



· 鄂尔多斯盆地岩相古地理与沉积演化 ·

鄂尔多斯盆地延安地区本溪组高分辨率层序地层与沉积特征

范萌萌¹, 袁 珍^{2,3}, 李文厚⁴, 卜 军⁵

(1. 西安科技大学 地质与环境学院/陕西省煤炭绿色开采地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 3. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

5. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院/低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710021)

摘要 鄂尔多斯盆地延安地区油气资源储藏丰富,本溪组是重要的勘探层段之一,但其沉积环境复杂,砂体分布及沉积演化特征不明确,制约了该地区天然气勘探开发的进程。因此,加强对延安地区本溪组地质学方面的研究,尤其是层序地层、沉积特征及演化的研究,将对该地区的古地理重建、油气勘探及开发提供有利的理论支撑。以高分辨率层序地层学、沉积岩石学、测井地质学和沉积学为理论指导,研究了鄂尔多斯盆地延安地区晚古生代本溪组的地层和沉积特征,确定了其层序地层单元划分、等时地层格架、沉积相类型及演化过程。研究表明,在层序地层方面,本溪组内可以识别出1个长期基准面旋回、2个中期基准面旋回和多个短期旋回;在沉积相类型方面,识别出12种岩石类型和7种岩相组合,据此认为延安地区本溪组发育潮坪和障壁岛—泻湖沉积相,进而识别出潮道、砂坪、混合坪、泥坪、泥炭坪、障壁岛砂坝、泻湖泥等沉积微相;在沉积相展布方面,研究区西南部和南部以潮坪沉积为主,东北部和北部以障壁岛—泻湖沉积为主,本1段和本2段的沉积格局基本一致。

关键词 高分辨率层序地层学;沉积演化;本溪组;延安地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3 DOI:10.16152/j.cnki.xdxzbz.2024-06-010

High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

FAN Mengmeng¹, YUAN Zhen^{2,3}, LI Wenhong⁴, BU Jun⁵

(1. School of Geology and Environment/Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China;

4. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

5. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina/National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Field, Xi'an 710021, China)

Abstract The oil and gas resources in Yan'an area of Ordos Basin are abundant, and Benxi Formation is one of the important exploration intervals. However, its sedimentary environment is complex, and the distribu-

收稿日期:2024-09-28

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42102177);中国地质调查局矿产资源调查评价项目(121201011000150014)。

第一作者:范萌萌,女,博士,工程师,从事矿产普查与勘探研究,8268658@163.com。

通信作者:袁珍,女,博士,副教授,从事沉积学与储层地质学研究,cloud_yz@163.com。

tion of sand bodies and sedimentary evolution characteristics are not clear, which restricts the process of natural gas exploration and development in this area. Therefore, strengthening the study of geology of Benxi Formation in Yan'an area, especially the study of sequence stratigraphy, sedimentary characteristics and evolution, will provide favorable theoretical support for paleogeographic reconstruction, oil and gas exploration and development in this area. Based on the theories of high-resolution sequence stratigraphy, sedimentary petrology, logging geology and sedimentology, the stratigraphic and sedimentary characteristics of the late Paleozoic Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin were studied, and the sequence stratigraphic unit division, isochronous stratigraphic framework, sedimentary facies types and evolution process were determined. The results show that in terms of sequence stratigraphy, one long-term base-level cycle, two medium-term base-level cycles and multiple short-term cycles can be identified in Benxi Formation. In terms of sedimentary facies types, 12 types of lithofacies and 7 lithofacies combinations were identified. According to this, it is considered that tidal flat and barrier island-lagoon sedimentary facies were developed in Benxi Formation in Yan'an area, and sedimentary microfacies such as tidal channel, sand flat, mixed flat, mud flat, peat flat, barrier island and lagoon sediments were identified. In terms of sedimentary facies distribution, tidal flat deposits are mainly developed in the southwest and south, and barrier island-lagoon deposits are mainly developed in the northeast and north. The sedimentary patterns of Ben 1 section and Ben 2 section are basically consistent.

Keywords high-resolution sequence stratigraphy; sedimentary evolution; Benxi Formation; Yan'an area; Ordos Basin

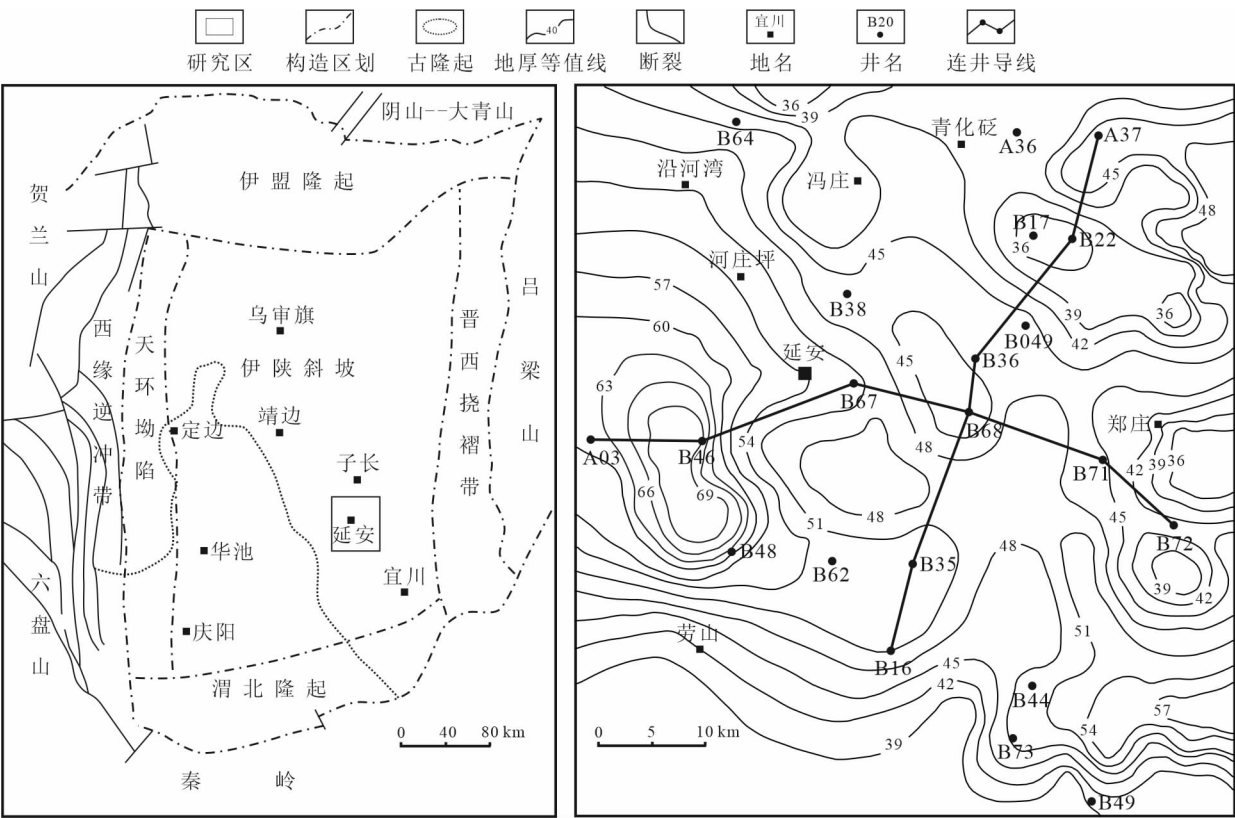
作为中国的第二大沉积盆地,鄂尔多斯盆地拥有丰富的石油、天然气、煤炭、地热等各种能源矿产,其资源分布广、矿产种类多,开采潜力十分巨大^[1-2]。上古生界地层在盆地内广泛分布,包含多个含气层位,拥有巨大的天然气储量和广阔的勘探开发前景,长庆油田等单位在盆地内已先后发现了多个大型天然气田,这些气田多位于盆地北部,盆地南部的天然气勘探进展则相对滞后^[3]。在层序地层学的研究领域,Cross 在对海相沉积地层层序深入分析的基础上,提出了高分辨率层序地层学,这一理论方法能够利用基准面旋回以及可容纳空间和沉积物供给量比值(A/S 值),对层序地层进行精细划分和表述^[4-6],自该学说被提出以来,在理论和技术方法上都获得了显著的进步与革新,并极大地促进了沉积学、储层沉积学、石油地质学等相关地质学科的进步,尤其是在提高地层对比精度方面展现出了独特的优势,不仅适用于海相沉积环境的研究,也能应用于陆相和海陆过渡相地层的分析。基于高分辨率层序地层学理论,许多研究人员对不同研究区域和地层进行了广泛的探索,这些研究涵盖了层序地层的划分、沉积环境的重建、沉积演化及储层特征的分析等方面,为各种矿产资源的勘探和开发提供了科学依据。基于鄂尔多斯盆地本溪组一下石盒子组的时间跨度大、地层发育完全但厚度薄、旋回性清晰等特点,郑荣才等人将该段地层

划分为3个超长期旋回、8个长期旋回和19个中期旋回,并分析了有利储集砂体在地层格架中的发育与展布^[7];李增学等人综合采用 Cross 倡导的高分辨率层序地层学和 Vail 的层序地层学理论,将鄂尔多斯盆地上古生界划分为9个长期旋回和4个超长期旋回,认为层序地层格架内盆地的聚煤作用不是一成不变的,而是会随着盆地充填演化发生动态迁移,同时聚煤作用的强度改变以及富煤单元的空间迁移受到沉积体系演变的影响^[8];张广权将大牛地气田本溪组—太原组划分为2个超长期旋回和6个长期旋回,认为等时地层格架对精细描述砂体分布规律和几何形态特征具有重要意义^[9]。研究人员对鄂尔多斯盆地本溪组的沉积环境已经有了比较统一的认识,认为本溪期发育陆表海盆地沉积环境,潮汐流是主要的水动力条件,但由于盆地内不同地区标志层发育不统一、岩性组合复杂等原因,不同学者在沉积相研究中也提出了不同的意见。李云与侯云东等人研究了鄂尔多斯盆地东部—东南部本溪组的沉积特征,研究区域有部分重叠,李云认为存在障壁海岸和陆棚沉积体系,砂坪和障壁岛砂体孔渗性能好,砂体发育受沉积相带展布的制约^[10],而侯云东认为当时为开敞型陆表海湾沉积环境,发育潮汐砂坝—三角洲复合沉积体系,砂体的发育受控于潮汐与河流互相影响的时空差异^[11];刘桂珍等人在高桥地区本溪组中识别出2

个三级层序,认为该区发育碎屑岩潮坪、混积潮坪和混积潟湖沉积,混积层系主要发育在 SQ2 海进体系域中^[12];王若谷等人认为盆地东南部石炭系一二叠系依次出现障壁海岸、碳酸盐台地、辫状河三角洲、曲流河三角洲和湖泊沉积体系^[13]。层序地层学和沉积学的研究密不可分,针对鄂尔多斯盆地延安地区本溪组,尚未有专门的研究将高分辨率层序地层学与沉积相及演化相结合,这一研究现状难以满足延安地区本溪组地质研究和油气勘探的需要。本研究针对鄂尔多斯盆地南部延安地区本溪组,以高分辨率层序地层学、沉积学、沉积岩石学等为理论指导,依托大量的测井数据、录井记录、岩心样本等基础资料,在层序地层格架建立和岩相组合识别的基础上深入探讨沉积充填特征,揭示沉积相展布规律,以期为后期的古地理重建、油气勘探开发等研究提供有利的支撑。

1 地质背景

延安地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡构造单



(a) 鄂尔多斯盆地构造区划及研究区位置 (b) 延安地区本溪组地厚及连井异线

图 1 鄂尔多斯盆地构造区划、研究区位置、延安地区本溪组地厚及连井剖面导线

Fig. 1 Tectonic division of Ordos Basin, the location of the study area, the thickness of Benxi Formation in Yan'an area and the connecting well conductor

2 高分辨率层序地层格架

2.1 层序界面和基准面旋回

运用高分辨率层序地层学原理,在区域地质背景、岩心观察、测井特征等资料的基础上,根据各级层序界面的特征^[21-26],在本溪组识别出1个超长期层序界面、1个长期层序界面、1个中期层序界面和1个最大海泛面。

2.1.1 超长期层序界面和超长期基准面旋回

超长期层序界面主要受控于构造运动的应力场转换,在地层上表现为区域不整合面,常有大套地层缺失,具有大幅穿时性,在测井曲线上表现为各项参数的突变^[7]。延安地区上古生界石炭系本溪组中识别出1个超长期层序界面,即石炭系本溪组与奥陶系马家沟组之间的加里东构造不整合面,代表着138 Ma的沉积间断,该界面之下为马家沟组的碳酸盐岩,界面之上为本溪组的障壁海岸沉积,沿不整合面存在厚薄不均的铝土岩风化壳。测井曲线特征亦发生突变,由不整合面之下的低自然伽马、低声波时差、高电阻的碳酸盐岩特征曲线,突变为不整合面之上的尖峰形极高自然伽马的铝土岩特征或泥质岩特征曲线,有时也会出现砂岩特征曲线^[22]。石炭系本溪组与其上覆二叠系太原组共同构成1个超长期基准面旋回,由2个长期基准面旋回组成,以发育滨浅海沉积为主,代表克拉通盆地裂陷阶段的陆表海沉积环境。

2.1.2 长期层序界面和长期基准面旋回

长期层序界面主要受控于构造幕式运动造成的基准面升降变化,表现为大型侵蚀面、岩性岩相的突变面等,在测井曲线上表现为相同或相邻沉积体系中海进-海退沉积序列的测井相转换面^[7]。延安地区上石炭统本溪组中识别出1个长期层序界面,即本溪组与太原组的分界,其形成受控于海西运动第三幕,古构造格局自此由南隆北倾转变为北隆南倾^[11]。该界面之下为本溪组下煤组,之上为太原组的厚层块状石灰岩^[24],下煤组在延安地区分布稳定,测井曲线上尖峰形低伽马及高声波时差特征明显,在界面之上突变为箱状低伽马、低声波时差、高电阻的碳酸盐岩特征。本溪组地层构成1个长期基准面旋回(LSC1),由2个中期基准面旋回组成,地层厚度约30~80 m,具有完整的水进-水退沉积旋回,旋回层序结构一般为向

上变深复变浅的对称型结构(C型),其上升半旋回厚度常大于下降半旋回,反映构造活动较为稳定、沉降幅度中等的缓慢海进-加速海退的地层旋回过程。

2.1.3 中期层序界面和中期基准面旋回

中期层序界面的形成与气候变化引起的基准面升降和物质供给有关,也受局部构造活动的影响,表现为砂层底部的冲刷面、煤层的顶底面、岩性岩相的变化面等,测井曲线上表现为同一沉积体系中相似沉积序列测井相的转换面^[7]。在延安地区本溪组地层中识别出1个中期层序界面,即晋祠砂岩底部,据此将本溪组划分为2个中期基准面旋回(MSC1、MSC2),一般均为向上变深又变浅的对称型(C型)旋回层序结构,每个中期旋回由2~4个向上变深的非对称型(A型)或对称型(C型)短期旋回叠置而成,大致对应潮坪砂岩—潮坪泥岩(含灰岩)—潮坪粉砂岩、煤层,或障壁砂岩—泻湖泥岩—潮坪泥岩、粉砂岩、煤层,代表一次较大幅度的海进-海退过程,是最具等时对比意义的层序^[26]。

2.1.4 短期层序界面和短期基准面旋回

短期层序界面特征与中期层序界面类似,但规模更小,发生频率更高,影响范围较小且变化很快,测井曲线上表现为韵律性沉积旋回的测井相组合转换面。短期基准面旋回主要反映同一或相邻沉积微相中岩石的粒序组合或沉积微相的组合,厚度为数米至十几米^[9],其结构类型有:①向上变深的非对称型(A型),形成于低可容纳空间增长率和高沉积物增长率的过补偿条件下,即 $A/S < 1$,以仅保留基准面上升半旋回,而基准面下降半旋回未保留为特征,在岩性上表现为砂(砾)岩—粉砂岩—泥岩、灰岩的沉积变化;②对称型(C型),形成于略高可容纳空间增长率和略低沉积物增长率的条件下,即 $A/S > 1$,较完整地保存了基准面上升半旋回和下降半旋回,具有二分时间单元分界线,发育由粗变细又变粗的韵律性旋回。

2.1.5 最大海泛面

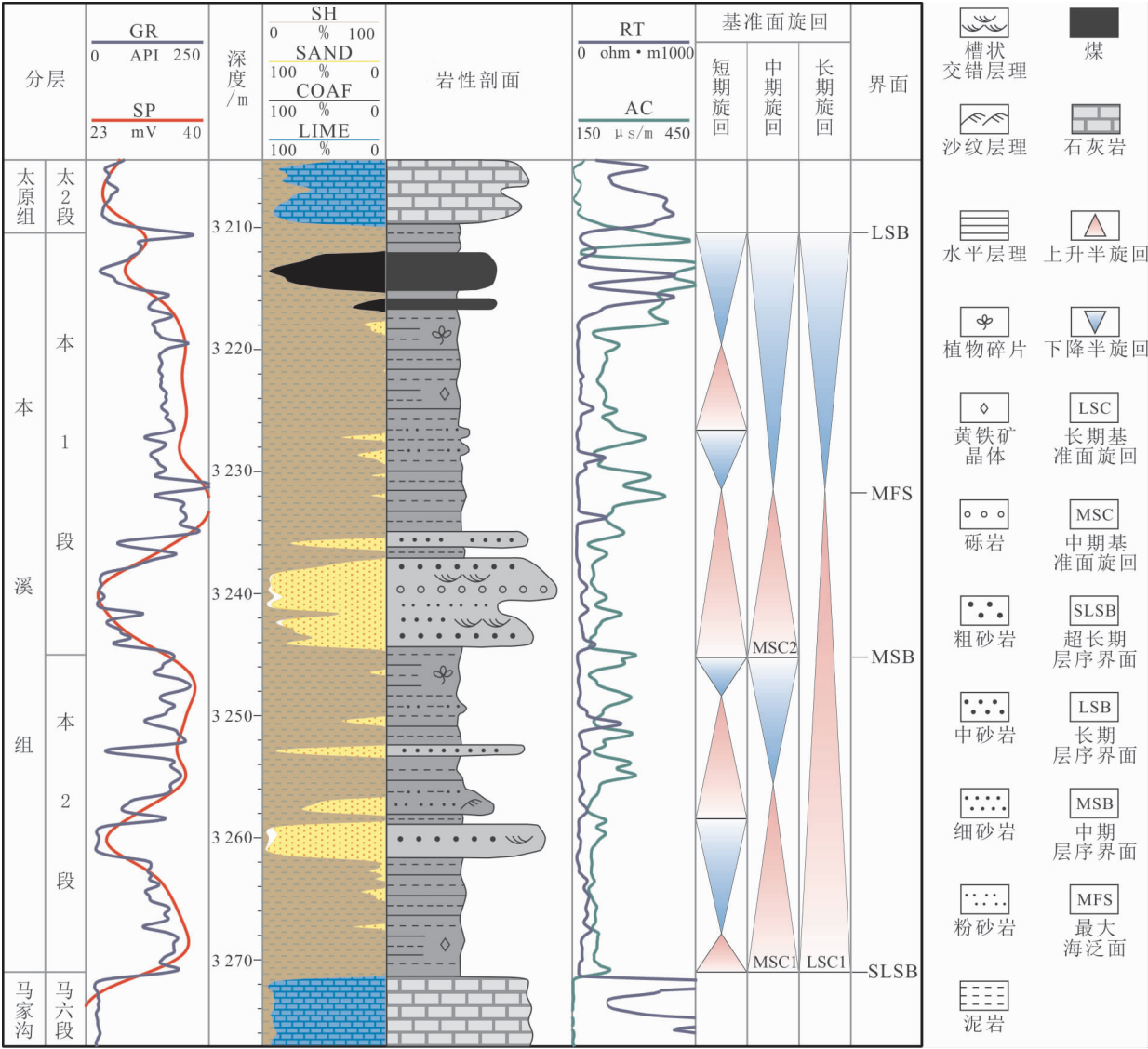
最大海泛面是指在海侵过程中,海平面上升至最高点时形成的沉积界面,它通常对应于一套地层中的最大沉积深度,此时沉积物的累积速率最低,之后海平面将开始下降或沉积速率增加^[7, 27]。本溪组的最大海泛面位于本溪组地层中上部,从岩性剖面上看,位于由粗到细正粒序沉积顶部的厚层泥岩(或灰岩)段,或者大套泥岩段的中上部,在测井

剖面上表现为低自然伽马、低声波时差、高电阻的特征,将测井曲线达到最低幅值而后折返的位置识别为最大海泛面^[28],该界面区域内分布广泛、产出稳定,是重要的区域等时对比标志。

2.2 层序地层格架

根据高分辨率层序基准面和旋回划分原则,

以及测井和钻井等资料,将延安地区本溪组划分为 1 个长期基准面旋回(LSC1)、2 个中期基准面旋回(MSC1、MSC2)和多个短期旋回。MSC1 和 MSC2 分别对应本 2 段和本 1 段(见图 2)。



注:数据来自 B48 井,钻井位置见图 1(b)。

图 2 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组基准面旋回划分

Fig. 2 Division on level cycle of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

3 高分辨率层序地层格架下的沉积充填

3.1 岩相类型与岩相组合

沉积岩的岩相一般是指在一定沉积条件和沉积过程下形成的岩性和沉积构造的组合,岩相分

析是沉积学的一个重要工具,可以根据岩相特征来判断水动力等沉积条件,推断并重建沉积环境和古地理背景^[29]。延安地区本溪组岩石类型丰富,发育有砾岩、砂岩、粉砂岩、泥页岩、石灰岩、煤等。通过对钻井岩心的颜色、岩性、结构和构造的观察,在研究区内共识别出 12 种岩相类型(见表 1、图 3)。

表 1 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组岩相类型分类

Tab. 1 Classification of lithofacies types of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

符号	岩相类型	岩性和结构构造	解释
Gm	块状层理砾岩相	浅灰色中细砾岩,结构成熟度中等-较好,底部可见冲刷面,块状层理	潮道等高能环境
Gt	槽状交错层理砾岩相	浅灰色中细砾岩,结构成熟度中等-较好,槽状交错层理	潮道等高能环境
Sm	块状层理砂岩相	浅灰色粗-细砂岩,结构成熟度中等,内部无明显粒序变化,无明显沉积构造,呈块状	强水动力条件
St	槽状交错层理砂岩相	浅灰色粗细砂岩,结构成熟度中等,局部含砾,可见正粒序,槽状交错层理	强水动力条件
Sp	板状交错层理砂岩相	浅灰色粗细砂岩,结构成熟度中等,板状交错层理	强水动力条件
Sf	羽状交错层理砂岩相	浅灰色细砂岩,局部含泥质夹层,具有羽状交错层理	潮汐环境
Sl	冲洗交错层理砂岩相	浅灰色中细砂岩,结构成熟度中等-较好,具有冲洗交错层理(低角度交错层理)	潮汐环境
Sc	潮汐层理粉细砂岩相	灰色粉—细砂岩和泥岩共生,形成潮汐层理(包括波状层理、透镜状层理、脉状层理)	潮汐作用以及水进、水退频繁交替
Fr	沙纹层理粉砂岩相	灰色粉砂岩、泥质粉砂岩,分选磨圆较差,含泥质纹层,呈沙纹层理	水动力条件较弱
M	泥岩相	暗色泥岩、粉砂质泥岩,含植物碎片和黄铁矿晶体,常见水平层理和块状层理	潟湖、泥坪、混合坪的低能还原环境
C	煤	黑色薄层煤层	泥炭坪
LI	石灰岩相	深灰色—灰色石灰岩、泥质灰岩,块状	潟湖、泥坪、混合坪的低能还原环境

沉积岩的岩相组合是指按照一定模式叠置在一起的若干种岩相的组合,反映的是特定的沉积环境和条件,是沉积学研究的重要手段^[30]。本次研究在延安地区本溪组地层中划分出 7 种岩相组合。

组合 1 (Gm-Gt-Sm-St-Sp-Sf-M): 底部发育块状和槽状交错层理中-细砾岩,砾石主要是石英。砾岩底部有时可见冲刷面,砾岩之上发育块状层理、槽状和板状交错层理粗-细砂岩,上部发育羽状交错层理砂岩和泥岩,正粒序。该岩相组合常在潮道沉积序列里出现[见图 3(a)]。

组合 2 (St-Sf-Sc-Fr): 下部发育槽状交错层理砂岩,其上发育羽状交错层理砂岩,向上过渡为潮汐层理粉—细砂岩以及沙纹层理粉砂岩,正粒序,

该岩相组合常在砂坪沉积序列里出现〔见图 3(b)〕。

组合 3 (Sc-Fr-M): 下部发育潮汐层理粉—细砂岩,其上为沙纹层理粉砂岩,向上过渡为泥岩,该岩相组合常在混合坪沉积序列里出现〔见图 3(b)〕。

组合 4 (M-Fr-M-C): 常见泥岩与沙纹层理粉砂岩互层,泥岩中可见水平层理和植物碎片,部分可见薄煤层,该岩相组合常在泥坪沉积序列里出现[见图 3(b)、(d)]。

组合 5 (M-C): 厚层泥岩中夹有煤层,泥岩常具水平层理,煤层较厚,该岩相组合常在泥炭坪沉积序列里出现〔见图 3(d)〕。

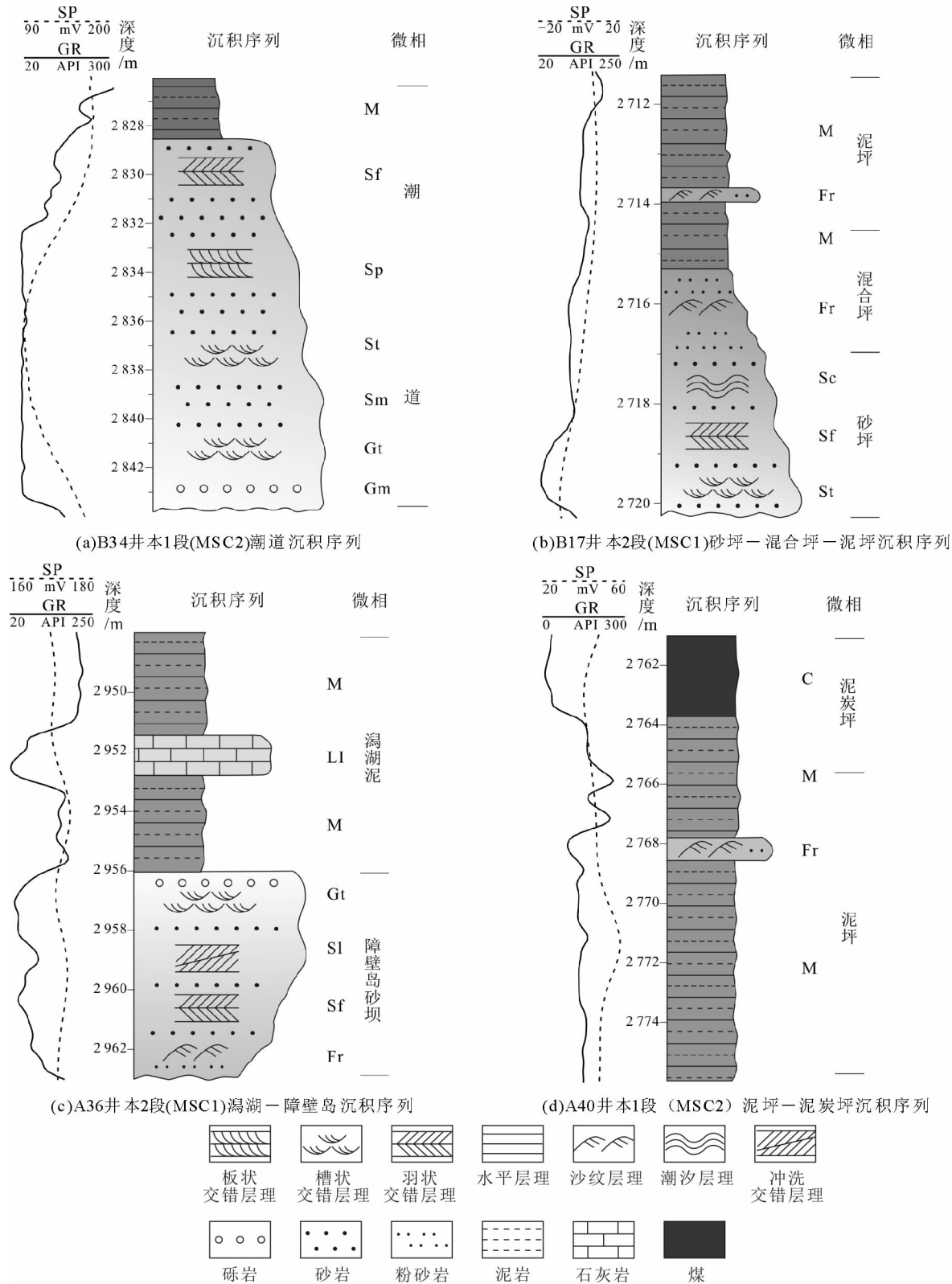


图 3 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组岩相组合

Fig. 3 Lithofacies combination of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

组合 6 (Fr-Sf-Sl-Gt):底部常出现砂纹交错层理粉砂岩,向上过渡为羽状交错层理砂岩和冲洗交错层理砂岩,顶部常发育石英细砾岩,砾石成分单一,反映了高能水动力冲刷环境,逆粒序,该组合常在障壁岛沉积序列里出现[见图 3(c)]。

组合 7 (M-LI-C-M):以厚层泥岩沉积为主,可

见灰岩和煤的薄夹层,该岩相组合常在潟湖沉积序列里出现〔见图3(c)〕。

3.2 沉积相特征

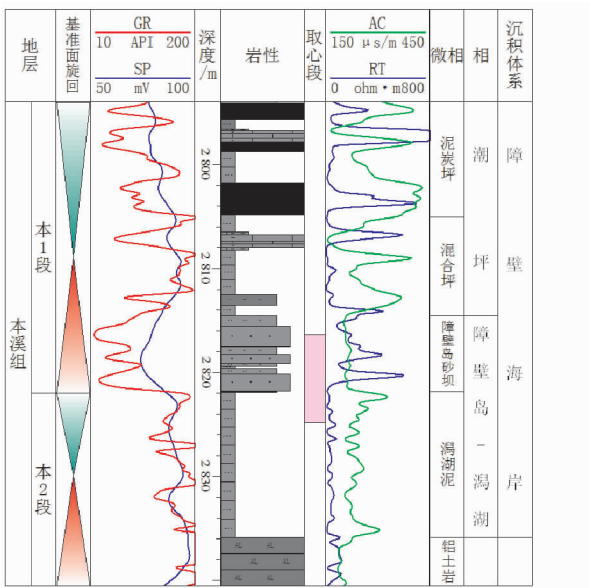
研究认为,鄂尔多斯盆地延安地区本溪组发育障壁海岸沉积体系,在其中识别出2种沉积相和7种沉积微相(见表2,图4)。

表2 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组沉积相类型
Tab.2 Sedimentary facies types of Benxi Formation in Yan' an area of Ordos Basin

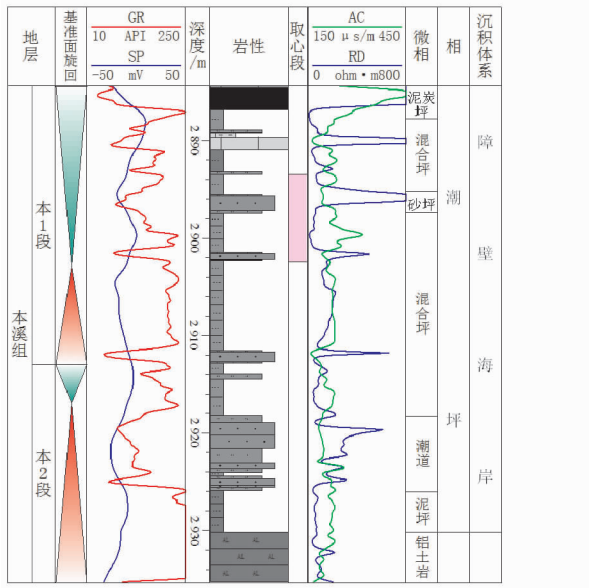
沉积体系	沉积相	沉积微相
障壁海岸	潮坪	潮道、砂坪、混合坪、泥坪、泥炭坪
	障壁岛—潟湖	障壁岛砂坝、潟湖泥

3.2.1 潮坪沉积

晚石炭世鄂尔多斯盆地地形较平坦且水体相

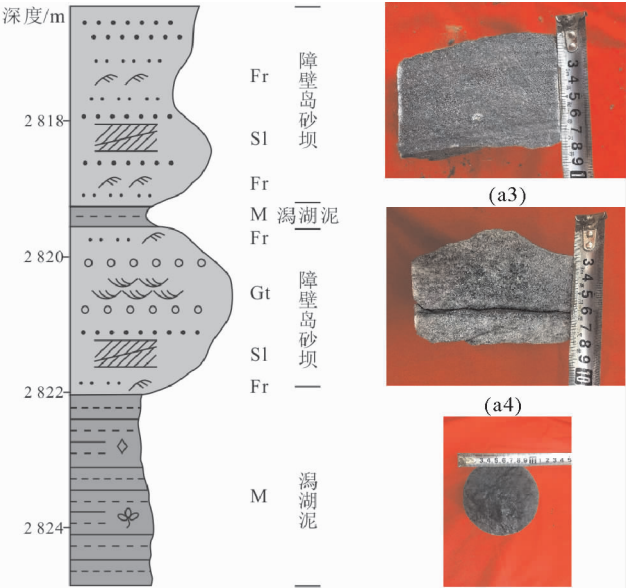


(a1)

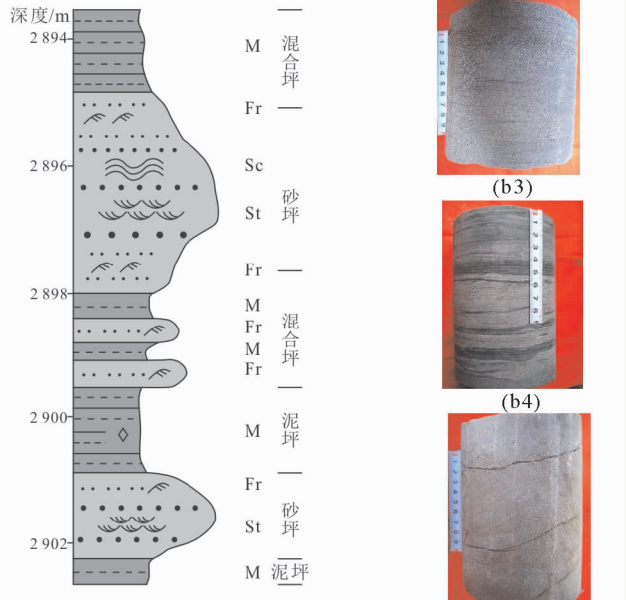


(b1)

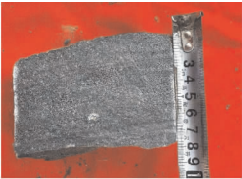
对较浅,在宽阔的陆表海近海区域形成了大范围的潮坪沉积。根据潮汐冲洗程度和沉积物粒度大小,延安地区本溪组的潮坪沉积可分为潮道、砂坪、混合坪、泥坪和泥炭坪微相。潮道是潮汐水流向陆地方向的延伸,属于高能水动力环境,沉积物厚度大且粒度粗。砂坪形成于平均低潮线附近,沉积物粒度较粗,主要是砂质沉积。泥坪形成于平均高潮线之上,沉积物粒度细,主要是泥质沉积。混合坪形成于平均低潮线和高潮线之间,主要发育砂泥互层沉积。垂向上砂坪、混合坪、泥坪相互叠置共生。本溪期末,区域海平面下降,大部分地区淤浅形成泥炭坪,发育厚度不一的煤层。



(a2)



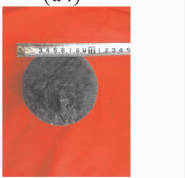
(b2)



(a3)



(a4)



(a5)



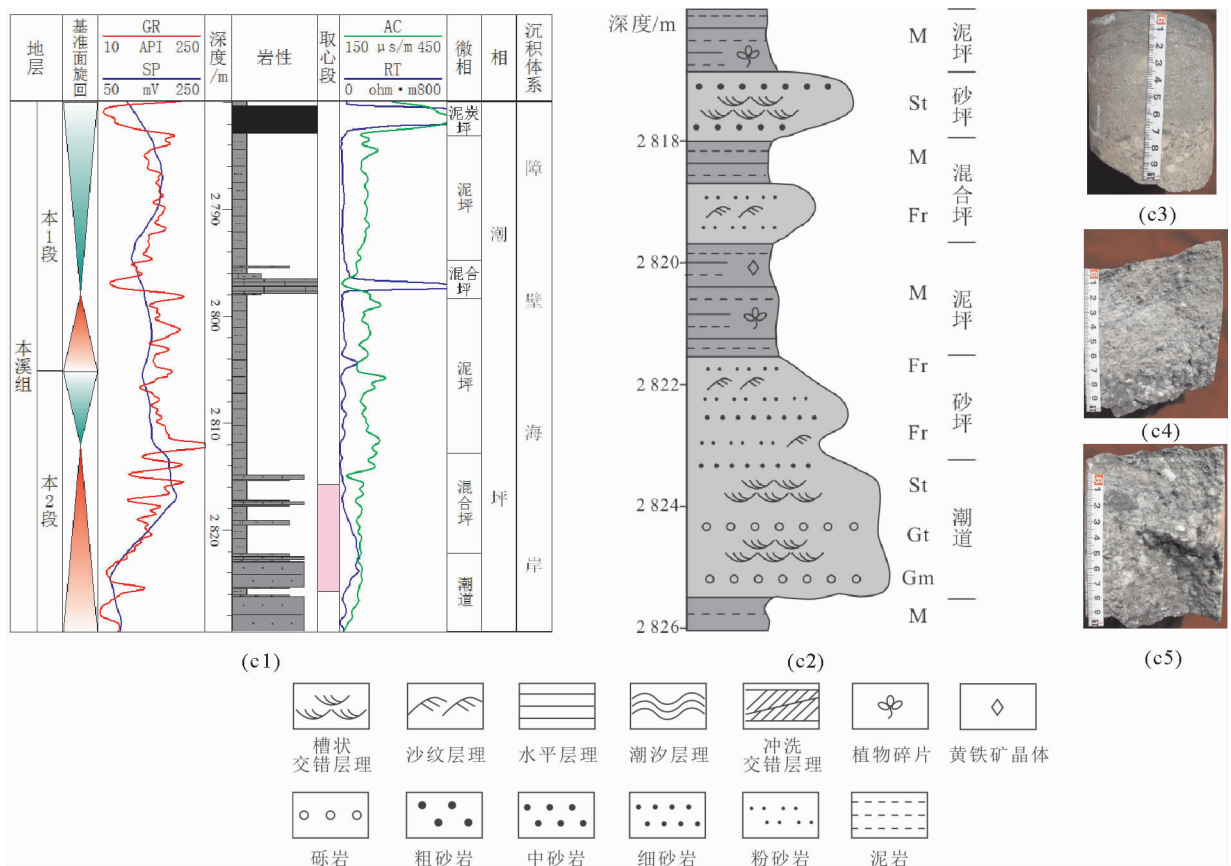
(b3)



(b4)



(b5)



(a1) B49 井本溪组沉积序列; (a2) B49 井本溪组取心段素描; (a3) B49 井, 2 819.7 m, 细砂岩, 冲洗交错层理; (a4) B49 井, 2 821 m, 细砾岩, 槽状交错层理; (a5) B49 井, 2 823.5 m, 泥岩, 含植物碎片; (b1) B73 井本溪组沉积序列; (b2) B73 井本溪组取心段素描; (b3) B73 井, 2 895.2 m, 粉-细砂岩, 沙纹层理; (b4) B73 井, 2 896 m, 细砂岩夹泥质条带, 潮汐层理; (b5) B73 井, 2 901.5 m, 细砂岩, 槽状交错层理; (c1) B44 井本溪组沉积序列; (c2) B44 井本溪组取心段素描; (c3) B44 井, 2 823.5 m, 块状层理砾岩和砂岩过渡为沙纹层理粉砂岩, 正粒序; (c4) B44 井, 2 824.6 m, 中砾岩, 槽状交错层理; (c5) B44 井, 2 825.1 m, 中砾岩, 块状层理

图 4 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组典型沉积序列

Fig. 4 Typical sedimentary sequence of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

潮道沉积主要由中-细砾岩和中-粗砂岩组成。砾岩中砾石成分较单一, 主要是矿物石英, 粒径 2~40 mm, 分选性中等-好, 磨圆度次棱角状-次圆状, 孔隙式-基底式胶结, 整体粒序不明显, 或略显正粒序, 多发育块状层理和槽状交错层理。砂岩主要类型是石英中-粗砂岩, 常发育块状层理、槽状或板状交错层理和羽状交错层理, 反映了在潮汐影响下的高能沉积环境。砂体底部常发育冲刷面, 存在滞留沉积。多期潮道沉积可在垂向上相互叠置^[13]。形成块状层理砾岩相 (Gm)—槽状交错层理砾岩相 (Gt)—块状层理砂岩相 (Sm)—槽状交错层理砂岩相 (St)—板状交错层理砂岩相 (Sp)—羽状交错层理砂岩相 (Sf)—泥岩相 (M) 的完整或不完整的叠加组合。

砂坪沉积主要由浅灰色石英中-细砂岩、粉砂

岩组成, 砂岩结构成熟度中等, 粒序特征不明显或具正粒序, 常见槽状交错层理、羽状交错层理、潮汐层理等。粉砂岩中常见沙纹层理、潮汐层理、变形层理等。潮汐层理包括透镜状层理、脉状层理、波状层理等, 反映涨潮、落潮过程中, 由于水动力强弱的差异而造成的沉积物中砂泥含量的不同^[12]。砂岩厚度变化较大, 自然伽马曲线多为中低幅值的齿状箱状或指状。垂向岩相序列为槽状交错层理砂岩相 (St)—羽状交错层理砂岩相 (Sf)—潮汐层理粉-细砂岩相 (Sc)—沙纹层理粉砂岩相 (Fr) 的完整或不完整的叠加组合。

混合坪沉积主要由细砂岩、粉砂岩和泥岩的薄互层组成, 局部可见薄层或透镜状石灰岩夹层和薄煤层, 发育潮汐层理、沙纹层理、水平层理等沉积构造。测井曲线变化较大, 砂岩自然伽马呈

低值的指形或箱型,粉砂岩和泥岩呈低值指形或平滑状,薄煤层呈尖峰状低伽马和高声波时差,石灰岩呈较低自然伽马和高电阻。垂向岩相序列为潮汐层理粉—细砂岩相(Sc)—沙纹层理粉砂岩相(Fr)—泥岩相(M)的完整或不完整的叠加组合。

泥坪沉积主要是厚层泥岩夹薄层粉砂岩,局部有薄层石灰岩和薄煤层,发育水平层理、透镜状层理等,自然伽马曲线多呈低幅齿状,薄煤层呈低值尖峰状。典型的岩相序列为泥岩相(M)—沙纹层理粉砂岩相(Fr)—泥岩相(M)—煤(C)的完整或不完整的叠加组合。

泥炭坪主要沉积有厚层泥岩、碳质泥岩和煤,典型的岩相序列为泥岩相(M)—煤(C)的叠加组合。

3.2.2 障壁岛—潟湖沉积

障壁岛通常表现为若干组平行于海岸线的狭长砂砾质岛屿,垂向上与潟湖沉积相互叠置。多分布于延安地区北部和东北部。本溪组障壁岛沉积主要为灰白色石英细-粗砂岩,顶部可出现砾岩。砾岩多为细-中砾石英砾岩,分选性较好-中等,磨圆度次圆-次棱状,常发育槽状交错层理。石英砂岩以细-中砂岩为主,分选性中等-好,磨圆度次圆-次棱状,颗粒支撑,多见泥质胶结,粒序变化不明显或具逆粒序,发育羽状交错层理、冲洗交错层理等,砂岩底部可见沙纹层理粉砂岩,与下伏泥岩呈过渡接触。垂向岩相序列为沙纹层理粉砂岩相(Fr)—羽状交错层理砂岩相(Sf)—冲洗交错层理砂岩相(Sl)—槽状交错层理砾岩相(Gt)的完整或不完整的叠加组合。

潟湖是处于海岸与障壁岛之间,被障壁岛所遮挡的半封闭水域,水动力较弱,垂向上与障壁岛沉积相互叠置。潟湖中主要沉积厚层暗色泥岩和碳质泥岩,发育块状层理和水平层理,可见植物化石,含黄铁矿晶体,反映封闭还原的沉积环境,局部可见透镜状粉砂岩、薄层石灰岩和薄层煤,石灰岩一般小于3 m,多为灰黑色泥晶灰岩。测井曲线泥岩段较平滑,呈低幅线形,薄煤层呈尖峰状低伽马和高声波时差,石灰岩呈较低自然伽马和高电阻。常见的垂向岩相序列为泥岩相(M)—石灰岩相(Li)—煤(C)—泥岩相(M)的完整或不完整组合。

4 层序格架下的沉积相展布与演化

构造运动和气候变化是海相、湖相层序地层发育的主要影响因素^[31-34],鄂尔多斯盆地上古生界沉积演化历史历经了3个沉积充填阶段,每个阶段都反映了不同的地质环境和沉积特征,展现了区域内复杂的地质历史和沉积演变过程。晚石炭世本溪组至早二叠世太原期属于陆表海盆地沉积充填阶段,主要发育碳酸盐岩与碎屑岩的混合沉积^[35-37]。在晚石炭世,鄂尔多斯盆地内存在中央古隆起,将盆地分为东西2个海域,延安及周边地区处于中央古隆起以东的华北海区域,地形西南高东北低,坡度较为平缓,没有明显的滨岸坡折带^[11,38-39],均匀沉积了一套障壁海岸沉积,纵向剖面上潮坪—障壁岛—潟湖沉积物相互叠置,对下伏奥陶系古风化面进行填平补齐。

本溪组地层构成1个长期基准面旋回(LSC1),可细分为2个中期基准面旋回(MSC1、MSC2),其中,MSC1相当于本溪组本2段,为上古生界最底部层序,沉积于奥陶系的风化壳之上,其上升半旋回的底部是铝土岩,之上发育障壁岛—潟湖沉积或者潮坪的砂泥岩沉积,整体向上变细,其下降半旋回发育障壁岛—潟湖沉积或者潮坪的砂泥岩沉积,进积作用不明显,呈现加积特征,体现缓慢海进,局部海退的特点^[11]。MSC2相当于本溪组本1段,其上升半旋回开始于晋祠砂岩或相对应的砂泥岩,其上发育混合坪—泥坪沉积或潟湖泥质沉积,其下降半旋回结束于泥炭坪的煤层〔见图5(a)、(b)〕。MSC2的海泛面是本溪组长期旋回(LSC1)的最大海泛面(见图2)。

由东西向沉积相连井剖面可以看出,延安地区东部主要发育潮坪沉积相,西部主要发育障壁岛—潟湖沉积相,自本2段到本1段,相界线向西移动,本2段砂体相对较为发育,连通性一般,B46井和B67井附近砂体最为发育,砂体厚度4~11 m,为潮道沉积,两期潮道砂体相互叠置,厚度大但东西向延伸距离较短〔见图5(a)〕。由南北向沉积相连井剖面可以看出,障壁岛—潟湖沉积相在延安地区北部大面积发育,南部在本2段有潮坪相出现,自本2段到本1段,相界线向南移动,砂体均不甚发育,厚度薄,延伸距离短,连通性差〔见图5(b)〕。

沉积相平面展布上,本 1 段和本 2 段沉积格局相似,受中央古隆起的影响,延安地区北部和东北部发育障壁岛—潟湖沉积,而南部和西南部发育潮坪沉积,由西向东潮汐作用增强。障壁岛沿南北方向近平行展布,间隔以泥质沉积为主的潟湖亚相〔见图 6(a)、(b)〕。本 2 段砂体较本 1 段更为发育,南部和西南部发育潮道和砂坪砂体, B46 井、B67 井和 B73 井附近砂体最厚,但连通性

一般,北部和东北部发育障壁岛砂坝,砂体多呈孤立状,连通性较差〔见图 6(b)〕。由于海平面的上升,本 1 段沉积时,海侵加剧,相带整体向西移动,潮坪和障壁岛—潟湖沉积的界线向西南部迁移,潮坪沉积面积缩减, B48 井、B49 井和 B22 井附近砂体较厚,但无论是砂坪还是障壁岛砂坝,都多呈孤立补丁状分布,砂体厚度明显变薄,分布范围变小,连通性差〔见图 6(a)〕。

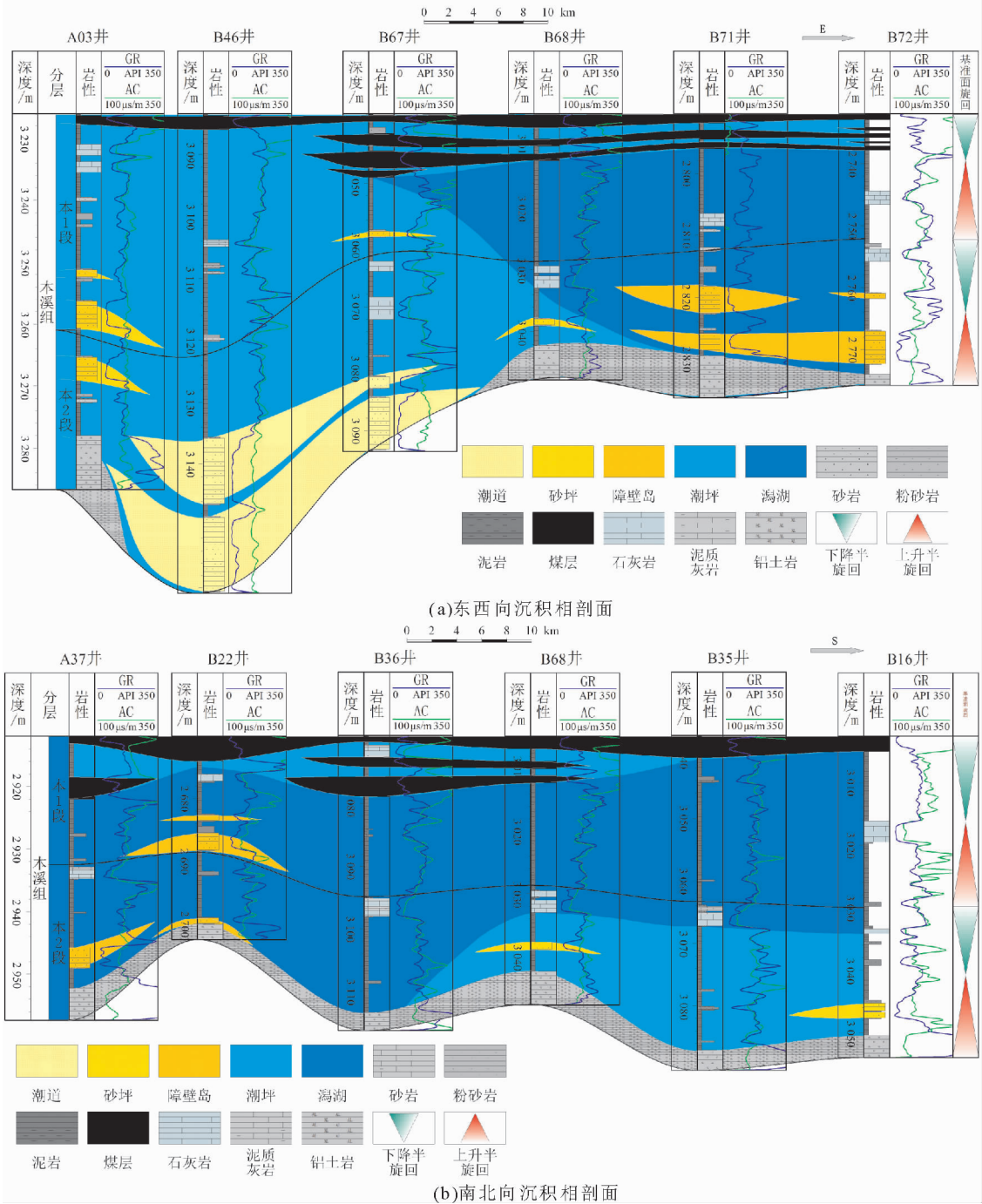
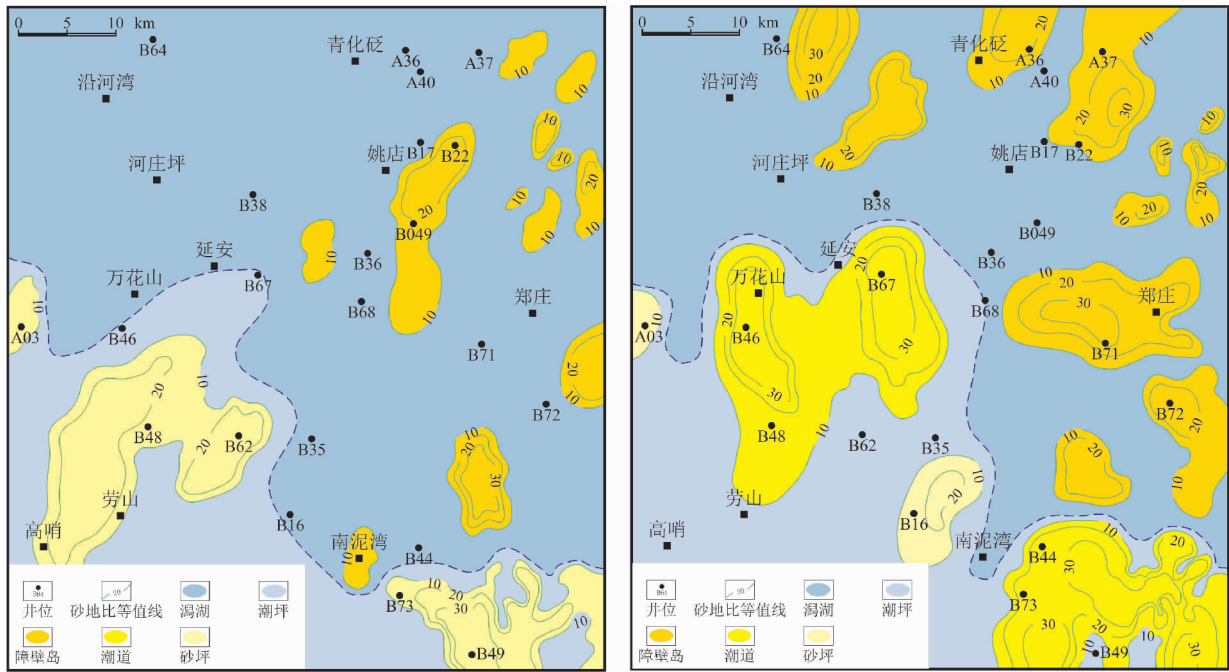


图 5 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组沉积相连井剖面

Fig. 5 Sedimentary connection well profile of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin



(a) 本1段(MSC2)沉积相展布

(b) 本2段(MSC1)沉积相展布

图6 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组沉积相展布

Fig.6 Sedimentary facies distribution of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin

5 结论

1)在延安地区本溪组地层中识别出1个超长期层序界面、1个长期层序界面和1个中期层序界面,据此将本溪组划分为1个长期基准面旋回(LSC1)、2个中期基准面旋回(MSC1、MSC2)和多个短期旋回。

2)在延安地区本溪组钻井岩芯中识别出12种岩相类型和7种岩相组合,认为本溪组发育障壁海岸沉积体系,识别出2种沉积相,即潮坪和障壁岛—潟湖沉积相,以及7种沉积微相,即潮道、砂坪、混合坪、泥坪、泥炭坪、障壁岛砂坝和潟湖泥。

3)延安地区本1段和本2段沉积格局相似,北部和东北部发育障壁岛—潟湖沉积,南部和西南部发育潮坪沉积。

参考文献

[1] 王香增. 延长探区天然气勘探重大突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 1-9.
WANG X Z. Major breakthrough of gas exploration in Yangchang blocks and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 1-9.

[2] 杨华, 刘新社, 闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来

构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 174-183.

YANG H, LIU X S, YAN X X. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 174-183.

[3] 周进松, 王念喜, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 34-41.

ZHOU J S, WANG N X, ZHAO Q P, et al. Natural gas accumulation characteristics in the Upper Paleozoic in the Yanchang exploration block of southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 34-41.

[4] 张磊夫, 吴陈君, 苏洋, 等. 爱尔兰克莱尔盆地 Ross Sandstone 组深水浊积岩露头高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 165-174.

ZHANG L F, WU C J, SU Y, et al. High resolution sequence stratigraphy of the Ross Sandstone deepwater-turbidite outcrops in the Clare Basin, Ireland[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 165-174.

[5] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派: 高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97.

DENG H W. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U. S.: High-resolution se-

- quence stratigraphy[J]. *Oil & Gas Geology*, 1995, 16(2):89-97.
- [6] 吴颖,张金功,尹锦涛,等.鄂尔多斯盆地富黄探区三叠系延长组高分辨率层序地层格架与古地貌恢复[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(1):132-143.
- WU Y, ZHANG J G, YIN J T, et al. The high resolution sequence stratigraphic framework and palaeo-geomorphologic restoration of Yanchang Formation in triassic system in Fuhuang exploration area of Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(1):132-143.
- [7] 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 R C, WEN H G, LIANG X W. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy for Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4):66-74.
- [8] 李增学,韩美莲,魏久传,等.鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序划分与煤聚积规律分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(1):5-12.
- LI Z X, HAN M L, WEI J C, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation law of upper Paleozoic erathem in Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(1):5-12.
- [9] 张广权.鄂尔多斯盆地大牛地气田本溪组—太原组高分辨率层序地层学研究[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5):915-922.
- ZHANG G Q. Study on the high-resolution sequence stratigraphy of Benxi Formation to Taiyuan Formation in Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5):915-922.
- [10] 李云,张建伍,李晶,等.鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组沉积微相特征及其对天然气富集控制作用[J]. *西北地质*, 2014, 47(2):216-222.
- LI Y, ZHANG J W, LI J, et al. A study on sedimentary microfacies of Benxi Formation and its controlling effect on gas enrichment in Yanchang district of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(2):216-222.
- [11] 侯云东,陈安清,赵伟波,等.鄂尔多斯盆地本溪组潮汐-三角洲复合砂体沉积环境[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4):393-401.
- HOU Y D, CHEN A Q, ZHAO W B, et al. Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(4):393-401.
- [12] 刘桂珍,高伟,尉加盛,等.混积层系沉积、层序特征:以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(3):382-392.
- LIU G Z, GAO W, WEI J S, et al. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed siliclastic-carbonate depositional system: Case study of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(3):382-392.
- [13] 王若谷,周进松,杜永慧,等.鄂尔多斯盆地东南部延安气田石炭系一二叠系沉积演化模式[J]. *地质科学*, 2021, 56(4):1088-1105.
- WANG R G, ZHOU J S, DU Y H, et al. Deposition evolution model of the Carboniferous-Permian in Yan'an gas field, the southeastern Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(4):1088-1105.
- [14] 邵龙义,董大啸,李明培,等.华北石炭一二叠纪层序-古地理及聚煤规律[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8):1725-1734.
- SHAO L Y, DONG D X, LI M P, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous-Permian in the North China Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8):1725-1734.
- [15] 侯中帅,陈世悦,王越,等.鄂尔多斯盆地东缘保德地区上古生界层序地层与沉积相特征[J]. *古地理学报*, 2018, 20(2):231-243.
- HOU Z S, CHEN S Y, WANG Y, et al. Characteristics of sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Upper Paleozoic in Baode area, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(2):231-243.
- [16] 王慧玲,姚泾利,石小虎,等.鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系地球化学特征及其地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(8):1502-1517.
- WANG H L, YAO J L, SHI X H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Taiyuan Formation bauxite series in the Longdong area of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8):1502-1517.
- [17] 曹茜,李涵,潘星,等.前石炭纪古地貌对铝土岩气藏控制作用:以鄂尔多斯盆地庆阳古隆起为例[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(8):1396-1410.
- CAO Q, LI H, PAN X, et al. Control of Pre-Carboniferous palaeogeomorphology on bauxite gas reservoirs: A case study of Qingyang palaeohigh in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8):1396-

- 1410.
- [18] 杜广宏,姚泾利,张盟勃,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区构造特征及其对古生界铝土岩气藏的控制作用[J]. 天然气地球科学,2024,35(8):1387-1395.
- DU G H, YAO J L, ZHANG M B, et al. Tectonic background and controlling factors of Palaeozoic bauxite formation in Longdong area of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2024,35(8):1387-1395.
- [19] 吴疆,关蕴文,蒲仁海,等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤层分布特征[J]. 西北大学学报(自然科学版),2023,53(5):830-842.
- WU J, GUAN Y W, PU R H, et al. Geophysical identification and distribution of Upper Paleozoic coals in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2023, 53(5):830-842.
- [20] 赵喆,徐旺林,赵振宇,等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. 石油勘探与开发,2024,51(2):234-247.
- ZHAO Z, XU W L, ZHAO Z Y, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2024,51(2):234-247.
- [21] 朱宗良,李文厚,李克永,等. 杭锦旗地区上古生界层序及沉积体系发育特征[J]. 西北大学学报(自然科学版),2010,40(6):1050-1054.
- ZHU Z L, LI W H, LI K Y, et al. The characteristic of sequence stratigraphy and sedimentary systems of Taiyuan-Xiashihezi formation in Hangjinqi area[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2010, 40(6):1050-1054.
- [22] 刘蝶,周金昱,张小刚,等. 鄂尔多斯盆地铝土岩储层岩相成像测井特征及分布规律[J]. 天然气地球科学,2024,35(8):1441-1453.
- LIU D, ZHOU J Y, ZHANG X G, et al. Lithofacies log identification and favorable lithofacies distribution of new types of bauxite reservoirs in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2024,35(8):1441-1453.
- [23] 李杨,阮壮,李中明,等. 南华北地区及其北部邻区上石炭统一—中二叠统高分辨率层序地层[J]. 现代地质,2020,34(4):718-731.
- LI Y, RUAN Z, LI Z M, et al. High-resolution stratigraphy of Upper Carboniferous-Middle Permian in southern north China and its northern surroundings[J]. Geoscience, 2020, 34(4):718-731.
- [24] 黄有根,许杰,郑小鹏,等. 鄂尔多斯盆地中东部下二叠统太原组灰岩沉积特征与沉积模式[J]. 古地理学报,2024,26(4):911-925.
- HUANG Y G, XU J, ZHENG X P, et al. Sedimentary characteristics and sedimentary models of the Lower Permian Taiyuan Formation limestone in mid-eastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2024, 26(4):911-925.
- [25] 王起琮,杨瑞涛. 子长地区延长组长6段基准面旋回层序识别[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007,37(5):793-797.
- WANG Q C, YANG R T. The recognition of base-level cyclic sequences in member 6 of Yanchang Formation, Upper Triassic in Zichang Area, Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2007, 37(5):793-797.
- [26] 赵明胜,田景春,张翔,等. 鄂北杭锦旗地区山西组高分辨层序格架下沉积充填及砂体展布规律[J]. 特种油气藏,2019,26(6):8-15.
- ZHAO M S, TIAN J C, ZHANG X, et al. Sedimentary filling and sandbody distribution patterns under high-resolution sequence framework of the Shanxi Formation in Hangjinqi of north Ordos[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6):8-15.
- [27] 肖玲,张井涛,郑荣才,等. 高分辨率层序地层学在隐蔽油气藏中的应用:以辽东湾旅大地区古近系东营组为例[J]. 地层学杂志,2013,37(3):369-376.
- XIAO L, ZHANG J T, ZHENG R C, et al. The application of high-resolution sequence-stratigraphy in the study of cryptic reservoirs: A case study of the paleogene dongying formation in the lüda area, Liaodongwan Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37(3):369-376.
- [28] 彭子霄,于兴河,李顺利,等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁迁移样式及控制因素[J]. 古地理学报, 2023,25(6):1330-1346.
- PENG Z X, YU X H, LI S L, et al. Migration patterns and controlling factors of barrier of the Benxi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography,2023,25(6):1330-1346.
- [29] 刘明成,吴胜和,万晓龙,等. 鄂尔多斯盆地庆城油田延长组页岩层系层序地层与沉积相特征[J]. 古地理学报,2024,26(4):779-795.
- LIU M C, WU S H, WAN X L, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the shale strata of Yanchang Formation in Qingcheng Oil-field, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2024, 26(4):779-795.
- [30] 王集,王峰,戚林河,等. 鄂尔多斯盆地中东部本溪组砂体成因类型及发育模式[J]. 沉积学报,2023,

41(5):1380-1395.

WANG J, WANG F, QI L H, et al. Genetic types and development models of sand bodies of the Benxi Formation in the east-central Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023,41(5):1380-1395.

[31] 于兴河,王德发,孙志华. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型:内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. *沉积学报*,1995,13(1):48-58.

YU X H, WANG D F, SUN Z H. Lithofacies types、vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: The observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,1995,13(1):48-58.

[32] 孟祥振,窦天财,蒲仁海,等. 鄂尔多斯盆地本溪组碎屑障壁海岸砂体微相南北变化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*,2024,54(3):555-568.

MENG X Z, DOU T C, PU R H, et al. Changes from south to north in the microfacies of clasticbarrier coastal sandbodies of the Benxi Formation in the Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2024,54(3):555-568.

[33] 于波. 鄂尔多斯东南部上古生界层序地层特征[J]. *西北地质*, 2016,49(1):92-100.

YU B. Characteristic of Upper Paleozoic sequence stratigraphy in east-southern Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*,2016,49(1):92-100.

[34] 于兴河,王香增,王念喜,等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. *古地理学报*, 2017,19(6):935-954.

YU X H, WANG X Z, WANG N X, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*,2017,19(6):935-954.

[35] 冯娟萍,欧阳征健,陈全红,等. 鄂尔多斯盆地及边缘地区上石炭统沉积特征[J]. *古地理学报*,2021,23(1):53-64.

FENG J P, OUYANG Z J, CHEN Q H, et al. Sedimentary characteristics of the upper Carboniferous in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. *Journal of Palaeogeography*,2021,23(1):53-64.

[36] 贾浪波,钟大康,孙海涛,等. 鄂尔多斯盆地本溪组沉积物物源探讨及其构造意义[J]. *沉积学报*, 2019,37(5):1087-1103.

JIA L B, ZHONG D K, SUN H T, et al. Sediment provenance analysis and tectonic implication of the Benxi Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2019,37(5):1087-1103.

[37] 郭艳琴,王美霞,郭彬程,等. 鄂尔多斯盆地西缘北部上古生界沉积体系特征及古地理演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*,2020,50(1):93-104.

GUO Y Q, WANG M X, GUO B C, et al. Sedimentary system characteristics and paleographic evolution of Upper Paleozoic of northern west margin, Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2020,50(1):93-104.

[38] 李江海,王洪浩,李维波,等. 显生宙全球古板块再造及构造演化[J]. *石油学报*, 2014,35(2):207-218.

LI J H, WANG H H, LI W B, et al. Discussion on global tectonics evolution from plate reconstruction in Phanerozoic[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2014,35(2):207-218.

[39] 虎建玲,王琳霖,陈琴,等. 鄂尔多斯盆地西南部早—中二叠世源—汇充填过程及构造-沉积格局[J]. *天然气地球科学*,2024,35(1):41-58.

HU J L, WANG L L, CHEN Q, et al. The Early-Middle Permian source to sink filling process and its tectonic-sedimentary response in the southwestern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(1):41-58.

(编辑 李 静)