphy framework; sequence boundary; carbonate rocks; Ordovician