

鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组桥头砂岩 层序地层及沉积特征

吴 鹏^{1,2}, 高计县^{1,2}, 郭俊超^{1,2}, 周煜哲^{1,2}, 胡晓贤^{1,2}

[1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011; 2. 中海石油(中国)有限公司 非常规油气分公司, 北京 100011]

摘要:鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组桥头砂岩的沉积特征及其在层序格架中的位置, 决定了储层类型和圈闭范围的评价。结合地震、测井、露头 and 岩心资料, 通过层序界面和海泛面的识别, 将太原组划分为1个完整的长期旋回(LSC1)和4个完整的中期旋回(MSC1, MSC2, MSC3, MSC4)。其中桥头砂岩位于MSC1下降半旋回中, 以粗粒和中-粗粒的石英砂岩为主; 粒度概率累积曲线呈典型双向水流特征; 岩心见典型潮汐水流沉积构造, 发育羽状、块状、粒序和复合层理等; 剖面上砂体呈透镜状, 平面上呈平行岸线条带状分布特征。综合分析认为桥头砂岩为潮汐水道及障壁砂坝沉积, 属海相成因优质储层。该砂体呈北东-南西平行岸线方向分布, 气井钻遇砂体均见高产气流。圈闭范围受砂体边界控制, 呈现岩性圈闭的特征。太原组桥头砂岩层序划分和沉积特征的研究, 对临兴地区和鄂尔多斯盆地东缘致密气的勘探开发具有指导意义。

关键词:沉积相; 桥头砂岩; 层序地层; 太原组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sequence stratigraphy and sedimentary characteristic analysis of Qiaotou sandstone of Tayuan Fm in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

Wu Peng^{1,2}, Gao Jixian^{1,2}, Guo Junchao^{1,2}, Zhou Yuzhe^{1,2}, Hu Xiaoxian^{1,2}

(1. China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing 100011, China;

2. Unconventional Oil & Gas Branch, CNOOC Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: Sedimentary characteristics and location within sequence framework of the Qiaotou sandstone of the Taiyuan Formation in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin, determine the reservoir type and trap area. The Taiyuan Formation is divided into one complete long-term cycle (LSC1) and four complete medium-term cycles (MSC1, MSC2, MSC3, MSC4) based on identification of sequence boundaries and flooding surfaces by using seismic, logging, outcrop and outcrop data. The Qiaotou sandstone is within the descending half cycle of MSC1 and is dominated by coarse-grained and coarse-to-medium grained quartz sandstones. The cumulative probability curve of the grain size is typical of the two-way flow. Core observation reveals typical tidal current sedimentary structure and pinnate, massive, graded and composite bedding. The sand bodies show lenticular geometry on section and appear as bands parallel with shorelines on map. The Qiaotou sandstone is believed based on a comprehensive analysis to be tidal channel and barrier bar deposits, which are quality reservoirs of marine facies. The sand body parallels shoreline in northwest-southwest direction and all wells that penetrate it test high gas flow. The area of traps are controlled by the sand body boundary and show the characteristics of lithologic traps. This study is of great significance for guiding exploration and development of tight sand gas in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin.

Key words: sedimentary facies, Qiaotou sandstone, sequence stratigraphy, Taiyuan Formation, Ordos Basin

近年来,鄂尔多斯盆地东缘临兴地区的致密气勘探开发实现了重大突破,提交探明储量超过1 000 ×

10⁸ m³,日产量超过40 × 10⁴ m³。该致密气主要来源于太原组的桥头砂岩及下石盒子组的骆驼脖子砂岩,其

收稿日期:2017-08-14;修订日期:2017-11-29。

第一作者简介:吴鹏(1988—),男,博士、工程师,非常规油气勘探与开发。E-mail:wupeng19@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05042,2016ZX05066);中海油重大专项(CNOOC-KJ 135ZDXMLTD14)。

中桥头砂岩是核心目标层位。由于桥头砂岩发育范围存在局限性,前期煤田钻孔资料揭示较少,多年来其沉积环境和沉积成因一直饱受争议。

层序地层学研究在油气勘探阶段有着重要的指导意义,众多学者对鄂尔多斯盆地的上古生界已经开展过长期大量有效的工作。其中,桂学智^[1]、武法东和陈钟惠^[2]、郭英海^[3]、樊太亮^[4]、陈洪德^[5]、沈玉林^[6-7]及郭书元^[8]等学者运用了经典层序地层学的分析方法对一些区块的层序界面进行了识别并划分了相应的层序,而邓宏文和翟爱军^[9]、李宝芳^[10]、姜烨^[11]及郑荣才^[12]等学者则运用了高分辨层序地层学的原理对一些区块进行了层序界面的识别及旋回的划分。由于鄂尔多斯不同地区相变较快,岩性组合复杂,标志层发育不统一等原因,每位学者的划分方案都存在着一定的区别。在鄂尔多斯盆地东缘,尤其是在临兴地区至今未有一套成熟的层序地层划分方案。因此,为了更好地指导和服务临兴气田的勘探开发工作,建立一套适用于该地区的层序地层划分方案是很有必要的。

鄂尔多斯盆地上古生界气藏是典型的岩性油气藏,而“微相控储,岩性控藏”的理念一直指导着该类油气藏的勘探开发工作,因此沉积相的研究,尤其是沉积微相的刻画就显得尤为重要。对鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系沉积环境已经有了比较一致的认识,即陆表海环境下发育的海陆过渡相。但太原组受海侵-海退范围、距物源区距离、水动力条件等因素差异性影响,究竟该划归到陆表海碳酸盐台地、潮坪相、障壁-潟湖相还是浅水三角洲相,仍存在着很大分歧。针对太原组主力砂体——桥头砂岩,陈钟惠^[13]、王华^[14]、姜烨^[15]、沈玉林^[7]及李勇^[16]等学者认为该砂体为河流相沉积,郝蜀民^[17]、王付斌^[18]、庞军刚^[19]、冯文立^[20]及郑文波^[21]等学者认为该砂体为障壁-潮坪相沉积,而付锁堂^[22]、兰朝利^[23]及宋雪娟^[24]等学者则认为该砂体为三角洲相沉积。不同成因砂体的沉积模式和砂体空间展布形态差别大,确定其成因类型,精确刻画其空间展布形态,对临兴地区太原组圈闭范围确定和井位部署具有重要的意义。

利用临兴地区近些年新钻的102口致密气井的钻井及测井资料,取心描述及岩心测试资料,三维地震资料及野外露头资料等,对太原组地层开展了高分辨率层序地层划分及沉积特征研究,以期确定研究区太原组层序地层划分方案及沉积相类型,进而确定桥头砂岩成因类型和砂体发育范围,指导下一步油气勘探和开发工作。

1 区域地质概况

临兴地区位于鄂尔多斯盆地东缘,西邻黄河,地处山西省临县及兴县境内,面积约2 530 km²。该区处于晋西挠褶构造带内(图1),上古生界断层比较发育,但普遍规模不大,构造以南北向为主体^[25]。研究区地层自老而新为本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组。本溪组-太原组沉积时,本区主要发育陆表海环境下的潮汐三角洲-障壁海岸沉积体系;山西组沉积时,以海陆过渡环境下的浅水三角洲沉积体系为主;下石盒子组、上石盒子组及石千峰组沉积时期,本区已经不受海水作用的影响,以陆相湖盆三角洲沉积体系及河流沉积体系为主^[26]。

2 太原组层序地层划分

运用高分辨率层序地层学的原理,在区域构造分析的基础上,综合野外露头、岩心观察及测试、测井响应特征与地震反射特征等资料,在本溪组-山西组识别出了区域不整合、区域构造体制转换、低水位暴露面及区域沉积体制转换面等代表大规模区域性海侵-海退的界面,同时还识别出岩性突变面、煤层底面及潮道下切面等代表小规模的海侵-海退的界面。

2.1 中期-长期旋回层序界面及最大海泛面

研究区的中期-长期旋回层序界面:上、下古生界的分界面,本溪组底部,露头可见红褐色铁铝岩,地震反射剖面上呈现中-弱振幅以及同向轴连续性一般的反射特征(图2a,图3,图4);二叠系-石炭系分界面,即8+9号煤层底界面,为区域性构造体制转换面,微量元素含量及Sr/Ba值较上下层位都低^[10],地震反射剖面上呈现强振幅与同向轴连续性好的反射特征(图2c,图3,图4);山西组-太原组分界面,北盆沟砂岩底面,为区域性沉积转换面,下切作用明显,GR测井曲线呈高幅箱形或钟形,地震反射剖面上呈现强振幅、同向轴连续性强的反射特征(图3,图4)。同时本区的最大海泛面发育于保德灰岩的顶面。该灰岩为生物碎屑灰岩,全区发育,可对比性强。之后海水逐渐向南退去,与下伏岩层(煤层或泥岩)差异性明显,地震反射剖面上呈现较强振幅、同相轴连续性较强的反射特征(图2d,图3)。

中期旋回层序界面:桥头砂岩底面,为岩性突变面,界面之下为泥炭坪沉积,以海侵成煤作用产生的

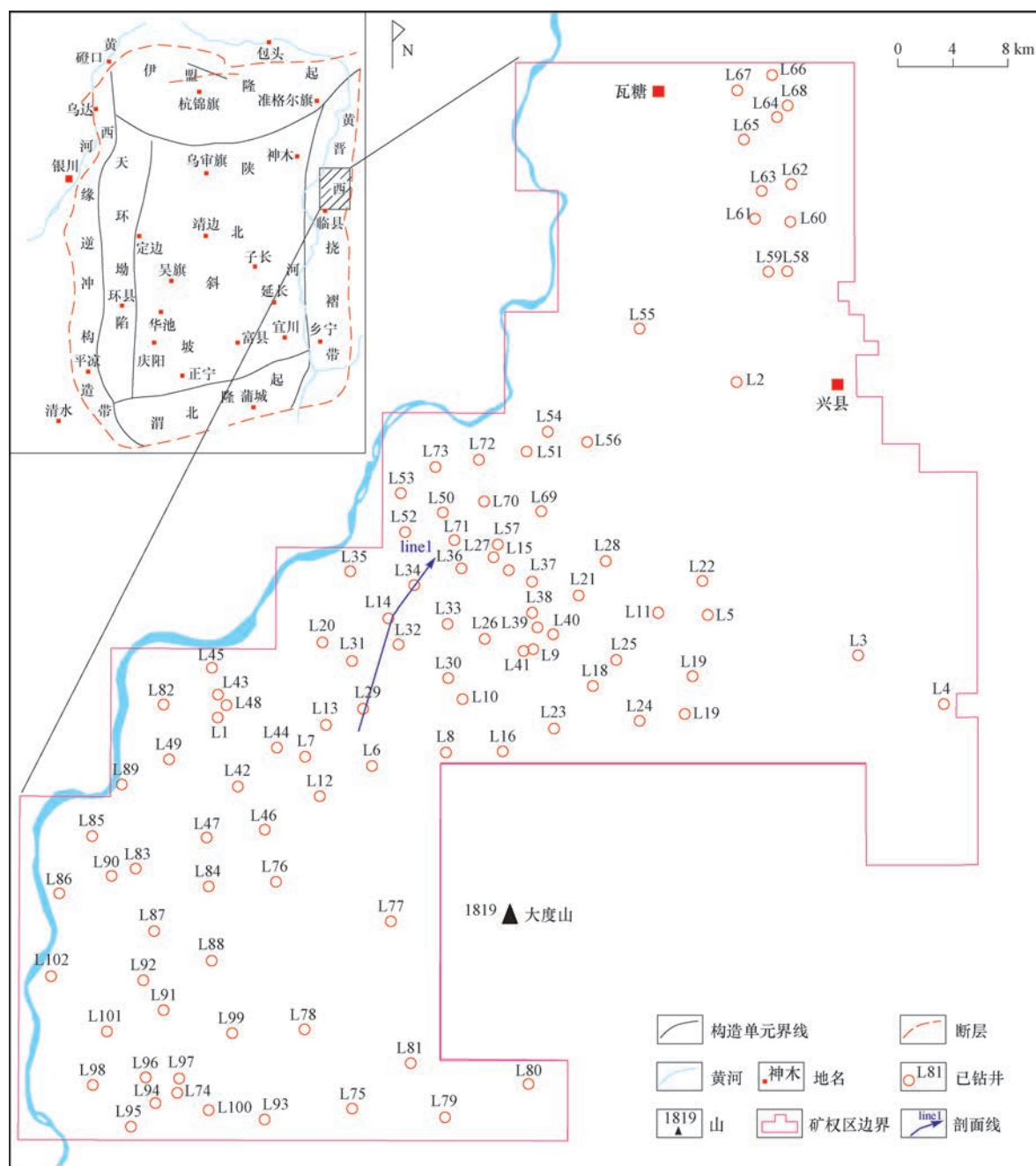


图1 鄂尔多斯盆地东缘临兴气田构造位置及井位分布

Fig. 1 Map showing locations of structure and wells in Linxing gas field, Ordos Basin

8+9号煤层及碳质泥岩为主,界面之上为海退产生的潮汐水道-障壁砂坝沉积,桥头砂体局部为下切作用明显的潮汐水道,其他地方以反韵律的障壁砂坝沉积为主,也可见潮下带的砂坪等沉积类型,研究区距离桥头镇仅30km,与桥头镇野外剖面具有很好的对比性(图2b,图2c,图4);6+7号煤层底面,底面的根土岩代表一次短暂的沉积间断及暴露(图2d,图4)。桥头砂岩底面、毛儿沟灰岩顶面、保德灰岩顶面及东大窑灰岩顶面代表中期旋回的海泛面,在研究区内均有一定的分布范围,可以追踪对比。

2.2 层序地层格架

在上述层序界面及海泛面识别的基础上,依据区域构造转换面、沉积体系转换面、地层叠加样式以及古土壤层等特征,结合野外露头观察资料,运用高分辨率层序地层学的原理对临兴地区太原组地层进行了层序划分。太原组可以划为1个完整的长期旋回(LSC1)和4个完整的中期旋回(太二段:MSC1, MSC2; 太一段:MSC3, MSC4)(图4)。太原组经历了一次大规模的海侵-海退的过程,对应一个完整长期旋回;其间多次小

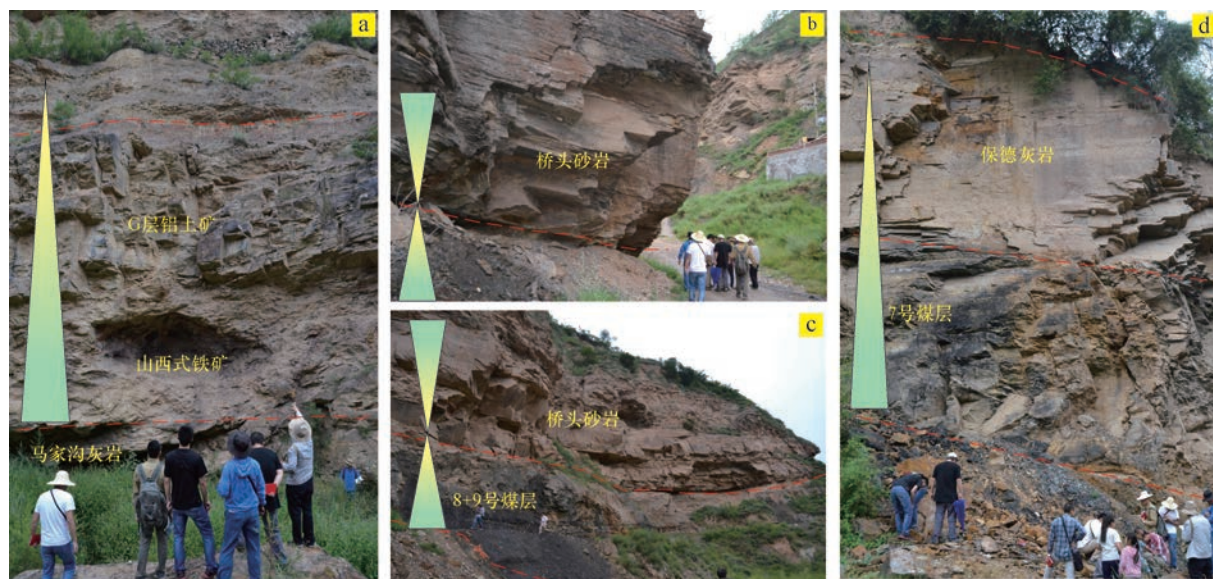


图2 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区野外地质露头剖面

Fig. 2 Geologic section of outcrop in Lingxing area, eastern margin of Ordos Basin

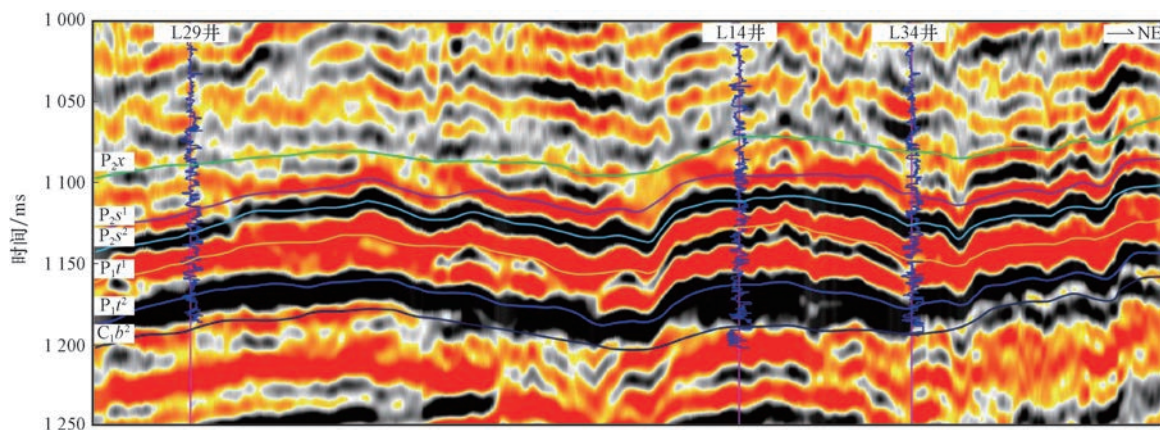


图3 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区层序顶、底界面地震反射特征(具体位置见图1中line 1)

Fig. 3 Reflectance signatures of sequence boundaries on seismic section across Lingxing area, eastern margin of Ordos Basin(see Fig. 1 for line 1 location)

规模海侵-海退过程,对应多个中期旋回。LSC1 旋回包括的地层从8+9号煤层的底面到北岔沟砂岩的底面。上下层序界面均为区域性平行不整合面,太二段顶部保德灰岩为区域海侵面,该灰岩在区域上稳定分布,表明最大海侵范围遍布整个研究区。

MSC1:海侵初期,海平面上升较慢,随着可容空间增长速率与泥炭堆积速率达到相对平衡,发育厚层8+9号煤层,随着海平面的持续上升,可容空间的增长速率超过泥炭堆积速率,导致8+9号煤层发育停止,构成MSC1上升半旋回;之后海平面下降,研究区障壁砂坝和潮汐水道开始发育,持续海退到毛儿沟灰岩底部,构成了MSC1下降半旋回^[27-28]。

MSC2:毛儿沟灰岩的发育代表着MSC2上升半旋回的开始,毛儿沟灰岩发育结束代表该次海侵的结束;

随后海退,直至7号煤层底部发育根土岩,构成MSC2下降半旋回。

MSC3:从7号煤层发育开始到保德灰岩发育结束,代表MSC3上升半旋回,该次海侵规模最大,范围最广;之后海退至6号煤层底部的根土岩,构成MSC3下降半旋回。

MSC4:太原时期最后一次海侵事件始于6号煤层的发育,到东大窑灰岩发育完为止,构成MSC4的上升半旋回;之后海退至北岔沟砂岩底界面,构成MSC4下降半旋回。

3 桥头砂岩沉积特征

太原组太二段 MSC1 下降半旋回中的潮汐三角洲

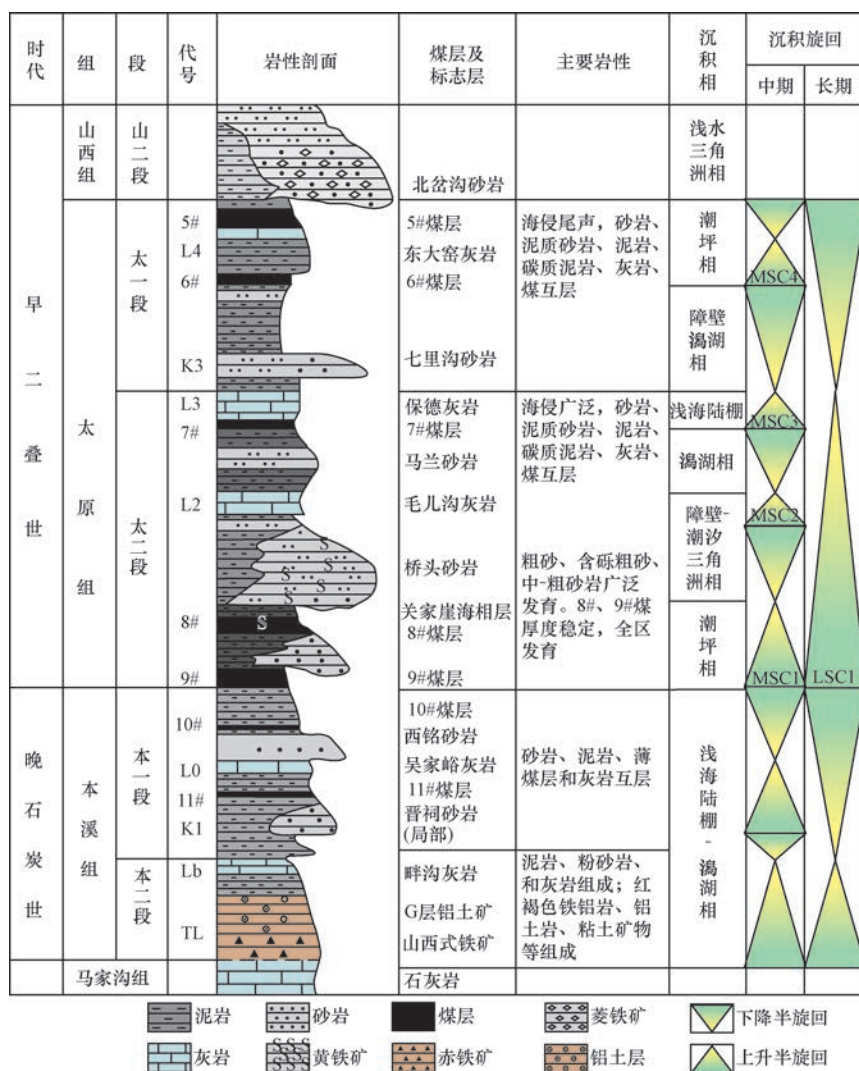


图4 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组地层和沉积旋回综合柱状图

Fig. 4 Composite columnar section showing strata and sedimentary cycles in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

相及障壁相沉积中的砂岩在研究区很发育,是研究区内最主要的产气层之一。陈钟惠等^[13]将鄂尔多斯东缘太原组底部“关家崖海相层”与“保德灰岩”之间广泛发育的这套砂体命名为“桥头砂岩”。笔者认为,桥头砂岩在不同地区,在其南北展布方向上,存在着沉积环境的变化,这也是不同学者对该砂体的沉积背景有不同认识主要原因。陆表海环境下海水频繁海侵—海退,多种沉积体系在空间上共同发育,因此会出现同期沉积的砂体发育环境不同的现象。现就研究区内桥头砂岩的沉积特征研究做重点介绍。

3.1 岩石学特征

碎屑颗粒成分可以很好地指示沉积物的冲洗程度:物源相同的情况下,冲洗程度越高,石英含量越高,长石和岩屑含量越低。研究区桥头砂岩的岩性主要为石英砂岩、岩屑石英砂岩(30口井237块样品,图5,图6)。

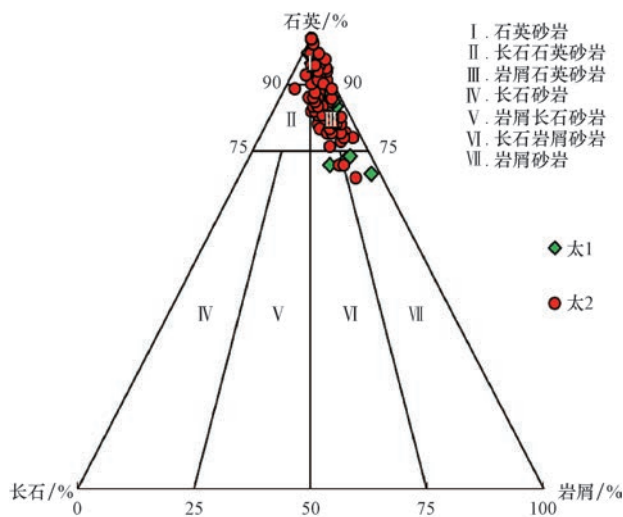


图5 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组桥头砂岩砂岩分类

Fig. 5 Ternary diagram showing classification of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

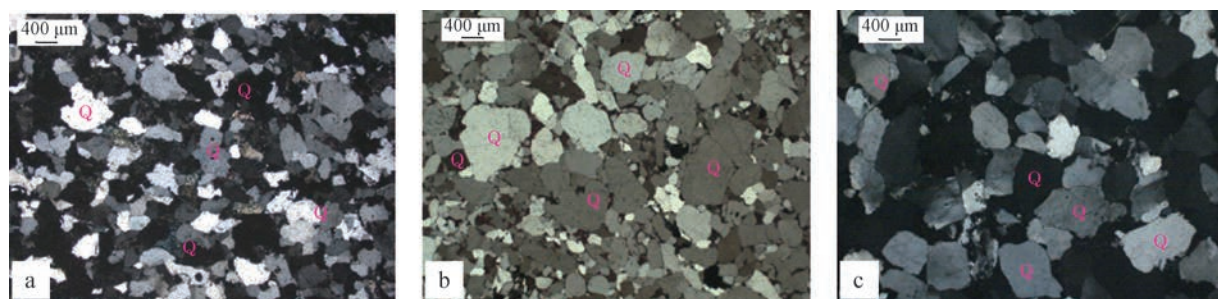


图6 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组桥头砂岩岩石类型图版

Fig. 6 Rock type chart board of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

a. L-21井,埋深1709 m,铸体薄片;b. L-33井,埋深1716 m,铸体薄片;c. L-18井,埋深1794 m,铸体薄片

石英含量为69%~100%,平均为88.0%;长石含量为0~10%,平均为3.6%;岩屑含量为0~28%,平均为8.6%,以变质岩岩屑为主,含少量岩浆岩岩屑、沉积岩岩屑等。说明沉积物经历了长时间的冲洗,成分成熟度高,此种岩石类型多见于滨浅海障壁-滨岸相砂岩沉积。

3.2 粒度结构特征

粒度分布特征是判别和解释砂体沉积环境的成因标志之一,并能直接提供砂体搬运和沉积时的水动力强度和作用方式。研究区桥头砂岩粒度总体较粗,最大粒径为0.15~6.5 mm,平均为1.55 mm,平均粒径为0.76 mm。粒度概率累计曲线表现为以滚动-跳跃组分为主的两段式,以粗砂岩和中-粗砂岩为主,具有较强的水动力条件。其中跳跃段呈明显两段特征,代表了双向水流沉积特征,为典型潮汐水流沉积产物,如潮汐水道、障壁砂坝及砂坪等(图7)。

砂岩的结构也可以指示沉积物的冲洗程度,颗粒的分选、磨圆越好,表明经历的冲洗时间越长。镜下薄

片显示桥头砂岩颗粒间以线接触和缝合接触为主,分选较好,次圆状和次棱角磨圆,颗粒支撑为主,杂基含量4%~37%,平均14.7%。中等-较强压实,孔隙结构好,以粒间溶孔、粒内溶孔与晶间孔为主(图8)。

3.3 沉积构造

沉积构造是沉积物沉积时水动力条件的直接反应。研究区桥头砂岩层理构造丰富,发育羽状层理、粒序层理、块状层理、波状层理、脉状层理及透镜状层理等(图9)。L-28井与L-30井底部发育冲刷面,其上可见砾石及泥砾沉积,代表潮汐水道的下切作用,代表着一种强的水动力条件。而羽状层理、粒序层理、波状层理、脉状层理及透镜状层理等复合韵律层理组合则指示为典型的潮汐影响沉积构造组合,是潮汐水流水动力条件不断变化的沉积响应。

3.4 标志物特征

岩心中的重矿物、动植物化石及生物扰动现象是判断沉积环境的重要依据。研究区桥头砂岩中黄铁矿

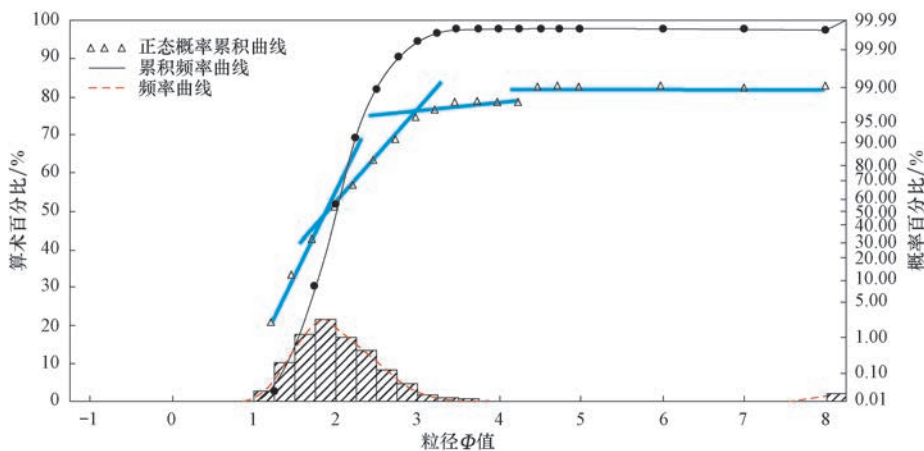


图7 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区桥头砂岩粒度统计(L-28井)

Fig. 7 Statistical analysis of grain size of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

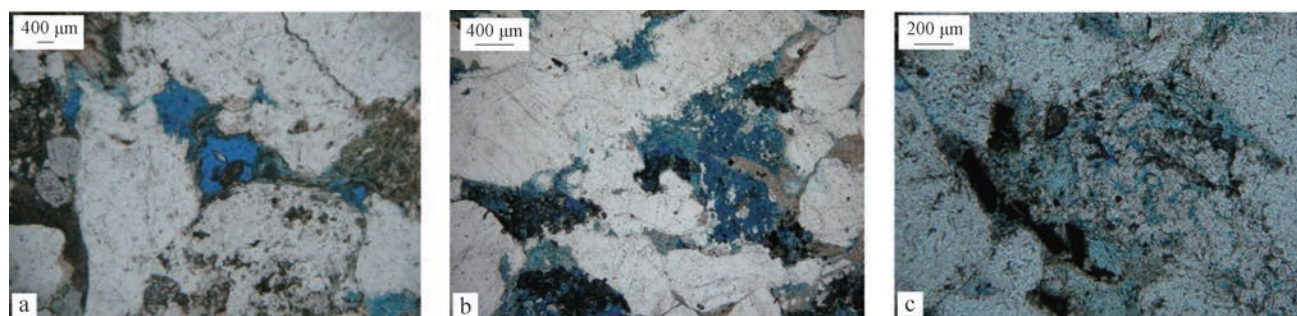


图8 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区桥头砂岩孔隙类型

Fig. 8 Pore types of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

a. L-21井,埋深1707.5 m,粒间溶孔,铸体薄片;b. L-33井,埋深1716.7 m,粒内溶孔,铸体薄片;c. L-18井,埋深1793.70 m,晶间孔,铸体薄片

结核发育,反映水下强还原环境。桥头砂岩上部发育的泥岩中有大量的植物茎叶化石及动物化石,如桫欏

栉羊齿化石及双壳类化石等,它们多见于弱水动力条件的潟湖沉积中(图9)。



图9 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区桥头砂岩典型沉积构造、化石及矿物特征

Fig. 9 Typical sedimentary structures, fossils and mineralogy of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

a. L-14井,埋深1706.2 m,羽状交错层理;b. L-28井,埋深1731.6 m,冲刷面;c. L-33井,埋深1723.4 m,粒序层理;d. L-11井,埋深1687.5 m,透镜状层理、平行层理;e. L-34井,埋深1692.1 m,波状层理、脉状层理;f. L-29井,埋深1652.2 m,桫欏栉羊齿化石;g. L-15井,埋深1997.35 m,双壳类化石;h. L-35井,埋深1789.6 m,黄铁矿结核

4 桥头砂岩展布特征及沉积环境

4.1 单井特征

从典型井 L-14 井与 L-29 井的沉积构造特征及岩性序列特征分析中可知,单井与地震资料(波形聚类属性中红色、棕色代表障壁砂坝及潮汐水道叠合发育区,砂体发育;蓝色、绿色代表潟湖及浅海陆棚发育区,砂体不甚发育)具有很好的对应关系(图 10)。L-14 井区地震波形聚类属性特征显示为红色和棕色叠合发育,而实钻录井、测井及岩心资料显示 L-14 井砂体发育很好,岩心上发育羽状交错层理的砂岩为主(图 9),GR 测井曲线特征呈现底部为多个漏斗形的叠合发育,为典型障壁砂坝的发育特征,上部为多个钟形的叠合发育,为典型的潮汐水道发育特征;L-29 井区地震波

形聚类属性特征显示为蓝色发育,岩心上发育杪楞栉羊齿化石(图 9),GR 测井曲线值整体较大,主要发育深灰色泥岩,局部可见指状砂岩(图 11)。

4.2 剖面特征

研究区桥头砂岩顶部发育稳定泥岩和灰岩层段,底部发育稳定煤层。该砂体有多种测井相类型,箱形、钟形、漏斗形、指状及多种形态的叠加复合型均有发育。不同井砂体厚度差别较大,北东-南西向连井剖面显示桥头砂岩呈中间厚两翼薄的特征;以底部稳定煤层拉平可见该砂体呈底平顶凸透镜状特征,与其对应的地震剖面上桥头砂岩亦显示明显透镜状特征(图 11),其与河道砂体剖面形态不同,证明为非河流-三角洲相沉积。

4.3 平面特征

桥头砂岩地震剖面显示透镜状特征。地震剖面显

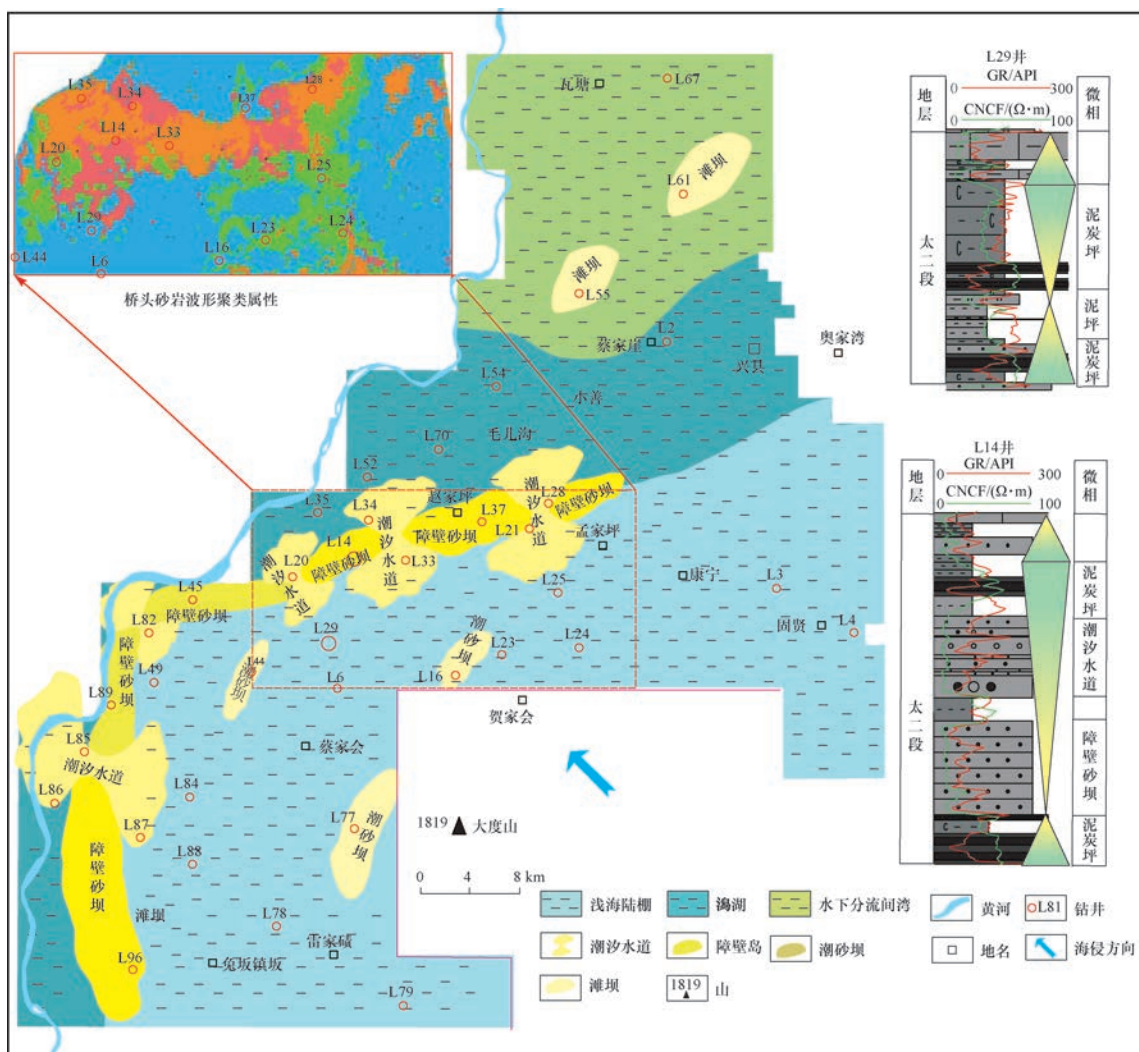


图 10 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区太原组(MSC1 下降半旋回)沉积相

Fig. 10 Sedimentary facies of the Taiyuan Formation(descending semi-circle of MSC1) in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

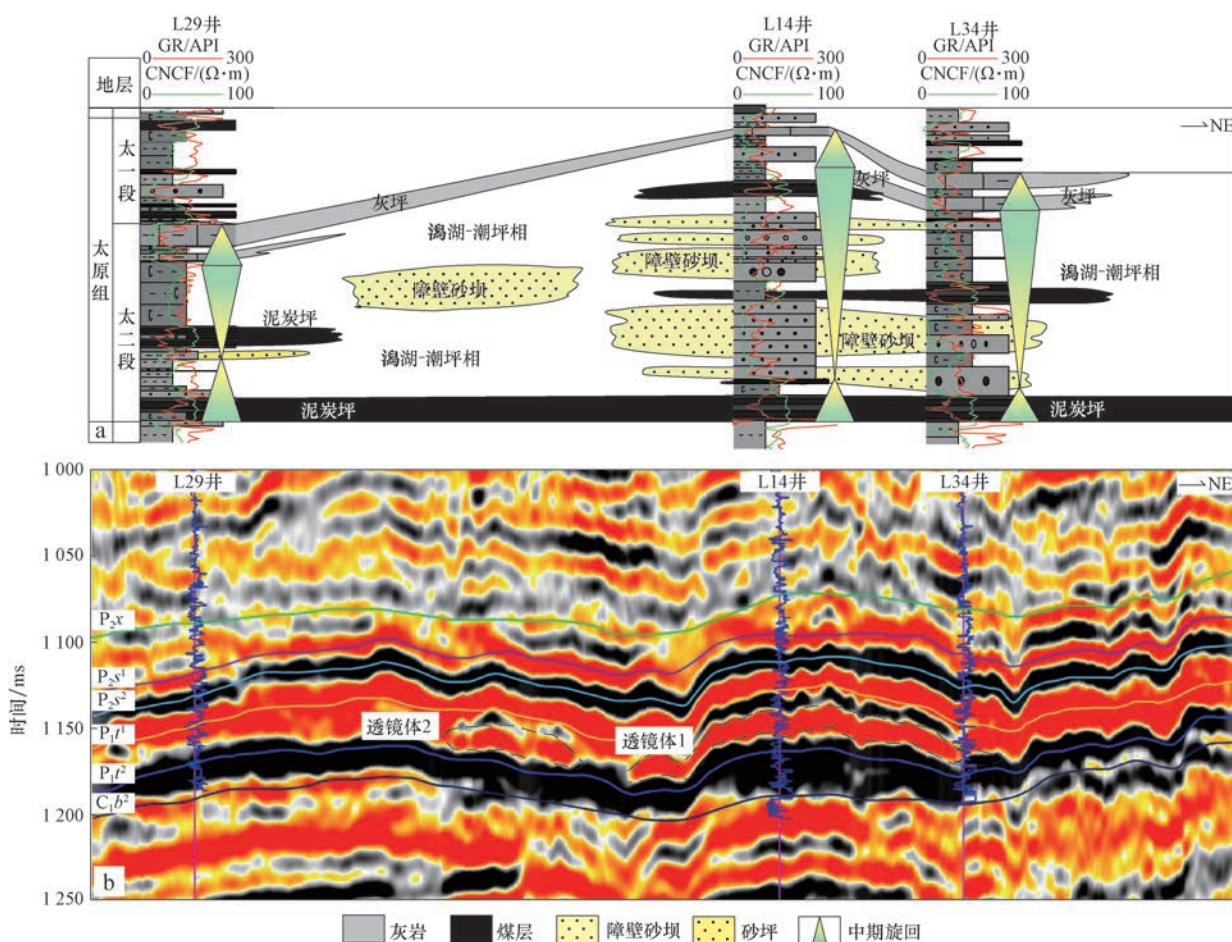


图 11 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区桥头砂岩剖面对比(具体位置见图 1 中 line 1)

Fig. 11 Correlation profile of Qiaotou sandstone in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin (see Fig. 1 for line 1 location)

a. 连井地质剖面; b. 连井地震剖面

示该砂体两翼和主体波形特征差异明显,砂体两翼呈强振幅低频强连续性反射特征,砂体中部呈强振幅高频透镜状和断续反射特征(图 11)。根据地震波形聚类属性图,该砂体波组特征平面呈弧形,平行岸线条带状分布,向东部减薄尖灭,向南北砂体两翼波组数呈渐变减少趋势。其形态特征与横切河道方向边部突变和顺河道方向连续分布的典型河道形态特征不同,为典型障壁砂坝条带状分布特征,进一步证明为非河流-三角洲相沉积。

4.4 沉积相及沉积环境

根据 102 口井的录井、测井、地震及岩心分析资料,结合 37 口井的岩心(太二段约 504m)观察描述,综合研究区桥头砂岩的粒度、成分、结构、沉积构造、标志物、剖面及平面特征等,认为桥头砂岩为典型浅海潮汐三角洲-障壁沉积。MSC1 旋回时期海水从东南部侵入,研究区内主要发育潮汐水道及障壁砂坝复合砂体,其呈北东-南西向展布,即平行于海岸线方向,沿 L-

85—L-45—L-33—L-28 井一线是研究区桥头砂岩发育最好的位置(图 10)。

张鹏飞等^[29-30]学者论证了华北石炭纪一二叠纪海侵性质为渐进型,而不是突发型海侵。由于陆表海盆地坡度极缓,海侵期间初始入侵的海水被分散开来,呈渐进型海侵,其后海侵范围继续扩大。在频繁海侵-海退作用下,发育了多期煤层和顶板海相灰岩。灰岩层下部有时还发育泥质沉积,直接盖在煤层之上,煤层、泥质沉积物和灰岩在相序上是连续的^[29]。在临兴地区,8+9 号煤层之上发育桥头砂岩,笔者认为在渐进型持续海侵的背景下,桥头砂岩与下伏煤层在相序上是连续的,在该地区桥头砂岩可以等同于“关家崖海相层”或者说是其一部分。将桥头砂岩解释为河流相或者三角洲相沉积明显存在问题,前文在桥头砂岩海相成因的相关论述中已有说明。

桥头砂岩作为研究区太原组主力产层已获勘探证实,现有钻井已揭示桥头砂岩含有优质储层,并已获得高产气流(图 10)。钻井和相关研究证实太原组圈闭

类型为以桥头砂岩为主要储层的岩性圈闭,其圈闭范围和闭合度主要受控于桥头砂岩的分布范围和砂体厚度。因此,确定桥头砂岩为潮汐水道-障壁砂坝体系成因类型为该区气藏圈闭的发现和优选奠定了基础,对于下一步气藏勘探和开发具有重要的指导意义。

5 结论

1) 根据高分辨率层序地层学原理,在层序界面及海泛面识别的基础上,将研究区太原组地层划分为1个完整的长期旋回和4个完整的中期旋回,建立了研究区的层序地层格架。

2) 研究区内桥头砂岩为障壁砂坝及潮汐水道砂体沉积,主要以粗粒、中-粗粒的石英砂岩及岩屑石英砂岩为主,孔隙发育,储层厚度大,物性好,砂体连片分布,属海相成因的优质储层,为该区太原组气藏主要储层类型。

3) 研究区桥头砂岩主要发育在MSC1下降半旋回中,其顶底以非储层段封堵,形成以砂体范围控制的条带状岩性圈闭,准确认识桥头砂岩成因类型并精刻画其边界,对指导临兴地区太原组圈闭和气藏的勘探开发具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 桂学智. 河东煤田晚古生代聚煤规律与煤炭资源评价[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1993: 1-200.
Gui Xuezhi. Late Paleozoic coal accumulation and evaluation of coal resources of Hedong Coalfield in Shanxi [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1993: 1-200.
- [2] 武法东, 陈钟惠, 张守良, 等. 华北晚古生代含煤盆地层序地层初探[J]. 中国煤田地质, 1994, 6(1): 11-18.
Wu Fading, Chen Zhonghui, Zhang Shouliang, et al. Primary study on the sequence stratigraphy of coalbearing strata of upper Paleozoic in north China [J]. China Coal Geology, 1994, 6(1): 11-18.
- [3] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 44-51.
Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, et al. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 44-51.
- [4] 樊太亮, 郭齐军, 吴贤顺. 鄂尔多斯盆地北部上古生界层序地层特征与储层发育规律[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 32-36.
Fan Tailiang, Guo Qijun, Wu Xianshun. Features of sequence stratigraphy and distribution regularities of reservoir in upper Paleozoic of north Ordos Basin [J]. Geoscience, 1999, 13(1): 32-36.
- [5] 陈洪德, 侯中健, 田景春, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化研究[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 16-22.
Chen Hongde, Hou Zhongjian, Tian Jingchun, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectono-sedimentary evolution in Ordos Basin during late Paleozoic [J]. Journal of Mineral Petrol, 2001, 21(3): 16-22.
- [6] 沈玉林, 郭英海, 李壮福, 等. 鄂尔多斯盆地北部苏里格庙含油气区上古生界层序地层研究[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 72-78.
Shen Yulin, Guo Yinghai, Li Zhuangfu, et al. Sequence stratigraphy study in upper Paleozoic of Suligemiao oil and gas-bearing area, north Ordos Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1): 72-78.
- [7] 沈玉林, 郭英海, 李壮福, 等. 鄂尔多斯盆地东缘本溪组-太原组层序地层特征[J]. 地球学报, 2009, 30(2): 187-193.
Shen Yulin, Guo Yinghai, Li Zhuangfu, et al. Sequence stratigraphy of Benxi-Taiyuan formation in eastern Ordos Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(2): 187-193.
- [8] 郭书元, 张广权, 陈舒薇, 等. 鄂尔多斯地区东北部大牛地气田晚石炭-早二叠世地层划分[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 697-705.
Guo Shuyuan, Zhang Guangquan, Chen Shuwei, et al. Stratigraphic division of Upper Carboniferous to Lower Permian from Daniudi Gas Field in east-northern of Ordos area [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 697-705.
- [9] 翟爱军, 邓宏文, 邓祖佑. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层与储层预测[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 336-340.
Zhai Aijun, Deng Hongwen, Deng Zuyou. Sequence stratigraphy and reservoir prediction of upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4): 336-340.
- [10] 李宝芳, 温显端, 李贵东. 华北石炭、二叠系高分辨率层序地层分析[J]. 地学前缘, 1999, 6(增刊): 81-94.
Li Baofang, Wen Xianduan, Li Guidong. High resolution sequence stratigraphy analysis on the Permo-Carboniferous in north China platform [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(Supple): 81-94.
- [11] 姜烨, 李宝芳. 鄂尔多斯盆地北部太原组上部灰岩段高分辨率层序地层分析[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 5-8.
Jiang Ye, Li Baofang. High-resolution sequence analysis on limestone member, upper Taiyuan formation, northeastern Ordos [J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(3): 5-8.
- [12] 郑荣才, 文华国, 梁西文. 鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序地层分析[J]. 矿物岩石, 2002, 22(4): 66-74.
Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Liang Xiwen. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy for upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Journal of Mineral Petrol, 2002, 22(4): 66-74.
- [13] 陈钟惠, 张年茂, 张守良, 等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系沉积体系和聚煤作用的时空演化[J]. 地球科学, 1989, 14(4): 357-366.
Chen Zhonghui, Zhang Nianmao, Zhang Shouliang, et al. The time and spatial evolution of sedimentary systems and coal accumulation centre in Late Paleozoic coal-bearing measures on the eastern margin of Ordos Basin [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1989, 14(4): 357-366.
- [14] 王华, 陈钟惠, 张守良, 等. 保德矿区太原组桥头砂岩沉积特征与煤聚集[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(2): 1-6.
Wang Hua, Chen Zhonghui, Zhang Shouliang, et al. The sedimentary characteristics of Qiaotou Sandstone body and its relation to coal accumulation of Taiyuan Formation in Baode Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(2): 1-6.

- [15] 姜烨,李宝芳,王绍昌,等.鄂尔多斯陆表海层序地层中的低位域沉积—以太原组上段桥头砂岩为例[J].现代地质,2001,15(4):425-430.
- Jiang Ye, Li Baofang, Wang Shaochang, et al. Low stand system tract sandstone in the sequence of epicontinental sea in Ordos: a case of Qiaotou sandstone in Upper Taiyuan Formation [J]. Geoscience, 2001, 15(4): 425-430.
- [16] 李勇,汤达祯,许浩,等.河东煤田北部典型砂岩体沉积演化特征[J].天然气工业,2013,33(2):22-27.
- Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Sedimentary evolution of typical sandstones distributed in northern Hedong Coalfield [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 22-27.
- [17] 郝蜀民,李良,尤欢增.大牛地气田石炭—二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J].中国地质,2007,34(4):606-611.
- Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. Permo-carboniferous paralic deposition systems in the Daniudi gas field and its near-source box-type gas accumulation forming model [J]. Geology in China, 2007, 34(4): 606-611.
- [18] 王付斌,李良,陈亚平.大牛地气田太原组沉积模式[J].天然气工业,2007,27(12):49-51.
- Wang Fubin, Li Liang, Chen Yaping. Depositional model of Taiyuan Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 49-51.
- [19] 庞军刚,李文厚,杨友运,等.鄂尔多斯盆地子洲地区上古生界沉积体系特征[J].天然气工业,2007,27(12):58-61.
- Pang Jianjun, Li Wenhui, Chen Yaping, et al. Features of upper Paleozoic depositional system in Zizhou region, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 58-61.
- [20] 冯文立,黄思静,黄培培,等.鄂尔多斯盆地东北部太原组砂岩储层特征[J].岩性油气藏,2009,01:89-93.
- Feng Wenli, Huang Sijing, Huang Peipei, et al. Sandstone reservoir characteristics of Taiyuan Formation in northeastern Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 89-93.
- [21] 郑文波,胡向阳,陈舒薇,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界沉积演化特征[J].沉积学报,2015,33(2):306-313.
- Zheng Wenbo, Hu Xiangyang, Chen Shuwei, et al. Characteristics of sedimentary evolution in the Upper Paleozoic, Daniudi gas field, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 306-313.
- [22] 付锁堂,田景春,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地晚古生代三角洲沉积体系平面展布特征[J].成都理工大学学报:自然科学版,2003,30(3):236-241.
- Fu Suotang, Tian Jingchun, Chen Hongde, et al. The delta depositional system distribution of Late Paleozoic era in the Ordos Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 30(3): 236-241.
- [23] 宋雪娟,李壮福,黄金连.神木—双山地区太原组桥头砂岩沉积特征及演化[J].中国煤炭地质,2011,23(4):14-18.
- Song Xuejuan, Li Zhuangfu, Huang Jinlian. Sedimentary characteristics and evolution of Qiaotou sandstone, Taiyuan Formation in Shenmu-Shuangshan area, Ordos Basin [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(4): 14-18.
- [24] 兰朝利,张君峰,陶维祥,等.鄂尔多斯盆地神木气田太原组沉积特征与演化[J].地质学报,2011,85(4):533-542.
- Lan Chaoli, Zhang Junfeng, Tao Weixiang, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the Upper Carboniferous Taiyuan Formation, Shenmu gasfield, northeastern Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 533-542.
- [25] 李勇,汤达祯,许浩,等.鄂尔多斯盆地东缘“翘板”支点影响下的含煤地层发育特征[J].煤炭学报,2012,37(S2):378-382.
- Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Characterization of coal bearing strata under influence of “seesaw” fulcrum in east margin of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 406-410.
- [26] Li Y, Tang D, Wu P, et al. Continuous unconventional natural gas accumulations of Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Linxing area, northeastern Ordos basin, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36, 314-327.
- [27] 刘焕杰,贾玉如,龙耀珍,等.海相成煤论进展[J].沉积学报,1992,10(3):47-56.
- Liu Huanjie, Jia Yuru, Long Yaozhen, et al. Progress in coal-forming theory of marine facies [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 47-56.
- [28] 刘焕杰,桑树勋,施健.成煤环境的比较沉积学研究—海南岛红树林潮坪与红树林泥炭[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,1997:1-203.
- Liu Huanjie, Sang Shuxun, Shi Jian. Comparative sedimentology research on coal forming environments—mangrove tidal flats and mangrove peats in the Hainan island of South China Sea [M]. Xuzhou Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 1997: 1-203.
- [29] 张鹏飞,邵龙义,代世锋.华北地台晚古生代海侵模式议[J].古地理学报,2001,3(1):15-24.
- Zhang Pengfei, Shao Longyi, Dai Shufeng. Discussions on the transgression model of the Late Palaeozoic in the North China Platform [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 15-24.
- [30] 张鹏飞.含煤岩系沉积学研究的几点思考[J].沉积学报,2003,21(1):125-128.
- Zhang Pengfei. Some considerations on coal measures sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 125-128.

(编辑 董立)