

准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体沉积模式及油气勘探意义

厚刚福¹, 李啸², 宋兵¹, 王力宝¹, 李亚哲¹, 郭华军¹,
曾德龙², 贾开富², 彭博¹, 单祥¹

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院

摘要 准噶尔盆地腹部八道湾组是侏罗系潜在的勘探接替领域。通过分析盆1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体形成条件、沉积特征,结合成藏条件研究,提出了坳陷湖盆坡折之下发育低位体系域砂体,低位体系域砂体成藏条件优越:①盆1井西凹陷八道湾组发育1个完整的三级层序,凹陷周缘发育坡折,来自东部物源体系的辫状河三角洲向凹陷方向进积,在坡折之下的凹陷区卸载沉积物,为凹陷区低位体系域砂体的发育创造了条件。②盆1井西凹陷八道湾组发育低位体系域砂体,低位体系域砂体呈砂泥互层,侧向与三角洲平原河漫滩泥岩接触,顶底板和侧向遮挡条件较好,岩性圈闭条件优越,具有形成规模岩性圈闭群的条件。③盆1井西凹陷发育低孔特低渗低位体系域砂岩储层,局部发育的微裂缝改善了储层物性;凹陷发育二叠系风城组和下乌尔禾组2套烃源岩,烃源条件较好。④盆1井西凹陷周缘发育深潜2组断裂,在垂向上沟通八道湾组低位体系域砂体与二叠系烃源岩,有利于油气聚集成藏,勘探潜力大,为准噶尔盆地下一步天然气规模发现的有利勘探领域。

关键词 低位体系域; 沉积模式; 岩性圈闭; 油气勘探; 八道湾组; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

层序地层学理论的出现,是地质学研究中的一场革命,开启了人类了解地球历史的新阶段^[1-2]。在世界范围内,层序地层学理论极大地推动了海洋深水及浅水领域油气勘探^[3],特别是大西洋两侧大陆边缘深水领域的系列发现,开辟了广阔的油气勘探新领域。20世纪80—90年代,层序地层学被引入中国,国内学者逐渐摒弃了传统的砂对砂、泥对泥的地层对比思路,开始在层序地层格架内开展沉积体系和储层预测工作,建立了各类盆地的层序地层充填模式,提出了陆相盆地层序地层四分方案,促进了层序地层学学科的发展^[4-9]。层序地层学理论的完善,极大地推动了国内油气勘探业务的提升。近年来,针对湖侵体系域大面积分布的(扇)三角洲前缘砂体进行钻井部署,在鄂尔多斯盆地三叠系^[10]、

准噶尔盆地二叠系—三叠系先后发现了亿吨级规模的储量^[11-12]。与湖侵体系域砂体相比,低位体系域砂体含油气条件同样极为优越,这个推论在国外已得到一些被动大陆边缘海相盆地油气勘探实践的验证^[13-14]。在国内东部的小型断陷盆地,近年来针对低位体系域砂体进行钻井部署,也取得了较为可观的勘探突破^[15],表明低位体系域砂体含油气性好,勘探潜力大。

准噶尔盆地腹部是岩性—地层油气藏勘探的重要领域^[16]。2019年,针对盆1井西凹陷侏罗系三工河组砂质碎屑流砂体部署的QS2井获得重大突破^[17-18],证实了凹陷区发育规模有效砂体,且岩性圈闭条件优越。三工河组天然气勘探获得重大突破后,亟需寻找新的接替领域。下侏罗统八道湾组盆地性质与三工河组类似,均为大型坳陷湖盆背景,湖盆凹陷区是否发育规模有效砂体、砂体能否形成岩性圈闭

收稿日期: 2022-07-13; 改回日期: 2022-07-27

本文受中国石油“十四五”科技重大专项所属课题“多类型储集体发育机制与储集能力定量评价技术研究”(编号:2021DJ0402)和“深层超深层有效储层形成主控因素与预测技术研究”(编号:2021DJ0202)资助

第一作者: 厚刚福, 硕士, 高级工程师, 主要从事沉积储层和油气勘探方面的研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: hougf_hz@petrochina.com.cn。 ORCID: 0000-0001-8993-3816

通信作者: 宋兵, 硕士, 工程师, 主要从事沉积储层和油气勘探方面的研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: songb_hz@petrochina.com.cn。 ORCID: 0000-0002-3566-948X

这两个问题对八道湾组新领域的提出和探井的部署至关重要。在充分消化前人研究成果的基础上,本文以准噶尔盆地盆1井西凹陷为例,通过800 km²三维地震资料的解释和反演,在建立八道湾组等时层序地层格架的基础上,恢复了古地貌,落实了坡折发育位置,提出盆1井西凹陷八道湾组底部发育低位体系域砂体,且岩性油气藏形成条件优越,为下一步准噶尔盆地腹部天然气勘探最有利的接替领域。

1 地质概况

盆1井西凹陷位于准噶尔盆地腹部中央坳陷的中北部^[19],其南接沙湾凹陷,西北部为达巴松凸起,东邻莫北凸起,东南部为莫索湾凸起(图1a),面积

约为3 500 km²,现今构造背景为南倾单斜。盆1井西凹陷周围已发现石西油田、莫索湾油气田、莫北油田、莫西庄油田和永进油田,油气主要来源于盆1井西凹陷二叠系烃源岩。侏罗系沉积期,准噶尔盆地气候条件差异较大,湖平面升降变化频繁,造就了盆地内极为复杂的沉积环境。盆1井西凹陷及周缘侏罗系自下而上依次发育八道湾组、三工河组、西山窑组 and 头屯河组(图1b)。八道湾组分布于侏罗系底部,根据岩性和电性特征,自下而上分为八道湾组一段(J₁b₁)、二段(J₁b₂)和三段(J₁b₃)^[20]。截至目前,盆1井西凹陷周缘钻穿八道湾组的钻井较少,主要集中于莫北、莫索湾凸起等正向构造单元,凹陷内部尚无井钻遇八道湾组。

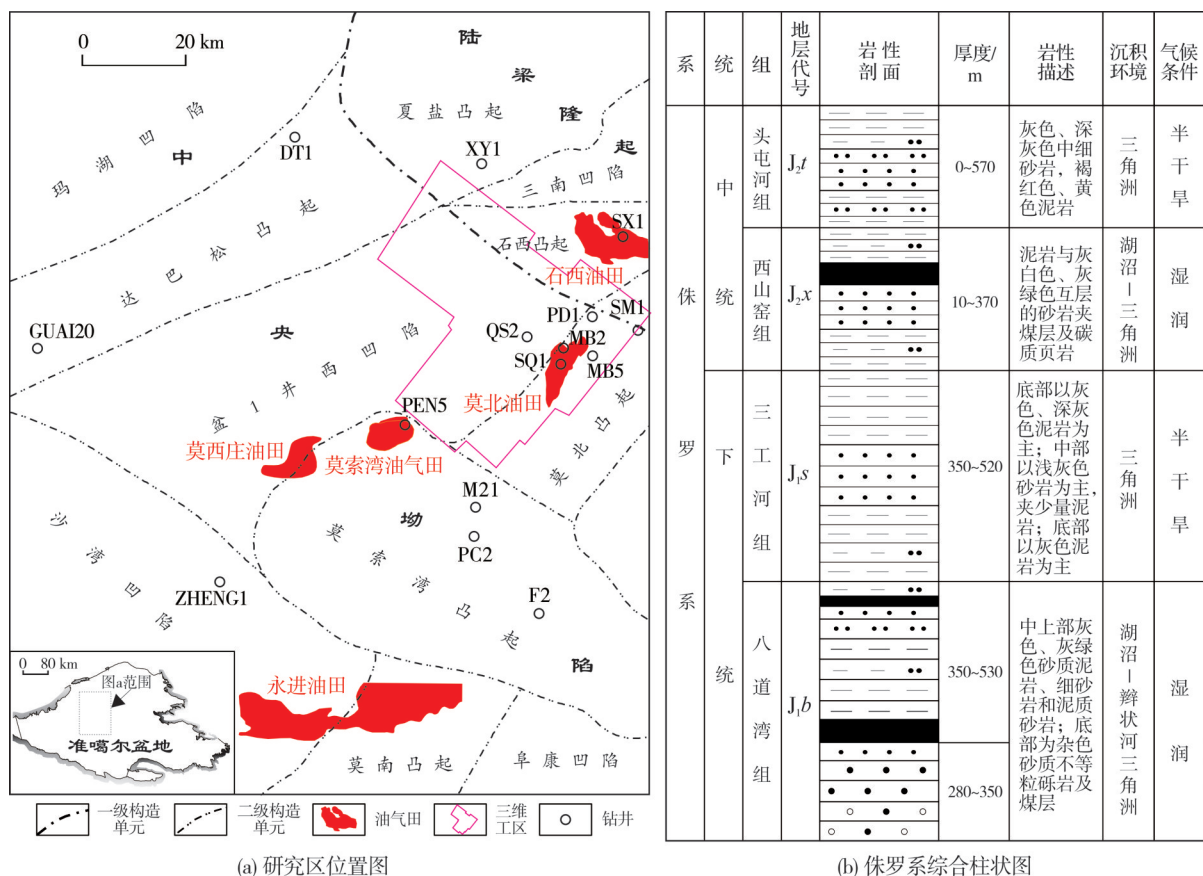


图1 准噶尔盆地盆1井西凹陷构造位置和地层柱状图

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic column of Western Well Pen-1 Sag in Junggar Basin

2 层序地层格架

国内许多学者对准噶尔盆地八道湾组的层序地层格架进行了深入研究。王仁冲等^[21]对滴南凸起的层序地层进行了深入研究,认为准噶尔盆地侏

罗系八道湾组底界是区域性不整合面,在地震剖面上呈较强振幅、中等连续的反射特征,界面上下有明显的超覆和削截现象,在全区较稳定,易于追踪和识别。方国庆等^[22]通过盆地东北缘的层序地层分析,认为侏罗系八道湾组—西山窑组具有4个三

级层序,其中八道湾组底部是印支运动形成的区域不整合面,下伏地层遭受变形和强烈的剥蚀,在盆地边缘侏罗系角度不整合于石炭系—三叠系之上。王哲等^[23]通过准噶尔盆地东部地区八道湾组的层序地层分析,认为八道湾组可识别出5个体系域,整体经历了一个先退积、后进积、再退积的过程。上述针对八道湾组层序地层的研究认识主要集中于盆地边缘,对盆地内部凹陷区及周缘八道湾组的层

序地层格架目前还缺乏统一认识。为了探讨盆地内部盆1井西凹陷八道湾组的层序地层格架,基于岩心、录井、测井和地震资料,在识别三级层序界面和体系域的基础上,建立了盆1井西凹陷及周缘八道湾组的层序地层格架。八道湾组发育1个完整的三级层序(SQ₁),其底界面和顶界面分别为SB1和SB2,层序内部识别出1个初始湖泛面(FFS1)和1个最大湖泛面(MFS1)(图2)。

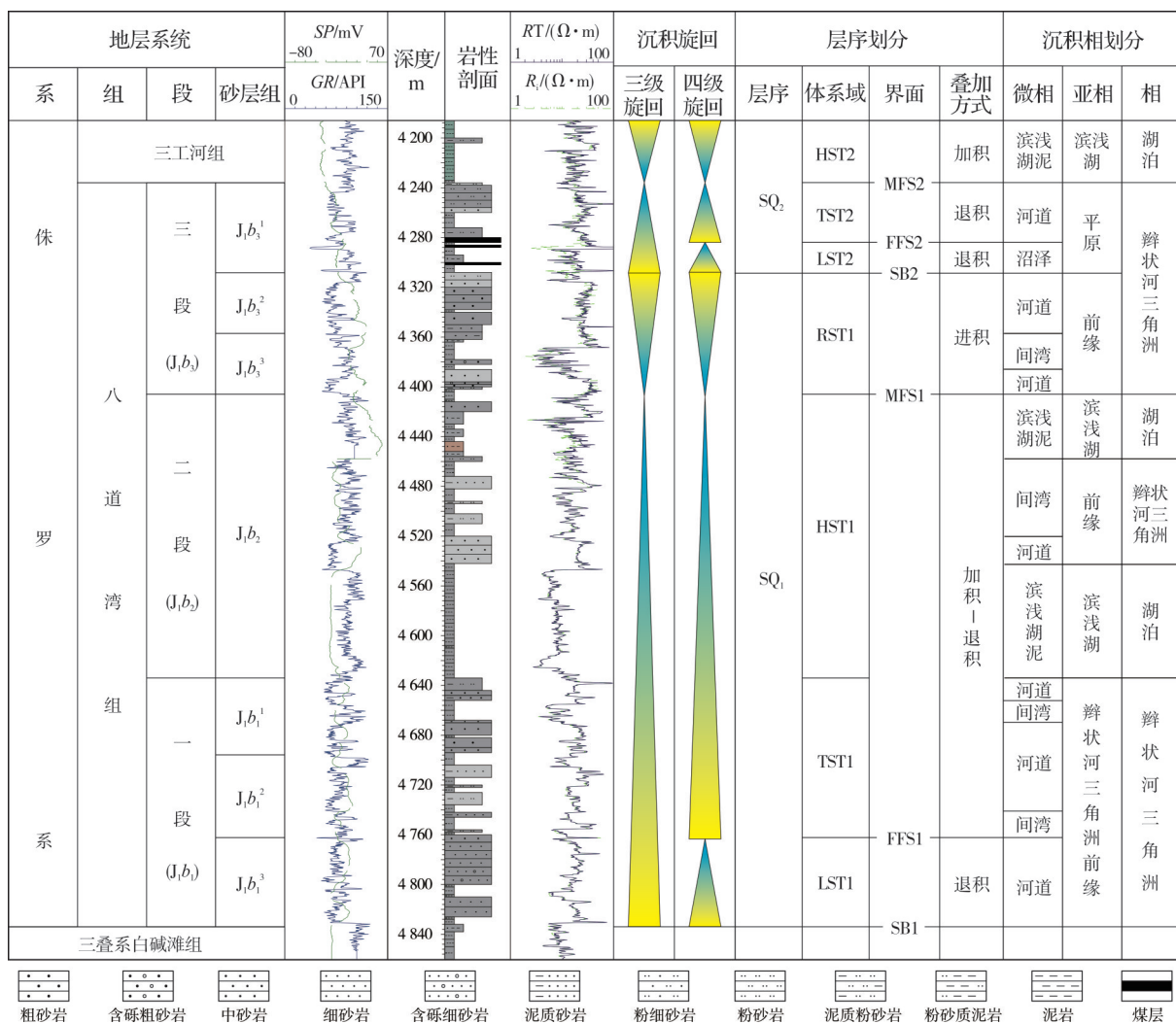


图2 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘八道湾组层序沉积综合柱状图

Fig. 2 The sequence-sedimentation comprehensive column of Badaowan Formation around Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

2.1 三级层序界面识别

三级层序界面是由盆地边缘的不整合面及与其对应的盆地内部的整合面,在盆地范围内可追踪对比,受构造活动控制。三叠纪末—侏罗纪初,受印支运动影响,侏罗系与三叠系不整合接触,其不

整合面(SB1)即为印支运动形成的区域不整合面,侏罗系角度不整合于三叠系之上,层序界面上下有明显的超覆和削截现象(图3),界面之上见上超及沟谷充填特征。钻井资料揭示:八道湾组底界为一岩性突变面,界面之下为三叠系白碱滩组泥岩,界面之上为八道湾组辫状河三角洲河道成因的滞留

砂岩。测井曲线显示:八道湾组底界为一典型突变面,自然伽马、自然电位曲线由低幅突变为中、高幅箱形或钟形,地层叠加方式由加积转换为退积(图2)。

SB2为八道湾组三段 J_1b_3 砂层组底部煤层发育段的底界面,是沉积作用转换面,不整合特征不明显,侵蚀作用较弱,为燕山运动早期次级构造活动形成的侵蚀面,其上下地层整合接触,易于追踪对比。在地震剖面上,SB2表现为强振幅、较连续的反射特征(图3),界面上下呈平行接触关系,未见侵蚀或者超覆现象。钻井和测井资料揭示,SB2为一套煤层的底面(图2),煤层分布稳定、易识别,为区域性等时界面,可作为层序地层对比的良好标志^[24-26]。

2.2 湖泛面识别

SQ₁的初始湖泛面(FFS1)位于八道湾组一段中部。初始湖泛面上下,沉积相类型和岩性均发生变化(图2):界面之下主要发育辫状河三角洲前缘水下分流河道微相,沉积物以中、粗砂岩和细砂岩为

主;界面之上主要发育分流间湾微相或滨浅湖亚相泥岩。初始湖泛面上下,测井响应特征也发生了明显的变化:界面之下电性特征表现为低自然伽马、低自然电位和高电阻率,而界面之上的电性特征为高自然伽马、高自然电位和低电阻率。在地震剖面上,初始湖泛面之下的上超现象极为明显,在坡折发育处超覆尖灭(图3),表明低位体系域的发育明显受坡折的控制。

SQ₁的最大湖泛面(MFS1)发育于八道湾组二段顶部,为侏罗系最大的湖侵面之一,全盆地可对比。最大湖泛面之下以湖泊相沉积为主,沉积物主要为大套泥岩,厚度大于50 m,测井曲线表现为高自然伽马、低自然电位、尖峰状高电阻的特征。最大湖泛面之上主要发育辫状河三角洲前缘沉积,沉积物以灰色、灰绿色细砂岩和粉砂岩为主。地震反射显示(图3):在最大湖泛面之下,其准层序组叠置样式呈退积式;而在最大湖泛面之上,准层序组叠置样式多呈进积式,下超现象较为常见。

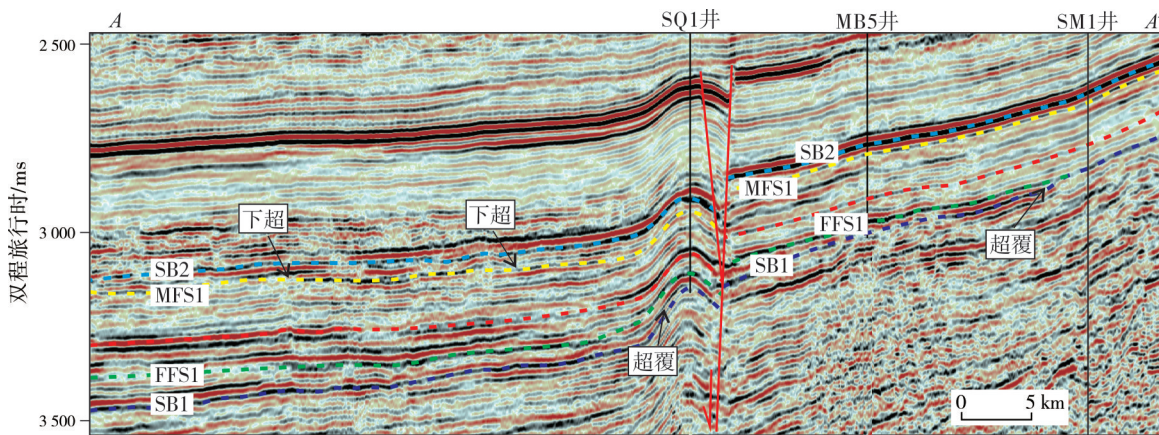


图3 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组层序地层划分对比剖面(剖面位置见图7)

Fig. 3 Division and correlation section of sequence stratigraphy of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (section location is shown in Fig.7)

2.3 层序地层格架建立

基于八道湾组层序界面和湖泛面的识别方案,开展了近10条钻井—地震连井划分对比,建立了盆1井西凹陷八道湾组等时层序地层格架(图3)。在此基础上,利用地层厚度法恢复了八道湾组沉积期古地貌,为研究低位体系域砂体的时空分布规律奠定了基础。

3 低位体系域砂体沉积模式

层序地层分析表明,八道湾组内部发育一个完

整的三级层序。通过低位体系域砂体识别、沉积特征和平面分布规律研究,建立了盆1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体沉积模式。

3.1 低位体系域砂体识别依据

低位体系域为层序地层学概念,指低水位期扇三角洲、辫状河三角洲和滑塌扇沉积的总称,可进一步识别出盆底扇、斜坡扇和前积楔等微相^[27-28]。本文研究的低位体系域(LST1)砂体发育在八道湾组三级层序底界面SB1与初始湖泛面FFS1之间。

从顺物源方向的地震剖面(图4a)可以看出,八

道湾组底部发育2期低位体系域砂体,均位于坡折之下的凹陷区,向坡折方向超覆尖灭,尖灭点较为明显,表明低位体系域砂体分布受坡折控制较为明显。从垂物源方向的地震剖面可以看出,低位体系域砂体反射极为连续,具有大面积席状分布的特征(图4b)。为了更好地识别低位体系域砂体,对测井波阻抗曲线进行岩石物理分析,鉴于纵波阻抗对砂泥岩具有很强的分辨能力,因此利用稀疏约束脉

冲反演对低位体系域砂体进行了预测,取得了很好的应用效果。在波阻抗反演剖面上(图5),低位体系域砂体表现为连续、高阻抗的特征,第2期低位体系域砂体向坡折方向超覆尖灭,尖灭点较清楚。第1期低位体系域砂体分布比第2期更广,目前无井钻遇第2期低位体系域砂体,仅有SQ1井、MB5井和PD1井钻遇第1期低位体系域砂体,与地震响应应具有较好的对应关系。

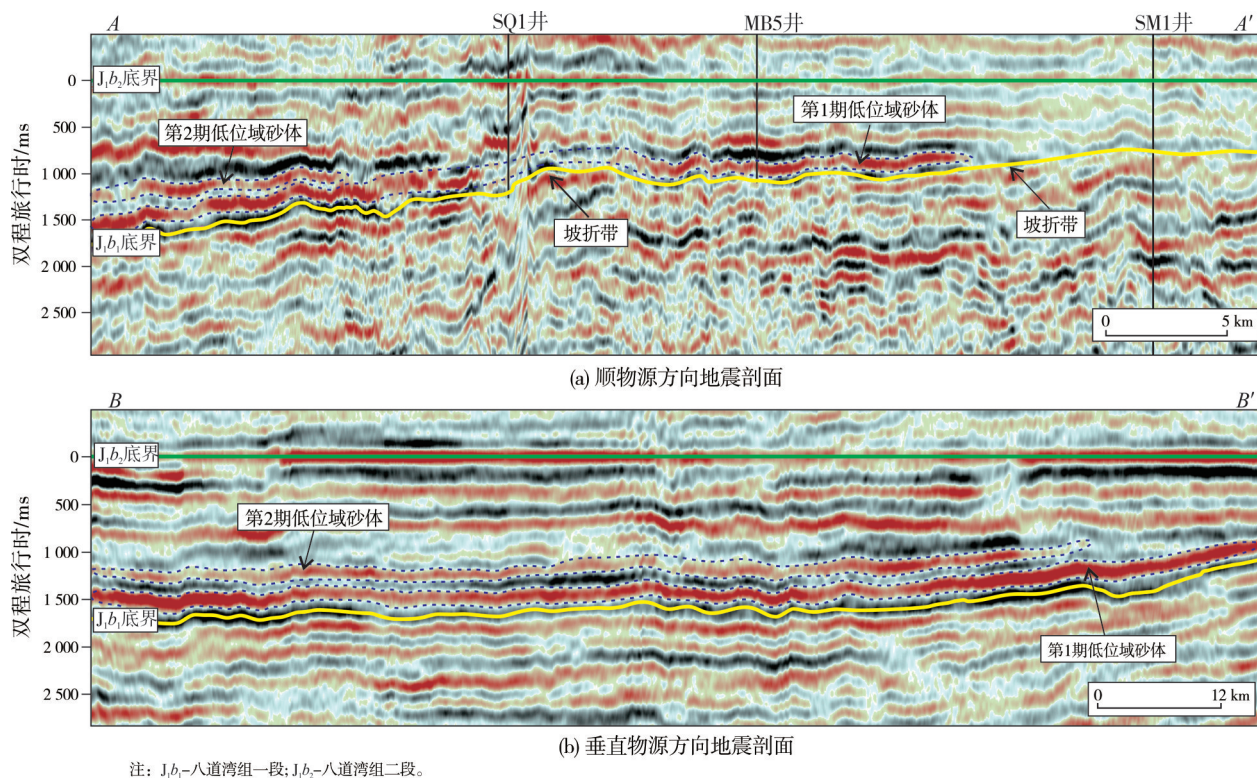


图4 准噶尔盆地1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体地震识别(剖面位置见图7)

Fig. 4 Seismic sections showing the LST sand body of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (section location is shown in Fig.7)

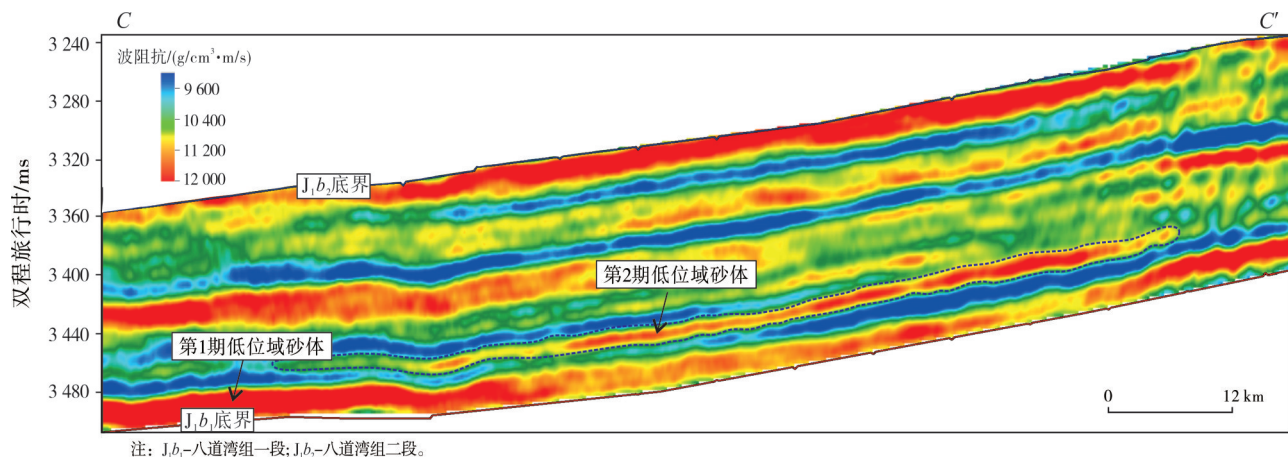


图5 准噶尔盆地1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体地震反演识别(剖面位置见图7)

Fig. 5 Seismic inversion section showing the LST sand body of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (section location is shown in Fig.7)

对盆1井西凹陷周缘录井、测井资料的分析及钻遇八道湾组一段的2口井共计20 m的岩心观察表明:八道湾组一段为逐渐湖侵的正旋回序列,下粗上细,自然伽马曲线形态常见钟形或箱形,与岩心相序构成良好的对应关系。单个旋回内部又由多期小型正旋回叠加而成,顶部为泥岩,底部为砂岩。砂岩粒度中等,以含砾粗砂岩、中砂岩和细砂岩为主,粒度介于扇三角洲与正常三角洲之间。砂岩底部常见冲刷面(图6a),砂岩中沉积构造极为发育,通常可见槽状交错层理(图6b)、板状交错层理

(图6c)、低角度交错层理(图6d),泥质撕裂屑、炭屑和漂浮泥砾顺层分布(图6e,6f),重力流成因的沉积构造不发育。这反映盆1井西凹陷八道湾组一段砂体为水动力较强的牵引流成因,垂向上多期河道频繁冲刷、切割,使得砂体在垂向上不断叠置。砂岩碎屑颗粒分选中等,磨圆度多为次棱角状一次圆状,结构成熟度中—高,表明盆1井西凹陷八道湾组一段发育低位体系域砂体,其成因类型为经过了长距离搬运、在坡折之下的平台区不断卸载而成的辫状河三角洲前缘砂体。

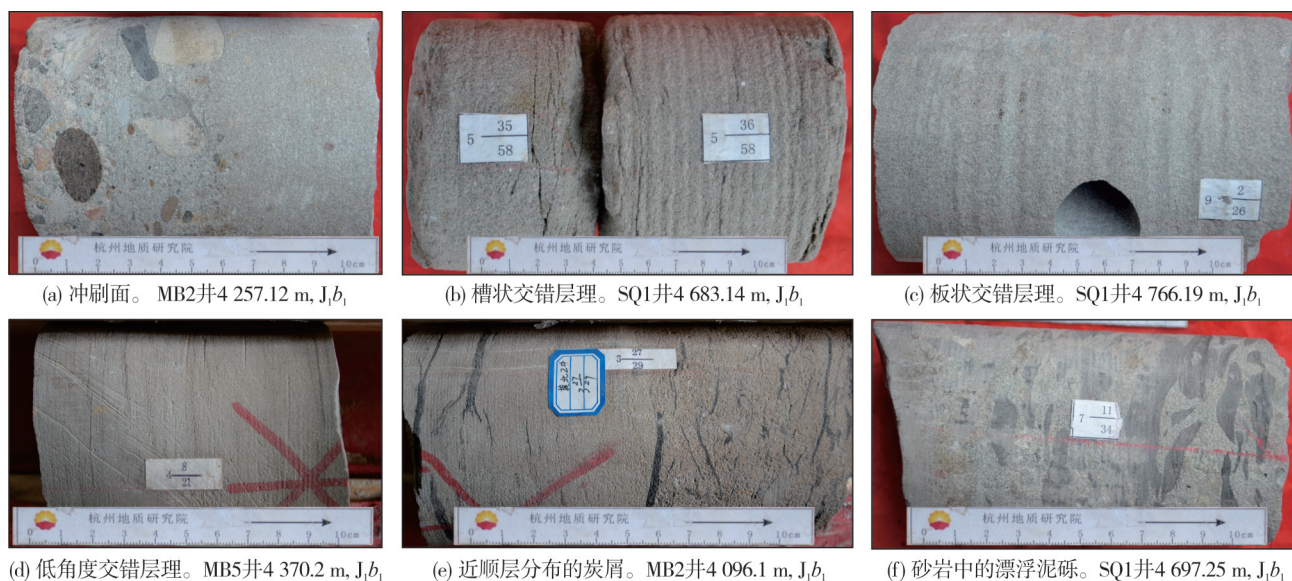


图6 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组辫状河三角洲前缘典型沉积构造

Fig. 6 Typical sedimentary structures of braided river delta front of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

3.2 低位体系域砂体平面分布特征

早侏罗世八道湾组沉积期,准噶尔盆地处于陆内拗陷盆地演化阶段,构造活动相对稳定,盆1井西凹陷及周缘为湖盆沉降中心。同时,八道湾期气候温暖潮湿,湖岸线迁移比较频繁,尤其是在湖盆沉降中心附近,湖岸线的不断迁移控制了坡折的相对发育位置,并进一步控制了低位体系域砂体的平面分布。另外,八道湾期盆地周缘物源供给充足,受东部物源体系影响的辫状河—辫状河三角洲砂体广泛发育,延伸可达数十公里^[29],这是低位体系域砂体形成的物质基础。盆1井西凹陷及周缘古地貌恢复表明(图7):八道湾组沉积期研究区表现为东部高、西部低的格局,围绕沉降中心,发育环状坡折。在地震剖面上,坡折特征较明显,同相轴上超现象

较清晰(图4a),坡折之下地层厚度明显较坡折之上加厚。坡折的形成主要受燕山期构造活动的影响:断裂活动造成地层发生挠曲变形,在古梁翼部发生披覆作用,从而形成由于构造活动引起的挠曲坡折带。坡折坡度较缓($1^{\circ}\sim 2^{\circ}$),来自东部物源体系的辫状河三角洲向盆1井西凹陷方向进积,在坡折之下的凹陷区卸载沉积物,为盆1井西凹陷低位体系域砂体的发育创造了条件。

为了明确低位体系域砂体的分布,利用拟声波阻抗反演技术对八道湾组一段第2期低位体系域砂体的分布进行了厘定。在平面上,低位体系域砂体的波阻抗呈现出中—高值,局部连片分布(图8)。在古地貌和波阻抗反演的基础上,编制第2期低位体系域砂体发育期的沉积相图(图9)。第2期低位体系域砂体发育期,湖岸线退至SQ1井以西的

坡折附近,来自东部物源体系的辫状河三角洲前缘砂体卸载至坡折之下的凹陷区,形成第2期低位体系域砂体,呈扇状或者朵状分布,分布面积约为650 km²。坡折之上发育辫状河三角洲平原亚相,为过路沉积区,砂体不发育。

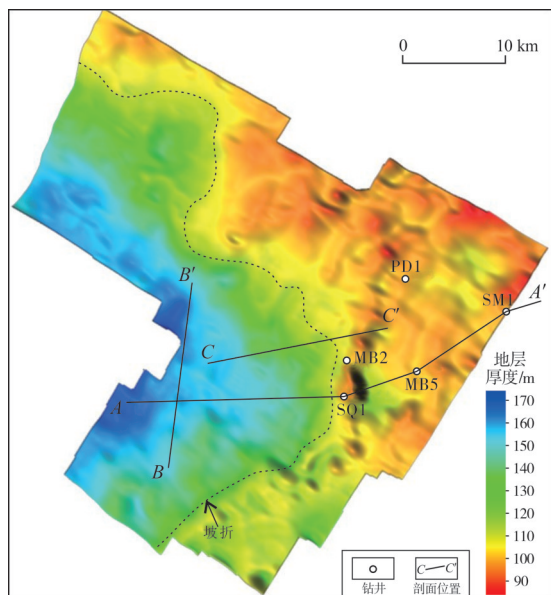


图7 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组一段沉积期古地貌
Fig. 7 Paleogeomorphology of the Badaowan Member 1 in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

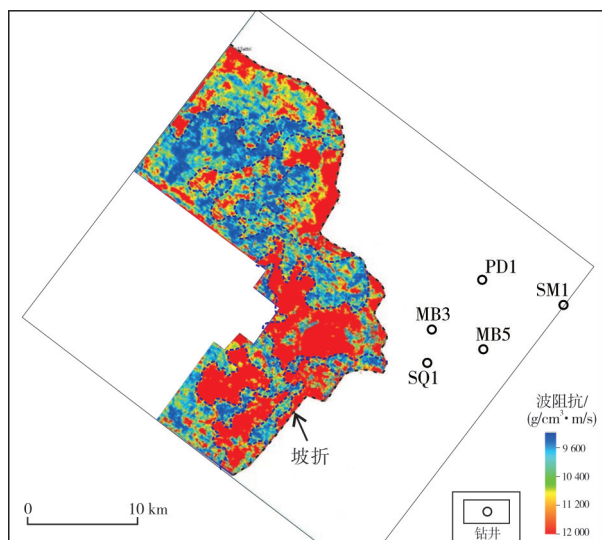


图8 准噶尔盆地盆1井西凹陷三维工区地震反演波阻抗平面图

Fig. 8 Wave-impedance plan of 3D seismic survey in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

3.3 低位体系域砂体沉积模式

在上述低位体系域砂体形成条件和分布规律分析的基础上,建立了低位体系域砂体沉积模式

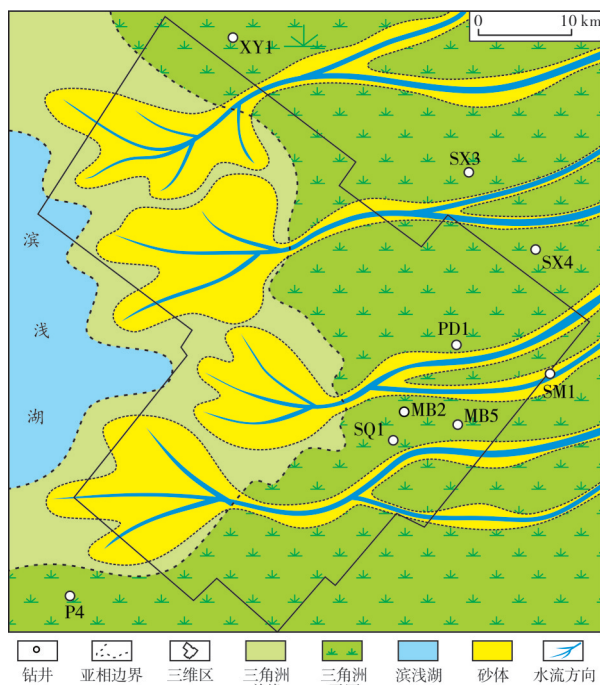


图9 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组一段第2期低位体系域砂体发育期沉积相图

Fig. 9 Sedimentary facies showing the second stage LST sand body of the Badaowan Member 1 in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

(图10)。盆1井西凹陷八道湾组一段发育2期低位体系域砂体,呈席状或者朵叶状大面积分布,但这2期砂体分布范围不尽相同,第2期低位体系域砂体沉积期,湖平面短暂下降,坡折的位置迁移至SQ1井以西,砂体在SQ1井以西的坡折之下发生卸载。坡折不仅控制了沉积相带格局^[30],也对低位体系域砂体的分布具有决定性意义。坡折的位置并不是一成不变的,它会随着湖平面的升降变化而不断发生迁移和改变:湖平面上升,坡折会向岸方向迁移;反之,湖平面下降,坡折则会向湖盆中心方向迁移。湖平面的升降变化控制了坡折的发育位置,进一步控制了低位体系域砂体的分布范围。在坡折之上,大多数砂体经牵引流作用直接输送至坡折之下的平台区卸载,这使得坡折之上的三角洲平原亚相砂体不发育,以过路沉积为主,沉积微相类型主要为河漫滩泥岩或者沼泽碳质泥岩。泛滥平原微相泥岩在侧向上与坡折之下的低位体系域砂体直接接触,对其构成良好的侧向遮挡。在垂向上,低位体系域砂体随着湖平面升降而变化,通常与滨浅湖泥岩间互沉积,呈砂泥互层,隔夹层极为发育,构成了良好的顶底板条件。因此,低位体系域砂体具有良好的岩性圈闭条件。

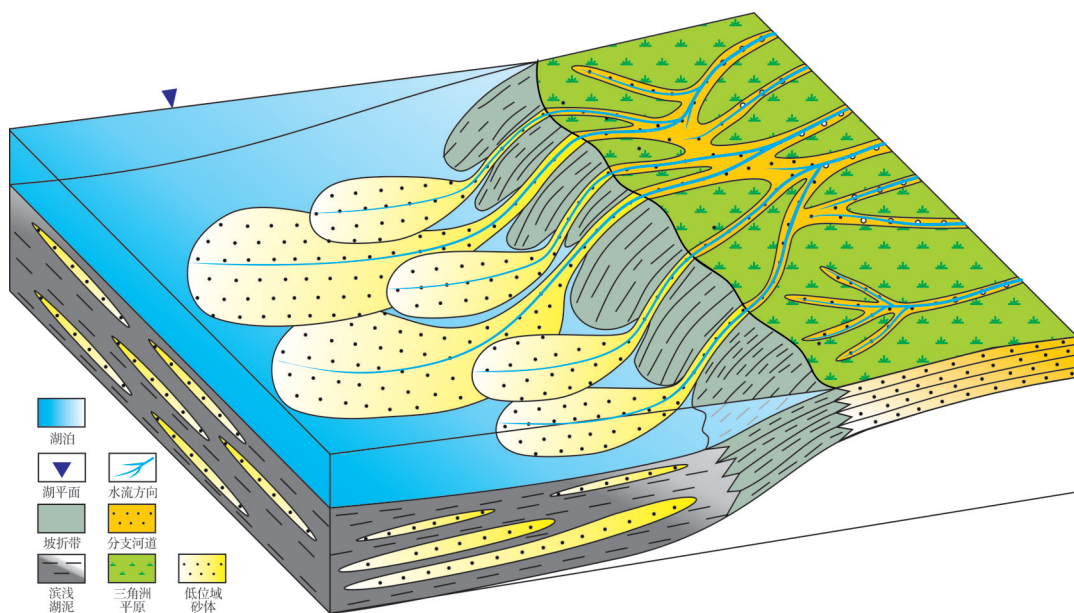


图10 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体沉积模式图

Fig. 10 Sedimentary model of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

4 油气勘探意义

(1) 盆1井西凹陷烃源岩发育, 周缘八道湾组油气显示活跃, 勘探潜力大。

盆1井西凹陷是准噶尔盆地五大主力生烃凹陷之一, 主力烃源岩发育层位包括石炭系、二叠系和侏罗系, 烃源岩供烃能力强, 资源潜力大^[31]。油气源对比分析表明, 盆1井西凹陷周缘已发现的油气均来源于二叠系风城组和下乌尔禾组。其中, 风城组发育一套海陆过渡相沉积, 烃源岩主要由黑灰色泥岩、白云质泥岩和碳酸盐岩组成, 有机碳含量介于0.03%~4.43%, 平均值为0.93%; 干酪根类型以III型为主; 镜质组反射率分布在0.85%~1.16%之间, 处于成熟阶段。下乌尔禾组发育一套浅湖—半深湖环境下的暗色泥岩沉积, 有机碳含量为0.18%~14.03%, 平均值为1.69%, 为一套中等—较好烃源岩; 干酪根类型以II₁型为主; 镜质组反射率分布在0.50%~1.70%之间, 处于成熟—高成熟阶段。风城组和下乌尔禾组2套烃源岩为盆1井西凹陷周缘油气成藏奠定了烃源基础。盆1井西凹陷周缘钻穿或钻揭八道湾组的井油气显示活跃, 见富含油岩心2.1 m、油浸岩心3.24 m, 4口井获工业油气流, 但凹陷区目前仍未有钻井钻遇八道湾组, 勘探程度低, 勘探潜力大。

(2) 低位体系域砂体发育原生粒间孔, 储层性

质较好。

研究区内仅3口井钻穿八道湾组第1期低位体系域砂体, 目前虽无取心和分析化验资料, 但凹陷周缘的MB5井、M21井、PC2井等邻井分析结果表明, 八道湾组5 000 m以下仍发育有效储层。根据激光共聚焦图像分析(图11a, 11b), 结合柱塞样面扫描(图11c)、小立方体三维扫描(图11d)和孔隙提取图像分析(图11e), 八道湾组一段储层孔隙类型包括原生粒间孔和溶蚀孔(图11)。储层孔隙度介于6.5%~14.76%, 平均为9.6%; 渗透率为 $(0.015\sim40.92)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 平均为 $0.22\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。储集空间以微米级孔隙为主, 喉道相对细小和狭窄, 孔喉连通性和孔喉微观结构较差, 总体属于低孔特低渗储层, 但局部微裂缝发育, 极大地改善了储层物性。与玛湖凹陷相比, 盆1井西凹陷周缘八道湾组粒度偏细, 砂砾岩储层总体不发育, 但储层储集性能相当, 主要是因为晚期长石颗粒溶蚀形成的粒内溶孔改善了储层物性, 溶蚀作用使平均孔隙度提高1.15%^[32]。另外, 盆1井西凹陷砂岩储层累积厚度更大、面积更广, 且砂体构型为砂泥互层结构, 隔夹层发育, 十分有利于油气聚集成藏。

(3) 印支期和燕山期2组断裂构成“Y”字形组合样式, 沟通二叠系烃源岩。

盆1井西凹陷周缘三工河组是准噶尔盆地腹部油气勘探的主战场之一, 已发现石西油田、莫索湾

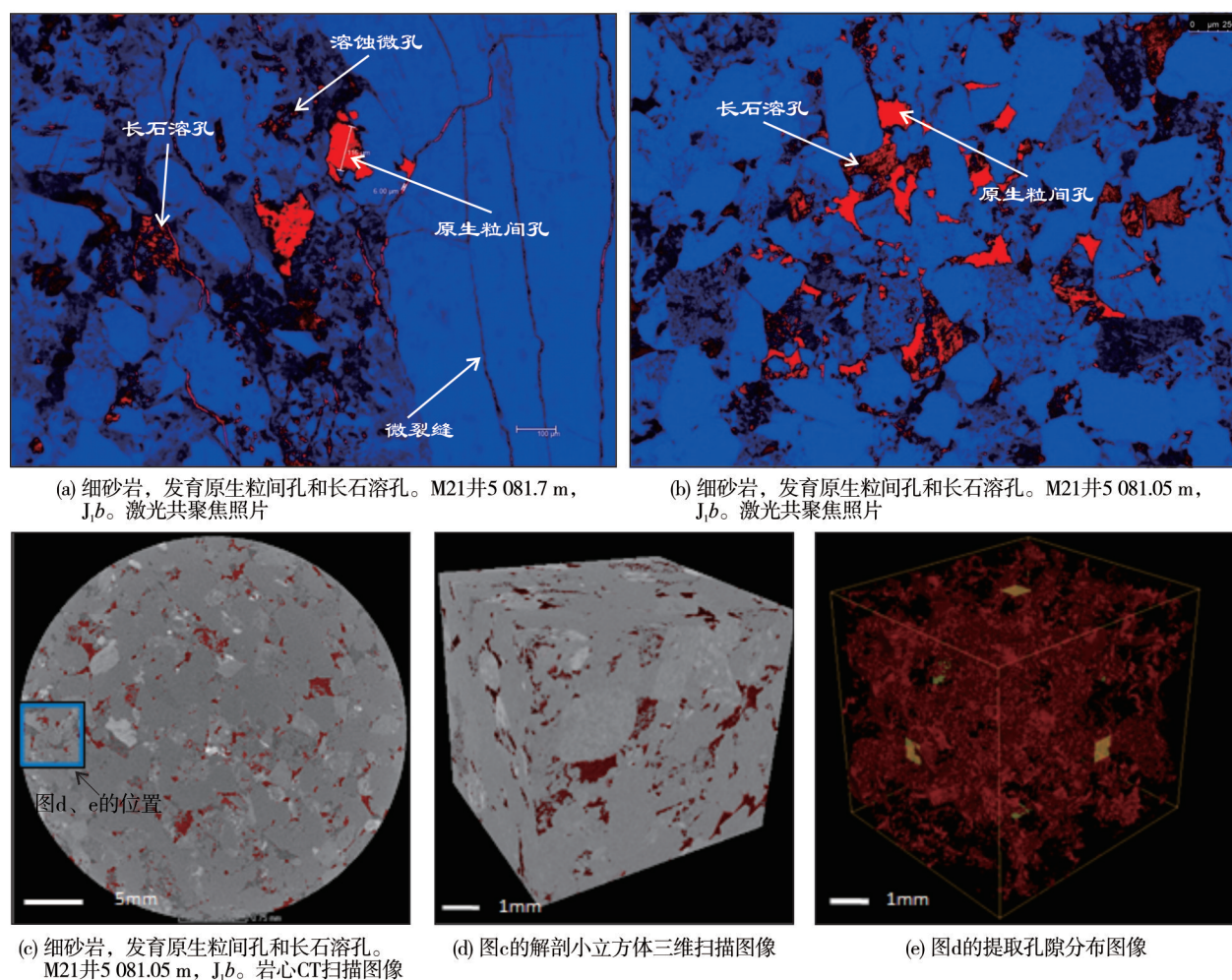


图 11 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷周缘八道湾组砂岩激光共聚焦与 CT 扫描图像

Fig. 11 Laser confocal and CT scanning images of the sand body of Badaowan Formation around Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

油气田、莫北油田和莫西庄油田,油藏类型均为构造油气藏。QS2井三工河组获得突破,证实了凹陷区同样具有广阔的勘探前景。油源对比分析表明,三工河组油气主要来源于盆 1 井西凹陷的二叠系烃源岩^[33-34]。截至目前,盆 1 井西凹陷及周缘八道湾组没有获得大的突破,莫北—莫索湾地区仅有 4 口井在八道湾组获得工业油气流,油藏类型均为构造油气藏,具有统一的油气水界面,主要受控于背斜或断背斜圈闭闭合度和储层砂体的质量,即“构造控藏,砂体控产”。莫索湾凸起、莫北凸起是大型继承性古凸起,凸起翼部发育多期断裂,深层断裂沟通二叠系风城组和下乌尔禾组烃源岩,浅层断裂沟通八道湾组砂体,深层断裂与浅层断裂在垂向上构成“Y”字形组合^[35-36],有利于二叠系油气进入侏罗系砂岩储层中。在垂向上,八道湾组比三工河组更接近二叠系烃源岩,且八道湾组发育 2 套输导层,在

空间上构成“阶梯运移、毯式输导”的油气成藏模式(图 12),有利于油气最终聚集成藏。从目前的勘探现状来看,八道湾组油气勘探主要围绕正向构造单元,以构造油气藏勘探为主。但是,由于坡折之上的正向构造单元八道湾组湖侵期砂体大面积分布,而且砂体厚度大,加之断距和构造幅度小,很难形成有效的圈闭并聚集成藏,这是目前盆 1 井西凹陷周缘三工河组油气勘探要优于八道湾组的原因。而盆 1 井西凹陷八道湾组低位体系域砂体在侧向上与湖侵期厚层砂体不连通,而是与辫状河三角洲平原亚相泥岩直接接触,岩性圈闭条件好,有利于油气聚集成藏,勘探潜力大。

综上所述,准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷八道湾组低位体系域砂体厚度大、分布面积广,储层质量较好,岩性圈闭条件和输导条件优越,为下一步油气勘探有利的接替领域。

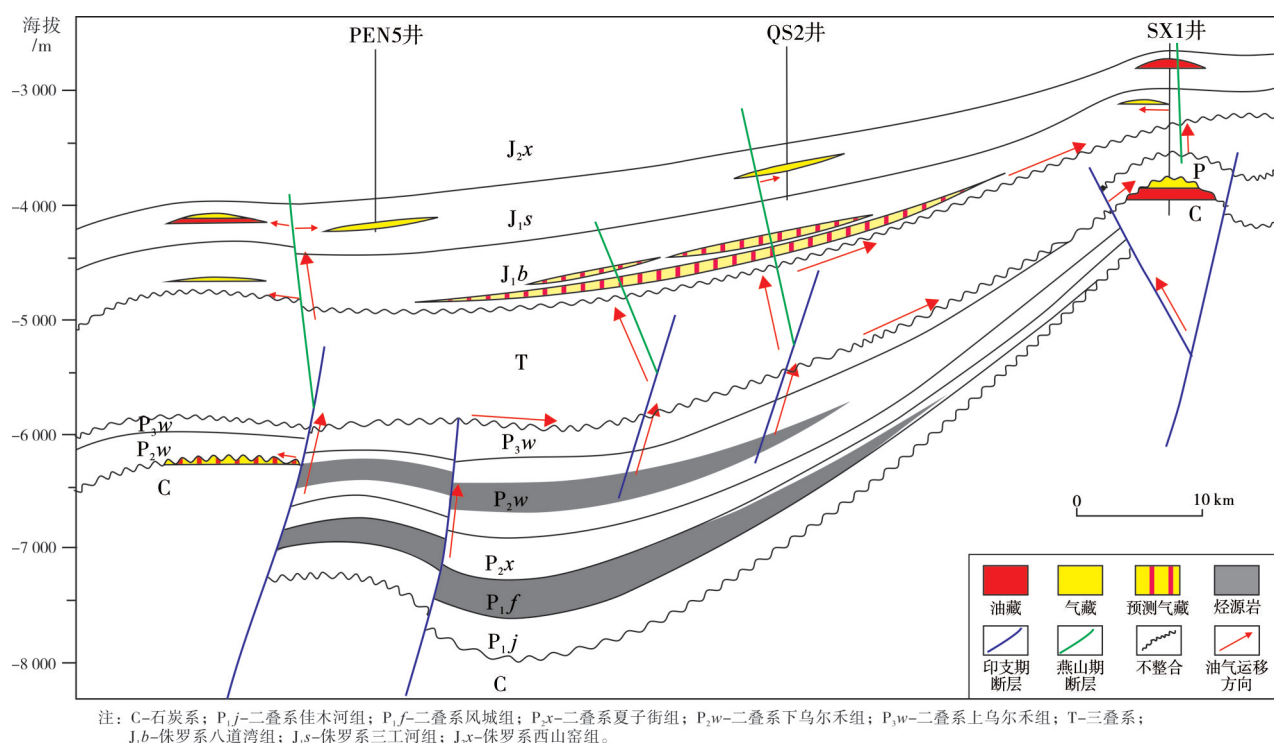


图12 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组成藏模式图

Fig. 12 Reservoir forming model of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

5 结论

(1) 准噶尔盆地盆1井西凹陷八道湾组发育1个完整的三级层序，凹陷周缘发育坡折，来自东部物源体系的辫状河三角洲向凹陷方向进积，并在坡折之下的凹陷区卸载沉积物，形成八道湾组低位体系域砂体。

(2) 盆1井西凹陷八道湾组低位体系域砂体呈砂泥互层，侧向与三角洲平原河漫滩泥岩接触，顶底板和侧向遮挡的条件较好，岩性圈闭条件优越，具有形成规模岩性圈闭群的条件。

(3) 盆1井西凹陷低位体系域砂体发育低孔特低渗储层，局部发育微裂缝，改善了储层物性；盆1井西凹陷发育二叠系风城组和下乌尔禾组2套烃源岩，烃源岩条件较好；盆1井西凹陷周缘发育深浅2组断裂，在垂向上沟通八道湾组低位体系域砂体与二叠系烃源岩，有利于天然气聚集成藏。

致谢：在本文写作过程中，中国石油杭州地质研究院寿建峰教授给予了悉心指导，并提出了诸多宝贵意见，在此表示最诚挚的谢意！

参考文献

- [1] VAIL P R, MITCHUM R M J, THOMPSON III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: relative changes of sea level from coastal onlap [J]. AAPG memoir, 1977, 26: 63-81.
- [2] GALLOWAY W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. AAPG bulletin, 1989, 73(2): 125-142.
- [3] LOSH S, EGLINTON L, SCHOELL M, et al. Vertical and lateral fluid flow related to a large growth fault, South Eugene island block 330 field, offshore Louisiana [J]. AAPG bulletin, 1999, 83(2): 244-276.
- [4] 徐怀大. 层序地层学理论用于我国断陷盆地分析中的问题 [J]. 石油与天然气地质, 1991(1): 52-57, 99-100.
XU Huaida. Problems in analysis of faulted basins of China based on sequence stratigraphic theory [J]. Oil & gas geology, 1991(1): 52-57, 99-100.
- [5] 魏魁生, 徐怀大. 华北典型箕状断陷盆地层序地层学模式及其与油气赋存关系 [J]. 地球科学, 1993(2): 139-149, 247.
WEI Kuisheng, XU Huaida. Sequence stratigraphic models and their relationship to oil and gas occurrence in typical faulted basins, Northern China [J]. Earth science, 1993(2): 139-149, 247.
- [6] 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式 [J]. 石油勘

- 探与开发, 1995(4): 6-10, 108.
- GU Jiayu. Framework concepts and models of sequence stratigraphy in nonmarine petroliferous basin[J]. Petroleum exploration and development, 1995(4): 6-10, 108.
- [7] 薛良清. 层序地层学研究现状、方法与前景[J]. 石油勘探与开发, 1995(5): 8-13, 96.
- XUE Liangqing. Current status, methodology, and future directions of sequence stratigraphy study[J]. Petroleum exploration and development, 1995(5): 8-13, 96.
- [8] 张振生, 黎英, 王冰. 冀中坳陷陆相地层序地层学的应用[J]. 石油学报, 1997(2): 29-37.
- ZHANG Zhensheng, LI Ying, WANG Bing. An application of sequence stratigraphy in continental deposit of Jizhong Depression[J]. Acta petrolei sinica, 1997(2): 29-37.
- [9] 胡受权, 郭文平, 颜其彬, 等. 断陷湖盆陡坡带陆相层序地层的“沉积滨线坡折”问题探讨[J]. 古地理论, 2000, 2(4): 20-29.
- HU Shouquan, GUO Wenping, YAN Qibin, et al. Study on depositional shoreline break for terrigenous sequence stratigraphy along the steep slope zone of fault-depressed lacustrine basin[J]. Journal of palaeogeography, 2000, 2(4): 20-29.
- [10] 杨明慧, 刘池洋. 鄂尔多斯中生代陆相盆地层序地层格架及多种能源矿产聚集[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 563-570.
- YANG Minghui, LIU Chiyang. Sequence stratigraphic framework and its control on accumulation of various energy resources in the Mesozoic continental basins in Ordos[J]. Oil & gas geology, 2006, 27(4): 563-570.
- [11] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 14-23.
- KUANG Lichun, TANG Yong, LEI Dewen, et al. Exploration of fan-controlled large-area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in slope zone of Mahu Depression in Junggar Basin[J]. China petroleum exploration, 2014, 19(6): 14-23.
- [12] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 玛湖凹陷源上砾岩大油区形成分布与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 1-8, 22.
- ZHI Dongming, TANG Yong, ZHENG Menglin, et al. Discovery, distribution and exploration practice of large oil provinces of above-source conglomerate in Mahu Sag[J]. Xinjiang petroleum geology, 2018, 39(1): 1-8, 22.
- [13] SUSENO P H, ZAKARIA, MUJAHIDIN N, et al. Contribution of Lahat Formation as hydrocarbon source rock in South Palembang Area, South Sumatra, Indonesia[C]//21st Annual Convention Proceedings (Volume 1), Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 1992: 325-337.
- [14] RASHID H, SOSROWIDJOJO I B, WILDIARTO F X. Musi platform and Palembang high: a new look at the petroleum system[C]//26th Annual Convention Proceedings (Volume 1), Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 1998: 265-276.
- [15] 李阳, 蔡进功, 刘建民. 东营凹陷下第三系高分辨率层序地层研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 210-216.
- LI Yang, CAI Jingong, LIU Jianmin. High-resolution sequence stratigraphy of Paleogene in Dongying Depression[J]. Acta sedimentologica sinica, 2002, 20(2): 210-216.
- [16] 唐勇, 孔玉华, 盛建红, 等. 准噶尔盆地腹部缓坡型岩性地层油气藏成藏控制因素分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 567-572.
- TANG Yong, KONG Yuhua, SHENG Jianhong, et al. Controlling factors of reservoir formation in ramp-type lithostratigraphic reservoir in hinterland of Junggar Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2009, 27(3): 567-572.
- [17] 厚刚福, 徐洋, 孙靖, 等. 三角洲前缘—湖盆深水区沉积模式及意义: 以准噶尔盆地1井西凹陷三工河组二段一砂组为例[J]. 石油学报, 2019, 40(10): 1223-1232.
- HOU Gangfu, XU Yang, SUN Jing, et al. Sedimentary model from delta front to deep water area and its significance: a case study from the first sand group, the second section of Sangonghe Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(10): 1223-1232.
- [18] 厚刚福, 曾德龙, 牛志杰, 等. 准噶尔盆地砂质碎屑流砂体新发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 41-49.
- HOU Gangfu, ZENG Delong, NIU Zhijie, et al. New discovery of sandy debris flow sandbody and its implications for oil and gas exploration in the Junggar Basin[J]. Natural gas industry, 2020, 40(11): 41-49.
- [19] 杨智, 何生, 李奇艳, 等. 准噶尔盆地腹部盆1井西凹陷超压研究[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 239-245.
- YANG Zhi, HE Sheng, LI Qiyang, et al. Overpressure in the Well Pen-1 West Subbasin in the interior of the Junggar Basin[J]. Geology in China, 2008, 35(2): 239-245.
- [20] 厚刚福, 吴爱成, 邹志文, 等. 玛湖凹陷八道湾组辫状河三角洲沉积特征及模式[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(6): 678-685.
- HOU Gangfu, WU Aicheng, ZOU Zhiwen, et al. Depositional characteristics and models of braided river delta in Badaowan Formation of Mahu sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2017, 38(6): 678-685.
- [21] 王仁冲, 徐怀民, 刘楼军, 等. 准噶尔盆地滴南凸起水西沟群层序地层特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(5): 601-608.
- WANG Renchong, XU Huaimin, LIU Loujun, et al. Sequence stratigraphy of Shuixigou Group at Dinan uplift, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2009, 36(5): 601-608.
- [22] 方国庆, 李育慈, 刘德良. 准噶尔盆地东北缘中—下侏罗统层序地层与油气[J]. 地质科学, 2000(4): 414-421, 509.

- FANG Guoqing, LI Yuci, LIU Deliang. Sequence stratigraphy and petroleum of Middle to Lower Jurassic in the north-eastern margin of the Junggar Basin[J]. Chinese journal of geology, 2000(4): 414-421, 509.
- [23] 王哲, 金振奎, 付晶, 等. 准噶尔盆地东部地区八道湾组层序地层及油气勘探有利区带预测[J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 553-562.
- WANG Zhe, JIN Zhenkui, FU Jing, et al. Sequence stratigraphy and prediction of favorable zones for hydrocarbon exploration of Badaowan Formation in eastern Junggar Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2013, 31(3): 553-562.
- [24] 吴因业. 吐哈盆地侏罗系含煤沉积层序特征研究[J]. 石油勘探与开发, 1995(5): 35-39, 97-98.
- WU Yinye. A study on depositional sequence feature of Jurassic coal formation in Tu-Ha Basin[J]. Petroleum exploration and development, 1995(5): 35-39, 97-98.
- [25] 吴因业. 煤层:一种陆相盆地中的成因层序边界[J]. 石油学报, 1996(4): 28-35.
- WU Yinye. Coal seam: a genetic stratigraphic sequence boundary in nonmarine basins[J]. Acta petrolei sinica, 1996(4): 28-35.
- [26] 何志平, 邵龙义, 康永尚, 等. 准噶尔盆地侏罗系八道湾组聚煤作用控制因素分析[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 449-454.
- HE Zhiping, SHAO Longyi, KANG Yongshang, et al. Analysis on controls of the coal accumulation in the Jurassic Badaowan Formation, Junggar Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2004, 22(3): 449-454.
- [27] 隋贵, 郭玉新, 王宝言, 等. 东营凹陷深陷期构造坡折带与低位扇序列[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 63-67.
- SUI Fengui, GUO Yuxin, WANG Baoyan, et al. Fault break-slope and low-stand fan sequence in Dongying Sag[J]. Petroleum exploration and development, 2005, 32(2): 63-67.
- [28] 任建业, 张青林, 陆永潮. 东营凹陷弧形断裂坡折带系统及其对低位域砂体的控制[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 628-635.
- REN Jianye, ZHANG Qinglin, LU Yongchao. Arc-shaped fault break slope system and its control on low stand systems sandbodies in Dongying Depression[J]. Acta sedimentologica sinica, 2004, 22(4): 628-635.
- [29] 孙靖, 薛晶晶, 吴海生, 等. 远源、细粒型浅水三角洲沉积特征与演化:以准噶尔盆地腹部莫索湾地区八道湾组为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 129-136.
- SUN Jing, XUE Jingjing, WU Haisheng, et al. Distal fine-grain shallow-water delta sedimentary characteristics and evolution: a case from Badaowan Formation in the central Junggar Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2016, 34(1): 129-136.
- [30] 赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 等. 断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现:以歧口凹陷歧北缓坡带为例[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 729-739.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, WANG Jiahao, et al. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin: a case study of Qibei slope in Qikou Sag[J]. Acta petrolei sinica, 2017, 38(7): 729-739.
- [31] 钱海涛, 苏东旭, 阿布力米提·依明, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷斜坡区油气地质特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(4): 551-561.
- QIAN Haitao, SU Dongxu, ABLIMIT Imin, et al. Petroleum geological characteristics and exploration potential in slope area of Well Pen-1 Western Depression in Junggar Basin[J]. Natural gas geoscience, 2021, 32(4): 551-561.
- [32] 单祥, 徐洋, 唐勇, 等. 莫北-莫索湾地区八道湾组储集层成岩作用及其对储集层物性的影响[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 401-408.
- SHAN Xiang, XU Yang, TANG Yong, et al. Diagenesis and effect on physical property of Lower Jurassic Badaowan Formation in Mobei-Mosuowan area, Junggar Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2015, 36(4): 401-408.
- [33] 周文泉, 罗新利, 刘宏伟. 盆1井西凹陷东环带油气成藏分析[J]. 新疆石油天然气, 2005, 1(3): 16-20.
- ZHOU Wenquan, LUO Xinli, LIU Hongwei. Analysis of hydrocarbon reservoir forming in the east belt around depression to the west of Well Pen-1[J]. Xinjiang oil & gas, 2005, 1(3): 16-20.
- [34] 麻伟娇, 卫延召, 曾德龙, 等. 准噶尔盆地莫索湾凸起古油藏的流体证据[J]. 石油学报, 2017, 38(4): 414-424.
- MA Weijiao, WEI Yanzhao, ZENG Delong, et al. Fluid evidence of paleo-reservoir in the Mosuowan Uplift, Junggar Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2017, 38(4): 414-424.
- [35] 孙靖, 宋永, 宋明星, 等. 准噶尔盆地腹部低凸起带油气成藏研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1219-1229.
- SUN Jing, SONG Yong, SONG Mingxing, et al. Hydrocarbon accumulation of low uplift belt in central Junggar Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1219-1229.
- [36] 厚刚福, 瞿建华, 朱峰, 等. 古地貌对沉积体系和沉积微相的控制作用分析:以准噶尔盆地腹部白垩系清水河组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 1038-1045.
- HOU Gangfu, QU Jianhua, ZHU Feng, et al. Controlling effect of paleogeomorphology on sedimentary system and sedimentary microfacies: a case study of Cretaceous Qingshuihe Formation in the hinterland of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 1038-1045.

Sedimentary model and significance for oil and gas exploration of the LST sand body of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

HOU Gangfu, LI Xiao, SONG Bing, WANG Libao, LI Yazhe, GUO Huajun,
ZENG Delong, JIA Kaifu, PENG Bo, SHAN Xiang

Abstract: Badaowan Formation in the hinterland of Junggar Basin is a potential exploration replacement field of Jurassic. By analyzing the formation conditions and sedimentary characteristics of the lowstand system tract(LST) sand body of Badaowan Formation in Western Well Pen-1 Sag, combined with the study of reservoir forming conditions, this paper proposes that LST sand bodies are developed below the slope break of depressional lake basin, and the reservoir forming conditions of LST sand body are superior. The results show that: (1) A complete third-order sequence is developed in the Badaowan Formation of the Western Well Pen-1 Sag in the Junggar Basin, and during the Badaowan sedimentation period, slope breaks are developed around the Western Well Pen-1 Sag. Braided river delta from the eastern provenance system prograde towards the sag, and unload sediment in the sag area below the slope breaks, creating conditions for the development of LST sand body in the sag area. (2) LST sand bodies of braided river delta are developed in Badaowan Formation of Western Well Pen-1 Sag, which is formed through the continuous unloading of sediment below the slope break after long distance transportation. The LST sand body is sand-shale interbedded, and laterally contacts with the flood plain mudstone of the delta plain, so the roof and floor and shielding conditions are good. Therefore, the lithologic trap conditions are superior, and the LST sand bodies have the conditions to form a large-scale lithologic trap group. (3) The low porosity and ultra-low permeability reservoir of LST sandstone is developed in the Western Well Pen-1 Sag, and the local microfractures improve the physical properties of the reservoir. Two sets of source rocks of the Permian Fengcheng Formation and Lower Wuerhe Formation are developed in the sag, so the source conditions are good. (4) In addition, two groups of deep and shallow faults are developed around the Western Well Pen-1 Sag, vertically connecting the LST sand bodies of Badaowan Formation with Permian source rocks, which is conducive to the accumulation oil and gas, so the LST sand bodies have great exploration potential and are favorable exploration fields for the next step of oil and gas discovery in the Junggar Basin. This understanding provides a geological basis for the next step of oil and gas exploration in Junggar Basin, and also provides a reference for oil and gas exploration in depressional lake basins with similar geological backgrounds at home and abroad.

Key words: lowstand system tract; sedimentary model; lithologic trap; oil and gas exploration; Badaowan Formation; Junggar Basin

HOU Gangfu, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in research on sedimentology and reservoir geology. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. ORCID: 0000-0001-8993-3816

SONG Bing, Corresponding author: MSc, Engineer, mainly engaged in research on sedimentology and reservoir geology. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. ORCID: 0000-0002-3566-948X