

陆相断陷湖盆滩坝沉积特征与地震沉积学响应

——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组一段为例

张自力^{1,2,3}, 李琦², 朱筱敏³, 施瑞生⁴, 谢爽慧³, 张锐锋⁵, 曹兰柱⁵

[1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中海油田服务股份有限公司油田生产事业部, 天津 300459; 5. 中国石油华北油田分公司, 河北 任丘 062552]

摘要:随着油气勘探程度的提高,滩坝作为陆相湖盆重要的储集体类型在隐蔽油气勘探中逐渐得到重视。以渤海湾盆地霸县凹陷沙河街组一段为研究目标,立足于岩心、钻井岩-电响应特征确定滩坝的类型及组合,利用三维地震资料综合解释并基于地震沉积学原理,明确不同成因类型滩坝的空间分布。结果表明,研究区滩坝岩性以(钙质)细砂岩、粉砂岩、生物灰岩、白云岩及泥质灰岩为主。依据岩性组合将滩坝划分为碎屑岩滩坝、碳酸盐岩滩坝、混积滩坝及风暴滩坝4种类型,并建立相应的滩坝沉积模式。其中,碎屑岩滩坝是三角洲前缘砂体改造、再堆积的结果,碳酸盐岩滩坝为低物源供给背景下湖盆内碳酸盐原生沉淀的产物,混积滩坝是陆源碎屑与内源碳酸盐岩碎屑混积的产物,风暴滩坝的形成则与湖浪对早期滩坝的破坏作用有关。滩坝时空分布具有继承性特征,垂向上从湖侵体系域至高位体系域沉积时期碎屑岩滩坝—混积滩坝—碳酸盐岩滩坝—混积滩坝—碎屑岩滩坝依次叠置,平面上古湖盆内断层翘倾盘及古底形凸起区是滩坝的重要发育部位,马西走滑断层末端形成的局部挤压隆起是大规模碳酸盐岩滩坝及混积滩坝集中发育区。滩坝的类型及发育特征记录了断陷湖盆构造-层序演化信息,是沉积盆地形成早期古地理格局及演化过程的物质表现。通过对滩坝的精细解剖,有助于恢复盆地的早期演化过程,为下一步储层预测和油气勘探开发提供参考。

关键词:沉积模式;地震沉积学;断陷湖盆;滩坝;沙河街组一段;古近系;霸县凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es¹ in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Zili^{1,2,3}, Li Qi², Zhu Xiaomin³, Shi Ruisheng⁴, Xie Shuanghui³, Zhang Ruifeng⁵, Cao Lanzhu⁵

[1. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Oilfield Production Department, China Oilfield Services Ltd., Tianjin 300459, China; 5. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China]

Abstract: With the increasing of exploration maturity, beach-bar deposit, as an important reservoir type in downfaulted lacustrine basins, has drawn more attention in search of subtle oil/gas reservoirs. The analysis of the core, lithology, and electrical properties serves to determine the type and combination of beach-bars in the 1st member of Shahejie Formation (Es¹) in the Baxian Sag, Bohai Bay Basin. The spatial distribution of these beach-bars of diverse genetic types is then clarified by a comprehensive interpretation of 3D seismic data and based on the principle of seismic sedimentology. The results show that the lithologic types of the beach-bars in the study area mainly include (calcareous) fine-grained sandstone, siltstone, biolimestone, dolomite and argillaceous limestone. According to lithologic combinations, the beach-bars can be classified into four types, that is, clastic rock type, carbonate rock

收稿日期:2021-10-10;修订日期:2022-05-08。

第一作者简介:张自力(1986—),男,博士、工程师,沉积学、层序地层学与油气地质。E-mail: Pipi-D-king@hotmail.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0605400);国家科技重大专项(2017ZX05001-002-002);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2017E-15)。

type, mixed carbonate-siliciclastic rock type and tempestite type, the depositional models of which are established respectively. Among others, the beach-bar of clastic rock type is a product of reformation and re-accumulation of delta-front sand bodies; the beach-bar of carbonate rock type is a product of primary deposition of carbonate rocks in the lacustrine basin under low provenance supply capacity; the beach-bar of mixed carbonate-siliciclastic rock type is a product of mixed deposition of terrigenous clastics and intrabasinal carbonate; and the beach-bar of tempestite type is developed under the destructive effect of waves on early formed beach-bars. The temporal and spatial distribution of beach bars show the feature of inheritance. Vertically, beach-bars of clastic rock type, of mixed carbonate-siliciclastic rock type, of carbonate rock type, of mixed carbonate-siliciclastic rock type and of clastic rock type are deposited and superimposed successively from lake transgressive systems tract to highstand systems tract. While in map view, beach-bars are mainly developed on the tilted fault walls and salients of paleo-lakebed form in the paleo-lake basin. Beach-bars of carbonate rock and mixed carbonate-siliciclastic rock type are seen in large scale in local uplifts caused by compression at the end of Maxi strike-slip fault. In all, the types and development characteristics of beach-bars serve to record the tectono-stratigraphic sequence evolution of the downfaulted lacustrine basin and as the material manifestation of paleogeographic pattern and its evolutionary process in the early stage of rifting. The fine description of beach-bars is conducive to restoring the early evolutionary process of the basin, so as to be of referential value to reservoir prediction and oil/gas exploration and development in the future.

Key words: sedimentary model, seismic sedimentology, downfaulted lacustrine basin, beach-bar, the 1st member of Shahejie Formation (Es¹), Palaeogene, Baxian Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:张自力,李琦,朱筱敏,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积特征与地震沉积学响应——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 970-989. DOI: 10. 11743/ogg20220418.

Zhang Zili, Li Qi, Zhu Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es¹ in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 970-989. DOI: 10. 11743/ogg20220418.

滩坝是滨浅海(湖)区一种重要的沉积相类型,是滩和坝的总称,其形成主要受波浪和沿岸流的控制^[1-2]。在陆相断陷湖盆中,滩坝砂体多分布于湖泊边缘、湖中局部隆起和湖岸线拐弯等处的滨浅湖缓坡地区^[3-4]。对于滩坝的形成,众多学者针对现代海岸或湖岸沉积以及野外滩坝露头进行了大量深入的研究,在沉积环境、成因、沉积特征和沉积模式等方面已取得了丰富的成果^[5-7]。在中国陆相断陷湖盆多年的油气勘探中,常常发现碎屑岩滩坝与碳酸盐岩相伴生形成混合沉积并发现了数量可观的油气^[2,4,8-10]。前人研究认为,混合沉积是一种广泛的沉积类型并且在海相、陆相以及过渡相等各类环境中均有一定分布^[8-9,11-12]。混合沉积物具有不同沉积相带在平面上交错或在垂向上依次重叠出现的特点^[8-10]。混合沉积(物)的形成受构造、气候、物源、湖(海)平面变化、水动力以及风场等多因素综合控制。此外,不同沉积环境中混积的主控因素不同^[6-8,11-13]。

渤海湾盆地古近系沙河街组一段(沙一段)下部广泛发育的一套以细碎屑岩与碳酸盐岩为主的混合沉积,被认为是断陷湖盆在广泛湖侵背景下,陆源碎

屑与内源性碳酸盐岩碎屑混合形成的滨浅湖滩坝沉积,既是区域上优质的烃源岩及盖层,也是岩性油气藏及页岩油勘探的重要领域之一^[10,14-17]。其中,湖泊碳酸盐岩的形成明显受控于古气候、古水动力和古水介质条件的变化,并且海侵作用与湖相碳酸盐岩的形成关系密切,尤其是近海湖泊^[18-22]。然而,在陆相断陷湖盆中构造沉降起主导作用,气候的周期性变化对物源供给、湖平面升降以及可容纳空间的控制相对于海相及海-陆过渡相来说更为显著,对于混合沉积及混积岩的形成显得更为复杂、多变^[23-37]。因此,断陷湖盆(混积)滩坝的成因类型和空间展布与古湖盆之间的关系显得尤为重要。混合沉积研究对于了解沉积环境的沉积动力学、湖平面变化以及区域沉降速率,甚至古气候和构造对沉积的控制作用等都具有特殊意义^[28]。

目前,常规地震勘探技术与方法受限于地震资料品质及分辨率,对薄层砂体(岩性体)的精细刻画存在一定困难,特别是对于沙一段厚层泥岩中裹挟的薄层碳酸盐岩及滩坝碎屑岩来说是个技术难题^[29-30]。地震沉积学原理的应用能够有效地刻画薄层砂体,尤其

通过地震岩性学与地震地貌学的综合分析,不仅可以分析沉积岩性、识别薄层砂体,还可以确定沉积类型及其演化特征等^[29-33]。因此,本次以渤海湾盆地冀中坳陷霸县凹陷古近系沙一段为例(图1),基于地震沉积学原理及方法,通过覆盖研究区三维地震资料的精细解释,分析陆相断陷湖盆(混积)滩坝的类型及成因,明确各类型滩坝的时空分布及演化特征,探寻和总结陆相断陷湖盆充填演化规律性及其差异性。本文研究丰富了陆相湖盆沉积体系类型,为同类型盆地演化研究和油气勘探提供借鉴,也为薄层砂体(岩性体)刻画提供研究实例。

1 区域地质特征

霸县凹陷位于渤海湾盆地西北部,为冀中坳陷内部中-新生代发育的次一级凹陷,是华北油田油气生产的主要区域之一^[35-38]。霸县凹陷古近系整体呈近NE-SW走向的半地堑结构(图1a),其西部以牛驼镇凸起为界,向东过渡为文安斜坡带,北部以霸县二台阶和里澜断层与廊固凹陷、武清凹陷相隔,南以徐水-新安横向调节断层与饶阳凹陷毗邻,东西宽约70 km,南北长约80 km,总勘探面积约5 600 km²^[39-40]。其中,三维地震覆盖面积为2 552 km²,探井800口。

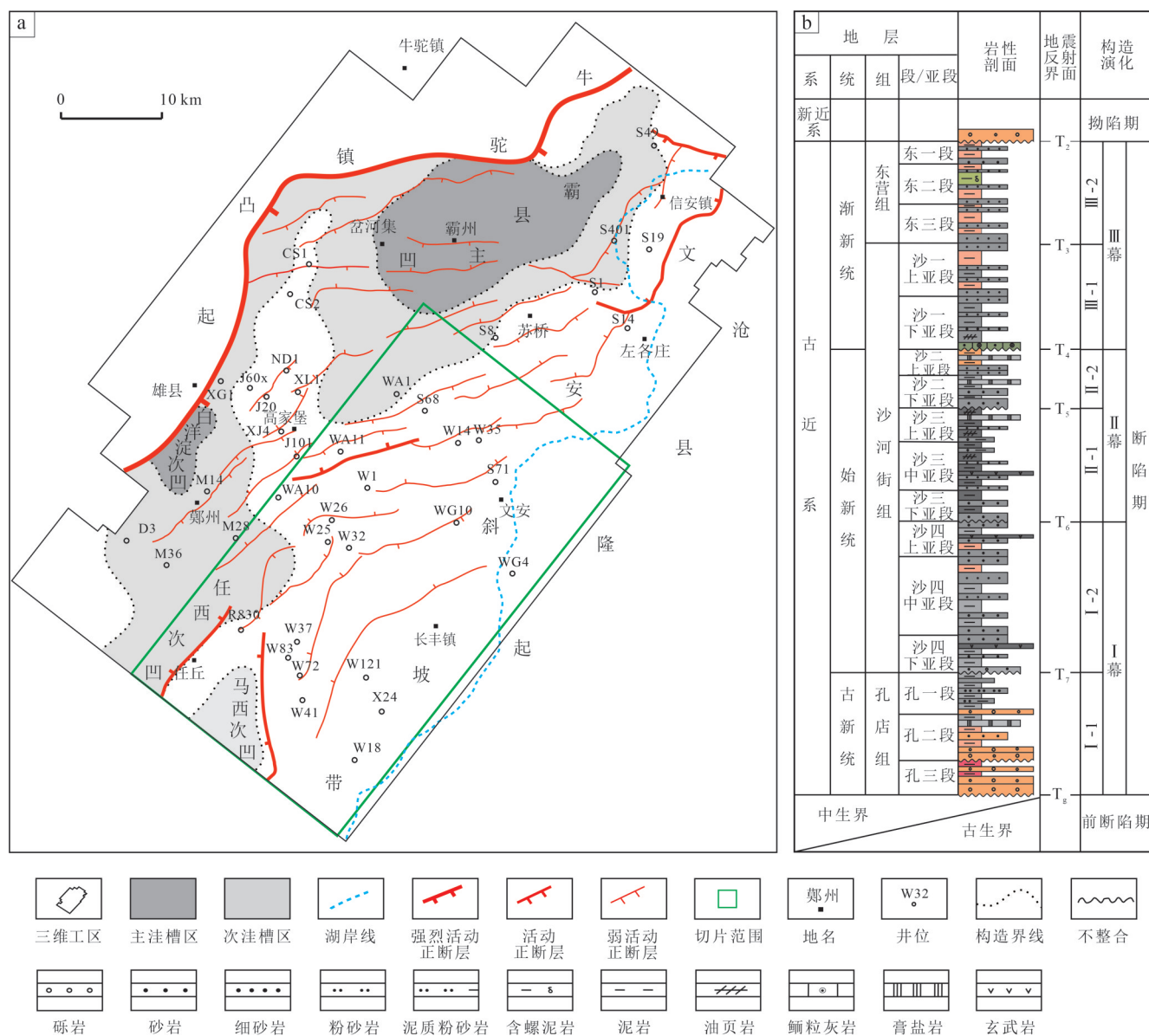


图1 渤海湾盆地霸县凹陷构造格局(a)及古近系综合柱状图(b)(据文献[34]修改)

Fig. 1 Basinal structure framework (a) and composite stratigraphic column (b) of the Palaeogene of the Baxian Sag, Bohai Bay Basin (modified after reference[34])

1.1 地质概况

霸县凹陷古近系发育齐全,断裂活动的不均衡性使地层具有南北分区、东西分带、厚度变化大、岩相变化快等特点,控盆断裂强烈活动使古近系沉积厚度超过8 000 m^[34,39-40]。前人依据岩性和古生物化石组合,将古近系自下而上依次划分为:孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed)^[35-37,41](图1b)。霸县凹陷古近系沉积体系组合类型丰富,受断层演化和空间组合形态及物源特征影响,时空分布差异性明显,共识别出冲积扇、曲流河三角洲、辫状河三角洲等10余种沉积相,可归纳总结为冲积-河流体系、湖泊-三角洲体系、湖泊-滩坝体系和河流-洪泛平原4种沉积体系类型^[14,34,39-40]。前人依据地震反射终止样式、岩性组合特征、古生物组合及垂向演化以及钻井岩-电响应特征等,将霸县凹陷古近系进一步划分为3个二级层序和14个三级层序^[39-40]。其中目的层沙一段(Es¹)划分为2个三级层序,自下而上依次为SQ10和SQ11,层序边界依次为SB10,SB11和SB12,分别对应T₄,T₄¹和T₃(图2)。

1.2 沙一期古湖盆特征

沙一段是霸县古湖盆结束沙二末期(沙二段沉积末期)盆地构造回返、再次进入快速沉降阶段(Ⅲ-1)、快速湖侵作用的产物^[14]。岩性以深灰色泥岩、灰色泥岩、灰绿色泥岩和油页岩为主,夹薄层细砂岩、粉砂岩、鲕粒灰岩、泥灰岩及白云岩,认为主要发育滩坝、湖泥及少量近岸水下扇(扇三角洲)沉积^[14,41](图1b,图2a)。霸县凹陷在结束沙二段(Es²)的抬升剥蚀、夷平后,形成整体由西向东的宽缓斜坡。残余地貌凸起零星分布,盆内活动正断层控制了湖盆底型,形成的下降盘是局部沉降中心(图3)。此时,霸县凹陷进入古近纪第三幕强烈沉降期(图1b),沙一期西部边界牛东断层拉伸率为4%~7%,盆地构造沉降速率为135~142 m/Ma,总沉降速率为235~250 m/Ma,盆地沉积和沉降中心位于边界断层下降盘,地层整体呈楔状结构,最大厚度为1 400 m^[14,39,42]。

沙一期冀中地区古气候温暖、湿润,霸县凹陷发生了古近纪最大一次湖侵过程^[14]。处于宽缓斜坡带之上的湖水面积迅速扩张,盆地整体处于欠补偿状态,湖岸线位于文安斜坡中-外带W18—WG4—S1—S19井等附近位置(图1a)。在快速湖侵作用下暗色泥岩、油页岩直接覆盖于不整合面(T₄/SB10)之上,沙一期霸县古湖盆持续时间较短,暗色泥岩段累积厚度小(文安斜坡带厚度5~90 m)^[14,40]。古湖盆水体浅(文安斜坡水

深<10 m),滩坝砂体常与暗色泥岩、油页岩及紫红-棕红色泥岩频繁薄互层。古湖盆水体偏咸(咸水-半咸水),微量元素具有高Sr/Ba值(>1.5,含量比)特征,Sr/Ba值显示沙一期湖盆水体迅速咸化之后逐渐淡化,呈淡-微咸水。水体处于还原-亚还原环境,其中,Ni/Co值为4.05~6.51,平均值为5.03,δU值为0.63~1.36,平均值为1.11^[14,42]。综上所述,霸县凹陷沙一期湖侵迅速,湖岸线溯源迁移速度快,湖盆具有宽、浅、咸及欠补偿等特点,有利于碳酸盐沉淀及滩坝的形成。

2 地震沉积学分析

2.1 地震沉积学原理及地震资料

本次研究采用曾洪流、朱筱敏等人的地震沉积学工作流程,该流程是在总结近年来中国陆相地震沉积学研究经验的基础上,针对陆相盆地的地震沉积学研究提出来的^[43-45]。相较于垂向分辨率,高的横向分辨率在平面上识别地质体形态和地貌优势更为明显,其主要技术手段包括高精度等时地层格架的建立、90°相位变换、属性优选、地层切片的制作以及沉积学解释等内容^[29,45]。

地震沉积学研究靶区位于霸县凹陷文安斜坡中南部,探井200口,三维地震覆盖面积约1 140 km²,研究区原始的地震资料相位角为0°,地质有效频带宽度为6~65 Hz,主频为27 Hz,正常极性。目标层段沙一段顶、底分别对应于T₃和T₄地震反射同相轴,其中,沙一下亚段(SQ10)顶、底界面分别为T₄¹(SB11)和T₄(SB10)。沙一下亚段滩坝沉积具有横向变化快与泥岩及碳酸盐岩沉积频繁互层特征,其地震响应受下部T₄强波峰影响,因此,研究区滩坝与湖相泥岩沉积组成低频、连续强振幅或复合强振幅反射地震特征(图2b,c)。通过地震沉积学方法,理论上可以有效区分各种岩性并明确其平面展布。本次利用Rockstar公司Geoscope软件在建立等时地层格架的基础上,以T₄¹和T₄地震反射界面为标志层,以上、下各3 ms旅行时间为间隔,对三维地震资料进行地层切片采样,并提取了50张均方根振幅地层切片。结合与不同沉积体系的地貌相匹配的地震平面反射特征,对地震属性(剖面、平面)进行精细解释,从而获得沙一下亚段岩性平面形态和分布特征(图4)。

2.2 地震地貌与典型地层切片

由于霸县凹陷沙一段形成于沙二末期广泛抬升、

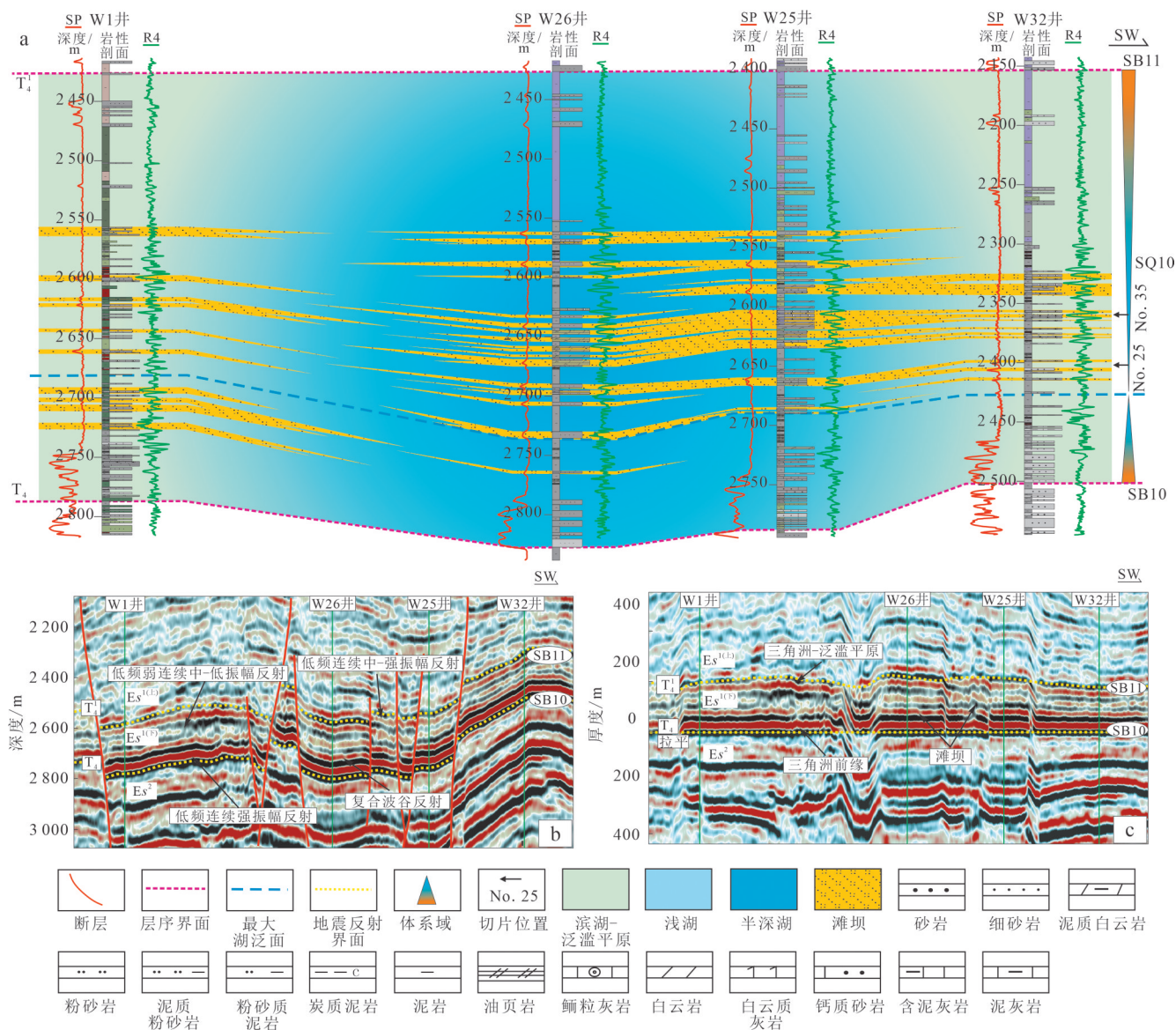


图2 霸县凹陷文安斜坡中-内带沙一下亚段(SQ10)地震反射结构及连井沉积相解释剖面(剖面位置见图3)

Fig. 2 Seismic reflection configuration and well-tie section for sedimentary facies interpretation of the $Es^{1(L)}$ (SQ10) in the middle-to-inner belt of Wen'an slope in the Baxian Sag (see Fig. 3 for the section location)

a. 过井沉积相对比剖面; b. 过井地震反射剖面及地震相特征; c. 过井 T_4 (SB10)地震拉平剖面

剥蚀的背景下,此时盆地快速沉降,文安斜坡地形高差小(10~50 m),沉积底形较为平坦(坡度 $<1^\circ$),并且沙一段底界面同相轴分布稳定,全区可追踪(图3),利用印模法可以有效恢复沉积期的古地貌特征。具体做法是先将沙一段底(T_4)同相轴拉平,以其上部相邻的波峰为参考,获得沙一初期的印模厚度,可以用来反映沙一期古地貌特征(图2b,c)。此外,沙一段下部“特殊岩性段”以泥岩和油页岩为主,整体岩性相近,且文安斜坡带沙一下亚段埋深差异较小,整体可采用固定的压实矫正系数。沙一段下部地层保存较完整,后期剥蚀作用可忽略不计。因此,印模法恢复沙一期古地貌可靠程度高。

研究区沙一段古地貌图和典型地层切片中均反映出文安斜坡发育两组断裂体系(图3,图4),两组断裂与牛东断层共同作用控制了霸县凹陷主洼和次洼的形成(图1,图3)。其中,北段断裂体系呈NE-SW向展布,是沙一期霸县凹陷主洼槽的西南缘,在W1井区附近形成了浅湖-半深湖泥质沉积。南部为NNW-SSE向延伸的马西右旋走滑断层所控制的断裂体系,大多数次级断层呈现出南向收敛、东北向发散的特征,平面显示为帚状(图4)。此断裂系统指示,霸县凹陷沙一期受右旋走滑作用影响,各断层两侧断块边沉积边滑动,在不同位置的受力不均衡,导致沿着断层的不同位置形成了压力场和张应力场共存的现象。在受压

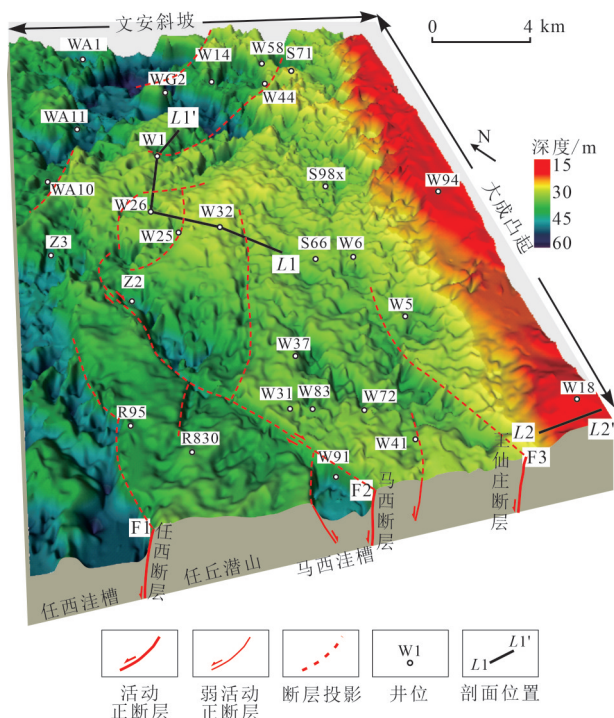


图3 霸县凹陷文安斜坡中南段沙一段沉积期古地貌

Fig. 3 Palaeogeomorphic map showing the south-to-middle section of Wen'an slope during the Es¹ deposition in the Baxian Sag

处,地貌隆起变形,如W41井区为线状低凸起;而在张开处发生沉降,形成地貌洼槽区,如W37井区为局部低洼带;沿着走滑断层下降盘形成线状次级洼槽,如马西洼槽是霸县凹陷沙一段的次级沉积、沉降中心(图1,图3)。而在走滑断层的末端,往往对应较大规模的压力场,被认为是形成W25井区大范围隆起的主要原因(图3,图4)。

在获得一系列地层切片的基础上,利用钻/测井资料对地震反射特征进行标定,明确地震属性所代表的岩性意义^[29,43-45](图2)。岩石物理分析表明,纵波速度(v_p)能较好地区分碳酸盐岩、砂岩和泥岩。其中,碳酸盐岩和砂岩以相对高速为特征,泥岩和油页岩则相对低速。岩性与地震反射具有较好的对应关系,一般强振幅代表富砂岩和碳酸盐岩沉积,弱振幅则代表以泥质沉积为主(图4)。本次选取了文安斜坡南段不同体系域并且与古地貌相匹配的两张典型等时地层切片(图2,图4),对各体系域内岩性及其空间分布进行了详细识别和分析。岩性-振幅标定显示,地层切片上均方根振幅(RMS)值大于15代表强振幅富砂及碳酸盐岩反射(黄色—红色), RMS 值小于10代表弱振幅富泥沉积反射(蓝色—绿色), RMS 值介于10~15代表砂泥岩、碳酸盐岩和泥岩之间的过渡反射(绿色—黄色)。

等时地层切片显示不同层系(时期)的振幅反射具有一定的相似性,强振幅与弱振幅反射之间呈渐变过渡,整体上由东部文安斜坡向西部霸县洼槽区振幅强度减弱。强振幅反射($RMS>15$)主要分布于文安斜坡沙一段地层超覆线附近区域,与近物源分布的小型三角洲沉积有关;其次,在马西走滑断层下降盘、任西断层下降盘之上,强振幅反射的连片分布反映了碳酸盐岩滩坝和混积滩坝的集中发育;此外,马西走滑断层北部消亡端也是强振幅反射集中分布位置,根据少量钻井岩-电特征推测,该位置与湖侵期厚层钙质泥岩及泥灰岩沉积有关。中振幅反射($10<RMS<15$)则沿超覆线强振幅反射周围分布于部分弱活动断层下降盘位置,其余零星分布于文安斜坡中-外带,多是薄层滩坝砂体与浅湖泥岩互层发育区。而弱振幅反射($RMS<10$)则连片分布于马西走滑断层消亡端形成的强振幅反射周缘以及切片北部靠近霸县洼槽等位置,这些位置主要与浅湖泥岩、油页岩及泥灰岩沉积有关(图4)。

3 滩坝类型及成因

霸县凹陷沙一段主要为开阔浅湖沉积,并发育小型三角洲、滩坝及浅湖泥质沉积^[14,39]。其中,滩坝可进一步划分为碎屑岩滩坝、碳酸盐岩滩坝、混积滩坝及风暴滩坝4种类型(表1)。

3.1 碎屑岩滩坝

碎屑岩滩坝岩性以浅灰色薄层(含砾)砂岩、细砂岩和粉砂岩为主,砂岩钙质胶结(图5;表1)。碎屑岩滩坝厚度为0.50~4.00 m,岩心整体呈逆粒序特征,砂体下部为粉砂岩和泥质细砂岩,常发育波状层理和变形层理(图5中①—⑤),底部与下伏泥岩呈渐变过渡,与砂岩呈突变过渡(图5中⑤,⑥),局部可见泥底劈构造,泥岩后期被氧化呈现紫红色(图5中④)。砂体上部以细砂岩和砂岩为主,发育块状层理、楔状层理、波状交错层理和爬升层理等(图5中⑥—⑨),砂体顶部可见浪成波痕和冲刷面等,与上覆滩坝或浅湖泥岩呈突变接触(图5中①,⑤,⑥)。此外,可见陆生高等植物茎及叶片化石碎片成层分布(图5中②),砂体上部细砂岩段可见长英质砾石(粒径在2~5 mm)(图5中⑦,⑧),砂体下部细粒段多发育炭质纹层,岩心垂向变形范围大(0.15~0.40 m),发育火焰构造和砂枕构造等(图5中③,⑤),砂体内部发育与层面近垂直的生物钻孔等(图5中⑩),是碎屑岩滩坝特有的识别标志。

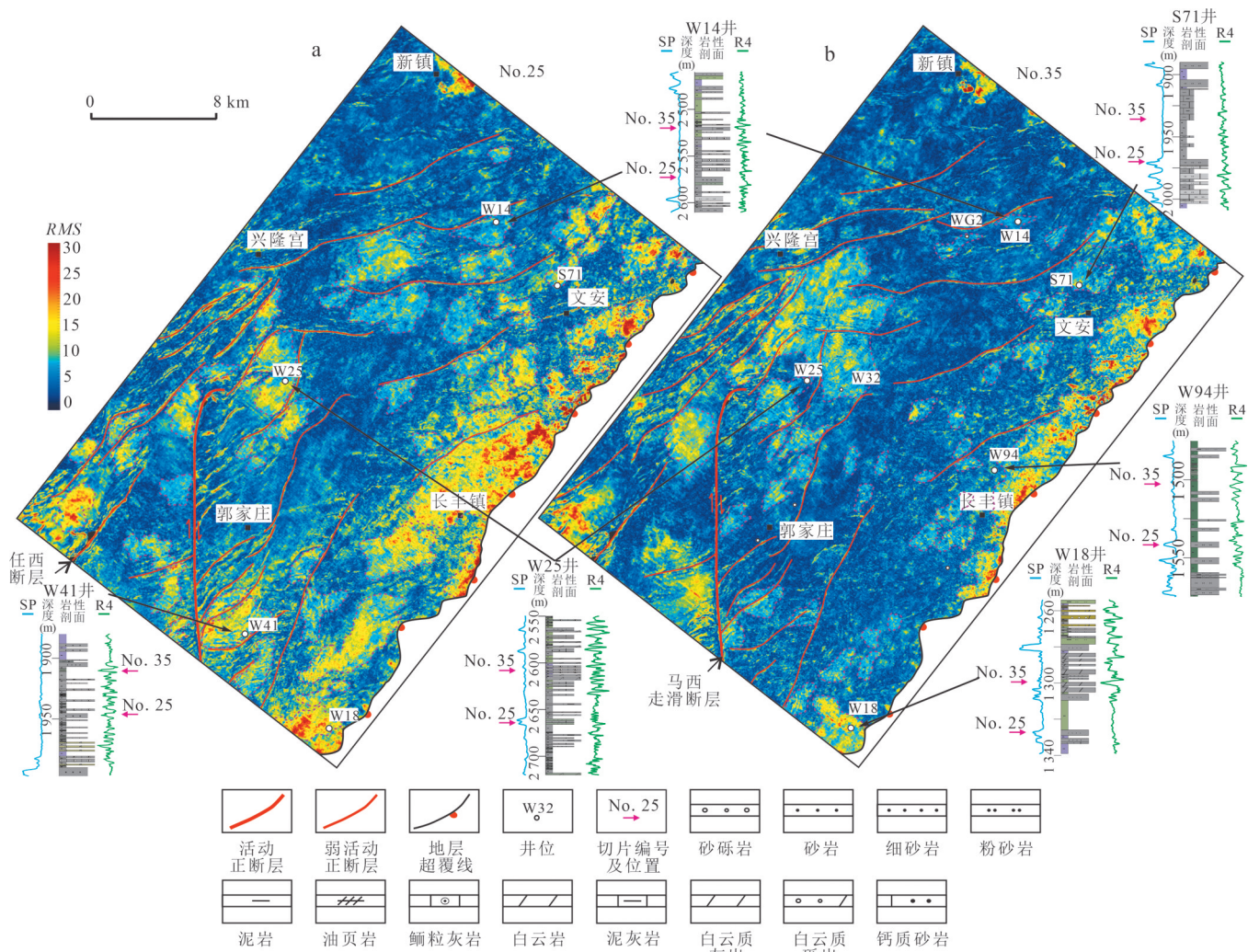


图4 霸县凹陷文安斜坡中南段沙一下亚段典型地层切片及岩性标注(切片范围见图1a,位置见图2a)

Fig. 4 Typical stratigraphic slices and lithologic annotation of the $Fs^{(L)}$ in the south-to-middle section of Wen'an slope in the Baxian sag (see Fig. 1a for the slice scope, and Fig. 2a for the location)
a. 湖侵体系域; b. 高位体系域

表1 霸县凹陷古近系沙一段滩坝类型及特征对比

Table 1 Comparison of beach-bars of diverse types in characteristics of the Palaeogene Es^1 in the Baxian Sag

沉积相	岩性组合	沉积构造	特殊现象	测井响应	地震反射	发育时期
碎屑岩滩坝	浅灰色薄层砂岩、细砂岩、粉砂岩为主,可见砾石,高等植物化石	下部波状层理、变形层理,上部楔状层理、波状交错层理、爬升层理等,可见生物钻孔	底部可见泥底劈构造,富含陆源植物碎片,可见长英质砾石	SP 指状、舌形,GR 低幅齿形,R4 低幅齿形,厚度 1.00 ~ 6.00 m	复合中-低频连续、中-强振幅波谷反射	湖侵体系域早期-高位体系域中、晚期
碳酸盐岩滩坝	灰白色生物灰岩、砾屑灰岩、(含)鲕粒灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩及白云岩	块状层理为主,垂向可见泥灰岩、泥质灰岩向鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩及白云岩过渡,垂直生物钻孔	可见鲕粒、生物碎屑,裂隙发育,部分裂隙被泥质充填	SP 低幅齿形,GR 低幅微齿形,R4 高幅锯齿形,厚度 1.00 ~ 10.00 m	中-低频连续性良好、强振幅平行反射	湖侵体系域晚期-高位体系域中期
混积滩坝	白色生物碎屑灰岩、砂屑灰岩、(含鲕粒)钙质粉-细砂岩、细砂岩、粉砂岩及泥岩	发育丰富的层理结构,包括块状层理、平行层理、粒序层理、楔状层理及波状交错层理,可见变形层理、生物钻孔及泥岩条带	碳酸盐岩与钙质细砂岩、泥岩的突变接触面可见冲刷面,渐变接触面多发育变形层理	SP 齿形、指形,GR 低幅微齿形,R4 中幅锯齿形,厚度 1.00 ~ 5.00 m	复合中-低频连续、中-强振幅波谷反射	湖侵体系域中、晚期-高位体系域中期
风暴滩坝	灰白色钙质砂岩、砂砾岩、含砾砂岩及粉砂岩,可见灰黑色泥砾及灰白色碳酸盐砾石	块状层理为主	可见分选差、次圆-次棱角状钙质泥岩及碳酸盐岩颗粒,复合粒序结构	SP 齿形夹指状峰,GR 齿形,R4 高幅锯齿形,厚度 1.00 ~ 6.00 m	低频较连续、复合波谷反射,蠕虫状反射特征	湖侵体系域一高位体系域早期

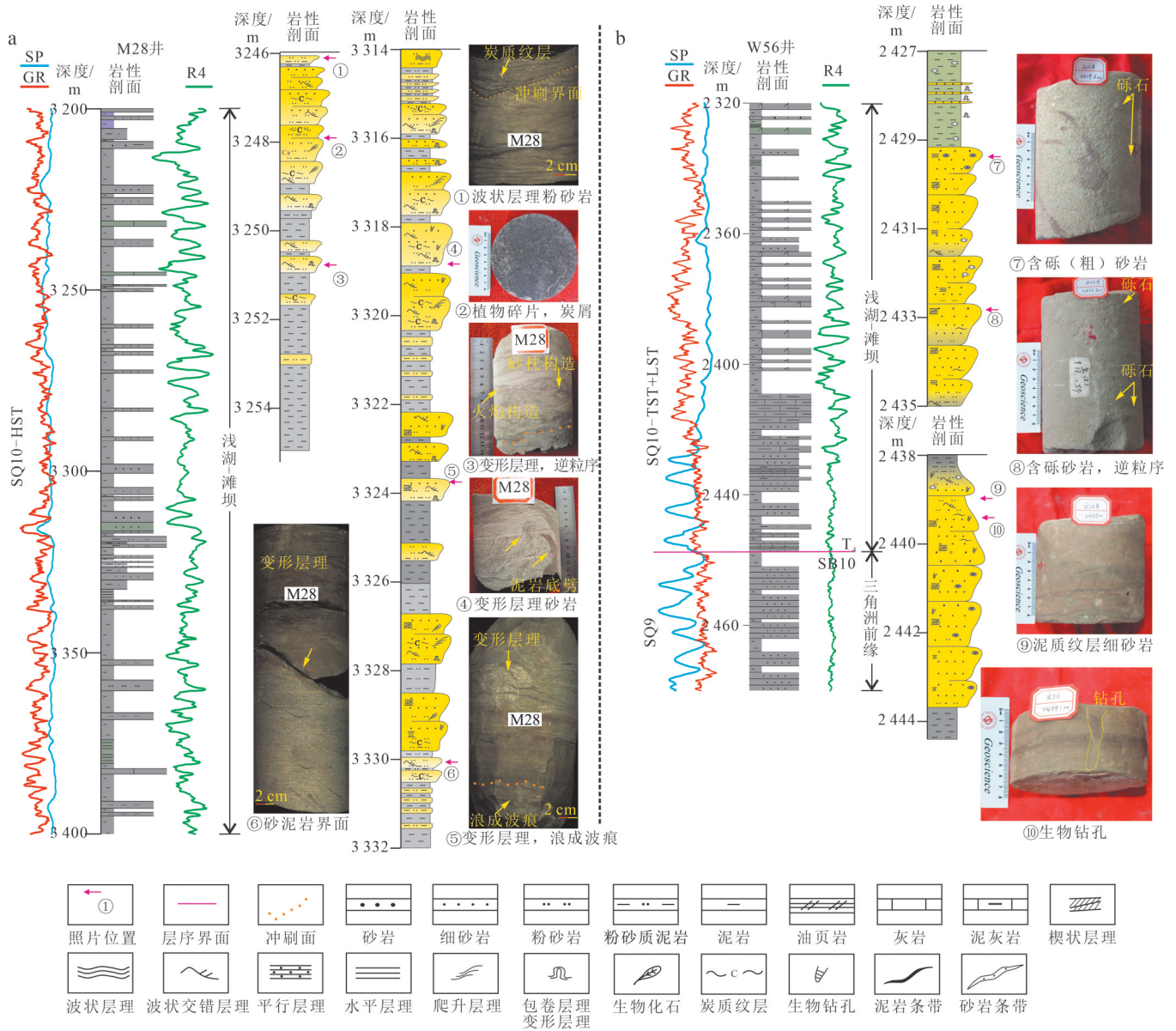


图5 霸县凹陷沙一段碎屑岩滩坝岩心相及钻井岩-电特征

Fig. 5 Core facies, lithology and electrical properties of the beach-bar of clastic type in the Es¹, Baxian Sag

a. M28井; b. W56井

钻井岩-电剖面分析可知,碎屑岩滩坝多分布于沙一下亚段下部及中-上部等位置(图5中M28井和W56井),可见砂岩和粉砂岩与灰-深灰色泥岩呈不等厚互层,单砂体厚度在1.00~6.00 m,累积厚度小于30.00 m(图2a)。SP(自然电位)曲线为近泥岩基线之上的“指状”及“尖刀状”峰,低幅“齿化”GR(自然伽马)曲线特征,R4(电阻率)曲线砂岩与泥岩呈“齿形”特征(图5;表1)。地震反射剖面中单期薄层砂岩难以识别,但多期砂岩集合体与互层泥岩、油页岩呈复合中-低频连续、中-强振幅波谷反射特征(图2b,c)。等时地层切片中碎屑岩滩坝多呈现出较为孤立的中-强振幅反射,局部中振幅反射可以形成小范围连片展

布(图4)。

碎屑岩滩坝沉积物主要来源于盆外牛驼镇凸起和沧县隆起等物源区(图1a),被认为是湖盆内部小型三角洲在沙一下沉积期(SQ10)快速湖侵过程中,其前缘砂体受湖浪作用改造、再堆积的产物(图6)。根据岩心及地层切片显示,碎屑岩滩坝分布具有以下特征:①分布于文安斜坡长丰镇、西部郑州地区三角洲侧缘等位置,或出现于三角洲间、平行于湖岸线分布;②分布于湖盆内部断层下盘形成的断鼻及古地貌凸起等局部水下低隆部位(图4);③垂向上多分布于沙一下亚段的下部和中-上部两个位置,分别隶属于层序格架内湖侵体系域早期和高位体系域中期(图5)。

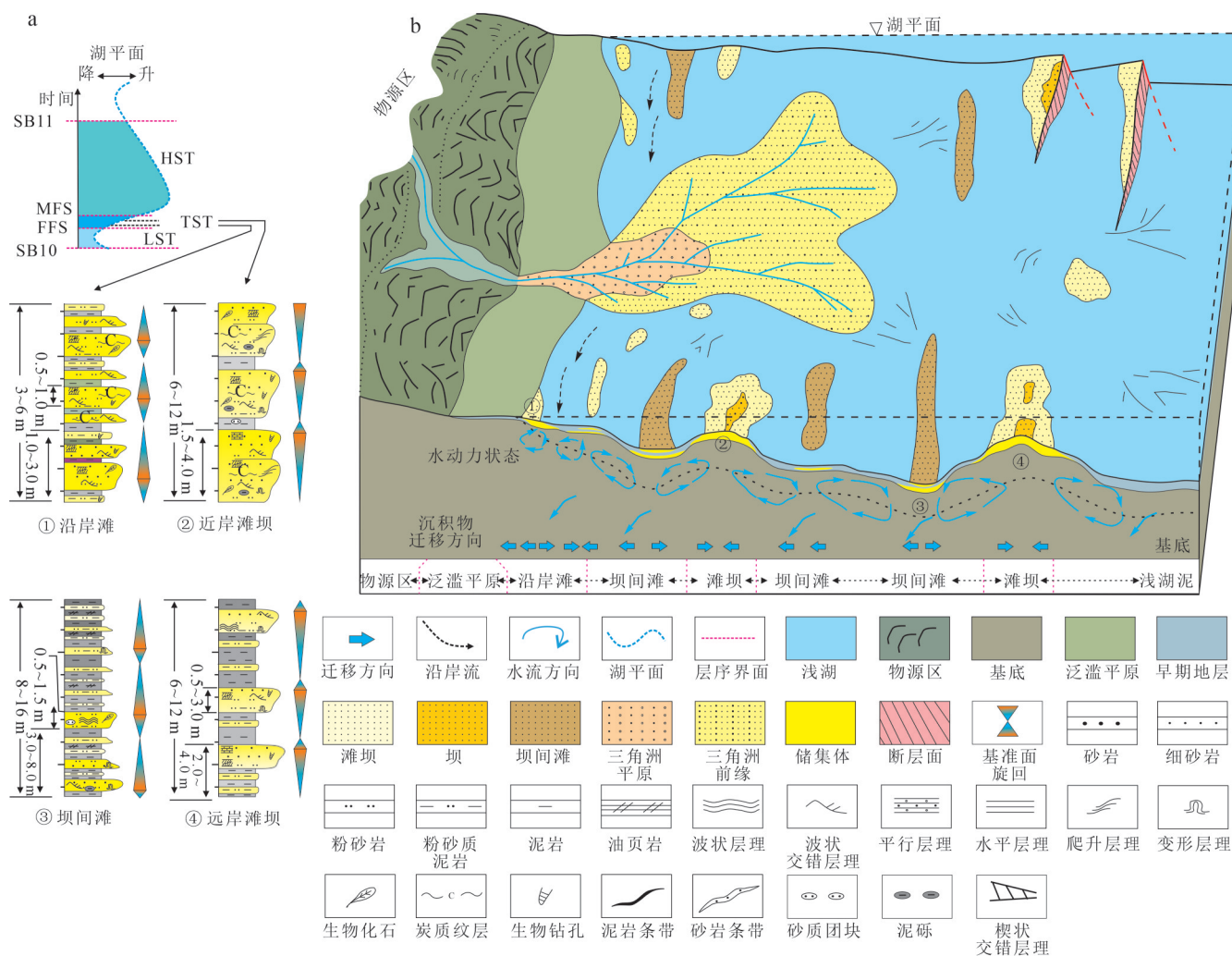


图6 霸县凹陷沙一段碎屑岩滩坝沉积模式及岩心相标志

Fig. 6 Depositional model and core facies markers of clastic rock beach bar in the Es¹, Baxian Sag

a. 岩性组合序列及层序结构位置; b. 沉积模式

LST. 低位体系域; TST. 湖侵体系域; HST. 高位体系域; FFS. 初始湖泛面; MFS. 最大湖泛面

碎屑岩滩坝具有差异化的岩性组合样式,近三角洲/湖岸线及湖侵体系域早期碎屑岩呈现出粒度粗(含砾)、单期砂体厚(1.00~4.00 m)、夹红-灰绿色泥岩以及强水动力等特征,垂向上各期滩坝间冲刷叠置,累积厚度大(图5中W56井)。远三角洲/湖岸线及湖侵体系域晚期-高位体系域早期阶段碎屑岩滩坝为粒度偏细(含钙质)、砂体偏薄(0.50~3.00 m)、与泥岩频繁互层,砂、泥岩之间呈渐变过渡(图5中M28井)。因此,依据滩坝分布位置和垂向岩性组合样式等特征,以沙一下亚段(SQ10)湖侵阶段为例,将碎屑岩进一步划分为:沿岸滩(坝)、近岸滩坝、远岸滩坝、坝间滩4种类型并建立垂向岩性组合样式(图6a中①—④)。

3.2 碳酸盐岩滩坝

碳酸盐岩滩坝岩性以薄层灰白色生物灰岩、砾屑

灰岩、(含)鲕粒灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩及白云岩为主(图7;表1),厚度在1.00~2.50 m,平均为1.50 m。生物碎屑灰岩、砾屑灰岩和(含)鲕粒灰岩等多呈块状结构(图7中①—⑤),部分砾屑灰岩具逆粒序特征(图7中②),灰岩、泥灰岩及白云质灰岩多呈灰白色块状(图7中③—⑤),灰岩顶部与泥岩、砂砾岩呈突变接触,可见冲刷面和飘砾(图7中①),部分(泥质)灰岩岩心表面可见灰黑色不规则斑状结构(图7中⑤)。碳酸盐岩滩坝以富含生物碎屑、鲕粒以及裂缝为特征。生物碎屑以不完整的腹足类和介形虫为主,鲕粒则以球状单鲕为主,部分受压呈椭圆状,核心为藻粒、长英质碎屑颗粒,也可见多个藻粒相互粘结形成复鲕(图7中⑥—⑧)^[10-11]。此外,部分灰岩中可见不规则裂隙,裂隙被灰色泥岩充填(图7中⑨),生物钻孔垂直或高角度斜交于层面。

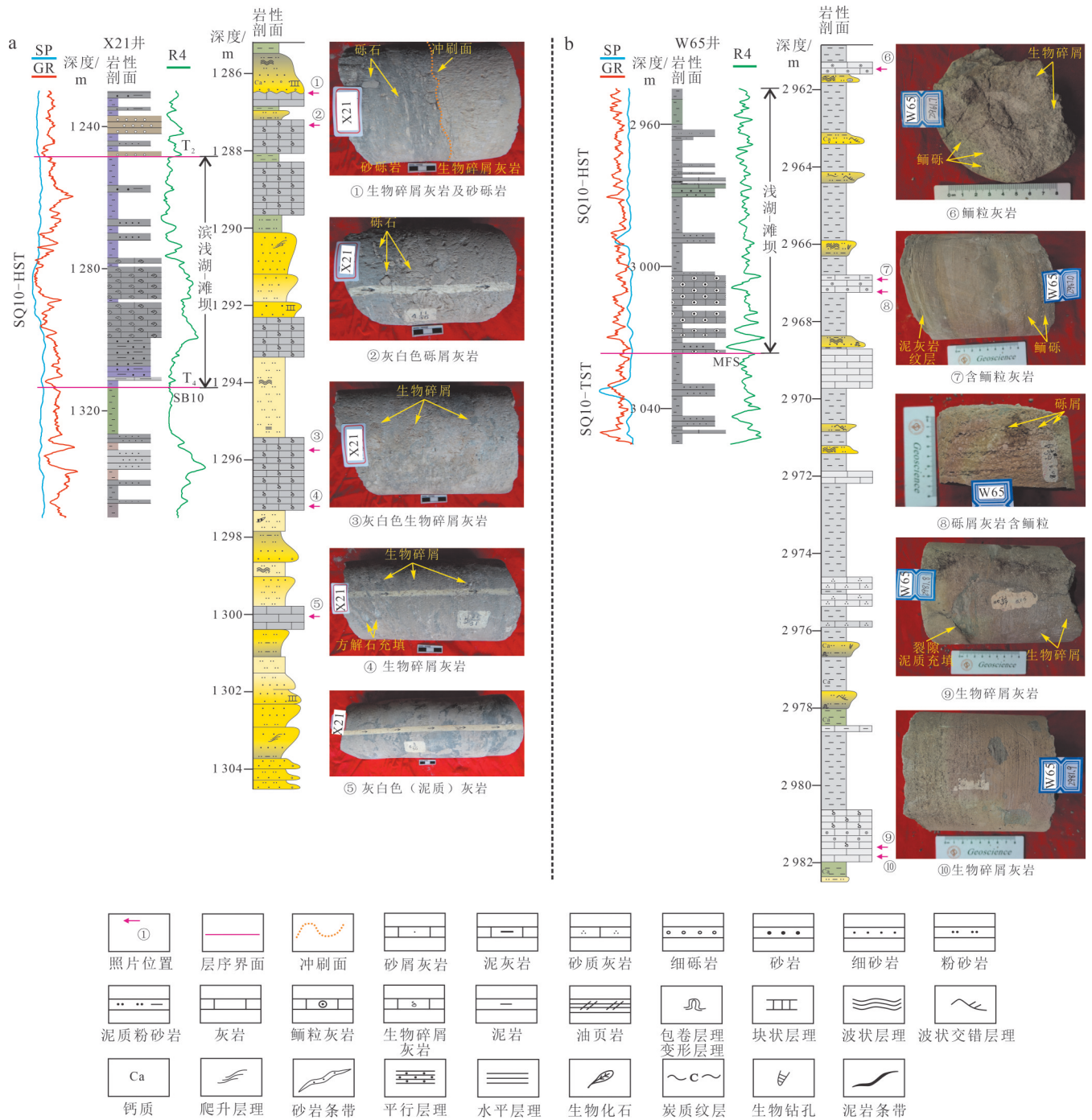


图7 霸县凹陷沙一段碳酸盐岩滩坝岩心相及钻井岩-电特征

Fig. 7 Core facies, lithology and electrical properties of the beach-bar of carbonate rock type in the Es¹, Baxian Sag
a. X21井; b. W65井

钻井岩-电剖面中碳酸盐岩滩坝集中分布于沙一下亚段中部,厚度1.00~10.00 m不等,累积厚度小于25.00 m(图2a)。可见灰-深灰色生物碎屑灰岩集中产出,或灰色鲕粒灰岩、泥灰岩、白云质灰岩及白云岩与暗色泥岩不等厚互层(图2,图7)。碳酸盐岩滩坝常规测井曲线具有“两低一高”特征,其中SP曲线为泥岩基线之上低幅“箱形”或“舌形”特征,GR曲线形态为低幅“齿

状”特征,R4曲线在泥岩与碳酸盐岩界面处出现高值跳跃(图7)。地震反射剖面中单层碳酸盐岩难以分辨,多期碳酸盐岩与泥岩、泥灰岩集合体呈现出中-低频连续性好、强振幅反射特征(图2b,c)。碳酸盐岩滩坝由于层薄、累积厚度较小,在等时地层切片中多呈现出连片分布的中振幅(黄色)反射特征,局部碳酸盐岩集中发育区呈现出斑点状及条带状强振幅(红色)反射(图4)。

碳酸盐岩滩坝被认为是霸县凹陷古湖盆湖水原生沉淀的产物(图8)。通过钻井岩/电及岩心显示,碳酸盐岩滩坝主要发育于沙一下亚段(SQ10)的中-下部,属于湖侵体系域晚期—高位体系域中期的沉积产物(图8a)。该阶段霸县凹陷湖平面由快速上升、趋于稳定后,逐渐进入下降阶段,在这个过程中陆源碎屑岩供给匮乏,在温暖、清浅的阔湖环境中,有利于碳酸盐岩沉淀^[19]。碳酸盐岩滩坝主要分布于马西走滑断层北部消亡段形成的水下低隆起区,其次为文安斜坡中-外带断层下盘及湖盆古底型凸起等位置(图8b)。马西断层北段碳酸盐岩滩坝呈继承性、连片分布,滩坝主体由灰岩、泥质灰岩及泥质白云岩组成,与灰-深灰色钙质泥岩互层,局部高部位则发育薄层生物碎屑、(含)鲕粒灰岩滩(图7a)。其余碳酸盐岩滩坝呈点状分布于水下低凸起,或呈线状沿断层下盘分布,岩性主要以灰岩和泥质灰岩为主,局部可见薄层鲕粒灰岩以及生物碎屑灰岩等(图7b)。湖盆内部形成大规

模浅滩泥灰岩与湖相泥岩及油页岩的频繁互层(图2中W1井),部分井段可见藻灰岩,多处于长期出露的低凸起周缘,可能与大规模藻类繁盛有关。根据碳酸盐岩滩坝的岩性组合、空间分布及垂向叠置特征,将碳酸盐岩滩坝进一步划分为滩坝主体、点状滩坝、浅滩及生物席4种类型,并建立了垂向岩性组合样式(图8a中①—④)。此外,碳酸盐岩滩坝具有继承性发育特征,岩性剖面中常常覆盖于早期碎屑岩滩坝之上(图2a)。

3.3 风暴滩坝

风暴滩坝岩性主要由灰白色钙质砂岩、砂砾岩、含砾砂岩及粉砂岩组成,常见块状层理、粒序层理、平行层理及变形层理等(图9;表1)。垂向上以复合粒序结构为主要特征,即由下部反粒序叠置上部正粒序而成,沉积厚度变化较大,少量岩心观察统计厚度为0.30~4.00 m。风暴滩坝的另一个典型特征是砾石成分及结

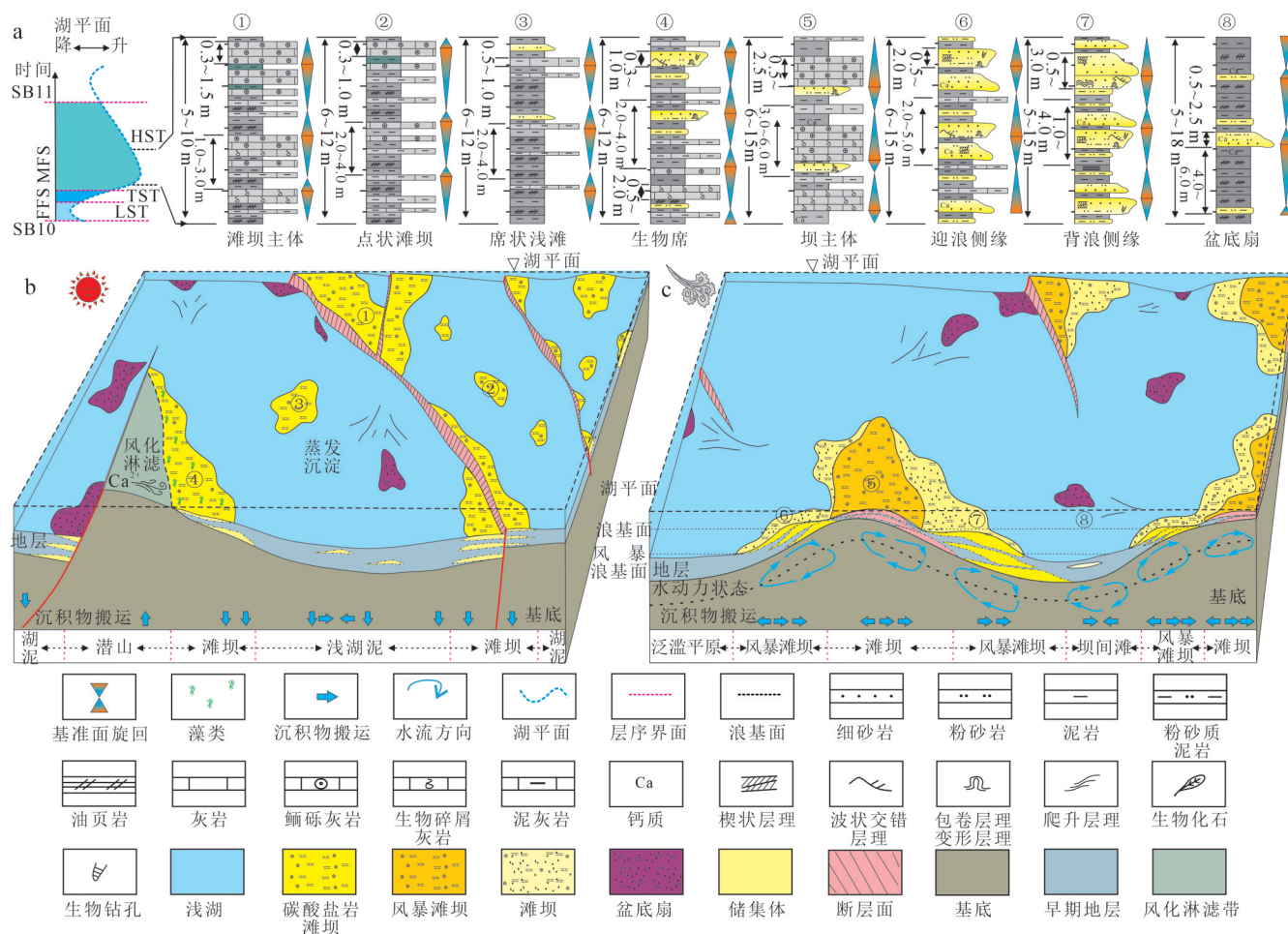


图8 霸县凹陷沙一段碳酸盐岩滩坝及风暴滩坝沉积模式及岩心相标志

Fig. 8 Depositional model and core facies markers of the beach bars of carbonate rock and tempestite types in the Es¹, Baxian Sag

a. 碳酸盐岩滩坝及混积滩坝垂向岩性序列及层序结构位置; b. 碳酸盐岩滩坝沉积模式; c. 风暴滩坝沉积模式

LST. 低位体系域; TST. 湖侵体系域; HST. 高位体系域; FFS. 初始湖泛面; MFS. 最大湖泛面

构具有多样性。通过颜色可以直观地分为两类:第一类为暗色泥(灰)砾,成分以深灰-灰黑色泥岩、钙质泥岩、泥质灰岩及泥灰岩组成,颗粒相对较小,粒径在2~5 mm,少量颗粒大于2 cm(图9a中①)。暗色泥砾呈扁平状或不规则状,也可见滚圆状,可见塑性变形和内部原始的水平层理,长轴方向通常具有顺层排列特征(图9a中②)。暗色泥砾主要分布于复合粒序层理中部及正粒序底部。第二类为灰白色(含)碳酸盐岩砾石,由浅灰-灰白色钙质砂岩、砂屑灰岩、灰岩及白云岩构成,粒径在2~25 mm,颗粒分选差但磨圆相对较好,呈次棱角状-次圆状(图9a中④)。灰白色砾石多分布于复合粒序的中部及逆粒序顶部。此外,部分灰岩颗粒在后期成岩过程中被溶蚀形成铸模孔隙,孔隙内侧缘及裂隙中常形成灰白色方解石沉淀(图9a中③,④)。

风暴滩坝钻/测井解释厚度为1.50~6.00 m,累积

厚度小于15.00 m,录井剖面显示灰-深灰色砂岩、钙质砂岩与灰色(泥)灰岩、白云质灰岩垂向间互叠置,夹薄层深灰色泥岩。测井曲线在风暴滩坝段常出现基值跳跃现象,其中SP曲线呈下部“漏斗形”上部“钟形”复合特征,部分呈“舌形”特征,GR曲线呈低幅“微齿形”,高电阻率及高声波时差特征(图9b)。风暴滩坝的规模决定了地震反射特征,通常风暴滩坝与其他滩坝地震反射结构类似,呈低频、连续复合地震反射特征,局部可见强复合反射中出现不连续、弱振幅反射特征,过X8井地震剖面呈现出蠕虫状反射结构,内部呈中-强波谷反射(图9c)。依据钻井岩-电特征与地震标定结果,风暴滩坝地层切片多显示为弱反射背景下的连片中振幅(黄色)反射,风暴滩坝主体或风暴滩坝集中发育位置呈现出中等反射强度背景下的斑状分布的强振幅(红色)反射特征(图4)。

风暴滩坝沉积是由原始碎屑岩滩坝、碳酸盐岩滩

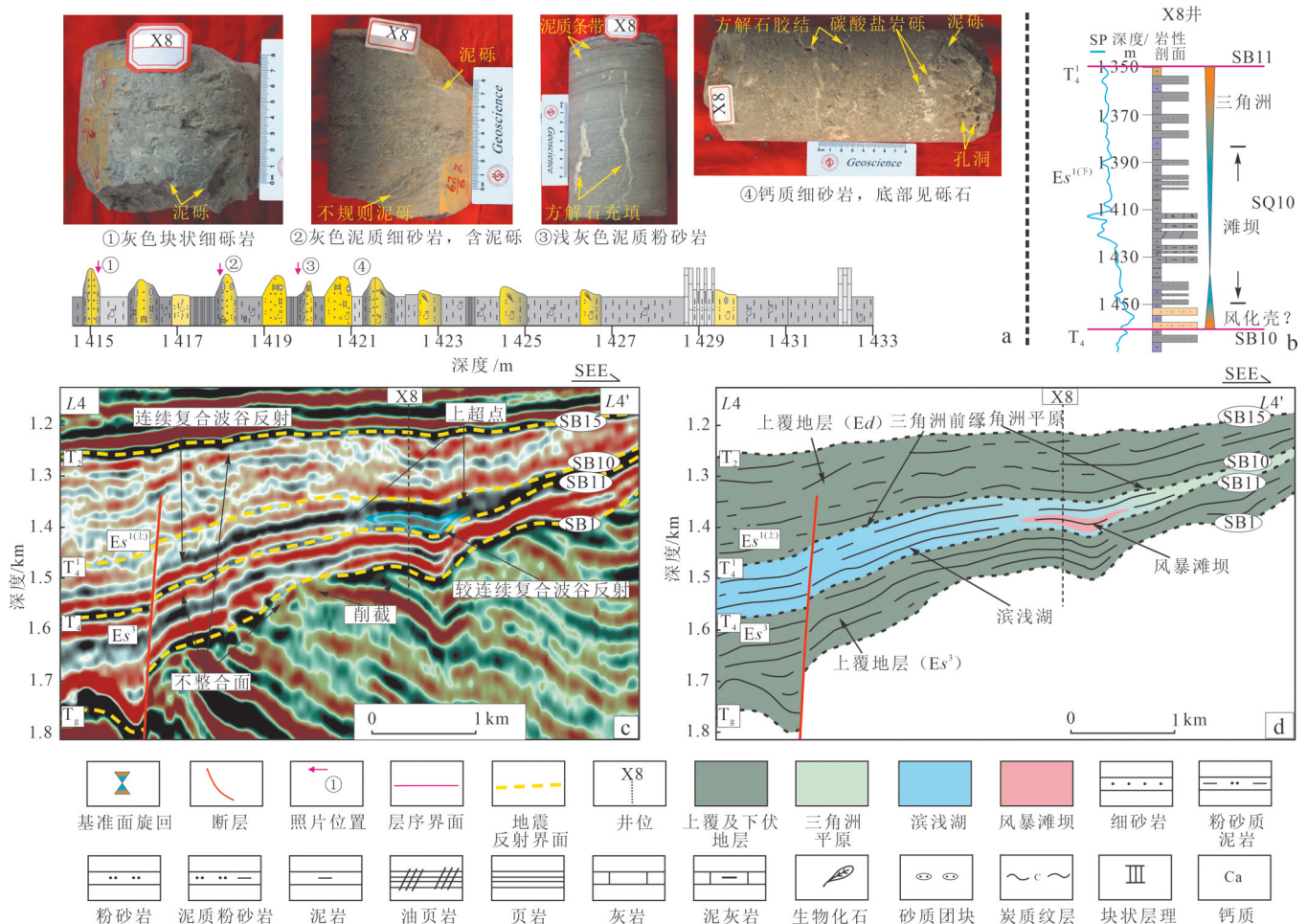


图9 霸县凹陷沙一段风暴滩坝岩心相及钻井岩-电特征

Fig. 9 Core facies, lithology and electrical properties of the beach-bar of tempestite type in the Es¹, Baxian Sag

a. 风暴滩坝岩心描述及典型照片; b. X8井钻井岩-电组合及沉积-层序解释; c. 过X8井地震反射剖面及地震相特征;

d. 过X8井地震反射剖面地质解释

坝及正常浅湖沉积在湖浪及风暴作用下被改造后,就近或短距离搬运再堆积的产物。该类型滩坝主要分布于文安斜坡南部,古地貌显示沙一下沉积期为局部水下低隆区或呈间歇性暴露(图3)。其中,X8井钻遇沙一下亚段风暴滩坝,钻井显示风暴滩坝主要发育在早期高位体系域(图9b),地震剖面显示风暴滩坝分布于凸起高部位及侧缘,整体呈现出披覆背斜样式,具顶部薄、两翼厚的特征(图9c)。部分钻井显示出岩性组合存在差异:低凸起体顶端岩性常以薄层生物碎屑灰岩和鲕粒灰岩为主;低凸起侧翼部由钙质砂岩和砂屑灰岩等相对较细的颗粒以及灰岩、泥质灰岩组成,局部可见钙质页岩及油页岩夹层;低凸起另一侧以砂砾岩、含砾砂岩和鲕粒灰岩等强水动力作用下的粗颗粒及粗碎屑组成(图9b)。造成低凸起顶端及两侧翼沉积物存在较大差异的原因可能与间歇性的风暴作用有关^[1-2]。据此,建立了断陷湖盆风暴滩坝沉积模式及坝主体、迎浪(风)侧缘、背浪(风)侧缘、盆底扇等4种具体的沉积类型(图8c中⑤—⑧)。早期滩坝及浅湖沉积被风暴浪搅动、破碎,大部分粗碎屑分布于水下低凸起背水坡,部分叠置于早期滩坝之上形成复合粒序(图8中⑦)。少量粗碎屑因回流被携带至迎水坡或形成底流被携带至深水洼槽等位置(图8中⑤),形成小型重力流水下扇沉积(图8中⑧),而水下低隆顶部在频繁的强水动力背景下,发育生物碎屑灰岩及鲕粒灰岩(图8中⑥)。在风暴浪间隙,湖盆内部多为正常浅湖(钙质)泥岩和油页岩沉积。

3.4 混积滩坝

混积滩坝岩性以浅灰色(钙质)细砂岩、粉砂岩、砂屑灰岩、(含)鲕粒灰岩、泥灰岩和白云质灰岩组成,厚度在0.30~3.50 m(图10;表1)。根据岩性组合及垂向叠置特征将混积滩坝划分为两种组合类型。第一类为灰白色砂屑灰岩、(含鲕粒)钙质粉-细砂岩为主,其次为含鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩,可见块状层理、平行层理、粒序层理、波状交错层理以及方解石纹层等,厚度在0.50~3.50 m(图10中W32井)。此类型滩坝顶/底通常与泥岩、钙质泥岩、灰泥呈突变接触,界面清晰但不平整,常见虫孔、冲刷面和变形构造(图10中①—⑤)。岩心观察可见明显的垂向水体变浅、水动力增强等特征,如小层内部可见钙质泥岩向泥灰岩过渡(图10中②),泥质、粉砂质灰岩向粉砂质、砂质灰岩过渡(图10中③),部分砂质灰岩顶部可见细砾石(图10中⑤)。第二类岩性以灰岩和砂屑灰岩为主,并与细砂岩、粉砂岩、泥岩、灰泥岩呈渐变过渡,垂向上呈逆粒

序,部分可见正粒序组合(图10中WG2井)。发育块状层理、平行层理、楔状层理和变形层理,可见生物钻孔及泥岩条带(图10中⑥—⑩)。单层滩坝厚度在0.05~0.30 m,复合体厚度在0.30~3.00 m。此类型沉积常见下部为钙质泥岩条带与钙质粉砂岩、细砂岩互层,上部为钙质细砂岩组合(图10中⑦,⑧),其次为下部钙质泥岩纹层与钙质细砂岩、粉砂岩互层,上部为砂屑灰岩、钙质细砂岩组合(图10中⑩),少见钙质细砂岩与泥岩互层,上部为钙质泥岩组合(图10中⑥)。

混积滩坝多识别于岩心观察中,钻井岩-电剖面与其余类型滩坝特征相近。通过岩心与测井综合识别,混积滩坝厚度较薄(1.00~4.00 m),多出现于厚层泥岩和泥灰岩中间,或碎屑岩、碳酸盐岩滩坝的顶/底部,垂向上呈现出滩坝沉积与浅湖泥岩之间的过渡沉积。混积滩坝SP曲线具有泥岩基线之上的低幅“齿状”或呈变形“漏斗形”特征,GR曲线呈低幅“齿化”,高电阻率特征(图2a,图10)。混积滩坝地震剖面与其他类型滩坝相近,滩坝沉积与泥岩组成低频、连续复合反射特征。依据钻井岩-电特征与地震标定结果显示,混积滩坝等时地层切片显示为弱振幅反射背景下的中-弱振幅(黄色—绿色)反射,或连续中-强振幅(黄色—红色)反射上部的中-弱(黄色—绿色)反射(图4)。

前人按照沉积物类型和空间组合样式,可将混积滩坝进一步分为成分混积滩坝和层系混积滩坝两种成因类型^[1,9-14,46](图11)。混积滩坝广泛分布于霸县凹陷文安斜坡带之上,平坦的古构造背景下的快速湖侵作用与物源的迟滞性响应造成了沙一段滩坝差异混积现象,混积岩时序上主要分布于湖侵体系域沉积中、晚期—高位体系域沉积中期(图10)。

成分混积型滩坝形成于湖侵体系域沉积中期,随着陆源沉积物供给减弱,湖盆内部碳酸盐沉淀趋势明显,湖浪将三角洲前缘陆源碎屑物再次搬运,并与碳酸盐共同混合再堆积,而高位体系域沉积中期则与此相反(图11a,b,d)。整体处于欠补偿背景下的成分混积滩坝,陆源碎屑含量或岩性组合与分布位置有关,与三角洲间的距离呈反比,深处湖盆内部的水下低隆部位,陆源碎屑难以触及。该时期古湖盆整体呈现水体缓慢变浅的趋势,发育下部以鲕粒灰岩和泥灰岩沉积为主、上部为以含鲕粒砂岩、砂屑灰岩及钙质细砂岩为主的成分混积型滩坝(图11a,d)。依据滩坝发育位置和陆源碎屑影响程度,可进一步细分为远岸滩坝、孤立滩坝及近(沿)岸滩坝3种成分混积类型(图11a中①—③)。

层系混积型滩坝,即为碳酸盐岩和碎屑岩滩坝的

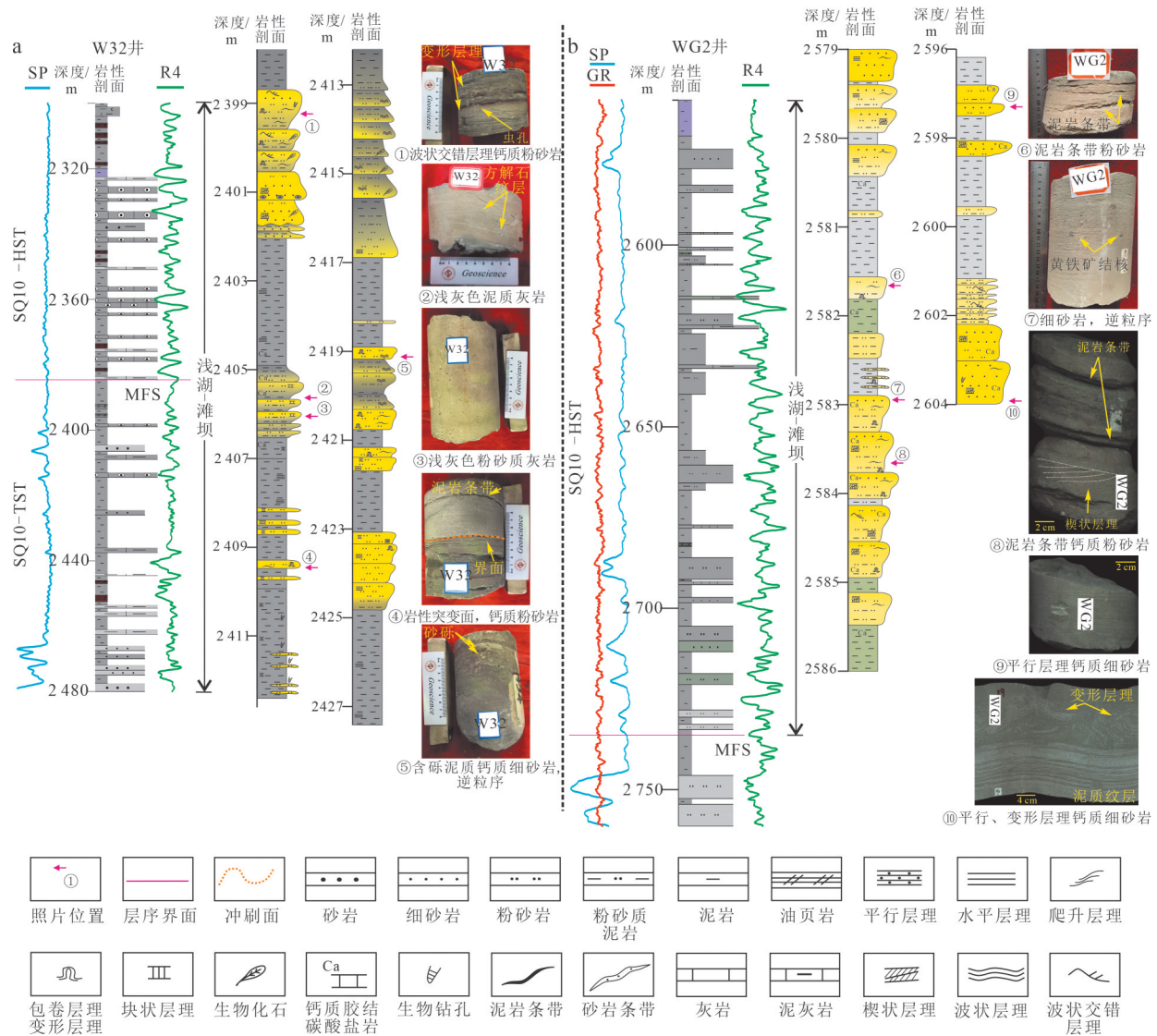


图10 霸县凹陷沙一段混积滩坝岩心相及钻井岩-电特征

Fig. 10 Core facies, lithology and electrical properties of the beach-bar of mixed carbonate-siliciclastic rock type in the Es¹, Baxian Sag
a. W32井; b. WG2井

频繁互层沉积,常见于湖侵体系域沉积早期和高位体系域沉积中期稍晚阶段,碎屑岩滩坝—碳酸盐岩滩坝—湖相泥岩垂向互层叠置(图11c,e)。其中,碳酸盐岩主要岩性为生物碎屑灰岩、泥晶灰岩、白云质灰岩,碎屑岩及湖相泥岩中富含钙质,这是次一级层序旋回过程中陆源碎屑与内源性碳酸盐岩相互补偿沉积的结果(图11c,e)。研究区整体呈现出湖平面缓慢上升和快速下降的趋势,下部以钙质砂岩、粉砂岩与灰岩、鲕粒灰岩互层沉积,上部多为鲕粒灰岩和砂屑灰岩沉积。依据滩坝发育位置和碳酸盐岩含量,可进一步细分为远岸滩坝、孤立滩坝及近(沿)岸滩坝3种层系混积类型(图11d中①—③)。此外,混积滩坝与其他类型滩坝垂向叠置具有明显的规律性,湖侵体系域沉积时期

混积滩坝叠置于碎屑岩滩坝之上,其上部多为最大湖泛时期泥岩及碳酸盐岩滩坝。而高位体系域沉积时期混积滩坝叠置于碳酸盐岩滩坝之上,其上部往往发育碎屑岩滩坝沉积。

4 滩坝分布与油气富集规律

4.1 滩坝空间分布

基于前文中古地貌以及对不同岩性体识别和平面分布特征的厘定,结合各类滩坝的成因特征,对文安斜坡南段两张典型地层切片进行沉积学解释(图4),从而详细刻画断陷湖盆滩坝沉积的时空分布及演化特征(图12)。

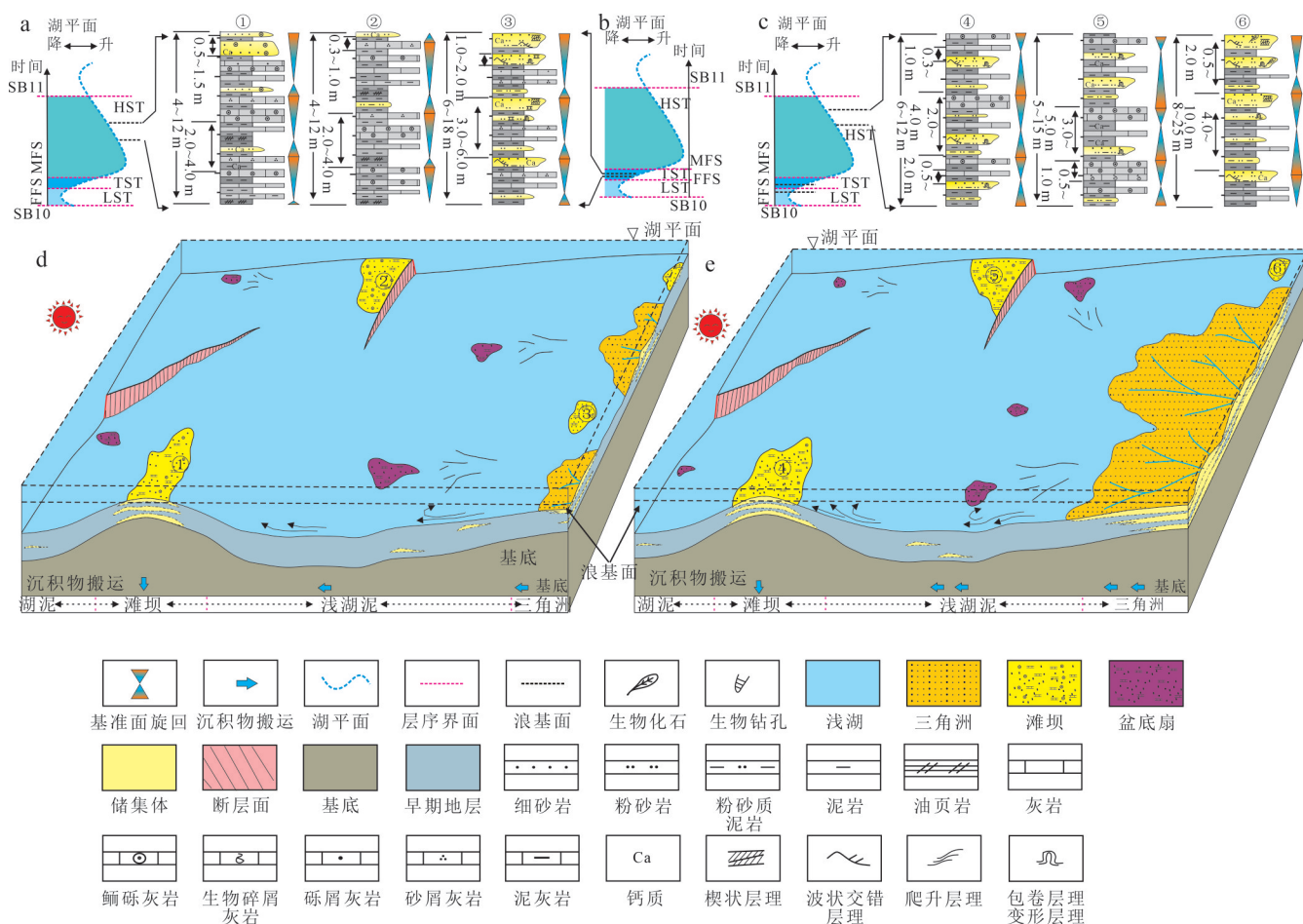


图11 霸县凹陷沙一段混积滩坝沉积模式及岩心相标志

Fig. 11 Depositional model and core facies markers of the beach-bar of mixed carbonate-siliciclastic rock type in the Es¹, Baxian Sag
a. 高位域中-晚期及对应成分混积滩坝岩性组合序列; b. 湖侵域早期及对应成分混积滩坝岩性组合序列; c. 高位域晚期及对应结构混积滩坝岩性组合序列; d. 成分混积滩坝模式及岩性序列空间分布; e. 结构混积滩坝模式及岩性序列空间分布
LST. 低位体系域; TST. 湖侵体系域; HST. 高位体系域; FFS. 初始湖泛面; MFS. 最大湖泛面

No. 25 切片对应沙一下亚段湖侵体系域沉积中期的地层切片(图4a)。通过岩心分析及钻井标定结果,湖侵体系域沉积中期主要发育碎屑岩滩坝、混积滩坝、三角洲及浅湖沉积4种类型(图12a)。湖侵体系域沉积时期文安斜坡南段发育的小型三角洲以三角洲前缘沉积为主,并逐渐收敛于长丰镇物源口附近,切片显示区域性连片分布高振幅特征。碎屑岩滩坝及碳酸盐岩滩坝以中-强振幅为主,具有以下4个特征:①文安斜坡中-外带靠近地层超覆线附近的滩坝,其长轴方向与湖岸线近平行;②少量滩坝分布于三角洲前缘前端,古地貌显示为局部水下低隆起;③文安斜坡中带活动正断层及弱活动正断层下盘形成的断鼻位置,特别是两条相向分布断层组成的马鞍状两翼是扇状滩坝的主要发育区;④文安斜坡带零星分布的、与断层无关的点状滩坝多是水下低凸起位置。因此,古地貌特征、湖浪及三角洲调节了滩坝的空间分布。此外,马西断层及

任西断层下降盘出现的以砂质为主的中-强振幅反射,可能为与风暴作用相关的盆底扇沉积。其他位置为泥质弱振幅反射,多为正常浅湖泥质沉积。

No. 35 切片对应沙一下亚段高位体系域沉积中期地层切片(图4b)。此时,霸县凹陷湖盆面积达到最大,湖水最深,湖平面达到最高后并逐渐开始下降,碳酸盐产率也相应达到最强。广泛发育碳酸盐岩滩坝及混积滩坝沉积,三角洲强振幅反射成裙带状分布于地层超覆线附近,文安斜坡其余区域呈泥质弱振幅反射特征,以浅湖泥质沉积为主(图12a)。碳酸盐岩滩坝及混积滩坝沉积具有一定的继承性,主要表现在马西断层北部消亡端形成的水下隆起区碎屑岩滩坝及混积滩坝之上发育的大规模碳酸盐岩滩坝及混积滩坝沉积,切片显示中-强振幅连片分布。此外,断鼻及水下低隆起等碎屑岩滩坝发育位置,高位体系域沉积中期切片仍然显示砂质中等振幅反射,认为上述位置是碳

酸盐岩滩坝和混积滩坝的发育区。霸县凹陷沙一下亚段处于高湖平面时期相对较短,碳酸盐岩滩坝的规模和分布范围较小,因此整体的切片振幅强度相对于湖侵体系域沉积时期偏低。对于斜坡南段W18井区及零星分布的中-强振幅反射,多是与风暴和湖浪作用相关的风暴滩坝和重力流盆底扇沉积。

4.2 油气富集规律

断陷湖盆的充填过程决定了烃源岩、储层和盖层的空间分布,强烈断陷伸展阶段常发育良好的烃源岩^[23,47-55]。霸县凹陷西部霸县洼槽和郑州洼槽发育了古近系沙四段、沙三段和沙一段3套生油层系^[36,56-58]。根据霸县凹陷岩石热解样品统计,沙一段主要为Ⅱ型干酪根,含少量Ⅰ型干酪根,总有机碳(TOC)含量为

0.2%~3.0%,其中 $TOC \geq 0.4\%$ 的样品占总样品的40%以上。钻井及测井解释成果显示沙一段以TOC含量在0.5%~1.0%的暗色泥岩分布最广,厚度超过200 m,最大厚度可达240 m(牛东断层下降盘)。TOC含量大于2.0%的烃源岩厚度为0~40 m,在高家堡、郑州、文安斜坡南段及马西洼槽等地区其厚度超过30 m。沙一段滩坝的储层物性较好,平均孔隙度为12.8%,平均渗透率为 $16.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,依据冀中坳陷储层评价标准,多为中-高孔、中-低渗储层。

霸县凹陷沙一段底埋深为1 500~6 000 m,除文安斜坡外带,霸县凹陷沙一段埋深均超过生烃门限(2 800 m),烃源岩处于大规模生、排烃期。因此,霸县凹陷沙一段不仅是优质的烃源岩层系,而且是优质的区域盖层和良好的储集体,具有优越的油气聚集及成

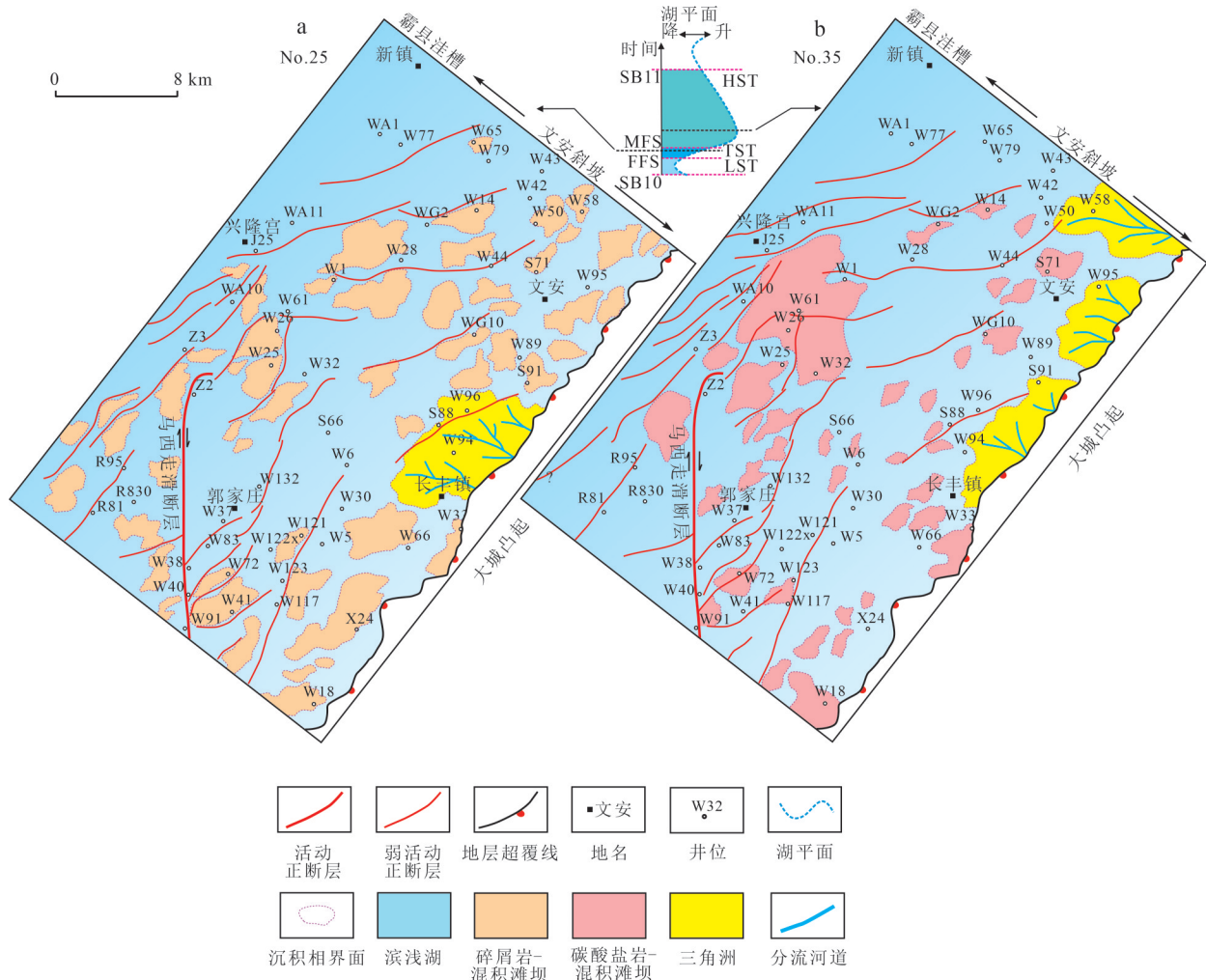


图12 霸县凹陷文安斜坡中南段沙一段典型地层切片沉积相解释

Fig. 12 Sedimentary facies interpretation on typical stratigraphic slices of the Es¹ in the south-to-middle section of Wen'an slope, Baxian Sag

a. 碎屑岩滩坝及混积滩坝切片; b. 碳酸盐岩滩坝及混积滩坝切片

No. 35. 切片编号; HST. 高位体系域; TST. 湖侵体系域; LST. 低位体系域; SB. 层序界面; MFS. 最大湖泛面; FFS. 初始湖泛面

藏条件,而滩坝沉积多形成自生自储的透镜体岩性油气藏。在文安斜坡W103井—W14井区沙一下亚段的碳酸盐岩滩坝-混积滩坝中,获得日产13.5 t的工业油流,滩坝厚度为6.2 m,面积为3.6 km²。此外,沙一段广泛分布的泥岩作为区域性盖层,限制了深部油气的垂向运移,使部分沿油源断层运移的油气直接进入滩坝成藏,形成沙一段与沙三段混源的构造-岩性油气藏。文安斜坡S98X井—WA24X井区碎屑岩滩坝获得了日产8.52 t的工业油流,滩坝厚度为1.6 m,面积为1.6 km²。霸县凹陷沙一段滩坝沉积易形成小而肥、数量多的规模目标,具有潜在的勘探前景。其中,文安斜坡外带多以湖侵体系域碎屑岩滩坝组成的构造-岩性油气藏为主,斜坡内带则以湖侵体系域和高位体系域混积滩坝组成的岩性透镜体油藏为主,而马西走滑断层北部消亡端高位体系域沉积时期发育的大规模碳酸盐岩滩坝和混积滩坝使得构造-岩性复合油藏发育区极具勘探价值。

5 讨论与结论

陆相断陷湖盆广泛发育(混积)滩坝沉积,其中构造、古地貌、水动力条件、古水深和物源等多重因素控制了滩坝的形成和分布^[1-2,10-13,19,59-61]。霸县凹陷沙一段大规模(混积)滩坝形成于第三幕裂陷初期,平坦的底型、强烈的构造沉降和快速湖侵作用造成古湖盆浅水、欠补偿,是(混积)滩坝沉积形成的主因。盆地强烈的构造沉降加剧了与周缘物源区地形的高差,也加剧了物源区的剥蚀作用,此时沉积物供给强烈,粗碎屑量增多。霸县凹陷沉积并不具有即时性,与此相反,沉积盆地内部的物质记录往往具有明显的滞后性。强烈的构造演化加剧了物源区溶解物质的析出并随径流被带入盆地,湖盆清澈、富营养化、生物繁盛,有利于沉积有机质的形成。差异化的沉积信号响应^[15,62],可能是造成断陷湖盆强烈断陷期形成规模性烃源岩堆积的主控因素。因此,对滩坝沉积的精细解剖有助于恢复湖盆沉积期的古地理背景,分析沉积信号对构造演化的迟滞响应特征,可以更加深入地明确断陷盆地构造-层序-沉积充填演化过程及其产物。此外,地震沉积学能有效地刻画薄层砂体,尤其是地震资料品质高、沉积底形平坦、砂-泥岩频繁互层的岩性组合砂体。而定量地震地貌学分析能通过三维地震资料平面成像定量分析沉积地貌,有助于精细刻画薄层砂体并提升勘探成效。

通过对陆相断陷湖盆滩坝成因类型分析,得到以

下结论:

1) 霸县凹陷沙一段滩坝岩性以(钙质)细砂岩、粉砂岩、生物灰岩、白云岩及泥质灰岩为主。依据岩性组合将滩坝划分为碎屑岩滩坝、碳酸盐岩滩坝、混积滩坝及风暴滩坝4种类型。

2) 碎屑岩滩坝是三角洲前缘砂体改造、再堆积的结果;碳酸盐岩滩坝为低物源供给背景下湖盆内碳酸盐原生沉淀的产物;混积滩坝是陆源碎屑与内源碳酸盐混积的产物;风暴滩坝的形成与湖浪对早期滩坝的破坏作用有关。

3) 地震沉积学能有效刻画薄层滩坝沉积。霸县凹陷沙一段滩坝空间分布具有继承性。其中,断层翘倾盘及局部古地形凸起是滩坝的重要发育部位,而凹陷内部走滑断层末端形成的局部挤压隆起是大规模滩坝发育区,也是规模油气勘探的潜力目标区。

4) 陆相断陷湖盆大规模滩坝形成于各幕裂陷初期,滩坝是沉积盆地形成演化过程及早期古地理格局的物质表现。对滩坝沉积的详细解剖有助于盆地沉积期的古地理恢复,明确断陷湖盆构造-层序充填过程及特征。

致谢:本文原始资料来源于中国石油华北油田勘探开发研究院,对中国石油华北油田相关专家在本次研究中的大力支持和指导深表感谢!同时感谢中国地质大学(北京)李顺利副教授、陈贺贺副教授在本文的研究过程中的建设性意见。感谢审稿专家的宝贵意见和帮助。

参 考 文 献

- [1] Jiang Z X, Liu H, Zhang S W, et al. Sedimentary characteristics of large-scale lacustrine beach-bars and their formation in the Eocene Boxing Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Sedimentology, 2011, 58: 1087-1112.
- [2] 姜在兴, 王俊辉, 张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 427-440.
Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 427-440.
- [3] Flores R M. Pictured Cliffs Sandstone Upper Cretaceous distributary-channel, delta-front and beach-bar deposits, southwestern San Juan Basin, New Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(3): 451-452.
- [4] 朱筱敏, 信荃麟, 张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 20-27.
Zhu Xiaomin, Xin Quanlin, Zhang Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down Lacustrine Basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 20-27.
- [5] Taylor A W, Ritts B D. Mesoscale heterogeneity of fluvial-lacus-

- trine reservoir analogus: Examples from the Eocene Green River and Colton Formations, Uinta Basin, Utah, USA [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2004, 27(1): 3–25.
- [6] Houser C, Greenwood B. Hydrodynamics and sediment transport within the inner surf zone of a lacustrine multiple-barred nearshore [J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1–4): 37–63.
- [7] Schwartz R K. Bedform, texture and longshore bar development in response to combined storm wave and current dynamics in a near-shore helical flow system [J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(6): 1512–1535.
- [8] Jiang Z X, Liang S Y, Zhang Y F, et al. Sedimentary hydrodynamic study of sand bodies in the upper subsection of the 4th Member of the Paleogene Shahejie Formation in the eastern Dongying Depression [J]. *Petroleum Science*, 2014, 17(1): 189–199.
- [9] 王越, 陈世悦, 张关龙, 等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征——以准噶尔盆地南缘芦苇沟组与吐哈盆地西北缘塔朗组为例 [J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 1021–1035.
- Wang Yue, Chen Shiyue, Zhang Guanlong, et al. Classifications of mixed sedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin: Taking example as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taierlang Formation in the northwest of Tuha Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 1021–1035.
- [10] 杜一帆, 朱筱敏, 叶蕾, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡沙一下亚段混积滩坝沉积特征与发育模式 [J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3759–3778.
- Du Yifan, Zhu Xiaomin, Ye Lei, et al. Features and model of mixed sediments in Lower Submember of First Member of Shahejie Formation in Lixian Slope, Raoyang Sag [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3759–3778.
- [11] 徐伟, 杜晓峰, 黄晓波, 等. 混合沉积研究进展与关键问题 [J]. *沉积学报*, 2019, 37(2): 225–238.
- Xu Wei, Du Xiaofeng, Huang Xiaobo, et al. Research advances and critical issues of mixed siliciclastic and carbonate sediments [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(2): 225–238.
- [12] Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 617–627.
- [13] 姜在兴, 王俊辉, 张元福, 等. “风-源-盆”三元耦合油气储集体预测方法及其应用——对非主力物源区储集体的解释与预测 [J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1465–1476.
- Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu, et al. Ternary “Windfield-Source-Basin” system for the prediction of hydrocarbon reservoirs: Interpretation and prediction of hydrocarbon reservoirs deviated from the main provenance areas [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1465–1476.
- [14] 张自力, 朱筱敏, 李琦, 等. 断陷湖盆差异湖侵过程与层序格架下沉积体系特征响应: 以霸县凹陷古近系沙河街组为例 [J]. *古地理学报*, 2020, 22(3): 440–456.
- Zhang Zili, Zhu Xiaomin, Li Qi, et al. Differential transgression of rift basin and characteristic response of sedimentary system within sequence framework: An example from the Paleogene Shahejie Formation in Baxian Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(3): 440–456.
- [15] Chen H H, Zhu X M, Wood L J, et al. Evolution of drainage, sediment-flux and fluvio-deltaic sedimentary systems response in hanging wall depocentres in evolving nonmarine rift basin: Paleogene of Raoyang Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Basin Research*, 2019, 31(1): 1–30.
- [16] 周立宏, 韩国猛, 马建英, 等. 歧口凹陷西南缘沙河街组一段下亚段古环境特征与沉积模式 [J]. *石油学报*, 2021, 41(8): 903–917.
- Zhou Lihong, Han Guomeng, Ma Jianying, et al. Palaeoenvironment characteristics and sedimentary model of the lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in the southwestern margin of Qikou sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 41(8): 903–917.
- [17] Shang X F, Hou J G, Dong Y. Genesis of reservoir heterogeneity and its impacts on petroleum exploitation in beach-bar sandstone reservoirs: A case study from the Bohai Bay Basin, China [J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(1): 35–48.
- [18] 赵俊青, 夏斌, 纪友亮, 等. 湖相碳酸盐岩高精度层序地层学探析 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 646–656.
- Zhao Junqing, Xia Bin, Ji Youliang, et al. Analysis of the high resolution sequence of lacustrine carbonate [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 646–656.
- [19] 宋国奇, 王延章, 石小虎, 等. 东营沙四段古盐度对碳酸盐岩沉积的控制作用 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(2): 8–14.
- Song Guoqi, Wang Yanzhang, Shi Xiaohu, et al. Palaeosalinity and its controlling on the development of beach and bar in lake facies [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2013, 35(2): 8–14.
- [20] 刘惠民, 杨怀宇, 张鹏飞, 等. 古湖泊水介质条件对混积岩相组合沉积的控制作用——以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 297–306.
- Liu Huiming, Yang Huaiyu, Zhang Pengfei, et al. Control effect of paleolacustrine water conditions on mixed lithofacies assemblages: A case study of the Palaeogene Es³, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 297–306.
- [21] Abdullah M A, Mohammed Y K, Abubakar M. Quartz dissolution in a single phase-high pH Berea sandstone via alkaline injection [J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(3): 181–188.
- [22] 陈波, 张顺存, 孙国强, 等. 准噶尔盆地车拐斜坡区储层碳酸盐胶结物碳氧同位素特征及其成因 [J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(4): 101–106.
- Chen Bo, Zhang Shuncun, Sun Guoqiang, et al. Characteristics and formation mechanism of carbonate cementation in Che-Guai slope area, Junggar Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(4): 101–106.
- [23] Ravnas R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(2): 110–146.
- [24] Strecker U, Stridtmann J R, Mithson A. Conceptual tectonostratigraphic model for seismic facies migration in a fluvio-lacustrine extensional basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(1): 43–61.
- [25] Catuneanu O, Abereu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth Sciences Reviews*, 2009, 92: 1–33.
- [26] Catuneanu O, Abereu V, Bhattacharya J P, et al. Model-independent sequence stratigraphy [J]. *Earth Science Reviews*, 2019, 188: 312–388.

- [27] Martins-neto M A, Catuneanu O. Rift sequence stratigraphy[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 247-253.
- [28] 王金友, 张立强, 张世奇, 等. 济阳拗陷沾化凹陷沙二段湖相混积岩沉积特征及成因分析——以罗家-邵家地区为例[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1085-1096.
- Wang Jinyou, Zhang Liqiang, Zhang Shiqi, et al. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine mixed rocks of the Second Member of the Eocene Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression: Taking Luoia—Shaojia Area for an Example [J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1085-1096.
- [29] 朱筱敏, 李洋, 董艳蕾, 等. 地震沉积学研究方法和歧口凹陷沙河街组沙一段实例分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 152-162.
- Zhu Xiaomin, Li Yang, Dong Yanlei, et al. The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou Depression of North China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 152-162.
- [30] Muhammad U, Numair A S, Eduardo G, et al. 3-D seismic interpretation of stratigraphic and structural features in the Upper Jurassic to Lower Cretaceous sequence of the Gullfaks Field, Norwegian North Sea: A case study of reservoir development[J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(4): 287-297.
- [31] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep -water settings[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [32] Wood L J, Kristine L. Quantitative seismic geomorphology of a Quaternary levee -channel system, offshore eastern Trinidad and Tobago, northeastern south America[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(1): 101-125.
- [33] Zhang Z L, Zhu X M, Li Q, et al. Depositional characteristics of fluvial facies in gentle slope zone of lacustrine rift basins: The third member of Dongying Formation in Wenan Slope of Baxian Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Interpretation*, 2019, 8(2): 37-55.
- [34] 张自力, 朱筱敏, 张锐锋, 等. 典型箕状断陷湖盆层序划分及层序结构样式——以霸县凹陷古近系为例[J]. *地球科学*, 2020, 45(11): 4218-4235.
- Zhang Zili, Zhu Xiaomin, Zhang Ruifeng, et al. Sequence framework and sequence filling style in lacustrine rift basin: Taking Paleogene in Baxian Sag as an example[J]. *Earth Science*, 2020, 45(11): 4218-4235.
- [35] 翟光明. 中国石油地质志[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 26-124.
- Zhai Guangming. *Petroleum geology of China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 26-124.
- [36] 张文朝, 崔周旗, 韩春元, 等. 冀中拗陷早第三纪湖盆演化与油气[J]. *古地理学报*, 2001, 3(1): 45-54.
- Zhang Wenchao, Cui Zhouqi, Han Chunyuan, et al. Evolution of Palaeogene lacustrine basins and oil and gas potentials in the central Hebei Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(1): 45-54.
- [37] 张文朝, 杨德相, 陈彦均, 等. 冀中凹陷古近系沉积构造特征与油气分布规律[J]. *地质学报*, 2008, 82(8): 1103-1112.
- Zhang Wenchao, Yang Dexiang, Chen Yanjun, et al. Sedimentary structural characteristics and hydrocarbon distributed rules of Jizhong Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1103-1112.
- [38] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1255-1264.
- Jiang Youlu, Su Shengmin, Liu Hua, et al. Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1255-1264.
- [39] 张自力, 朱筱敏, 李琦, 等. 霸县凹陷古近系层序格架下沉积充填响应过程分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 132-149.
- Zhang Zili, Zhu Xiaomin, Li Qi, et al. Response process of sedimentary filling under sequence framework of Paleogene in Baxian Sag [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 132-149.
- [40] Zhang Z L, Zhu X M, Zhang R F, et al. To establish a sequence stratigraphy in lacustrine rift basin: A 3D seismic case study from Paleogene Baxian Sag in Bohai Bay Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, DOI:10. 1016/j. marpetgeo. 2020. 104505.
- [41] 纪友亮, 赵贤正, 单敬福, 等. 冀中拗陷古近系沉积层序特征及其沉积体系演化[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 48-56.
- Ji Youliang, Zhao Xianzheng, Shan Jingfu, et al. Depositional architecture of Paleogene system tectonic sequences and evolvement of sedimentary system in Jizhong Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 48-56.
- [42] 叶蕾, 朱筱敏, 张锐锋, 等. 冀中拗陷饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组一段浅水三角洲和滩坝的沉积环境[J]. *古地理学报*, 2020, 22(3): 587-600.
- Ye Lei, Zhu Xiaomin, Zhang Ruifeng, et al. Sedimentary environment of shallow-water delta and beach-bar of the Member 1 of Shahejie Formation in Lixian Slope of Raoyang Sag, Jizhong Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(3): 587-600.
- [43] 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 915-921.
- Zhu Xiaomin, Liu Changli, Zhang Yina, et al. On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 915-921.
- [44] 朱筱敏, 董艳蕾, 胡廷惠, 等. 精细层序地层格架与地震沉积学研究: 以泌阳凹陷核桃园组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 615-624.
- Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Hu Tinghui, et al. Seismic sedimentology study of fine sequence stratigraphic framework: A case study of the Hetaoyuan Formation in the Biyang Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 615-624.
- [45] Zeng H L, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing part II: real 3-D seismic data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 514-522.
- [46] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. *古地理学报*, 2001, 3(3): 63-66.
- Sha Qingan. Discussion on mixing deposit and Hunji Rock [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(3): 63-66.
- [47] Lin C S, Eriksson K. A, Li S T. Sequence architecture, depositional systems, and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlan Basin, northeast China[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(11), 2017-2043.
- [48] Ge J W, Zhu X M, Zhang X T, et al. Tectono-stratigraphic evolution and hydrocarbon exploration in the Eocene Southern Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Aus-*

- tralian Journal of Earth Science, 2017, 64: 931–956.
- [49] 张莹, 孙立东, 印长海, 等. 双城地区构造演化特征及其对油气聚集的控制作用[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(3): 1–6.
Zhang Ying, Sun Lidong, Yin Changhai, et al. Structural evolution characteristics of Shuangcheng area and its control effect on oil and gas accumulation[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(3): 1–6.
- [50] 孙显义, 许凤鸣, 王瑞. 松辽盆地敖古拉断裂带反转构造圈闭形成机制及控藏作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 10–16.
Sun Xianyi, Xu Fengming, Wang Rui. Forming mechanism of the inverted structural trap in Aogula fault zone of Songliao Basin and its reservoir controlling action[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 10–16.
- [51] 佟远萍. 松辽盆地北部齐家北地区扶余油层沉积特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 17–24.
Tong Yuanping. Sedimentary characteristics of Fuyu oil reservoirs and their controlling effects on the hydrocarbon accumulation in Qijiaobei area of North Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 17–24.
- [52] 李晓光, 刘兴周. 辽河断陷连续型油气聚集特征及聚集模式研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 1–8.
Li Xiaoguang, Liu Xingzhou. Continuous hydrocarbon accumulation properties and patterns in Liaohe Fault–Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 1–8.
- [53] Ning F, Yun J B, Zhang, Z P, et al. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of Central Uplift Belt in the Tarim Basin[J]. Energy Geoscience, 2022, 3(1): 63–72.
- [54] 李浩, 王保华, 陆建林, 等. 东濮凹陷古近系页岩油富集地质条件与勘探前景[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 33–41.
Li Hao, Wang Baohua, Lu Jianlin, et al. Geological characteristics and exploration prospects of Paleogene continental shale oil accumulation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(3): 33–41.
- [55] 陈维涛, 徐少华, 孙珍, 等. 层序地层学标准化理论在陆架坡折–陆坡区的应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1414–1422.
Chen Weitao, Xu Shaohua, Sun Zhen, et al. Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1414–1422.
- [56] 杨德相, 蒋有录, 赵志刚, 等. 冀中凹陷洼槽区地质特征及其与油气分布关系[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(5): 990–1001.
Yang Dexiang, Jiang Youlu, Zhao Zhigang. Geological characteristics of sub-sags and their relation with hydrocarbon distribution in Jizhong Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(5): 990–1001.
- [57] 赵力民, 赵贤正, 刘井旺, 等. 冀中拗陷古近系地层岩性油藏成藏特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 492–497.
Zhao Limin, Zhao Xianzheng, Liu, Jingwang, et al. Characteristics of Paleogene stratigraphic and lithologic reservoirs and its exploration direction in Jizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 492–497.
- [58] 汪少勇, 黄福喜, 宋涛, 等. 渤海湾盆地缓坡外带成藏特征与勘探潜力分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 9–16.
Wang Shaoyong, Huang Fuxi, Song Tao, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration potential of outer gentle slope zone in Bohai Bay Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 9–16.
- [59] 王延章, 宋国奇, 王新征, 等. 古地貌对不同类型滩坝沉积的控制作用: 以东营凹陷东部南坡地区为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 13–16.
Wang Yanzhang, Song Guoqi, Wang Xinzhen, et al. Controlling effect of paleogeomorphology on deposition of beach and bar sand reservoir—case study of south slope, east Dongying Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 13–16.
- [60] 刘洪洲, 程奇, 宋洪亮, 等. 曹妃甸 A 油田沙二段缓坡微古地貌对沉积砂体的控制作用[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(2): 1–4.
Liu Hongzhou, Cheng Qi, Song Hongliang, et al. Control effect of gentle slope micro paleogeomorphology on sedimentary sand body in the second member of Shahejie Formation in Caofeidian A oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(2): 1–4.
- [61] 王丽娟, 陈晓平. 高阳地区沙一下亚段滩坝砂体沉积特征及控制因素[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(3): 24–29.
Wang Lijuan, Chen Xiaoping, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach bar sand body in the lower part of the first member of Shahejie Formation of Gaoyang area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(3): 24–29.
- [62] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 古“源–汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1107–1118.
Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Zhang Zili, et al. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient “Source-to-Sink” systems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1107–1118.

(编辑 张玉银)