



· 地球科学 ·

鄂尔多斯盆地本溪组碎屑障壁海岸 砂体微相南北变化

孟祥振¹, 窦天财², 蒲仁海³, 高小平², 刘刚², 宋明³, 樊宇洁³

(1. 陕西延长石油[集团]有限责任公司 天然气研究院分公司, 陕西 西安 710061; 2. 陕西延长石油[集团]有限责任公司 气田公司, 陕西 延安 716000; 3. 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)

摘要 在延长探区近1 500口钻井资料的基础上,进行大量岩心和薄片观察以及砂厚和砂地比统计,探究鄂尔多斯盆地本溪组的砂体微相类型、平面形态和分布的沿岸变化及其控制因素。结果表明,延长气田本溪组总体均为中小潮差环境下的陆源碎屑障壁海岸沉积,但南部的甘泉—富县地区波浪作用较弱,形成了典型的障壁砂坝和障壁后沉积。北部延安—靖边南地区波浪作用较强,形成了改造障壁、浅滩和下切谷充填潮道3种主要微相砂体。障壁砂体呈平行岸线的带状或串珠状排列,近源和近岸分布;浅滩砂体呈多个分散的卵圆形远源远岸分布;潮道带砂体充填则受控于古地貌凹槽。该研究结果对延长气田和类似环境的储层识别和评价具有重要的指导意义。

关键词 强波浪型障壁;弱波浪型障壁;浅滩;潮道;砂体规模与形态

中图分类号: TE122 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2024-03-018

Changes from south to north in the microfacies of clastic barrier coastal sandbodies of the Benxi Formation in the Ordos Basin

MENG Xiangzhen¹, DOU Tiancai², PU Renhai³, GAO Xiaoping², LIU Gang², SONG Ming³, FAN Yujie³

(1. Natural Gas Research Institute Branch, Shaanxi Yanchang Petroleum [Group] Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. Gas Field Company, Shaanxi Yanchang Petroleum [Group] Co., Ltd., Yan'an 716000, China;

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

Abstract Based on core and thin section observations, as well as statistical analyzes of sandstone thickness and percentage of sandstone content from 1446 wells, we analyzed the coastal changes and control factors of the microfacies type, planar morphology and distribution of the Benxi Fm sandbodies in the Yanchang gas field. The results indicate that the Benxi Fm of the Yanchang gas field is generally composed of terrigenous coastal clastic barrier deposits in a medium to small tidal range environment, but the wave action in the southern region is weak, forming typical barrier sandbars and backbarrier deposits. The wave actions in the north change more strongly, forming three major microfacies sandbodies: reworked barriers, shoals and incised valley filled tidal channels. The barrier sandbodies are arranged in a belt or bead-like pattern parallel to the shoreline and are distributed longshore near the provenance. The oval-shaped shoal sandbodies are dispersed

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41390451); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-140)。

第一作者: 孟祥振, 男, 正高级工程师, 从事油气勘探开发地质研究, 364178782@qq.com。

further from the shoreline, and the filling of tidal channel sandbodies is controlled by ancient geomorphic grooves. This research has important guiding significance for the identification and evaluation of reservoirs in the Yanchang gas field and similar geological settings.

Keywords strong wave barrier; weak wave barrier; shoal; tidal channel; sand body dimension and distribution

中国含油气盆地的陆源碎屑岩大多为陆相沉积,海相砂泥岩仅见于塔里木盆地志留-泥盆系、东海平湖组-宝石组和鄂尔多斯盆地本溪组等。由于海相砂泥岩比例较少,露头有限,所以研究程度整体偏低。延长气田的本溪组是一个重要的产气层位,虽然气田已发现多年,但由于早期井位较稀,取心较少,前人对本溪组砂岩微相、展布及其与成藏的关系等问题存在许多不同的意见。早期有人认为本溪组砂岩为扇三角洲^[1]或浅水三角洲沉积^[2],后来又有人认为其属于潮道^[3]。随着钻井增多和研究的深入,越来越多的学者认为存在障壁砂坝^[4-9],同时也有人认为包含潮汐三角洲^[10]。盆地中部本溪组的碎屑主要来自东北方向的阴山造山带,西南方向的东祁连和东南方向的秦岭造山带^[11-12]。然而,障壁沙坝往往形成在中小潮差和弱波浪的平缓海岸地区^[13],当波浪作用增强或古地形发生变化时,障壁被破坏,改造成浅滩或滨面砂体^[14]。由于本溪组沉积在一个具有 1.4 亿年间断的不整合面上,古地貌起伏不平,沿古地貌凹槽往往会形成入潮口或主潮道微相砂体^[15]。即使在波浪作用为主的海岸地区既可形成小型孤立分散的浅滩砂体,也可形成大规模连片的滨面砂体。所以,砂体的微相类型及其规模和平面展布之间存在密切的关系^[16]。如何区分不同微相的砂体,它们的规模、形态和延伸方向有什么差异等成为气田地质评价与开发方案部署中一个重要的问题。

在没有三维地震的情况下,在平行岸线约 150 km 的海岸带,本溪组砂体微相到底存在什么微相变化,属于北东向延伸还是北西向或其他方向延伸等缺乏地质依据。近年来,延长气田在加速实现产气千万吨油当量目标的过程中,从靖边南至富县的探区内,揭示本溪组的钻井已超过一千五百余口,局部密井网区的井距平均已达 2~3 km,应用这些钻井资料确定本溪组的砂体微相类型和展布规律有了可能。本研究根据岩心、薄片、测井、分析化验及试气等资料,对该地区本溪组的古地貌、沉积微相、储层展布等进行了研究,认为

探区内的本溪组砂岩总体存在一些共性,南北的微相和分布也有一些差异。

1 本溪组陆源碎屑障壁海岸的沉积特征

研究区延长气田北起靖边南,南至黄陵,长约 150 km,东西横跨志丹至延川约 120 km,本溪组总体为碎屑海岸沉积,岩心中见到纺锤虫海相化石,砂岩主要存在障壁、潮道和浅滩等微相类型,其平面形态、规模、延伸趋势等均具有陆源碎屑海岸沉积的一些共性。

研究区本溪组整体上为奥陶系岩溶不整合面上发育的一套障壁海岸陆源碎屑岩沉积体系。岩心上的沉积构造主要反映了潮汐和波浪两种沉积作用的同生并存,与潮汐有关的主要沉积标志是入潮口和潮道砂岩中所见的冲刷面及其上覆的滞留砾石、正粒序层理、羽状交错层理砂岩、双或单黏土层细砂岩、波状层理、透镜状层理和脉状层理等^[17]。与滨海(滨面或浅滩)有关的沉积构造主要是低角度交错层理和面状层理砂岩^[18-19]。结合薄片观察到的成分和结构成熟度差异、测井相特征等可以看出,本溪组的砂岩微相主要为潮道、障壁和浅滩等,其次可能存在少量的冲溢扇、涨落潮三角洲等砂体^[17]。

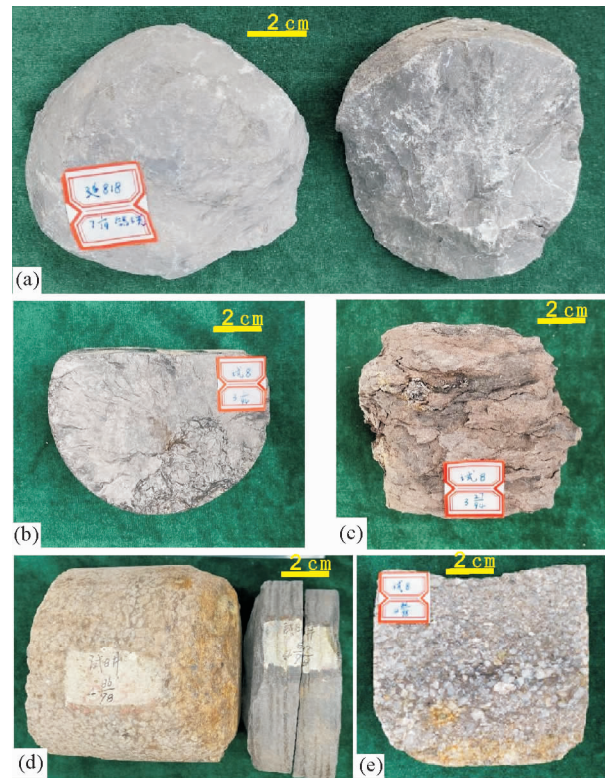
1.1 岩石学特征

自南向北、自下而上,研究区本溪组均存在 4 种主要岩石类型,分别为铝土岩、煤层与碳质泥岩、砂岩与含砾砂岩、灰岩和暗色泥岩,反映了表生、暴露、强水动力和浅—较深水沉积等多种环境。

第一类岩性主要为本溪组底部的铝土岩、铝土质泥岩,表现为表生浅湖的沉积环境。铝土岩是一种由铝氢氧化物组成的沉积岩类,主要矿物成分包括水铝石、黏土、氧化铁、钛及其他微量矿物;延 1003、延 1227、试 8 井、延 650、延 816、延 818 等井全岩主量元素分析可知, Al_2O_3 质量分数 6%~38%,属于铝土质泥岩类[见图 1(a)]。

第二类岩性主要为煤、碳质泥岩以及根土岩,多见于障壁岛顶部潮上带泥坪环境中,属于暴露标志[见图1(b)、(c)]。

第三类为砂岩和含砾砂岩,主要包括细砂岩、中—粗砂岩和含砾砂岩,灰白、浅灰为主,厚—中厚层,颗粒支撑和基质支撑均可见,砾石多呈次圆状,多以滞留细砾分布在冲刷面之上[见图1(d)],见正粒序层理[见图1(e)]、板状交错层理、槽状交错层理、楔状交错层理、平行层理、羽状交错层理、面状(低角度交错)层理和块状(均匀)层理等。



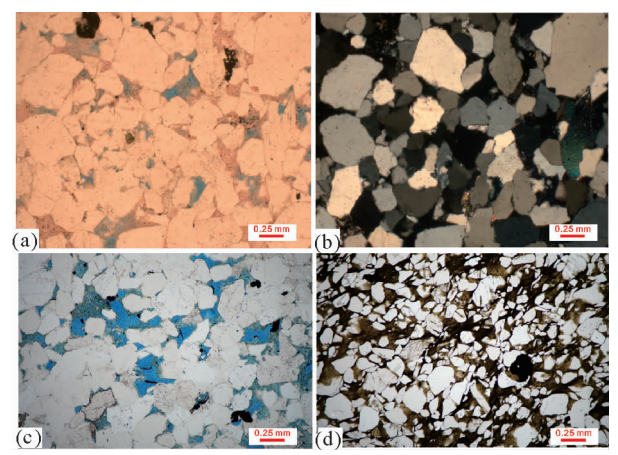
(a)延818井,灰色块状铝土岩,本溪组底界识别依据之一;(b)、(c)试8井,本一段上部根土岩,障壁岛顶部的暴露标志;(d)入潮口微相粗砂岩底界与泥岩突变接触;(e)入潮口微相石英质正粒序含细砾粗一中砂岩。

第四类岩性主要为黑色、灰色泥页岩,这类岩性代表的中深潟湖或滨外泥等较深水、弱还原环境。泥岩中常见植物碎片,有时泥岩与砂岩、粉砂岩呈互层状,可见沙纹层理或水平层理。

1.2 砂岩具有高成分成熟度和中低结构成熟度

薄片镜下观察表明,本溪组砂岩的成分成熟度总体很高,石英和硅质岩屑质量分数一般在

95%左右;但结构成熟度中等到偏低,多数砂岩为中等分选,次棱角—次圆状[见图2(a)、(b)、(c)]。个别砂岩结构成熟度低,含质量分数5%~10%的泥砾,部分砂岩含火山尘杂基[见图2(d)]。这种中等结构成熟度可能主要反映了潮汐流的水动力特点,缺乏高能波浪淘洗作用。少量低结构成熟度可能为风暴或小型潮汐冲刷快速堆积造成,或与火山碎屑的混入有关。



(a)Y1050井浅灰色中砂岩中等分选和磨圆度,蓝色为孔隙,红色为方解石,单偏光;(b)正交;(c)Y1126井,浅灰色中砂岩,蓝色为孔隙,中等分选磨圆,单偏光;(d)Y1059井,深灰色细砂岩,含火山尘杂基,分选磨圆差,单偏光。

图2 本溪组砂岩高成分成熟度、中低结构成熟度显微照片

Fig. 2 Microscopic photos of high-compositional maturity and medium to low textural maturity Benxi Formation sandstones

1.3 存在潮汐与滨海特有的沉积构造

根据前人研究可知,障壁沙坝的主体部分主要由潮道和滨海砂岩组成,这两种微相在古代沉积岩中也可据沉积构造识别出来,如潮道一般底界具冲刷,含滞留砂砾和粒序层理,内部往往见槽状和板状交错层理,偶见双向羽状交错层理;而浅滩或滨面砂岩除可见板状和槽状交错层理外,还可见面状层理或低角度的楔状交错层理^[15,17-19]。障壁沙坝是多个微相组成的复合砂体,一般厚度大,单层厚度多大于5 m,其他沉积微相如冲溢扇、涨落差三角洲等砂岩一般单层厚度较薄,多小于3 m,宽度0.1~1.5 km,面积多小于1 km²,也可存在底界突变的正旋回和底界渐变的反旋回两种剖面结构^[20]。冲溢扇沉积中可见到风暴冲刷砾屑^[19]。但是,井下地层涨落潮三角洲和冲溢扇很难识别,主要依靠砂体规模和平面上与障壁的

位置关系进行推测。在难以区分的情况下,一般把障壁靠岸一侧的非障壁砂坝部分简单统称为障壁后沉积,主要为潮坪潟湖环境的薄层状砂岩、粉砂岩、泥岩互层夹煤线^[21]。

研究区本溪组砂岩岩心上常见板状交错层理、槽状交错层理砂岩,这两种交错层理在潮道和滨海砂岩中均可出现。研究区本溪组也偶见羽状交错层理中细砂岩[见图 3(a)、(b)],也可见到双或单黏土层[见图 3(c)],呈波状[见图 3(d)]、透镜状[见图 3(e)]和脉状层理,这些属于潮道和潮坪环境的沉积特征。本溪组中也存在典型的浅滩或滨面有关的低角度楔状交错层理[见图 3(f)]和面状层理[见图 3(g)]砂岩。



(a) 延 600 井,羽状交错层理细砂岩;(b) 延 887 井,羽状交错层理;(c) 含双或单黏土层细砂岩;(d) 波状交错层理;(e) 透镜状层理;(f) 低角度楔状交错层理;(g) 面状层理细砂岩。

图 3 本溪组岩心见到的几种沉积构造

Fig. 3 Sedimentary structures observed in the core of the Benxi Formation

1.4 砂岩底部与泥岩存在突变和渐变两种序列

根据欧美地区障壁沙坝的研究可知,砂岩底部冲刷面和滞留砾石多于障壁底部的人潮口沉积有关^[15]。冲刷面下伏往往为中—深潟湖或滨外低能泥岩、潮坪粉砂泥岩、沼泽泥炭等沉积微相。砂岩顶界与泥岩多为突变接触,少数为渐变接触。

在自然伽马曲线上,砂岩多呈箱型,少量呈钟形和高幅齿形。

研究区本溪组岩心上常见本溪组砂岩或细砾岩与下伏泥岩之间呈突变接触,且近一半砂砾岩底界存在冲刷面,砂砾岩内部见粒序层理[见图 4(a)、(b)]。



(a) Y864 井,细砾岩底界冲刷,内部具正粒序层理;
(b) Y1003 井,砂岩底部与泥岩突变接触。

图 4 研究区本溪组岩心照片

Fig. 4 Core photos of the Benxi Formation in the study area

大约 1/3 的砂岩底界与泥岩呈渐变关系,自然伽马测井曲线呈漏斗形或组合漏斗形,具滨外(或泻湖)泥-浅滩砂或朝上带泥-潮间带砂的旋回特点。如延 1045 井位于障壁北东缘入潮口远离岸线方向,测井与岩心综合反映出,其本 2 段具有朝上变粗的反旋回特点,综合判断为落潮三角洲沉积(见图 5)。总体上讲,冲刷面成为潮道和障壁砂坝底部入潮口常见的沉积构造。

前人研究表明,砂岩底界与泥岩的突变和渐变在障壁砂坝均可出现,且冲刷突变者较为常见,此时常伴随入潮口主潮道含砾砂岩的沉积。滨面或浅滩砂体底界渐变较常见^[15,20]。

1.5 存在风暴、凝灰质和局部灰岩等沉积现象

研究区本溪组沉积期间曾经发育过两次中深—滨浅泻湖沉积背景,发育深灰色水平层理暗色泥岩、沙纹层理含粉砂泥岩、含碳质泥岩。从全取心并看,本 1 段和本 2 段均存在较深水的泥岩沉积背景。在该沉积背景中,有时可以看到风暴遗迹、凝灰质砂岩和沉火山角砾凝灰岩。延 377 井本溪组泥岩中,局部含 20~30 cm 的沉火山角砾凝灰岩[见图 6(a)],延 1227 井本 2 段和延 887 井本一段潟湖泥岩中含撕裂状泥砾质砂岩,应为风

暴对较深水泥岩的冲刷搅动再沉积形成,应属于障壁砂坝上的冲溢扇环境[见图 6(b)、(c)]。

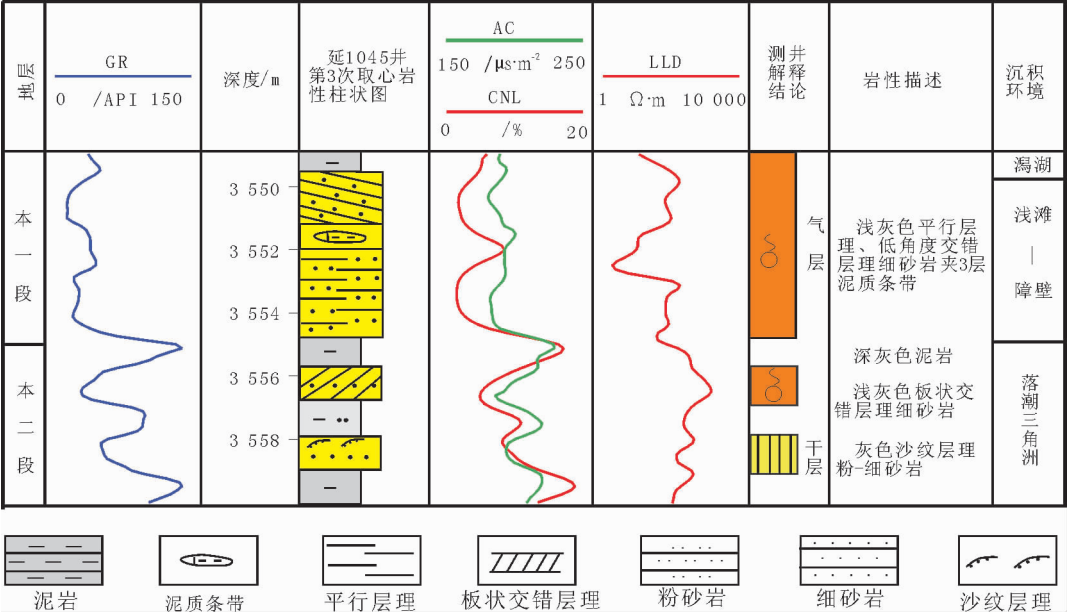


图 5 延 1045 本 2 段落潮三角洲至本 1 障壁浅滩潟湖岩心剖面

Fig. 5 The core and logging section from the ebb tidal delta to the barrier, shoal and lagoon in Well Y1045



(a) 延 377 井中所夹的沉火山角砾凝灰岩;(b) 延 1227 井 3 回次本溪组含风暴撕裂状泥砾细砂岩;(c) 灰色钙质泥岩破碎和短距离错动沉积;(d) 风暴有关的冲刷成因砂、泥质砾屑(右)。

图 6 岩心沉积构造标志
Fig. 6 Core sedimentary structure markers

本溪组内部局部含 1 或 2 层 1~2 m 薄层灰岩,其测井 $AC < 190 \mu s/m$ 且 $Rd > 2\,000 \Omega \cdot m$, 本 1 段和本 2 段均发育。平面上它们在岩溶凹地障壁边缘和之间局部零星分布,并与浅滩砂岩或潮汐三角洲纵向过渡,为浅水潟湖环境。

1.6 本一和本二段分别代表两期水进水退旋回

综合取心和测井岩性、沉积相解释可以看出,

研究区本溪组存在两次水进水退旋回,本 2 段和本 1 段分别经历了水体变深-变浅的沉积过程。如本溪组全取心的试 8 井本溪组由一个较深水泥岩-障壁沙坝-较深水泥岩-潮坪台地旋回组成(见图 7、图 8)。

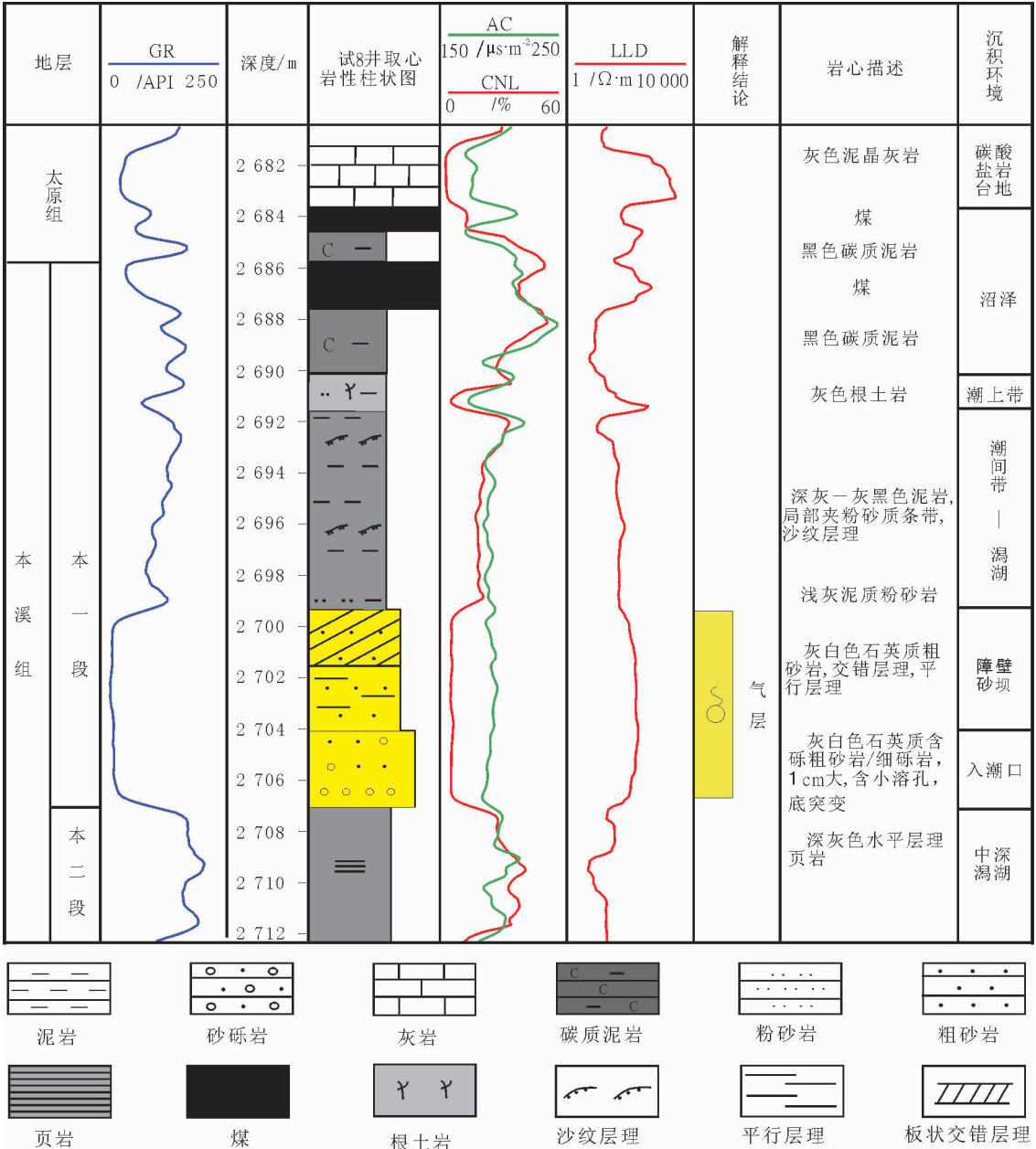


图 7 试 8 井本一段入潮口-障壁砂坝-潟湖-潮上带沼泽台地沉积剖面图

Fig. 7 Sedimentary profile of the tidal inlet, barrier sandbar, lagoon, intertidal swamp platform in the first section of S8 well

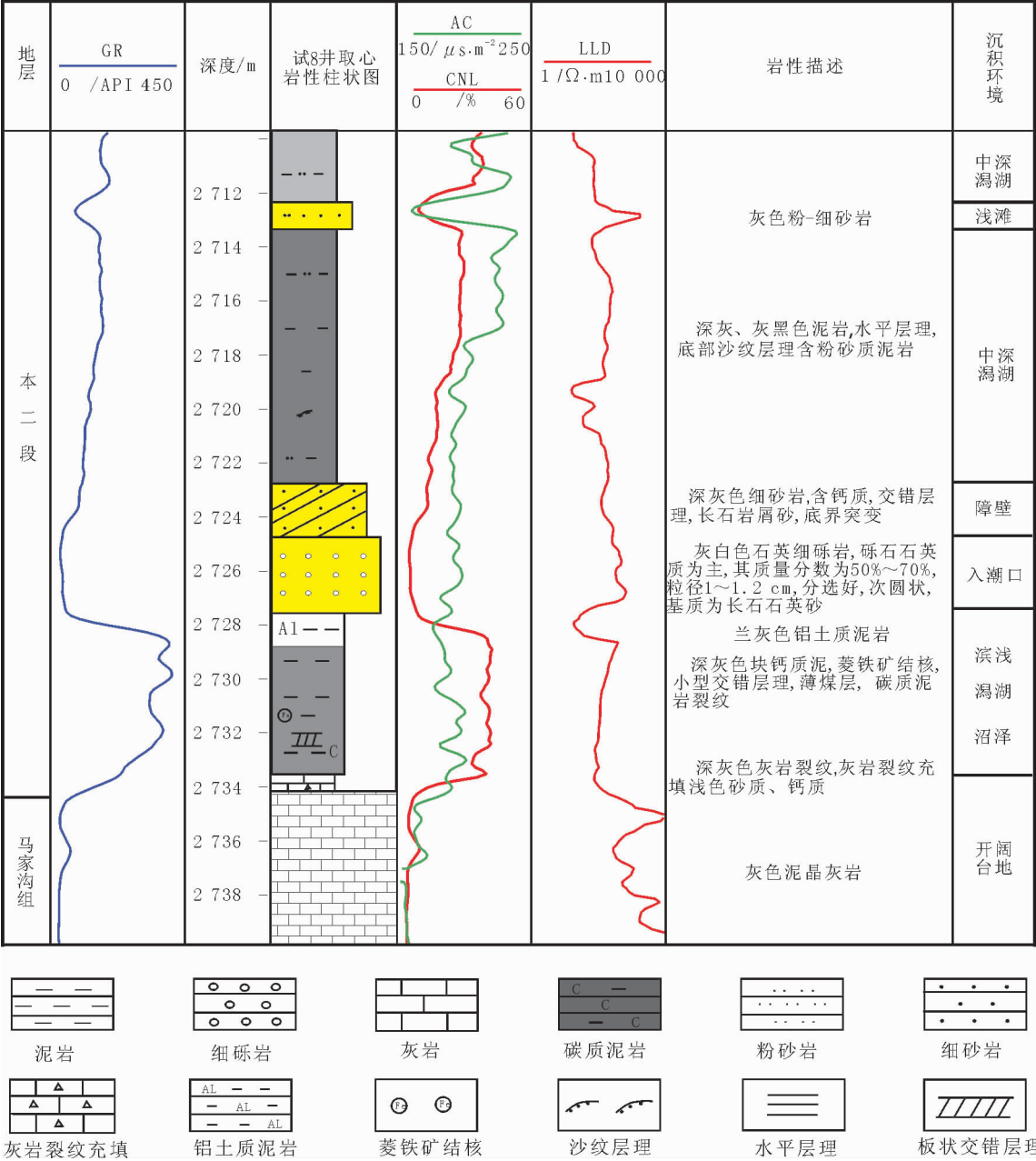


图 8 试 8 井本二段沼泽-泻湖-入潮口-障壁-潟湖沉积剖面图

Fig. 8 Sedimentary profile of the swamp, lagoon, tidal inlet, barrier, lagoon in Section 2 of S8 Well

2 气田南北微相类型与分布的变化

根据对鄂尔多斯盆地本溪组的沉积相分析可知,盆地东南部甘泉—富县地区属于典型的弱波浪型障壁-泻湖海岸体系,盆地北部的安塞—靖边地区则属于较强波浪改造的障壁-浅滩-潮道体

系。

在平均井距 2~3 km 的密井网条件下,通过统计延长气田近 1 500 口钻井的本一和本二段砂岩厚度和砂地比,分别制作研究区南部甘泉—富县地区(见图 9)以及北部靖边南—延安地区(见图 10)本一段及本二段砂地比与沉积相平面图。由图 9、图 10 可以看出,南北本溪组砂体形态与分布具有明显的不同。

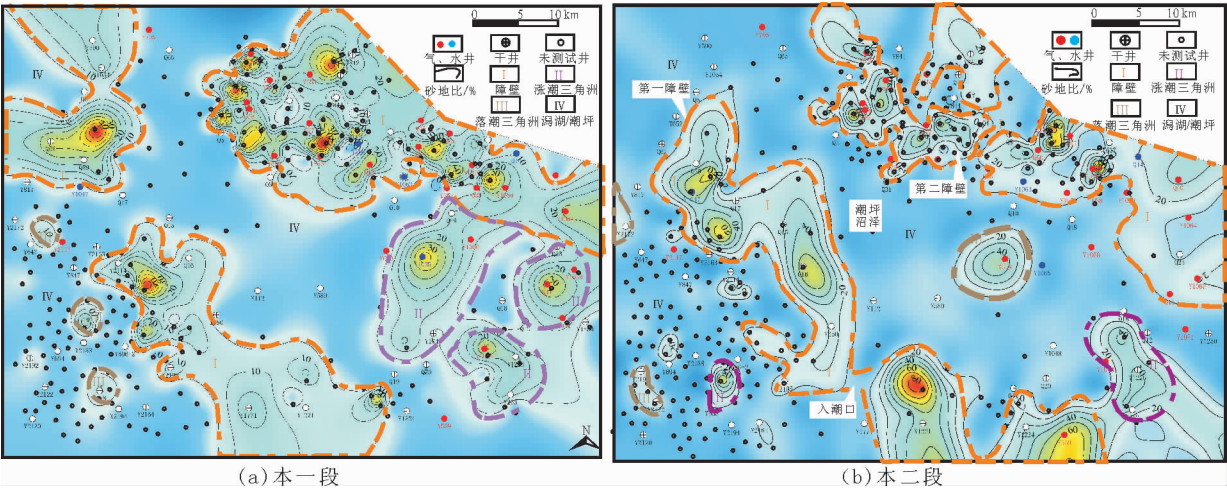


图 9 研究区南部甘泉—富县地区砂地比与障壁砂坝沉积相平面图

Fig. 9 Plans of the sand-to-ground ratio and sedimentary phase planes in the Ganquan-Fuxian Area

延长气田南部甘泉—富县地区的本溪组沉积属于中低潮差、弱波浪环境,形成了典型的障壁沙坝及障壁后泻湖潮坪沉积,其模式如图 11 所示。本一段和本二段各发育两个平行岸线的北西向延伸的大型障壁砂坝,单个障壁宽 5 ~ 15 km,长 40 ~ 50 km,障壁砂坝由多个呈串珠状砂体组成,一般厚度 4 ~ 10 m,最大厚度接近 20 m,障壁靠岸一侧和两障壁之间为泻湖潮坪沉积(见图 10)。

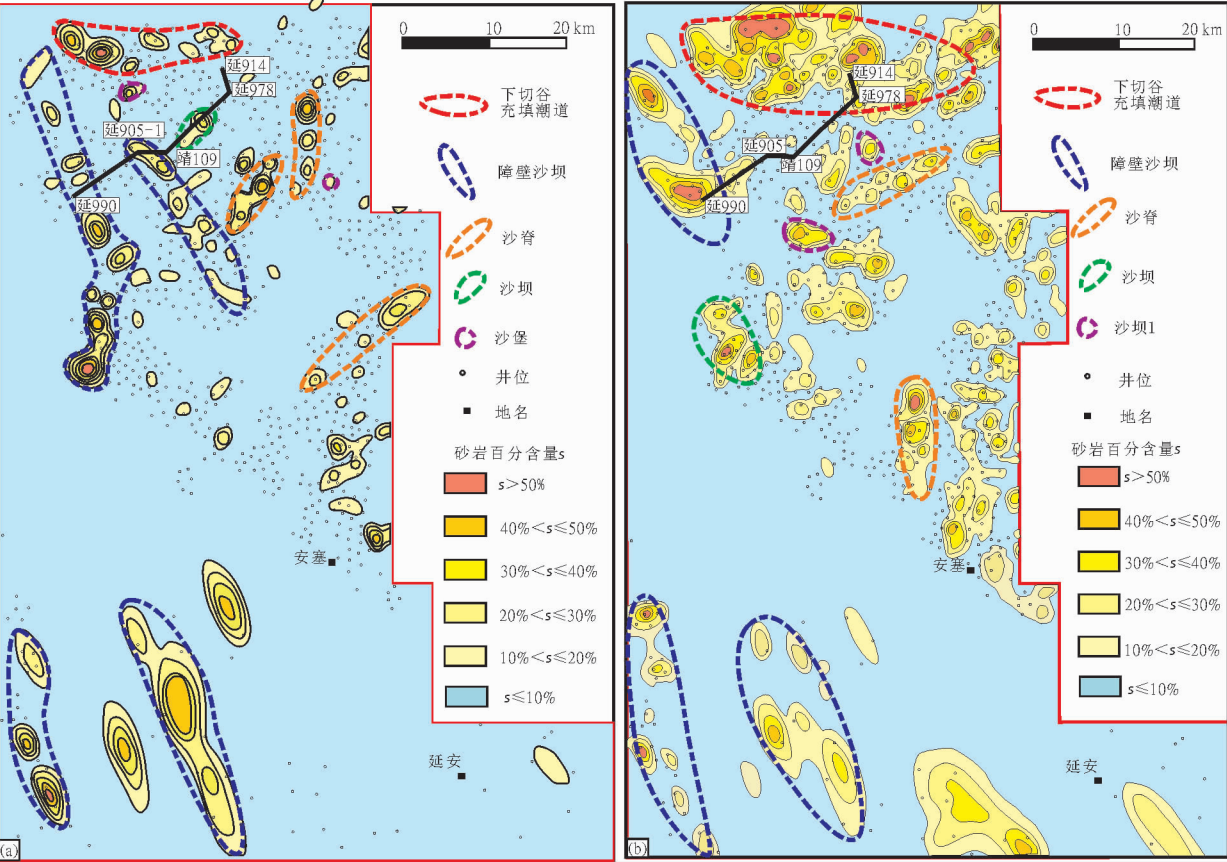


图 10 延长气田北部砂地比与沉积相平面图

Fig. 10 Sandstone content percentages and sedimentary facies map in the northern part of the Yanchang gas field

延长气田北部靖边南—延安地区属于中低潮差和较强波浪环境,本溪组砂体主要发育 3 种微相,即被波浪改造的障壁沙坝、孤立分散的卵圆形浅滩、斜交或垂直岸线的古地貌凹槽充填的潮道(见图 11)。

由于受波浪改造和破坏,延长气田北部的障

壁沙坝面积较小,主要分布在西侧靠岸地区,北北西或近南北向延伸,本一段障壁砂体宽度 2 ~ 3 km,长 10 ~ 20 km,一般厚度 3 ~ 6 m;本二段障壁砂体宽 3 ~ 5 km,长 10 ~ 15 km,一般厚度 10 ~ 20 m,砂地比 30% ~ 50% (见图 10)。

浅滩砂体单个规模小,直径一般 1 ~ 3 km,厚度约 5 ~ 15 m,砂地比 10% ~ 30%,孤立分散在安塞以北至靖边南地区的障壁沙坝和下切谷充填潮道之间 (见图 10、图 12)。

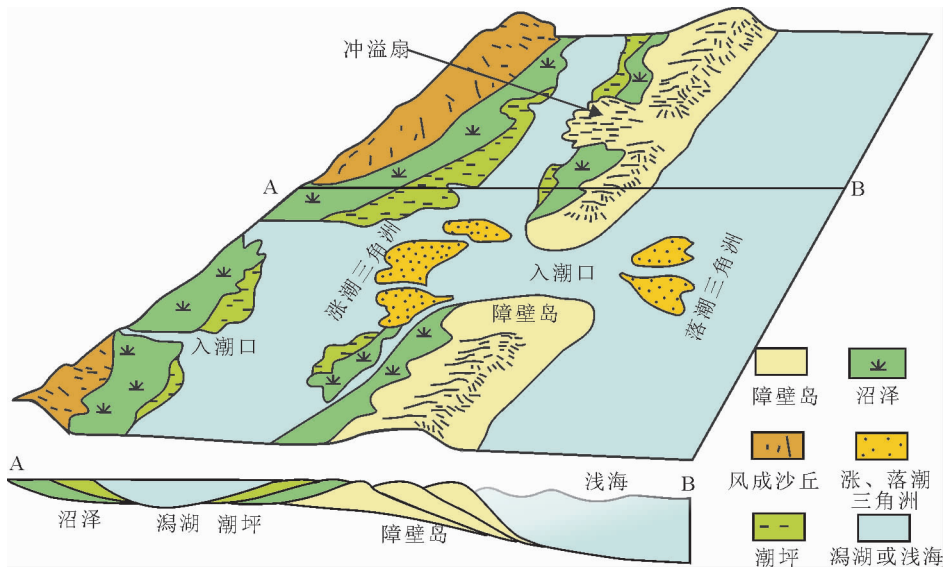


图 11 障壁-泻湖海岸沉积单元组成模式图 (据文献[20]修改)

Fig. 11 Composition model of barrier lagoon coastal sedimentary units

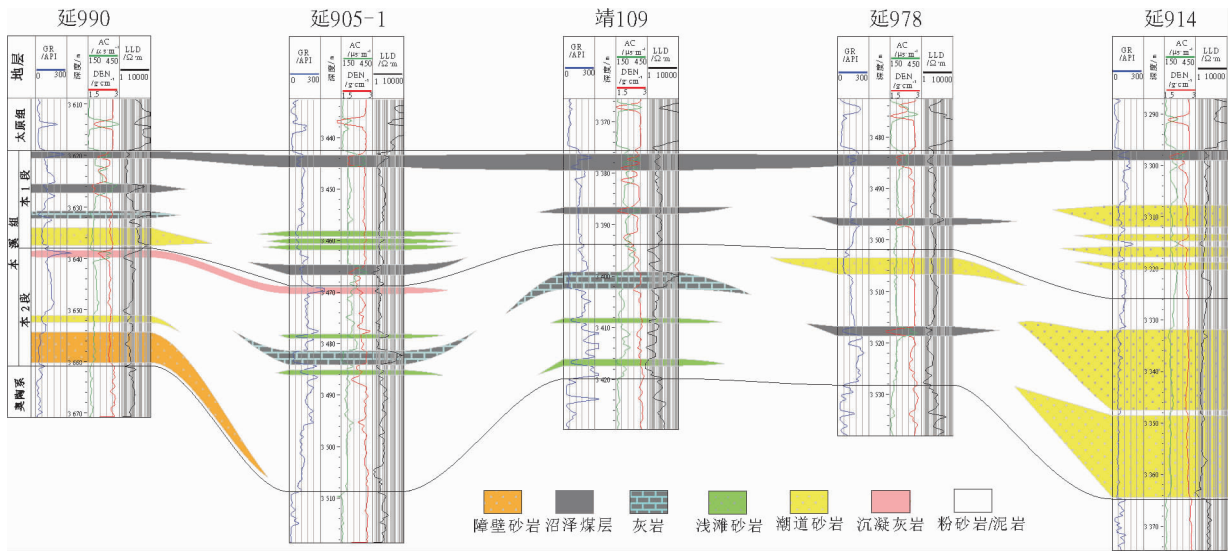


图 12 延安气田北部障壁潮道滩坝钻井对比剖面 (剖面位置见图 10)

Fig. 12 Cross-sections of wells linked through different microfacies and lithologies in the Benxi Formation

浅滩砂体根据其平面形态分为 3 种 (见图 10),窄带状的一般称滩脊,长宽比大于 3 : 1;短轴状的称滩坝,长宽比介于 3 : 1 ~ 2 : 1;近园形者称滩堡,长宽比小于 2 : 1。研究区主要为滩堡沙体,多个滩堡可定向排列形成滩脊或滩坝。浅滩的不同形态与平坦的陆表海上存在的类似古地貌形态有关。分散的卵圆形滩堡也见于澳大利亚北部的

现代大堡礁,平面上,小型滩堡呈近卵圆形的浅滩,水深小于 10 m,直径 1 ~ 3 km,无定向不规则分布。在研究区北部滩堡数量二十余个。

潮道砂岩主要分布在研究区最北端,充填在近东西延伸的下切谷中,近似垂直于古海岸线,砂体宽度 3 ~ 10 km,长度 20 ~ 30 km,厚度 10 ~ 20 m,砂地比 30% ~ 50%。该潮道带在前石炭纪古

地质图上对应一个东西向的下切谷,沿下切谷由于存在强烈剥蚀下切作用,出露了马⁵₃至马⁵₄地层,下切谷两侧则出露了马⁵₁至马⁶地层(见图 13)。下切谷内部充填的本溪组厚度也明显大于两侧,砂地比增高,砂岩也增厚,砂体底界存在冲刷并与泥岩突变接触。沿不整合面下切谷沉积较厚潮道砂体的现象在第四纪障壁海岸沉积中也多有报道^[15,21]。

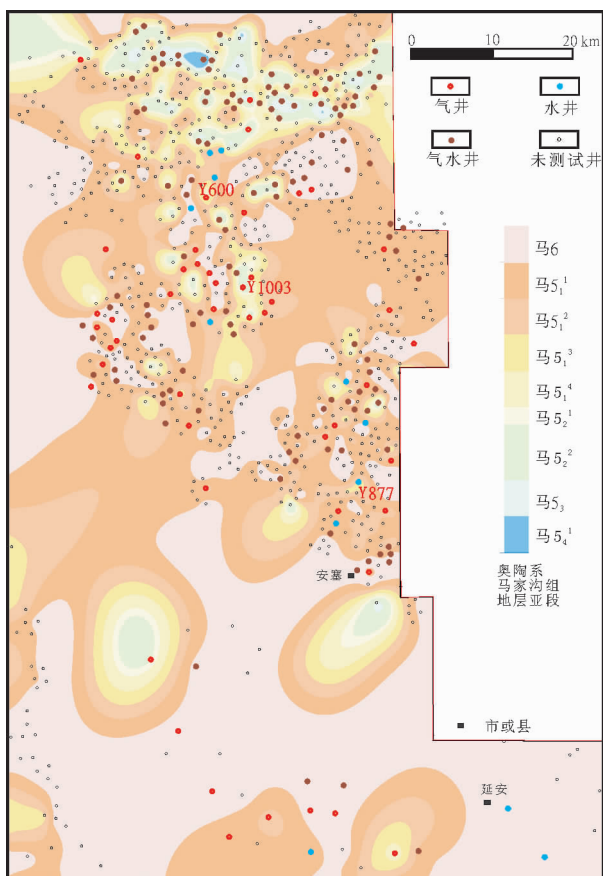


图 13 延长气田北部前石炭纪古地质图

Fig. 13 Pre-Carboniferous paleogeological map of Jingbian southern Yan'an area

前人研究表明,障壁主要形成于中小潮差和弱波浪作用的平坦碎屑海岸地区,大潮差潮汐环境,砂体被搬运堆积成近垂直岸线的潮汐沙坝,障壁不发育^[13]。强波浪环境下,障壁会被波浪改造形成部分浅滩砂体,或彻底改造成滨海沉积体系。荷兰西海岸现代碎屑海岸就属于此种类型,障壁沙坝与浅滩砂共同分布,多个障壁沙坝与海岸线平行或呈低角度斜交,障壁靠岸一侧为浅滩砂体^[14]。延长气田中北部的滩堡砂体则主要分布在障壁靠海一侧,与荷兰西海岸现代沉积稍有不同,其原因与古地貌对海底地形和砂体分布的控制有关。

3 古海岸线和物源对砂体微相和分布差异的影响

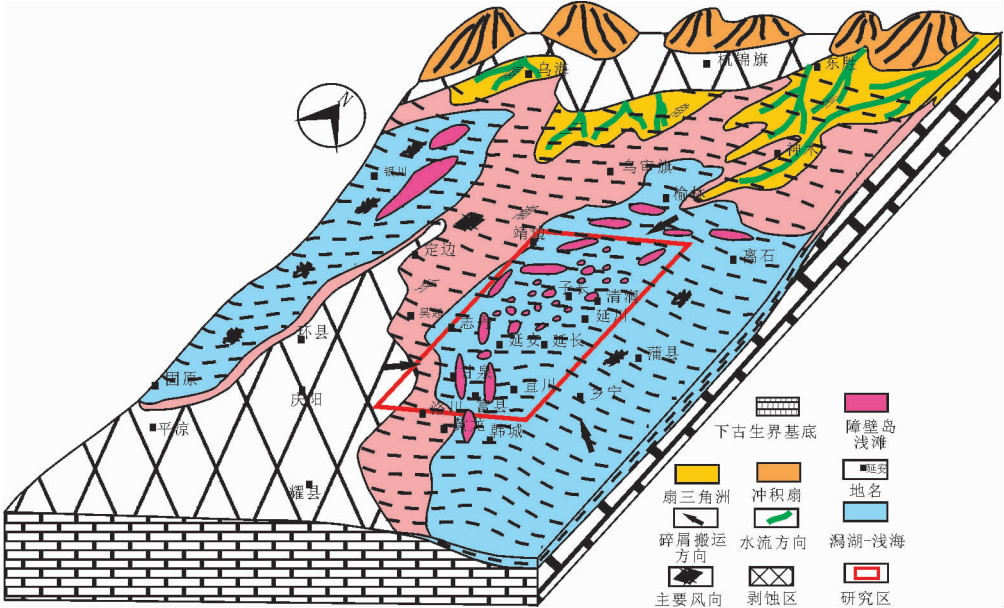
研究区本溪组沉积时,在鄂尔多斯盆地中部存在一个朝北变低、变窄的古隆起剥蚀区,隆起上本溪组缺失(见图 14),隆起以东和以西沉积的地层分别为本溪组和羊虎沟组。本溪组岩石的重矿物、碎屑锆石和微量元素等分析表明,延长气田的砂泥主要来自北东的阴山、西南方向的西秦岭和东南方向的东秦岭^[11-12]。北东物源与南物源的分界线大致呈北西向延伸,位于靖边南的延 52 井至延川的延 528 井;西南物源与东南物源的分界线大致呈北北东向延伸,分界线大致位于甘泉县的延 1051 至延长西的延 528 井(见图 15)。延长气田本溪组的主要物源来自东南和西南方向,仅北东局部地区来自北东方向。甘泉—富县地区紧邻中央古隆起北北西向的古海岸线(隆起边界线),距西南物源的古海岸线较近,所以形成了大型北北西延伸的障壁沙坝。延安及其以北至靖边南的本溪组碎屑也主要来自西南方向,在西侧近岸地区可能形成沿岸障壁砂体,在距西海岸线更远的子长—延川一带,接近陆表海内部,可能受北东向风力和波浪作用更强,形成了大量小型浪控浅滩砂体(见图 14)。

所以,延长气田本溪组砂体微相和展布的南北差异与古海岸线和物源远近也有一定的关系,即近源近岸地区发育沿岸障壁沙坝,远源远岸地区浅滩砂体比例增高。

4 古地貌对砂体微相和分布的影响

无论延长气田的南部或北部,奥陶系顶面的岩溶古地貌对砂体的砂厚与分布有重要的影响,但气田南北古地貌对砂体的控制方式稍有不同。南部古地貌为北东倾斜坡叠加两个北北西走向的古凹槽和古凸起(见图 16),形成的本溪组障壁沙坝也为北北西走向;本溪组砂岩最厚的障壁沙坝微相沿岩溶古凹槽与古高地之间的斜坡分布,即障壁砂岩含量最高的位置既不在古地貌高地,也不在古地貌凹槽,而是位于古地貌高地与凹槽之间的斜坡上,此处应属于潮下带波浪作用较强的前滨-临滨带(也称为滨面带)。第一和第二障壁之间对应为古地貌高地,为古水深较浅的朝间带-

朝上带。第一障壁西南侧和第二障壁北东侧对应于古地貌凹槽,分别属于潮坪-潟湖和陆棚泥沉积环境(见图9、图16)。



注:红框内为研究区范围

图 14 鄂尔多斯盆地本溪组沉积时的古地貌示意图(据文献[9]修改)

Fig. 14 Paleogeomorphic framework during sedimentation of the Benxi Formation in the Ordos Basin

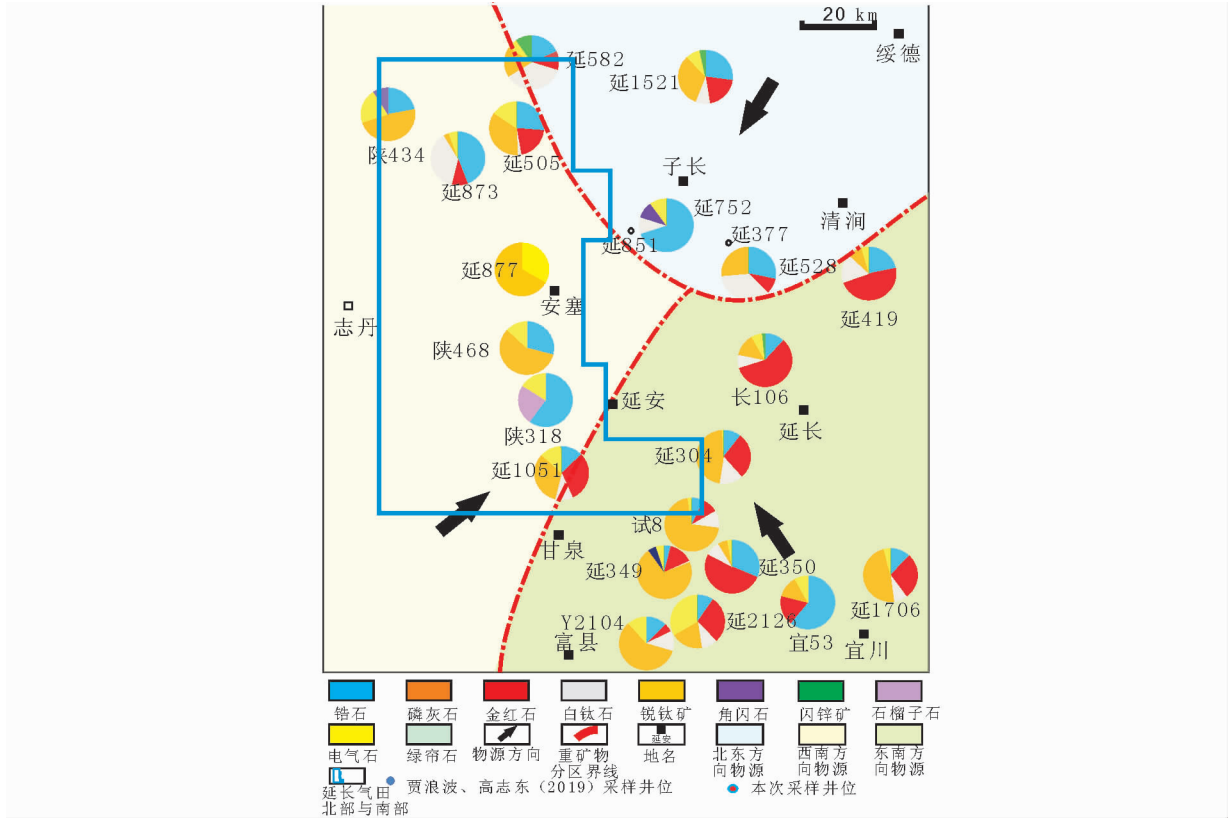


图 15 延长气田区本溪组砂岩重矿物分析与物源区分界图

Fig. 15 Distribution of heavy minerals and provenance of the Benxi Formation sandstone in the Yanchang gas field

但是,延长气田北部的本溪组砂岩多沿岩溶古凹槽加厚。无论是靖边南的近东西向下切谷充填潮道砂岩,还是北北西向障壁沙坝,或是浪控成因的分散的滩堡砂岩,其加厚位置均与古地貌凹

地位置吻合。这种本溪组砂岩加厚带的成因可能均与其底部存在类似下切谷充填潮道砂体有关(见图 17)。

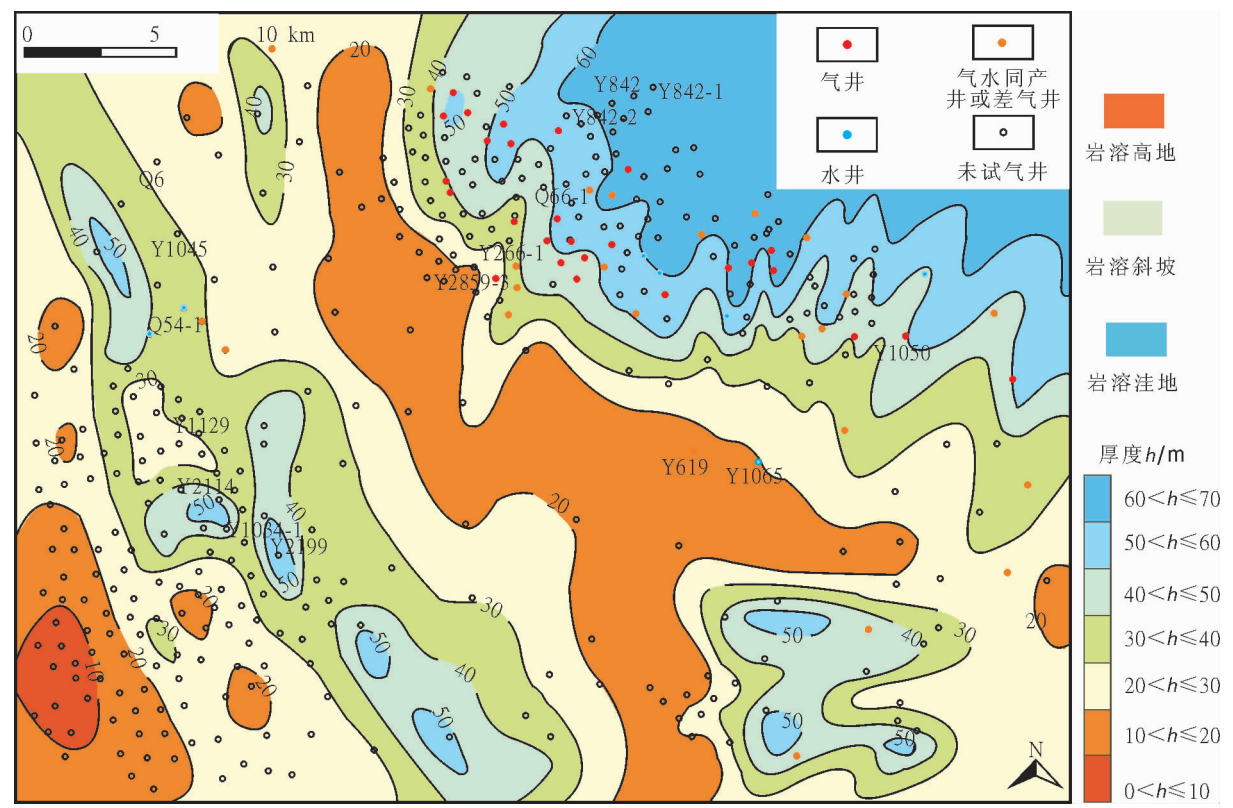


图 16 延长气田南部甘泉—富县地区本溪组古地貌图
Fig. 16 Thickness map of the Benxi Formation in Ganquan to Fuxian County

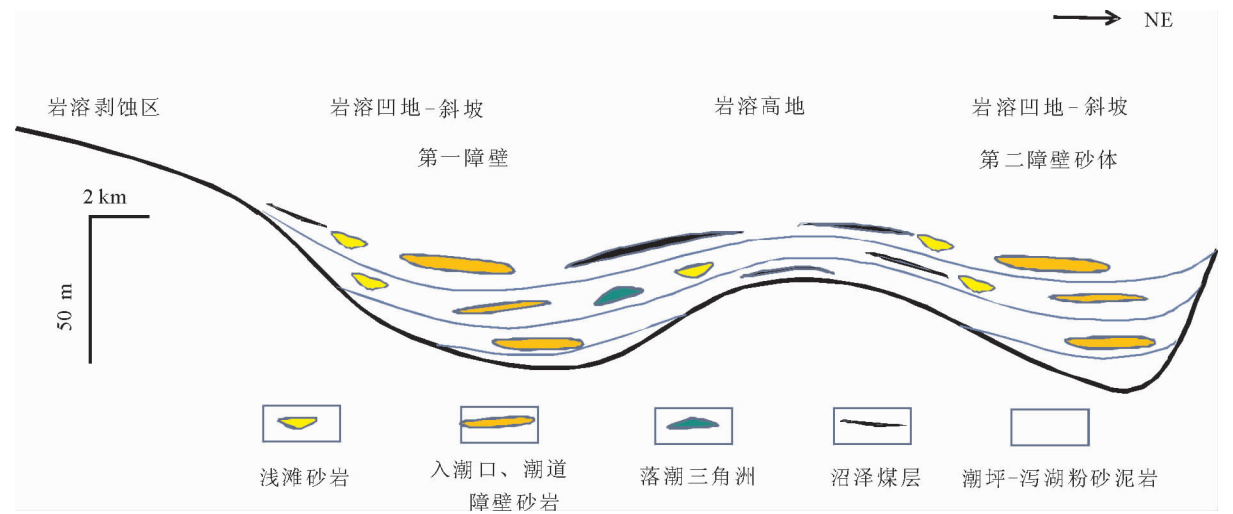


图 17 延长气田中北部岩溶下切谷内本溪组砂岩增厚示意剖面图

Fig. 17 A schematic section of sandstone thickening in the Benxi Formation in the karst grooves in the northern Yanchang gas field

5 本溪组砂体的控藏作用

研究区本溪组是延长气田一个重要的产气层位,相对于石盒子组、山西组和奥陶系等其他产层气藏,本溪组气藏储量大、单井产能高,其重要原因之一是障壁、滨海砂岩是海陆相砂岩中除辫状河之外规模最大的砂岩^[16],厚度大,分布广,且成分和结构成熟度较高,因而储层物性好^[22]。其次,本溪组顶部一般存在一套厚度较大(4~16 m)且稳定的煤层和碳质泥岩烃源岩,煤层上覆太原组10~30 m致密泥晶灰岩,起到较好的封盖作用,使成藏期本溪组顶部煤层气朝下伏砂岩之间形成较大的源储压差和充注压力,导致本溪组气藏比其他层位的气藏地层压力系数偏高^[8],一般达1以上,而同井其他层位气藏的压力系数一般小于1)。这些要素是造成延长气田本溪组气藏产量高的一个重要原因。

总体上讲,延长气田南部属于中低潮差、弱波浪环境,障壁沙坝规模大,是本溪组储量和高产能的主要贡献者。气田北部风力和波浪作用增强,加上古地貌不平整的影响,障壁被改造,砂体规模变小,小型浅滩和潮道砂体占比增高,本溪组气藏的产量和储量相对南部变差。

6 结论

1) 延长气田本溪组总体上属于中低潮差作用的陆源碎屑障壁海岸环境,砂体微相和分布受波浪强弱、古地貌、物源供应等因素的影响。气田南部为弱波浪环境,主要发育了典型的障壁沙坝;气田北部波浪作用增强,主要发育了改造型障壁、浅滩和潮道等3种微相砂体。

2) 延长气田北部本溪组浅滩微相受凹凸不平的古地貌影响,呈现3种平面形态类型,分别为近卵圆形滩堡、短轴状滩坝和长轴状滩脊,浅滩单砂体规模小,远源分散分布,或隐约呈北东向排列;靖边南近东西向延伸的潮道砂体主要充填在不整合面的下切谷中;造成延长气田本溪组砂体微相和分布南北差异的主要原因是古地貌和波浪作用强度差异。

3) 延长气田南部本溪组障壁沙坝规模大,连片分布,储量和产能较高;北部浅滩和潮道单砂体规模小,分布零散,储量和产能相对较低。

参考文献

- [1] 陈全红,李可永,张道锋,等.鄂尔多斯盆地本溪组—太原组扇三角洲沉积与油气聚集的关系[J].中国地质,2010,37(2):421-429.
CHEN Q H, LI K Y, ZHANG D F, et al. Relationship between fan delta sedimentation and oil and gas accumulation of Benxi Formation-Taiyuan Formation in Ordos Basin [J]. Geology in China, 2010, 37 (2): 421-429.
- [2] 李洁.晚古生代鄂尔多斯盆地沉积-层序充填特征与物质分布规律[D].成都:成都理工大学,2011.
- [3] 段长江,谢英刚,潘新志,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴地区本溪组—太原组沉积环境及沉积相研究[J].石油天然气学报,2015,37(5):6-9.
DUAN C J, XIE Y G, PAN X Z, et al. Study on sedimentary environment and sedimentary facies of Benxi Formation-Taiyuan Formation in Linxing Area, eastern margin of Ordos Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2015, 37 (5): 6-9.
- [4] 王越,陈世悦,梁绘媛,等.鄂尔多斯盆地保德地区上古生界沉积相与沉积演化特征[J].沉积学报,2016,34(4):775-784.
WANG Y, CHEN S Y, LIANG H Y, et al. Sedimentary facies and evolution characteristics of Upper Paleozoic in Baode Area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34 (4): 775-784.
- [5] 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 sand bodies of Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (6): 935-954.
- [6] 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 of barrier coast of Benxi Formation in southeastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (9): 48-56.
- [7] 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 Upper Paleozoic in Baode Area, eastern margin of Or-

- dos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(2): 231-243.
- [8] 高小平. 延长—延川东部探区上古生界有利储层主控因素研究[J]. *石化技术*, 2019, 26(7): 25-26.
- GAO X P. Study on main controlling factors of Upper Paleozoic favorable reservoirs in Yanchang-Yanchuan eastern exploration area [J]. *Petrochemical Technology*, 2019, 26(7): 25-26.
- [9] 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. Sedimentary evolution model of Carboniferous-Permian in Yan'an gas field in southeastern Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(4): 1088-1105.
- [10] 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.
- [11] 林进, 李云, 何剑. 鄂尔多斯延长气田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. Analysis of provenance and sedimentary system of Benxi Formation in Yanchang exploration area of Ordos [J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1542-1551.
- [12] 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. Discussion on sediment provenance of Benxi Formation in Ordos Basin and its tectonic significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 1087-1103.
- [13] GALLOWAY W E, HOBDAI D K. Terrigenous clastic depositional systems[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [14] SHORT A D. Beach systems of the central Netherlands coast: Processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system[J]. *Marine Geology*, 1992, 107(1/2): 103-137.
- [15] FITZGERALD D, BUYNEVICH I, HEIN C. Morphodynamics and facies architecture of tidal inlets and tidal deltas[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2012.
- [16] REYNOLDS A D. Dimensions of paralic sandstone bodies[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(2): 211-229.
- [17] TAVENER-SMITH R. Prograding coastal facies associations in the Vryheid formation (Permian) at Effingham quarries near Durban, South Africa[J]. *Sedimentary Geology*, 1982, 32(1/2): 111-140.
- [18] BRIDGES P H. Lower Silurian transgressive barrier islands, southwest Wales[J]. *Sedimentology*, 1976, 23(3): 347-362.
- [19] HOBDAI D K, TANKARD A J. Transgressive-barrier and shallow-shelf interpretation of the lower Paleozoic Peninsula Formation, South Africa[J]. *Geol Soc America Bull*, 1978, 89(12): 17-33.
- [20] HUDOCK J W, FLAIG P P, WOOD L J. Washover Fans: A modern geomorphologic analysis and proposed classification scheme to improve reservoir models[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(10): 854-865.
- [21] JOHANNESSEN P N, NIELSEN L H, NIELSEN L, et al. Architecture of an Upper Jurassic barrier island sandstone reservoir, Danish Central Graben: Implications of a Holocene-Recent analogue from the Wadden Sea[J]. *Petroleum Geology Conference*, 2010, 7(1): 145-155.
- [22] 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): 468-481.
- MENG X Z, SONG M, PU R H, et al. Control factors and prediction of favorable accumulation areas for Benxi Formation gas reservoirs in Fuxian to Ganquan County [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(3): 468-481.

(编辑 雷雁林)