



· 鄂尔多斯盆地岩相古地理与沉积演化 ·

鄂尔多斯盆地东北部神木—佳县地区 上石炭统本溪组沉积特征

郭艳琴^{1,2,3}, 梁言乐^{1,3}, 汪淑洁^{4,5}, 于雷^{4,5}, 李百强⁶, 张凯笑^{1,3}, 付升^{1,3}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;
3. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;
5. 低渗透油气田勘探开发国家工程试验室, 陕西 西安 710018; 6. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要 综合研究区钻井岩心资料及东边野外剖面的岩石类型、岩石结构、沉积构造、岩电组合等及1500余口井砂岩、泥岩、灰岩和煤层等岩性厚度及砂地比展布特征,对神木—佳县地区上石炭统本溪组的沉积特征和本1、本2段沉积微相平面展布特征及其演化进行深入研究。结果表明,研究区主要为三角洲和障壁海岸沉积体系,其中三角洲体系主要为三角洲前缘亚相,可进一步划分为水下分流河道和分流间湾微相;障壁海岸体系可划分为障壁岛、潮坪和潟湖3种亚相,进一步划分为砂坪、泥坪、滨海沼泽等多种微相。研究区西部本2及本1段发育潟湖障壁岛沉积,障壁岛均呈零星状分布;研究区东部本2期主要为潮坪沉积,潮坪沉积以泥坪和砂坪为主,仅北部存在三角洲前缘沉积且规模较小;到本1期演化为三角洲前缘沉积,具有明显的南北分带特征:双山—双99井以北为河控三角洲,西南部则为潮汐改造三角洲。西南部潮汐改造三角洲受潮汐改造程度高,岩石粒度较粗,岩屑及胶结物含量较高,因此粒间孔、岩屑溶孔及晶间孔含量较高,储层物性较好,天然气产量较高。

关键词 上石炭统本溪组;岩石学相标志;沉积特征;神木—佳县地区;鄂尔多斯盆地
中图分类号: P512.2 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-06-009

Sedimentary characteristics of Benxi Formation of the upper Carboniferous in Shenmu-Jiaxian area of the north-eastern Ordos Basin

GUO Yanqin^{1,2,3}, LIANG Yanle^{1,3}, WANG Shujie^{4,5}, YU Lei^{4,5},
LI Baiqiang⁶, ZHANG Kaixiao^{1,3}, FU Sheng^{1,3}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

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

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China;

5. National Engineering Laboratory for Low-permeability Petroleum Exploration and Development, Xi'an 710018, China;

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41702117); 陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBGY-079); 西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金(22LCD04); 陕西省技术创新引导专项基金(2023-YD-CGZH-02); 陕西省科协青年人才托举计划项目(20240701); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0287)。

第一作者: 郭艳琴, 女, 博士, 教授, 从事沉积学及储层地质学研究, guoyanqin@xsyu.edu.cn。

6. School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract The Sedimentary features of Benxi Formation of the upper Carboniferous in Shenmu-Jiaxian area and the distribution pattern of sedimentary microfacies and evolution of the Section One and Section Two were studied in depth based on the comprehensive analysis of the rock type, rock texture, sedimentary structure, rock electric and the thickness and the exhibition features of sandstone, mudstone, limestone, coal seam and ratio of sand and stratum of 1 500 wells. The results show that the delta and barrier coastal sedimentation systems dominate the study area. The delta system is primarily composed of delta front subfacies, which are further divided into underwater diversion channel and diversion bay microfacies. The barrier coastal system is divided into three subfacies: barrier island, tidal flat, and lagoon, which are further subdivided into various microfacies, such as sand flats, mud flats, and coastal marshes. Lagoon-barrier islands are developed in the west of the study area in Section Two and Section One of the Benxi Formation and the barrier islands distribution are sporadic. In the eastern part of the study area, tidal flat deposits is the main Sedimentary subfacies in Section Two of the Benxi Formation, which include mud flat and sand flat mainly, and only a small scale delt front developed in the north of the study area. But in section one of the Benxi Formation, the tidal flat evolved into delta front which with a distinct north-south zoning features. The sedimentary facie is delta controlled by river in north of Shuangshan-Shuang 99 well, and the sedimentary facie is tidal modification delta in southwest of Shuangshan-Double 99 well line. Because of the high degree of tidal modification, the rock of modification delta in southwest are coarse granularity and higher content of rock debris and cement, therefore, the reservoir is more physical property and higher natural gas production because it had higher content of intergranular hole, debris dissolution hole and intercrystalline pore.

Keywords Benxi Formation of upper Carboniferous; petrographic facies symbol; sedimentary characteristics; Shenmu-Jiaxian area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地经历了加里东-喜山构造运动旋回和多幕构造运动,盆地周围的深层构造呈现出较高的活跃性,而与之相对的是,盖层内部构造发育程度相对较低,是中国重要的煤、石油、天然气能源生产基地之一^[1]。晚石炭世本溪期,受古亚洲洋俯冲和消减作用的影响,盆地处于南隆北倾向北隆南倾的古地貌转换阶段^[2-4],华北陆表海因此从东侧和北东侧侵入盆地内部,水体南深北浅,构造-沉积格局与物源体系复杂。在多期次海侵、海退作用下,本溪组发育海陆交互沉积体系^[5],普遍沉积两套厚层砂体夹煤层,上覆太原组煤系烃源岩地层,烃源岩分布广泛,厚度稳定,具有优质的成藏地质条件,成为上古生界一个重要的建产层系。近年来,盆地东北部临兴气田及神木气田本溪组油气的突破,也展示出鄂尔多斯盆地东北部本溪组巨大的油气勘探潜力^[6-8]。

近年来钻井结果及部分学者研究表明,烃源岩分布不是本溪组气藏富集的主控因素,天然气富集与砂体的厚度、类型、规模及展布规律等直接相关^[9-11],而砂体厚度、类型、规模及展布规律均受控于沉积相,因此要有效预测砂体展布规律及发育规

模,就需要进行沉积体系及沉积微相研究。近几年,随着鄂尔多斯盆地本溪组勘探的进展,国内外学者对其物源、沉积相、砂体成因、储层特征及成藏主控因素进行了大量的研究和讨论,取得较多的成果和认识,但众多学者对本溪组的认识存在较大的争议,主要表现在物源、沉积相及砂体成因两个方面。有学者认为本溪期盆地仅发育北部物源^[12-14];也有学者认为本溪期盆地北物源及南物源均发育^[15-21],北部物源和南部物源基本在盆地中部柳林成家庄一带交汇^[21-22]。有学者认为,本溪组沉积体系为开阔陆表海背景下的潮控海湾—三角洲体系^[20,23],砂体发育及分布受控于河流和潮汐共同作用;而部分学者认为本溪组为障壁岛—潟湖沉积体系^[24-30],障壁岛的发育控制着砂体的分布。

近年来,在盆地东北部神木—佳县地区,本溪组天然气勘探取得较大突破,据本 1 段 160 口井及本 2 段 3 口井产量统计,平均单井日产气量达 $17.34 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中本 1 段 157 口及本 2 段 3 口井达到工业气流井。天然气产量在垂向上和平面上均表现出较强的差异性,垂向上表现为本溪组本 1 段即晋祠砂岩工业气流井分布较广,而本 2

畔沟砂岩中工业气流井零星分布;本溪组上段晋祠砂岩中天然气日产在平面上具明显的分区性,高产井主要集中在双山—双99井—一线西南地区,121口井平均日产气 $22.68 \times 10^4 \text{ m}^3$,而双山—双99井—一线东北部39口井单井日产明显较低,平均日产气 $8.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。不管是垂向上还是平面上,天然气富集均受储层宏观展布规律及储层微观特征的影响,根本上受控于沉积相。因此,综合24口钻井岩心的沉积构造和薄片鉴定资料、1500口钻井的测井曲线和岩屑录井资料及研究区东边保德桥头、保德扒楼沟、宁武红土沟、兴县关家崖和吕梁招贤水542个野外露头点的资料(见图1),对本溪组沉积相及其特征进行详细研究,从而明确本溪组不同砂体的成因及其展布规律及规模,为今后本溪组天然气高效勘探及开发提供地质依据。

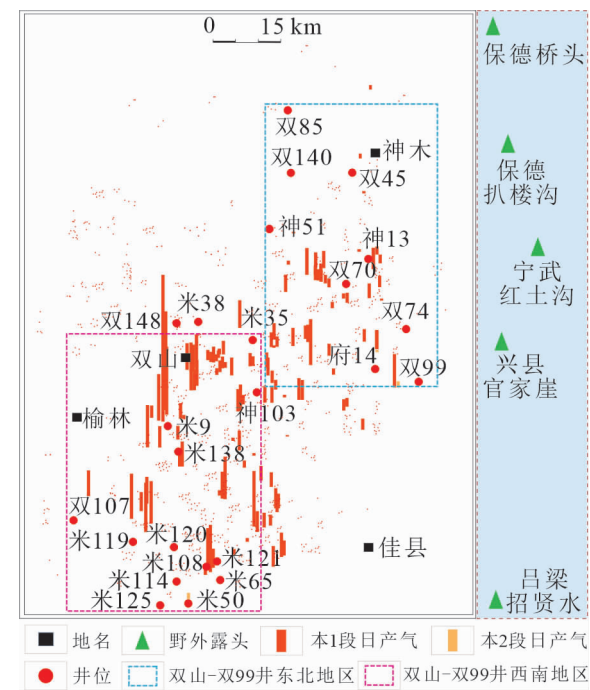


图1 研究区天然气产量及取心井和野外露头分布
Fig.1 The location of natural gas productionin and the coring wells and outcrops the study area

1 地层及岩性特征

本溪组沉积作用由海西期华北海自NNE方向侵入而形成,其沉积基础为加里东期奥陶系侵蚀风化地貌,沉积物主要为风化产物铝土岩、滨浅海碎屑岩、潮坪灰岩、滨海沼泽煤岩等。本溪组底部铁铝岩层与下伏马家沟组岩溶白云岩不整合接触,顶部发育一套海退下的煤系地层沉积,即8[#]、9[#]煤层,由于硫含量较高,经常伴随着一种特殊的气味,被称作臭煤^[31],是本溪组与太原组桥头砂岩的分界;除此以外,在本溪组内部还发育畔沟灰岩、晋祠砂岩及吴家峪灰岩岩性标志层,均具有典型的电性特征,将本溪组从下到上分为3段:本3、本2和本1,即湖田段、畔沟段和晋祠段(见图2、表1)。

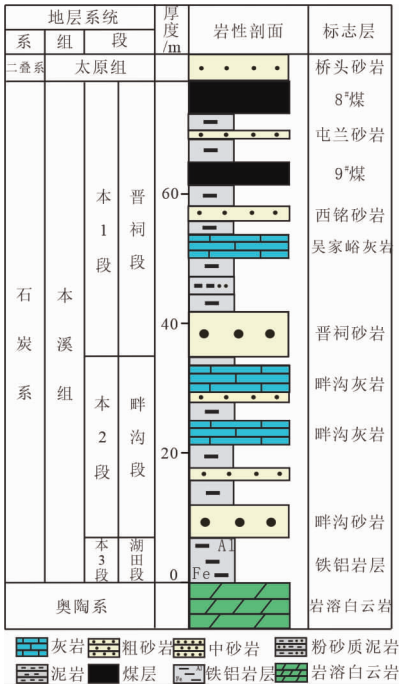


图2 本溪组地层发育特征
Fig.2 The stratigraphic characteristics of the Benxi Formation

表1 研究区本溪组主要岩性标志层及其电性特征					
Tab.1 Main lithologic markers and their electrical characteristics of the Benxi Formation in the study area					
地层单位			气层组	标志层	测井曲线特征
系	组	段			
石炭系	本溪组	太原组		庙沟灰岩 桥头砂岩 8 [#] 、9 [#] 煤层 吴家峪灰岩 晋祠砂岩	高声波、高电阻 低声波、高电阻 低伽玛、低声波、低电阻
		晋祠段	本1		
		畔沟段	本2	畔沟灰岩	低伽玛、低声波、高电阻
		湖田段	本3	铁铝岩层	高伽玛、低电阻
奥陶系	马家沟组			岩溶白云岩	

1)本 3(湖田段):主要由棕红色、紫红色富含铁铝的泥岩、页岩以及“山西式铁矿”组成。这一地层单元被命名为湖田段,是源于山东省淄博煤田的湖田矿区,该层段经历了多次沉积和侵蚀过程^[31]。湖田段是本溪组最容易识别的岩层,表现为异常高的自然伽玛值和低电阻率电性特征;研究区厚度为 0~9 m,平均厚度为 4 m。

2)本 2(畔沟段):岩性主要为砂岩、泥岩、粉砂岩及灰岩,薄煤层局部发育。研究区厚度为 6~47 m,平均厚度为 20 m。畔沟段底部发育畔沟砂岩,稳定性较差,常呈透镜状分布;中上部及顶部常发育 1~3 层层状或透镜状灰岩。畔沟段命名源于太原西山畔沟,表现为低伽玛、低声波、高电阻电性特征。

3)本 1(晋祠段):为一套由海相砂岩、泥岩、灰岩和煤层组成的煤系地层,研究区厚度为 11~56 m,平均厚度为 29 m。晋祠段底部发育一套砂岩或含砾砂岩,称为晋祠砂岩,在研究区相对稳定,厚度较大,电性表现为伽玛、声波、电阻均低特征;中部发育一套灰岩,称吴家峪灰岩,具低声波、高电阻电性特征,发育不稳定;顶部发育 8[#]、9[#]煤

层,在研究区分布广泛,厚度较大,其电性特征表现为高声波、高电阻。此外,吴家峪灰岩与 9[#]煤之间局部发育一套细砂岩,称“西铭砂岩”,8[#]、9[#]煤之间局部发育一套粉细砂岩,称“屯兰砂岩”,这两套细、粉细砂岩厚度小,分布不稳定^[18]。

2 岩石学相标志

2.1 岩石类型及特征

研究区本溪组岩石类型多样,主要包括砂岩、泥岩、灰岩和煤层,还可见部分泥页岩、炭质泥岩和石英砾岩。钻井岩心薄片鉴定显示,本 1 及本 2 段砂岩主要为石英砂岩和岩屑石英砂岩,含少量岩屑砂岩,砂岩粒度相对较粗,局部发育含砾砂岩及砾岩,通常为灰绿色和灰色,常见黄铁矿及硫等反映还原环境的指示矿物〔见图 3(a)、(b)、(c)〕;灰岩主要为泥晶灰岩〔见图 3(d)〕;泥岩整体为深灰色和灰黑色,常发育植物碎片化石〔见图 3(e)〕,煤层中含大量硫和黄铁矿矿物〔见图 3(f)〕,反映了还原—强还原沉积环境。



(a)砾岩,米 38 井,本 2 段,2 780.2 m;(b)含砾粗砂岩,神 103 井,本 1 段,2 484.6 m;(c)中—粗砂岩,含硫、含黄铁矿,神 51,本 1 段,2 330.2 m;(d)泥晶灰岩,米 119 井,本 1 段,3 026.0 m;(e)深灰色泥岩见碳化植物碎片化石,双 107 井,本 1 段,2 729.8 m;(f)的泥页岩及煤层,煤层中含硫和黄铁矿,兴县关家崖本 2 段

图 3 本溪组钻井岩心及野外剖面岩石类型及特征

Fig. 3 Rock types and characteristics of drilling core and outcrops section of Benxi Formation

2.2 岩石结构特征

2.2.1 粒度

砂岩粒度统计分析表明,本溪组岩石粒度变化较大,从巨砂至泥均有分布,整体以粗砂、中

砂、细砂和极细砂为主(见图 4)。本 1 段单井粒度统计分析显示,岩石粒度在平面分布上具有一定的分区性,双山—双 99 井一线东北部自北向南从双 45 井至神 51 井再至神 13 井,粗砂和中砂含

量逐渐减少,细砂和极细砂含量逐渐增加〔见图 4 (a)],反映了由北向南水动力逐渐减弱,近物源区至远物源区粒度变细,河流或者三角洲分流河道或者水下分流河道的特征显著,表明河控作用较强;在双山—双 99 井一线西南部,岩石粒度仍以粗砂和中砂为主,部分井发育巨砂,个别井细砂

和极细砂含量较高,但砂体岩石粒度平面展布无规律性〔见图 4(b)]。其原因可能为三角洲受中等潮差的潮汐改造作用强,虽然砂体仍然较好地保留了三角洲的面貌^[20],但水下分流河道的砂体岩石粒度近物源至远物源逐渐变细的平面展布特征不再保留。

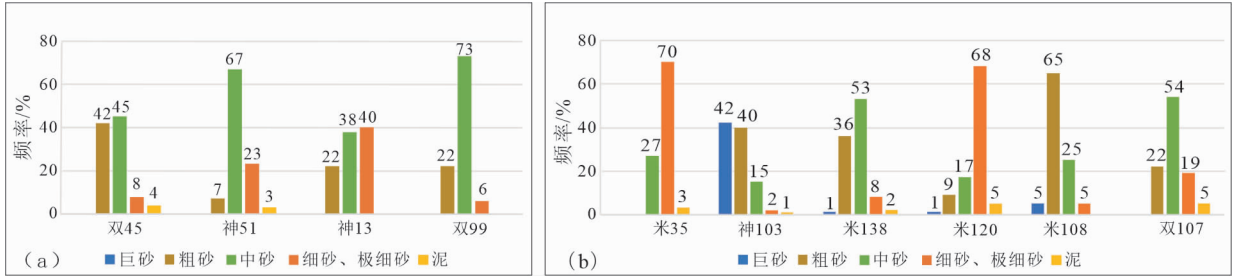


图 4 本溪组本 1 段岩石粒度直方图
Fig. 4 Grain size histogram of section one of Benxi Formation

2.2.2 颗粒分选性

岩石颗粒分选程度统计结果显示,研究区本溪组岩石颗粒分选程度差异明显,分选程度差、中等、中等—好以及好在研究区均发育(见图 5)。本 1 段岩石颗粒分选在平面分布上与岩石粒度分布具同样的分区性,双山—双 99 一线东北部自北向南从双 85 井至双 45 井、神 51 井再至神 13 井和府 14 井,中等分选比例逐渐减少,分选中等—好和好比例逐渐增加〔图 5(a)]。同样,研究区

东部从双 74 井到双 99 井也反映了由北至南分选程度变好的趋势,表明水动力主要受河流控制,同时表明双 74 井—双 94 井与双 85 井—双 45 井—神 51 井—神 13 井—府 14 井分属两支分流河道;在双山—双 99 井一线西南部,岩石颗粒分选以中等、中等—好以及好为主,个别井颗粒分选差,占比 6%~50% 不等,分选程度同样平面展布无规律性〔见图 5(b)],表明后期受海水潮汐改造作用显著。

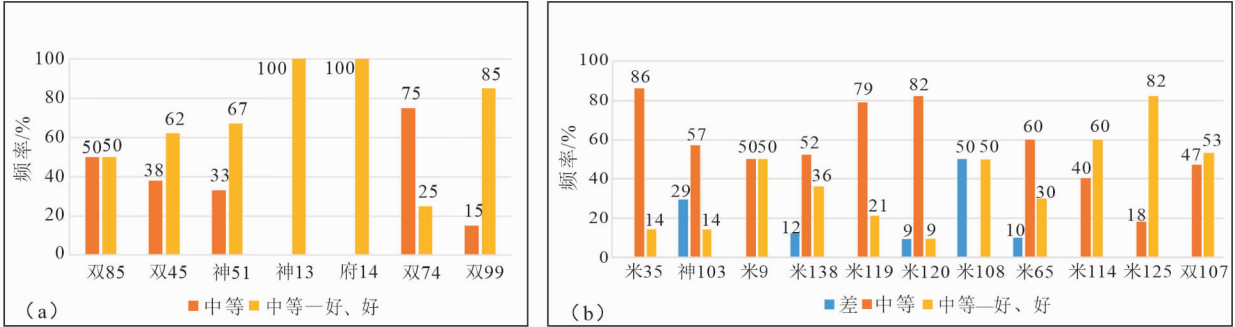


图 5 本溪组本 1 段岩石颗粒分选直方图
Fig. 5 Particle separation histogram of section one of Benxi Formation

2.2.3 颗粒磨圆度

岩石颗粒磨圆程度统计结果显示,研究区本溪组岩石颗粒磨圆程度差异同样显著,主要为次棱状、次圆—次棱状、次棱—次圆状和次圆状(见图 6)。本 1 段岩石颗粒磨圆在平面上与岩石颗粒分选分区性一致,双山—双 99 井一线东北部自北向南,从双 85 井至双 45 井、神 51 井再至神 13 井,磨圆度逐渐变好,次棱、次圆—次棱比例逐渐减小,而次棱—次圆、次圆—圆及圆比例逐渐增大

〔见图 6(a)],研究区东部从双 74 井到双 99 井也反映了由北至南磨圆程度变好的趋势;在双山—双 99 井一线西南部,岩石颗粒磨圆整体以次棱—次圆为主,但次棱、次圆—次棱也较发育,个别井中,次棱、次圆—次棱占比较大,超过 50%,磨圆度同样平面展布无规律性〔见图 6(b)],表明后期受海水潮汐改造作用显著。

双山—双 99 井一线西南部受潮汐改造显著,水动力强,颗粒整体较粗,分选及磨圆度较高,是

导致西南部粒间孔及面孔率高于东北部的重要因素之一,也是双山—双 99 井一线西南部较东北部

储层物性好、天然气产量高的重要因素之一。

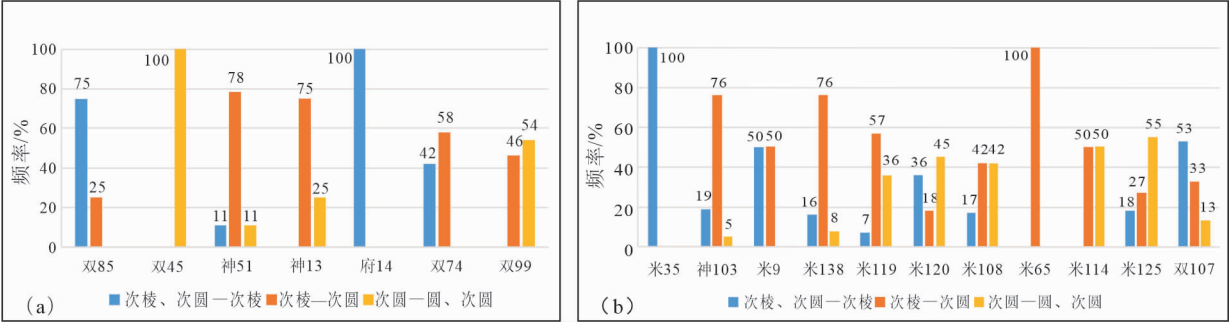


图 6 本溪组本 1 段岩石颗粒磨圆直方图

Fig. 6 Particle separation histogram of section one of Benxi Formation

2.3 岩屑及胶结物的类型及特征

本溪组岩屑主要有变质岩类的石英岩、千枚岩、变质砂岩岩屑、云母碎屑,其次为少量隐晶岩及喷发岩等岩浆岩岩屑,其中石英岩岩屑含量最大;胶结物主要为高岭石、水云母等黏土矿物及铁方解石、铁白云石等碳酸盐矿物。本 1 段岩屑及胶结物含量在平面上与岩石颗粒分选及磨圆分区

性一致,以双山—双 99 井一线为界,西南部地区石英岩岩屑、云母碎屑、高岭石胶结物含量整体高于东北部地区,尤其高岭石胶结物最为突出(见图 7、8)。因此,西南部地区岩屑溶孔、高岭石晶间孔较东北部发育,也是西南部较东北部面孔率高、储层物性好、天然气产量高的另一重要因素。

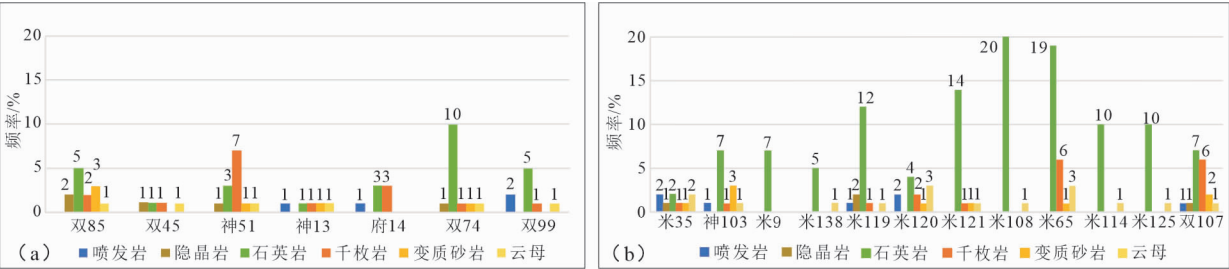


图 7 本溪组本 1 段岩屑类型及含量直方图

Fig. 7 Rock debris types and contents histogram of section one of Benxi Formation

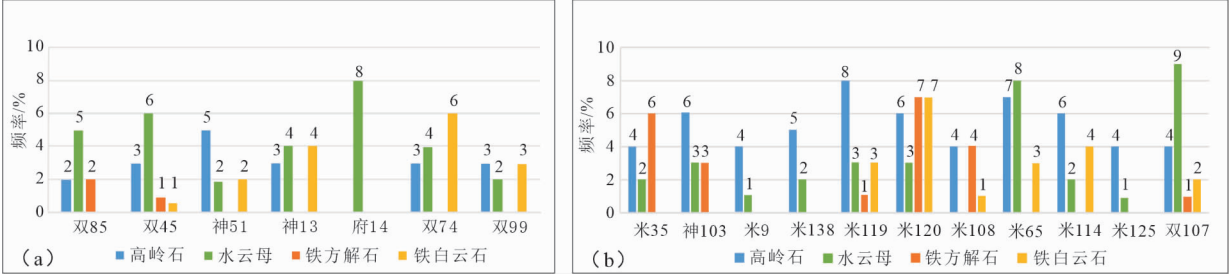


图 8 本溪组本 1 段岩石胶结物类型及含量直方图

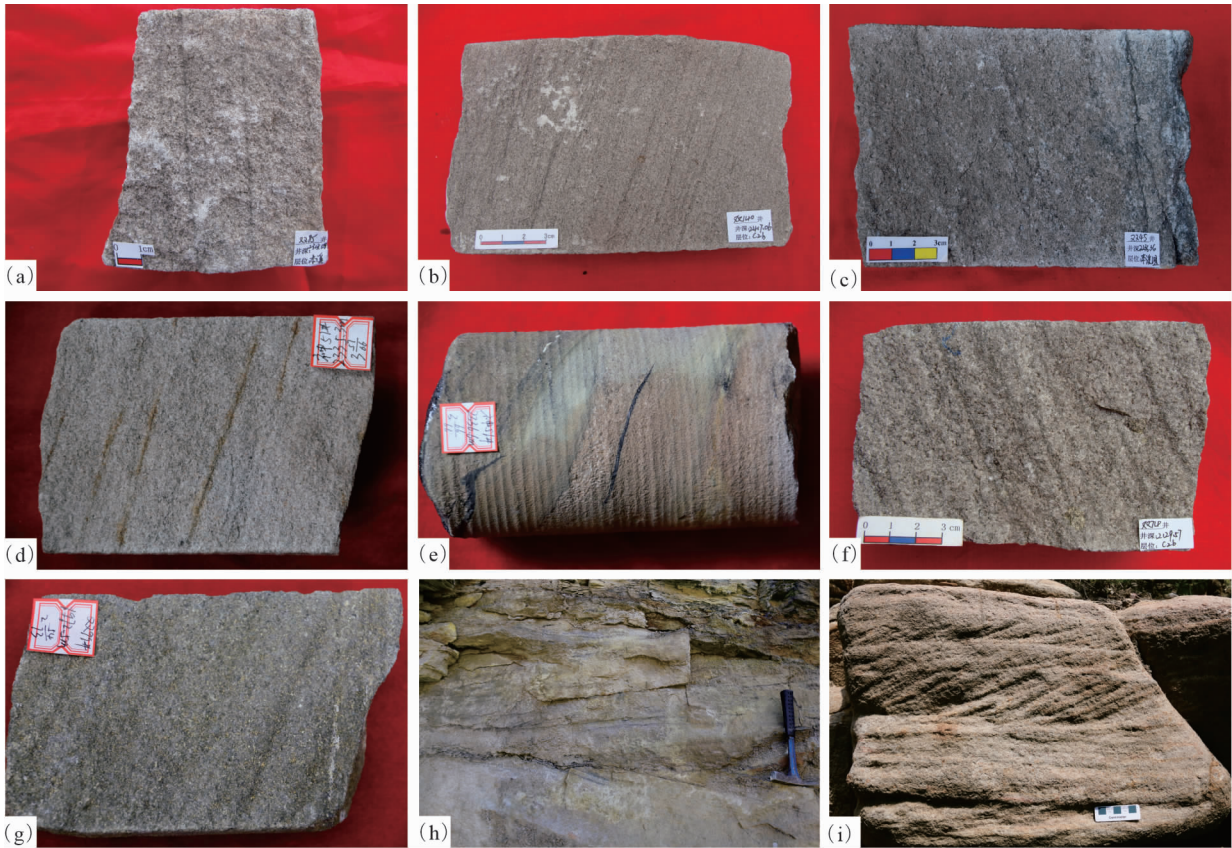
Fig. 8 Cement types and contents histogram of section one of Benxi Formation

2.4 沉积构造特征

研究区本溪组沉积构造发育,本 1 段沉积构造在平面上也具有明显的分区性。研究区双山—双 99 井一线东北部钻井岩心及其东部野外剖面中沉积构造主要为板状交错层理,其次为槽状和平行层理,砂岩底部发育冲刷面(见图 9),反映了河道或三角洲平原分流河道或前缘水下分流河道

沉积特征,羽状、波状及冲洗交错层理等潮汐层理局部发育,表明了受一定的波浪和潮汐作用的影响,整体上为河控三角洲。双山—双 99 井一线西南部,板状、槽状交错层理仍然发育,表现为三角洲前缘沉积特征,但羽状、波状及冲洗交错层理等潮汐层理更显著,局部可见波痕等层面沉积构造(见图 10),反映了波浪及潮汐改造作用显著较东

北部加强。



(a) 板状交错层理, 双 85 井, 2 313.9 m; (b) 板状交错层理, 双 140, 2 417.1 m; (c) 板状交错层理, 双 45 井, 2 236.4 m; (d) 板状交错层理, 神 51, 2 335.3 m; (e) 河道底部冲刷面, 神 51, 2 336.6 m; (f) 板状交错层理, 双 74, 2 129.1 m; (g) 板状交错层理, 含硫, 含气, 双 99, 1 972.5 m; (h) 晋祠砂岩中板状交错层理, 保德扒楼沟; (i) 晋祠砂岩中槽状交错层理及平行层理, 兴县关家崖

图 9 双山—双 99 井一线东北部本溪组本 1 段主要沉积构造

Fig. 9 Major sedimentary structure of section one of Benxi Formation in the northeast of Shuangshan-Shuang 99 well line

3 沉积体系及其主要特征

3.1 沉积相类型划分

综合研究区钻井及其东边保德桥头—吕梁招贤水等露头的岩石类型、结构、沉积构造、旋回、韵律、岩性电性组合、砂地比等值线平面展布等,由单井到连井再到平面系统分析全区沉积特征,将鄂尔多斯盆地东北部神木—佳县地区本溪组划分为三角洲(河控三角洲和潮汐改造三角洲)和障壁海岸沉积体系,并进一步划分出三角洲前缘、障壁岛、潮坪和潟湖 4 种亚相及水下分流河道、砂坪、泥坪、灰坪、滨海沼泽等多种微相(见表 2)。

3.2 沉积相类型及其特征

3.2.1 三角洲

研究区三角洲主要为前缘亚相沉积,本 1 段

较本 2 段发育广泛,由水下分流河道及分流间湾微相组成,水下分流河道主要岩性为中砂岩及粗砂岩,其次发育细砂岩及含砾粗砂岩,分流间湾岩性则以泥岩及粉砂质泥岩为主。水下分流河道和分流间湾在垂向上交替出现,常发育多个旋回,单个水下分流河道底部发育冲刷面,河道内部呈下粗上细的正旋回。砂层单层厚度一般 3~6 m,多期河道互相切割叠置,累计厚度可达 10~18 m。水下分流河道的伽马曲线一般为钟型或者箱型,或者是两者的复合形态,曲线齿化或者光滑,底部突变,顶部渐变。三角洲的进积作用常常导致后期陆源粗碎屑沉积于前期细粒沉积之上,垂向上呈现为典型的反粒序,由下向上沉积物粒度变粗,即三角洲前缘水下分流河道直接发育在潮坪之上[见图 11(a)、(b)]。



(a) 波状交错层理, 神 103 井, 2 490.9 m; (b) 底部板状交错层理、中部羽状交错层理, 米 9 井, 2 748.3 m; (c) 波状交错层理, 米 138 井, 2 814.9 m; (d) 羽状交错层理, 米 138 井, 2 818.1 m; (e) 板状交错层理, 米 138 井, 2 819.5 m; (f) 冲刷交错层理, 米 138 井, 2 820.1 m; (g) 羽状交错层理, 米 121 井, 2 658.9 m; (h) 冲刷交错层理, 米 125 井, 2 606.2 m; (i) 晋祠砂岩表面波痕, 吕梁招贤水

图 10 双山—双 99 井一线西南部本溪组本 1 段主要沉积构造

Fig. 10 Major sedimentary structure of section one of Benxi Formation in the southwest area of Shuangshan-Shuang 99 well line

表 2 研究区本溪组沉积相及微相分类

Tab. 2 Classification of sedimentary facies and microfacies of the Benxi Formation in the study area

沉积相	亚相	微相	发育主要层位
三角洲(河控、潮汐改造)	三角洲前缘	水下分流河道、分流间湾	本 1 段
	障壁岛		本 1 段、本 2 段
障壁海岸	潮坪	泥坪、砂坪、混和坪、泥炭	本 2 段
	潟湖	沼泽、灰坪 滨海沼泽	本 1 段、本 2 段

钻井岩心及野外露头中, 沉积构造有板状、槽状、羽状、波状和冲刷交错层理等。研究区双山—双 99 井一线东北地区双 85、神 51、双 74 及双 99 井等钻井岩心中以板状和槽状交错层理为主, 整体上为河控三角洲, 砂体厚度大, 顺物源方向即南北向砂体连续性较好, 垂合物源方向即东西向砂体连续性较差(见图 12, 13); 双山—双 99 井一线西南地区米 35、米 9 及米 138 井等钻井岩心中则以波状、羽状和冲刷交错层理为主,

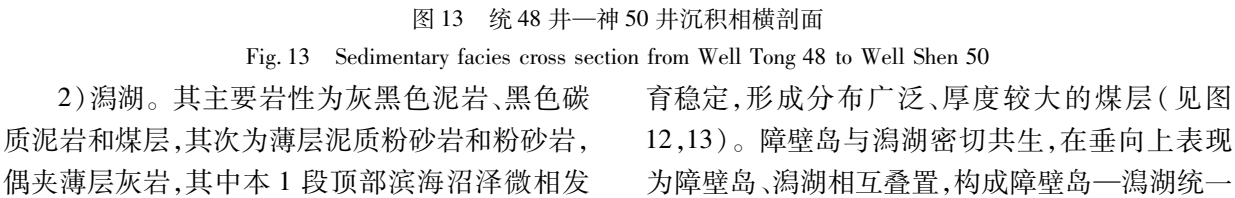
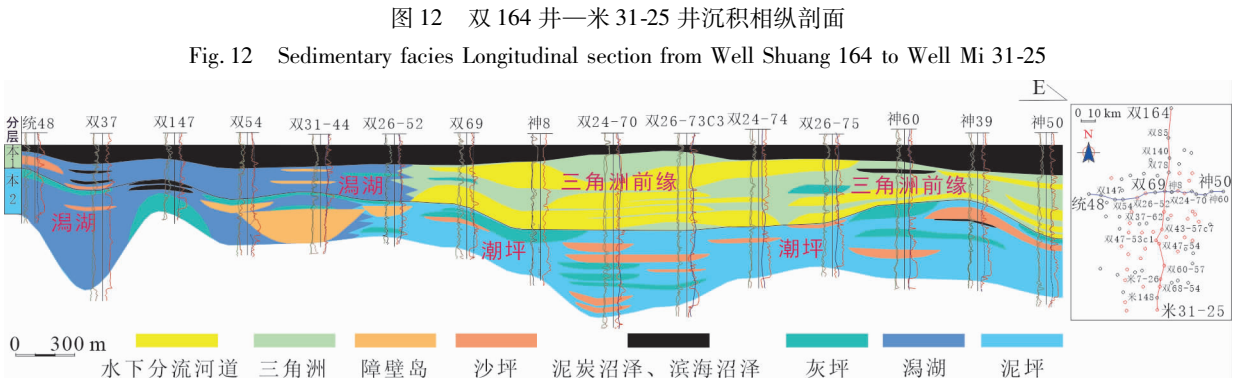
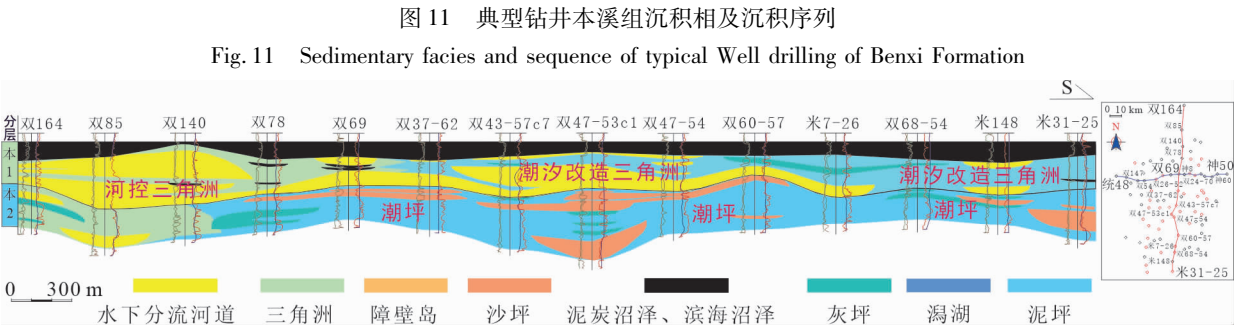
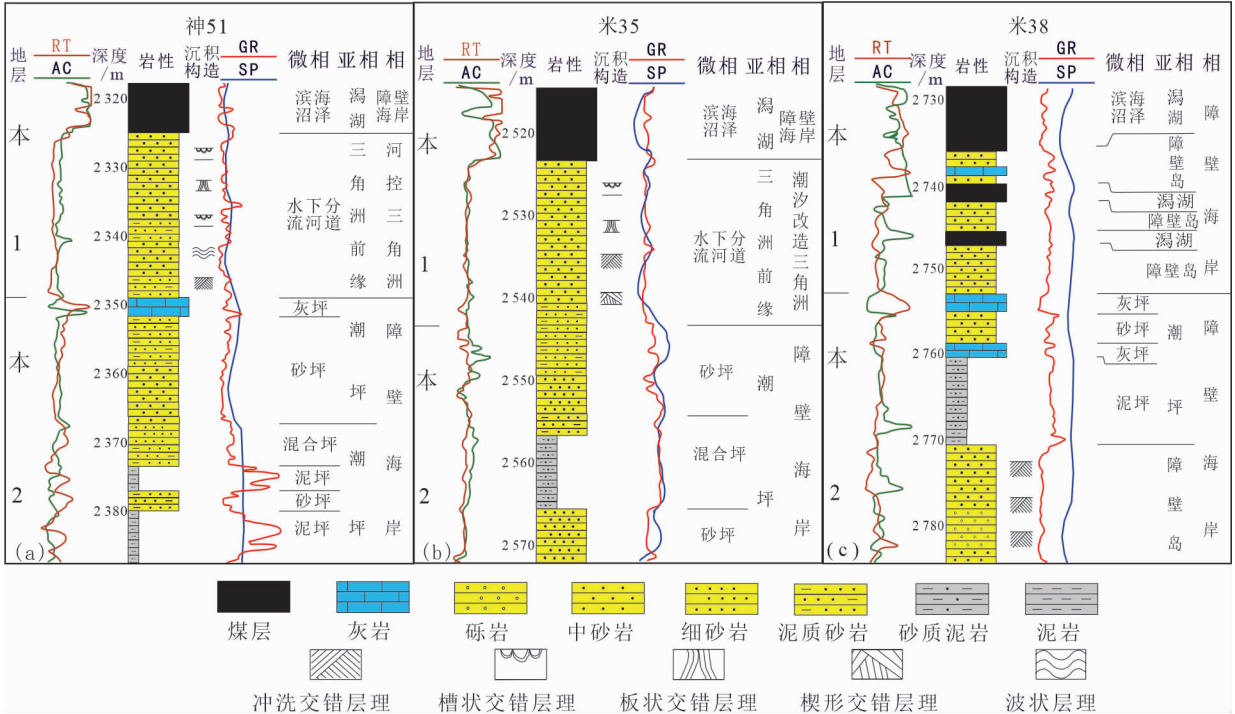
受潮汐改造更为显著, 为潮汐改造三角洲沉积, 砂体厚度较北部小, 南北向顺物源方向砂体连续性也较差(见图 12)。

3.2.2 障壁海岸

障壁海岸体系可划分为潟湖、障壁岛和潮坪 3 种亚相, 本 1 段和本 2 段均发育潟湖及障壁岛亚相, 而本 2 段主要发育潮坪亚相。

1) 障壁岛。障壁岛是海浪作用下形成的沙坝, 常平行海岸分布。其主要岩性为灰色细砂岩,

其次为中—粗砂岩,含砾粗砂岩和砾岩局部发育, 冲洗交错层理最为发育,其次为板状交错层理 [见图 14(a)~(d)]。

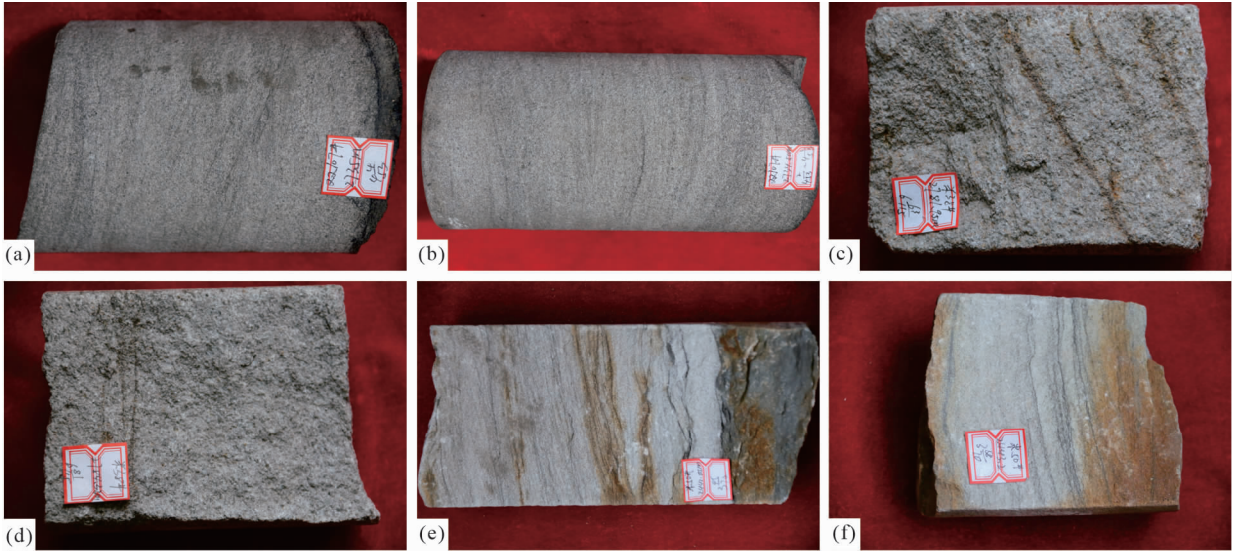


的沉积体系[见图 11(c)]。

3)潮坪。潮坪沉积在本 2 段最为发育,主要为碎屑岩潮坪,可进一步划分为砂坪、泥坪、混合坪及泥炭沼泽沉积微相,碳酸盐岩潮坪主要为灰坪,发育相对局限[见图 11(a)、(b)、(c)]。

砂坪岩性以灰白色细砂岩和粉砂岩为主,其

次为粗砂岩。其主要发育波状交错层理,其次为羽状交错层理[见图 14(e)、(f)]。泥坪岩性以粉砂质泥岩和泥岩为主,发育水平层理,常见植物碎片化石。混合坪微相岩性主要为泥质粉砂岩、薄层泥质膏岩及薄煤层。灰坪以深灰色泥晶灰岩、泥质灰岩为主,常发育方解石脉。



(a) 冲刷交错层理,双 107 井,本 1 段,2 735.1 m;(b) 冲刷交错层理,双 107 井,本 1 段,2 734.5 m;(c) 板状交错层理,米 38 井,本 2 段,2 781.9 m;(d) 冲刷交错层理,米 38 井,本 2 段,2 784.3 m;(e) 波状交错层理,米 50 井,本 2 段,2 442.1 m;(f) 下部波状交错层理、上部羽状交错层理,米 50 井,本 2 段,2 443.2 m

图 14 本溪组障壁岛及潮坪主要沉积构造

Fig. 14 Main sedimentary structures of barrier islands and tidal flat of Benxi Formation

4 沉积微相平面展布特征及沉积演化

在重点井及连井剖面沉积相和沉积微相研究的基础上,综合研究区 1 500 余口井本 1 和本 2 段的砂岩、泥岩、煤层和灰岩等岩性厚度及砂地比展布特征,进行本溪组本 2 段和本 1 段沉积微相平面分布及其沉积演化研究。

4.1 本 2 段沉积微相展布特征

本 2 期,受中央古隆起的影响,鄂尔多斯盆地具西高东低的特征,研究区主要为障壁海岸体系,三角洲体系仅在东北部发育。东北部三角洲共有 3 支水下分流河道,但延伸距离较近,最远到达双 140 井—神木一线。研究区东南部为广泛发育的潮坪沉积,主要为泥坪和砂坪,砂坪沉积范

围较广,但单个砂坪面积相对较小,多呈孤立状。研究区北部神木南局部发育灰坪沉积。研究区西部则为潟湖-障壁沉积,主要为潟湖泥质沉积,障壁岛呈零星分布状[见图 15(a)]。

4.2 本 1 段沉积微相展布特征

本 1 段沉积展布与本 2 段具较好的继承性,研究区西部广大地区仍以潟湖-障壁沉积亚相沉积为主,显著不同的是研究区东部地区演变为三角洲沉积。在研究区双山—双 99 井一线东北地区,三角洲沉积主要受河流控制,发育 4 支规模较大、延伸较远的水下分流河道,河道宽度 5 ~ 15 km;而双山—双 99 井一线西南地区潮汐改造作用显著增强,水下分流河道规模明显减小,南北向连续性较差,河道宽度一般小于 5 km,为潮汐改造三角洲[见图 15(b)]。

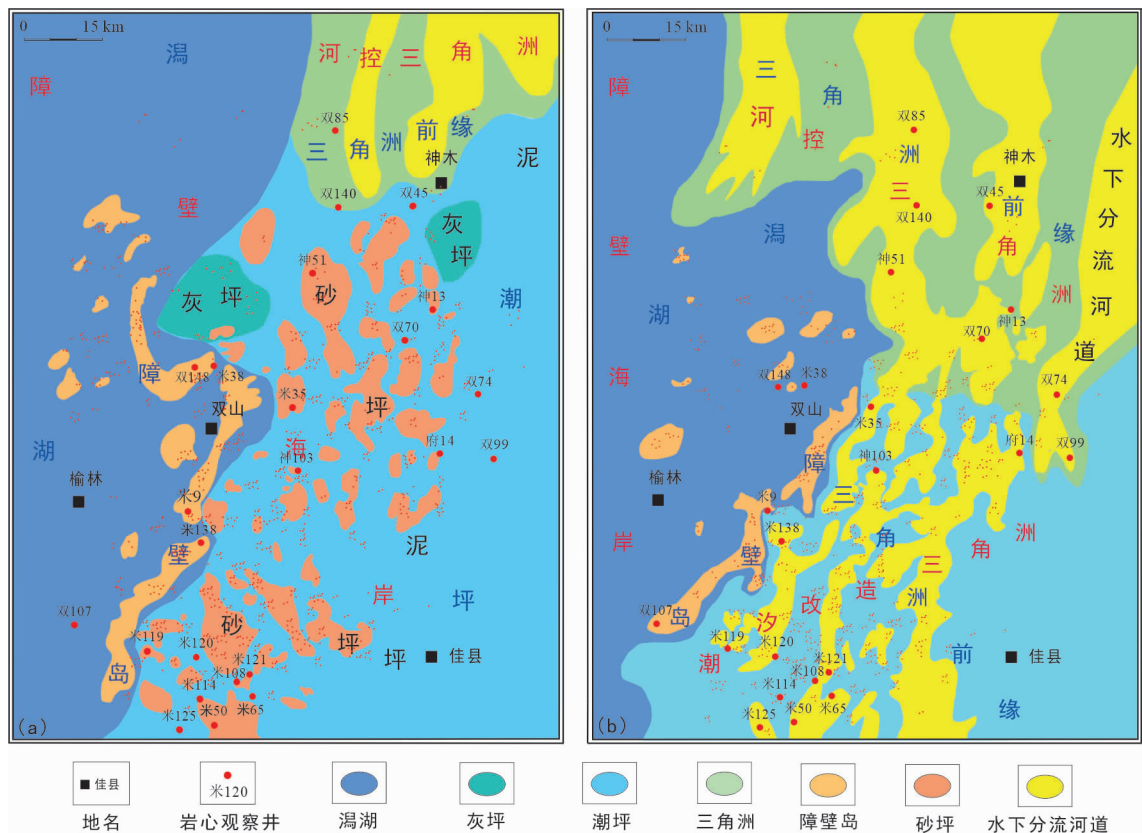


图 15 本溪组沉积微相平面分布图

Fig. 15 The sedimentary microfacies planar distribution map of of Benxi Formation

5 结论

1)综合钻井岩心及野外露头的岩石类型、粒度、分选及磨圆等沉积结构、沉积构造和测井电性特征,在研究区识别出三角洲和障壁海岸两种沉积体系,并可进一步划分出三角洲前缘、潟湖、障壁岛和潮坪 4 种沉积亚相和水下分流河道、分流间湾、砂坪、泥坪、灰坪及滨海沼泽等多种微相,建立了垂向序列。

2)本 2 段及本 1 段在研究区西部广泛发育潟湖-障壁岛沉积,障壁岛均呈零星状分布,本 2 较本 1 段略发育;本 2 期只在北部发育规模较小的三角洲前缘沉积,东部为广泛发育的潮坪沉积,以泥坪和砂坪为主,规模较小的灰坪沉积局部发育;研究区东部到本 1 期演化为三角洲前缘沉积,但具有明显的分区特征,在双山—双 99 井一线东北部为河控三角洲,西南部则为潮汐改造三角洲。

3)潮汐改造三角洲,受潮汐改造程度高,与北部河控三角洲相比,岩石粒度较粗,分选及磨圆度较高,岩屑及胶结物含量较高,因此粒间孔、岩屑溶孔及胶结物晶间孔含量较高,储层物性较好,

天然气产量较高。

参考文献

[1] 刘池洋,赵红格,谭成仟,等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统[J]. 石油与天然气地质,2006, 27(2):131-142.

LIU C Y, ZHAO H G, TAN C Q, et al. Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization/reservoiring system in the basin[J]. Oil & Gas Geology,2006,27(2):131-142.

[2] 李文厚,张倩,李克永,等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理学报,2021, 23 (1):39-52.

LI W H, ZHANG Q, LI K Y, et al. Sedimentary evolution of the late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23 (1): 39-52.

[3] 尚冠雄. 华北晚古生代聚煤盆地造盆构造述略[J]. 中国煤田地质,1995,7(2):1-6.

SHANG G X. An outline of basining structures of North China Late Palaeozoic coal accumulation basin[J]. Coal Geology of China, 1995, 7(2): 1-6, 17.

[4] 王东方,陈从云,段瑞焱,等. 中俄边境两侧早古生代造山作用及金银矿带的研究:中俄联合考察报告

- [J]. 贵金属地质, 1992, 1(4): 263-270.
- WANG D F, CHEN C Y, DUAN R Y, et al. Study on early Paleozoic orogeny and gold-silver ore belt on both sides of the Sino-Russian border: A report of Sino-Russian joint investigation [J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1992, 1(4): 263-270.
- [5] 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.
- [6] 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—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.
- [7] 宋平, 郭明强, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区上古生界烃源岩特征及其对天然气成藏的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 22-28.
- SONG P, GUO M Q, ZHAO J Z, et al. Characteristics of Upper Paleozoic source rocks in Linxing Area, eastern margin of Ordos Basin and their controlling effect on accumulation of natural gas [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2019, 34(1): 22-28.
- [8] 张蕊, 王琳霖, 刘磊, 等. 鄂尔多斯盆地东部晚石炭世本溪组源-汇充填过程与古地理格局[J]. 沉积学报, 2023, 34(1): 22-28.
- ZHANG R, WANG L L, LIU L, et al. Source-to-sink filling process and paleogeographic pattern of the Late Carboniferous Benxi Formation in the eastern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 34(1): 22-28.
- [9] 冯娟萍, 欧阳征健, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地及周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.
- [10] 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 paleogeographic evolution of Upper Paleozoic of northern west margin, Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 93-104.
- [11] 孟祥振, 宋明, 蒲仁海, 等. 甘泉—富县地区本溪组气藏控制因素和有利成藏区预测[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023, 53(3): 466-479.
- MENG X Z, SONG M, PU R H, et al. Controlling factors of Benxi Formation gas reservoirs and prediction of favorable accumulation areas in Ganquan-Fuxian Area [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2023, 53(3): 466-479.
- [12] 林进, 李云, 何剑. 鄂尔多斯延长探区本溪组物源及沉积体系分析[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1542-1551.
- LIN J, LI Y, HE J. An analysis of the source and the sedimentary system of the Carboniferous Benxi Formation in Yanchang Area of Ordos Basin [J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1542-1551.
- [13] 赵谦平, 王若谷, 高飞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界物源分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 933-941.
- ZHAO Q P, WANG R G, GAO F, et al. Provenance analysis of Upper Paleozoic in Yanchang Blocks, the southeast Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2015, 45(6): 933-941.
- [14] 苏东旭, 于兴河, 李胜利, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁海岸沉积特征与展布规律[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 48-56.
- SU D X, YU X H, LI S L, et al. Sedimentary characteristics and distribution laws of Benxi Formation barrier coast in SE Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 48-56.
- [15] 陈全红, 李文厚, 刘昊伟, 等. 鄂尔多斯盆地上石炭统一—中二叠统砂岩物源分析[J]. 古地理学报, 2009, 11(6): 629-640.
- CHEN Q H, LI W H, LIU H W, et al. Provenance analysis of sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin [J]. Acta Palaeogeography, 2009, 11(6): 629-640.
- [16] LI H, HE B, XU Y, et al. U-Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: Insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(5): 335-346.
- [17] DONG Y P, ZHANG G W, CHRISTOPH H, et al. Pa-

- laeozeic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks [J]. LITHOS, 2011, 122(1/2): 39-56.
- [18] ZHU X Q, ZHU W B, GE R F, et al. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: Implications for tectonic evolution and crustal growth[J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 383-400.
- [19] WANG Q, DENG J, LIU X, et al. Provenance of Late Carboniferous bauxite deposits in the North China Craton: New constraints on marginal arc construction and accretion processes [J]. Gondwana Research, 2016, 38: 86-98.
- [20] 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 (Natural Science Edition), 2018, 45(4): 393-401.
- [21] 贾浪波. 鄂尔多斯盆地中东部上石炭统本溪组物源及沉积体系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [22] 高志东. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组物源分析及有利砂体发育规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [23] 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [24] 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 Y H, LIU H J, QUAN B, et al. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 44-51.
- [25] 陈洪德, 侯中键, 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): 16-24.
- CHEN H D, HOU Z J, TIAN J C, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectono-sedimentary evolution in Ordos Basin during late Palaeozoic [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 16-24.
- [26] 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 Paleozoic sequence stratigraphy for Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2002, 22(4): 66-74.
- [27] 魏红红, 李文厚, 屈红军, 等. 苏里格庙地区上古生界层序地层学研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2002, 32(1): 55-59.
- WEI H H, LI W H, QU H J, et al. Sequence stratigraphy of Upper Paleozoic in Suligemiao Region[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2002, 32(1): 55-59.
- [28] 王勇, 徐晓蓉, 付晓燕, 等. 苏里格气田苏6井区上古生界沉积相特征研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 266-272.
- WANG Y, XU X R, FU X Y, et al. Research on the sedimentary facies characteristics of Upper Paleozoic reservoir in Su 6 Region, Sulige Gasfield[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 266-272.
- [29] 周进松, 赵谦平, 银晓, 等. 鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组储层沉积特征及天然气勘探方向[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(2): 13-16.
- ZHOU J S, ZHAO Q P, YIN X, et al. Sedimentary characteristics of carboniferous Benxi Formation, south-eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2012, 35(2): 13-16.
- [30] 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 293-320.
- GUO Y Q, LI W H, GUO B C, et al. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(2): 293-320.
- [31] 刘新昕. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组沉积环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

(编辑 雷雁林)