

惠民凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体沉积特征及形成条件

袁静¹, 梁绘媛¹, 谭明友², 陈晓杰³, 董道涛¹, 孙明江², 高若函¹

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化 胜利油田 物探研究院, 山东 东营 257000;

3. 中国石化 胜利油田 纯梁采油厂, 山东 东营 257000)

摘要:在精细岩心描述的基础上,通过综合分析岩石粒度特征、录井、测井、地震以及大量区域地质背景资料,对惠民凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征、展布规律和形成条件进行了系统研究。结果表明:研究区滩坝砂以粉-细砂岩和粉砂岩为主,泥质含量较高,物性较差。垂向上,4砂组—2砂组沉积时期滩坝砂体零星发育,1砂组发育大面积漫滩坝;平面上,滩坝砂体沿夏口断层呈带状分布。从湖平面条件来看,枯水面之下的稳定水深和较强波浪作用更利于坝砂发育;从构造条件来看,夏口断层形成的地形坡折一方面促进了滩坝砂体沿断层下降盘聚集,另一方面也限制了滩坝的横向展布宽度;从物源供给来看,洪水漫湖条件下基岩和先成沉积物的线状供源比末端扇在洪泛期砂体入湖更利于滩坝大面积发育。

关键词:滩坝;砂体沉积特征;沙四上亚段;惠民凹陷南斜坡

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and forming conditions of beach-bar sandbodies in the upper fourth member of the Shahejie Formation in the south slope of the Huimin Sag

Yuan Jing¹, Liang Huiyuan¹, Tan Mingyou², Chen Xiaojie³, Dong Daotao¹, Sun Mingjiang², Gao Ruohan¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Geophysical Prospecting Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Chunliang Oil Producer, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: Sedimentary characteristics, distribution patterns and forming conditions of beach-bar sandbodies in the upper fourth member of the Eocene Shahejie Formation on the south slope of the Huimin sag have been systematically analyzed in this paper based on detailed core description and analyses of grain sizes, well log, seismic and the regional geological background data. The result indicates that the beach-bar sandstones are dominated by siltstones and fine-grained silty sandstones of high mud content, thus have unfavorable physical properties. Vertically, the beach-bar sandbodies are common in the first sand group but sporadic in the second, the third and the fourth sand groups. Laterally, beach-bars in the studying area distribute along the Xiakou fault. Stable water depth and stronger waves were beneficial to the formation of beach-bar sandbodies. The slope break caused by the Xiakou fault was helpful for beach-bar sandbodies to be formed along the thrown side of the fault but also restricted the horizontal spreading of the beach-bar. Sediments from the basement and earlier deposited layers in flood-overflow lake provided better sediment source for the beach-bar to develop than that from the terminal fan during flood period.

Key words: beach-bar, sedimentary characteristics of sandbodies, upper Es⁴ Formation, south slope of the Huimin Sag

近年来,随着油气勘探程度的不断提高,单层厚度薄、横向变化大、隐蔽性强的湖相滩坝砂体的勘探取得了突破,尤其在济阳坳陷已成为重要的储集砂体类型。前人对东营凹陷^[1-3]、沾化凹陷^[4]、车镇凹陷^[5-6]和惠民凹陷中央隆起带^[7-8]滩坝砂体的沉积特征、展布规律和影响因素等已做过较为详细的工作,而

对惠民凹陷南部缓坡带(以下简称惠民南坡)沙四段(沙河街组四段)滩坝砂体的研究相对薄弱。

本文在精细岩心描述的基础上,结合粒度分析、测井曲线和地震反射特征,并综合考虑构造发育背景、物源特征和搬运介质性质等因素,对惠民南坡沙四段上亚段滩坝砂体进行系统研究。

1 沉积背景

惠民南坡是惠民凹陷南斜坡和夏口断裂带的总称,是由控凹的齐广断层和夏口断层共同控制的大型单斜式缓坡带,长轴呈北东向,勘探面积约2 400 km²(图1)。研究区在单斜背景上被一系列近北东向和北北东向断层切割,形成了东西向“梁沟相间”、南北向“断阶分带”的基本构造格局^[9]。钻井揭示该区地层发育较为齐全,仅东营末期由于块断差异运动,曲堤地垒带整体南翘,古近系普遍遭受剥蚀,馆陶组上覆于沙四段—东营组之上。

根据区域构造、地层和沉积情况,将惠民凹陷南坡沙四段划分为上、下两个亚段,其中上亚段划分为4个砂层组。沙四段上亚段沉积时期正值惠民凹陷湖盆扩张时期,在夏口断层以南湖岸线之上发育末端扇相,以北地区发育滨浅湖滩坝砂体,其中1砂组沉积时期滨湖区受洪水影响,横向上较为宽阔,由陆向湖可划分出泥坪、混合坪和砂坪,为漫湖沉积。岩心物性分析表明,该区滩坝砂体孔隙度为5%~21%,平均为11.86%;渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 140 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $7.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;与大多数滩坝砂体的物性相比较差。

2 沉积特征

2.1 岩性特征

惠民南坡沙四段上亚段滨湖砂坝以浅灰色中—厚

层(3~7 m)粉砂岩、粉—细砂岩为主要岩石类型;砂滩以浅灰色薄层(单层厚度多小于2 m)粉细砂岩、粉砂岩与棕红色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩互层为特征。洪水—漫湖沉积时期,大面积展布的砂滩具有漫湖砂坪特征,与混合坪和泥坪共生。漫湖砂坪位于枯水面附近,是在高能环境中形成的灰色、褐色、紫红色薄层(滩砂,单层厚度小于2 m)—中厚层(坝砂,单层厚度大于2 m)砂岩夹紫红色、棕红色泥岩沉积,可见双壳类化石。浅湖砂坝沉积单层厚度一般在2~4 m,多为灰色、深灰色粉砂岩沉积;砂滩一般位于水下地势较为平坦处,单层多小于2 m,岩石类型多为粉砂岩和泥质粉砂岩,有时见植物碎屑。

2.2 结构特征

研究区沙四段上亚段岩石样品粒度分析结果表明,其岩石C值平均为0.26~0.35 mm,粒度中值平均为0.08~0.15 mm,反映以粉细砂岩为特征。标准偏差平均为1.03~1.82,分选系数平均为1.40~1.95,表明岩石分选中等。镜下观察岩石碎屑呈次棱角—棱角状,磨圆度中等,一般为颗粒支撑,有少量样品为杂基支撑。

上述样品的粒度概率图以“一跳一悬加过渡”式和多段式最为常见(图2),滚动总体不发育,跳跃总体斜率大,分选较好。前者主要由跳跃总体、悬浮总体(含量一般不超过40%)及两者之间的过渡段组成,反映能量中等,但动荡性较强的流体特征;后者跳跃总体

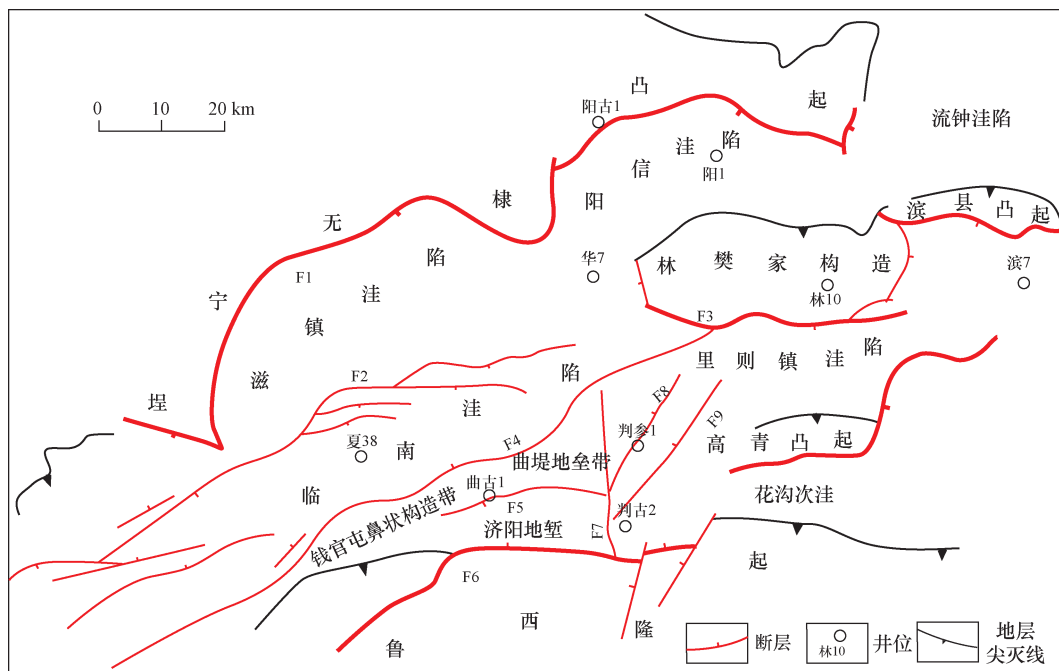


图1 惠民凹陷区域构造^[9]

Fig. 1 Structural location of the Huimin Sag^[9]

F1 陵县—阳信断层;F2 临商断层;F3 临南断层;F4 夏口断层;F5 曲堤断层;F6 齐河断层;F7 白桥断层;F8 仁风断层;F9 王判镇断层

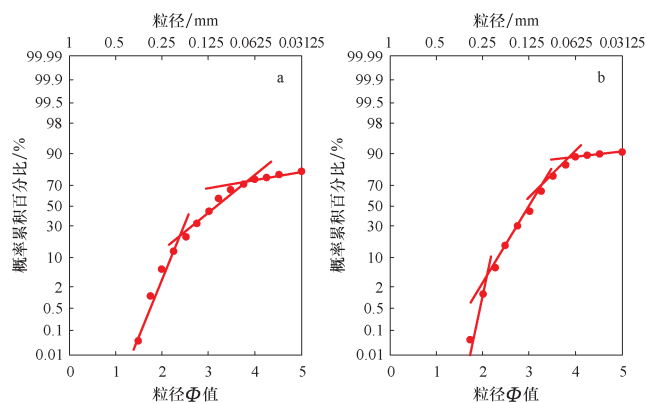


图2 惠民凹陷南坡沙四段上亚段粒度累积百分比

Fig. 2 Grain-size accumulative probability curves of beach-bar sandbodies in the upper fourth member of the Shahejie Formation on the south slope of the Huimin Sag

Formation on the south slope of the Huimin Sag

a. 夏510井,井深3 174.09 m; b. 夏斜96井,井深2 961.60 m

常由两个次总体组成,反映搬运沉积流体具有冲刷回流现象,是典型的滨浅湖区水动力特征。

2.3 沉积构造特征

惠民南坡沙四上亚段沉积时期,滨浅湖区水动力较强,波浪和湖流对沉积物进行冲刷改造,加之水体较浅,生物成因构造发育,常对原先形成的层理造成不同程度的破坏。总体上,研究区目的层段典型的沉积构造包括:浪成波痕(图3a)、平行层理(图3b)、浪成砂纹层理(图3c)、脉状层理(图3d)、波状复合层理(图3d)、楔状交错层

理、波状层理、透镜状层理和生物遗迹化石(图3e)及生物扰动构造(图3f)等。

3 滩坝展布规律

为全面分析研究区滩坝砂体的平面展布和垂向演化特征,从岩心相入手,细致分析了其测井和地震响应。结果表明:研究区沙四段上亚段砂坝沉积SP曲线一般表现为中、高幅箱形或漏斗形的反粒序特征;砂滩SP曲线一般为中幅的指状或尖刀状。在地震剖面上,滩坝砂体主要表现为短轴低频不连续中、强反射。在此基础上,对惠民南坡沙四段上亚段沉积特征进行了综合研究。

从发育时间和层位来看,研究区滩坝砂体主要分布于沙四段上亚段。上亚段4个砂组由下而上呈现两个退积旋回:4砂组只零星发育滩砂,坝砂不发育。3砂组沉积时期滩坝砂体比4砂组发育。2砂组滩坝砂体较3砂组不发育。1砂组沉积时期滨浅湖区域拓宽,具有漫湖沉积特点,发育类似于潮坪的砂坪、混合坪和泥坪沉积,滩坝砂体尤为发育(图4)。

从发育位置来看,研究区沙四段上亚段滩坝砂体发育明显受到夏口断层的控制。总体上滩砂沿夏口断层呈带状发育,坝砂在其中串珠状分布且主要集中于夏口断层下降盘,特别是夏511—夏960—夏28井区及附近,即现今曲堤地垒带北侧(图5)。

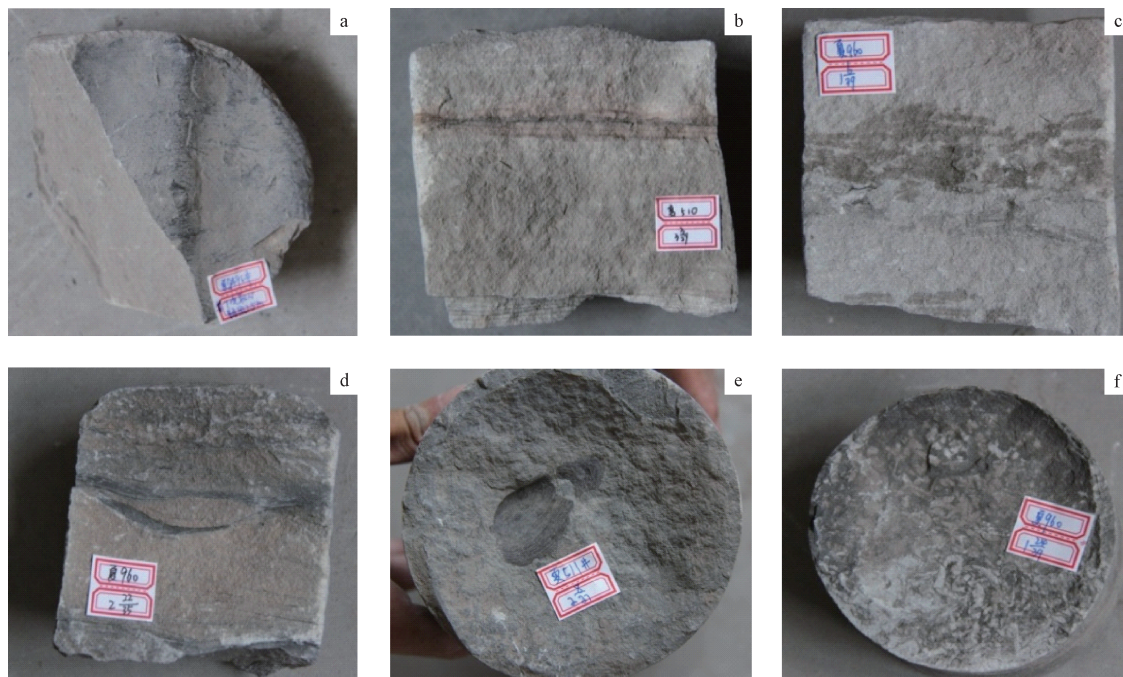


图3 惠民凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体沉积构造

Fig. 3 Core photographs showing different sedimentary structures of the upper fourth member of the Shahejie Formation on the south slope of the Huimin Sag

a. 浪成波痕,夏斜96井,井深3 769.80 m; b. 平行层理,夏510井,井深3 176.42 m; c. 浪成砂纹层理,夏960井,井深3 218.10 m; d. 脉状层理,夏960井,井深3 421.10 m; e. 双壳类停息迹,夏511井,井深3 347.02 m; f. 生物扰动构造,夏960井,井深3 221.60 m

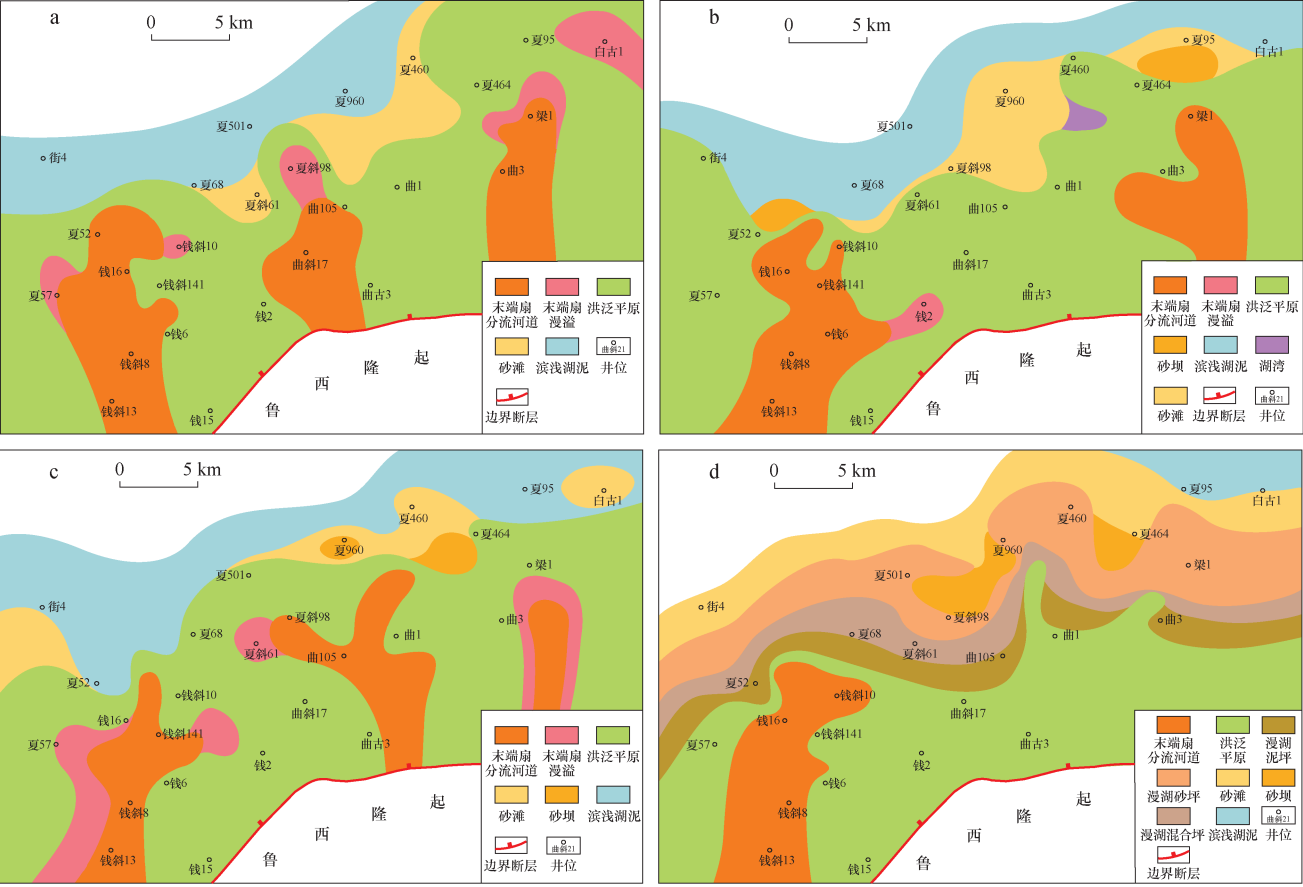


图4 惠民凹陷南坡沙四段上亚段各砂组沉积相

Fig. 4 Sedimentary facies of the sand groups of the upper fourth member of the Shahejie Formation on the south slope of the Huimin Sag
a. 4 砂组; b. 3 砂组; c. 2 砂组; d. 1 砂组

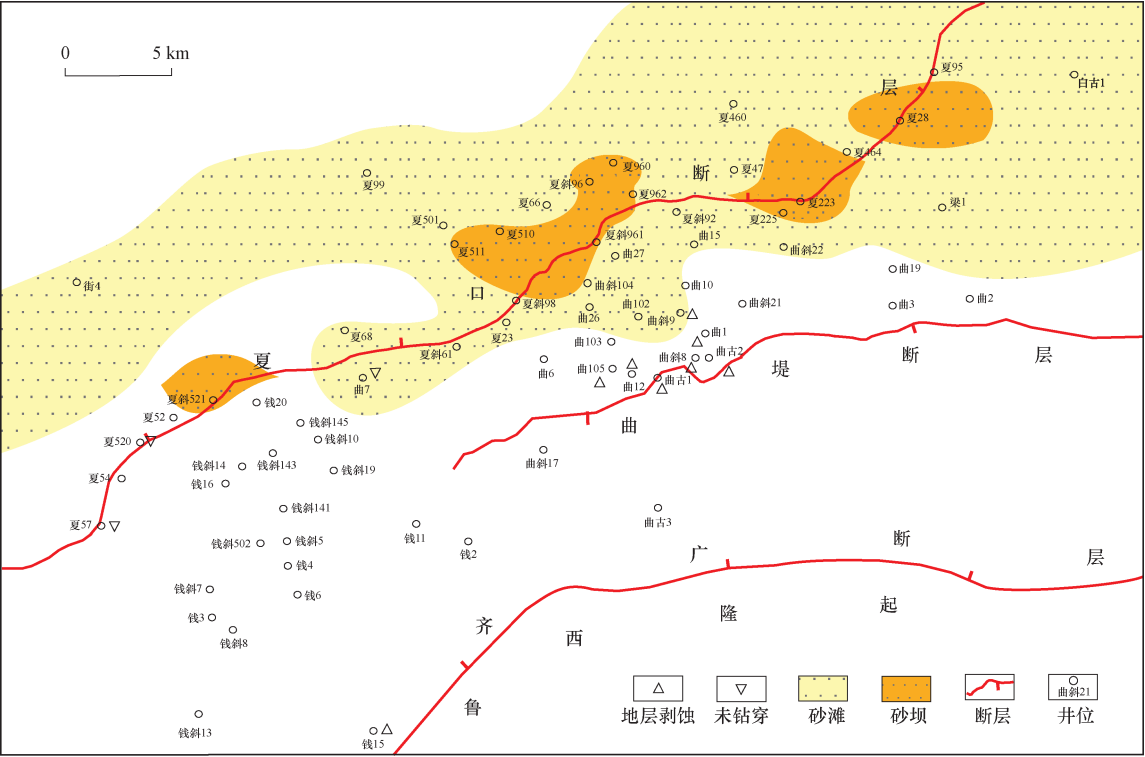


图5 惠民凹陷南坡沙四段上亚段滩坝沉积叠合图

Fig. 5 Superimposed map of the beach-bar sand group deposition in the upper fourth member of the Shahejie Formation on the south slope of the Huimin Sag

4 滩坝形成条件

4.1 湖平面变化及水动力条件

滩坝为滨浅湖区域内在波浪和湖流作用下堆积下来的砂体^[10]。湖平面变化和水动力条件对滩坝的形成至关重要。湖盆扩张时期,在整体湖侵背景下湖水的周期性动荡有利于滩坝砂体的形成^[5,8]。研究区1砂组沉积时期湖平面快速上升和周期性洪泛为滩坝的形成提供了水动力条件。

从研究区沙四上亚段泥岩颜色图中可以看出(图6),在4砂组—2砂组,泥岩颜色基本为氧化色,反映此时研究区以陆上环境为主,夏口断层尚未强烈活动^[11],其北也仅是洪水面之下的滨湖区域,因此滩坝砂体零星发育。1砂组沉积时期,夏口断层活动加剧,湖平面相对上升,且在洪泛作用下频繁震荡,滨浅湖区域展宽。此时,在夏口断层以北泥岩颜色基本上以深灰色和灰色为主,曲堤地区泥岩颜色为杂色,表明夏口断层北侧水体加深,枯水面基本沿夏口断层一线分布;洪水期湖水可漫过曲堤地垒带。滩坝砂体基本上分布于枯水面之下,反映枯水面与浪基面之间波浪和沿岸流活跃,有利于滩坝砂体的搬运与聚集。

4.2 构造及古地形条件

惠民凹陷南坡南北向“断阶分带”的构造格局控制了滩坝的分布位置。研究区沙四段上亚段滩坝砂体主要集中于曲堤地垒带北侧,在钱官屯地区仅零星发育,沿夏口断层呈带状分布。夏口断层活动形成地形坡折,促使上升的湖平面在一定时期内形成较稳定的湖岸带。断层坡折下方水体迅速加深,有利于形成能量较强的波浪,控制滩坝砂体沿断层分布^[8]。但与此同时,突然加深的水体受断层所限,滨浅湖区域变窄,滩坝砂体的展布宽度随之变小从而局限于断层下降盘发育。

研究区东西向“沟梁相间”的古地形有利于形成陆上冲沟和曲折的湖岸线。洪泛期湖平面上升,增强的波浪作用可迅速将入湖沉积物沿冲沟搬运并重新聚集,使得滩坝砂体在冲沟之间的湖岸处相对发育。沿岸流在曲折的岸线阻挡下偏离原方向而形成较强的离岸流,侵蚀湖底冲刷出沟槽,沉积物聚集在沟道间形成坝砂,且在湖岸线曲折处往复迁移^[12]。湖岸线的曲折变化会造成沿岸流和海浪能量的消耗,使得经过淘洗的砂粒沉积下来,形成平行于岸线伸展的长条形湖岸砂嘴,并逐步发展成为条带状滩坝^[13]。

同时,根据地层厚度图估算研究区滩坝砂体发育

地区的地形坡度为 $0.3^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 。这与东营凹陷博兴洼陷同时期滩坝沉积的地形坡度($0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 之间^[2,14-15])基本一致,也与 Roelvink 等^[16]的模拟结果相符。

4.3 物源供给条件

沙四段上亚段沉积时期,惠民凹陷相对湖平面上升,物源供给能力相对减弱。研究区沙四段下亚段陆上主要是冲积扇沉积,上亚段则转变为末端扇沉积。由于末端扇未直接入湖,只能借助于洪水期雨水冲刷与湖涨作用携带部分碎屑物质入湖成为滩坝物源。此外,基岩的冲刷以及先成的冲积扇扇缘厚层沙泥沉积物也会在波浪冲刷与湖流作用下被重新分配、筛选和聚集,形成滩坝。

从沉积相图(图4)上可以看出,末端扇前方的滩坝砂体规模较小,分布范围相对局限,以坝砂为主,如3砂组和2砂组末端扇前方的滩坝。这些滩坝主要由洪流携带的碎屑物质供源。由先成沉积物沿湖岸带线性供源而成的滩坝平行于岸线带状分布,在湖平面频繁迁移过程中可大片分布,但泥质含量较高^[17],如1砂组漫湖砂坪以及砂坝。因此,从滩坝砂体规模上看,由基岩和先成沉积物供源的滩坝砂体较末端扇供源的滩坝砂体更为发育。同时,由于末端扇与先成沉积地层供应的沉积物粒度较细,泥质含量高,是导致研究区滩坝砂体物性较差的重要原因。

5 结论

1) 惠民凹陷南坡沙四段上亚段滩坝砂以粉细砂岩和粉砂岩为主;粒度概率曲线多为“两跳一悬”式,反映了搬运沉积流体具有的冲刷回流现象且动荡性较强的特点;沉积构造主要发育浪成波痕、平行层理、浪成沙纹层理、波状层理和生物成因构造。

2) 平面上,研究区沙四段上亚段滩坝砂体沿夏口断层呈带状分布,坝砂在其中串珠状分布,且主要集中于夏口断层上盘。垂向上,4个砂组由下而上呈现两个退积旋回,以1砂组滩坝砂体最为发育。

3) 研究区1砂组沉积时期,湖平面快速上升和周期性洪泛为滩坝的形成提供了水动力条件,枯水面之下的稳定水深和较强波浪作用更利于坝砂发育。南北向“断阶分带”的构造格局控制了滩坝的分布位置,夏口断层形成的地形坡折一方面促进了滩坝砂体沿断层在上盘聚集,另一方面也限制了滩坝的横向展布宽度。滩坝沉积物的物源主要来自先成沉积物、基岩和末端扇沉积物,其中前两者的线状供源比后者在洪泛期砂体入湖更利于滩坝大面积发育。

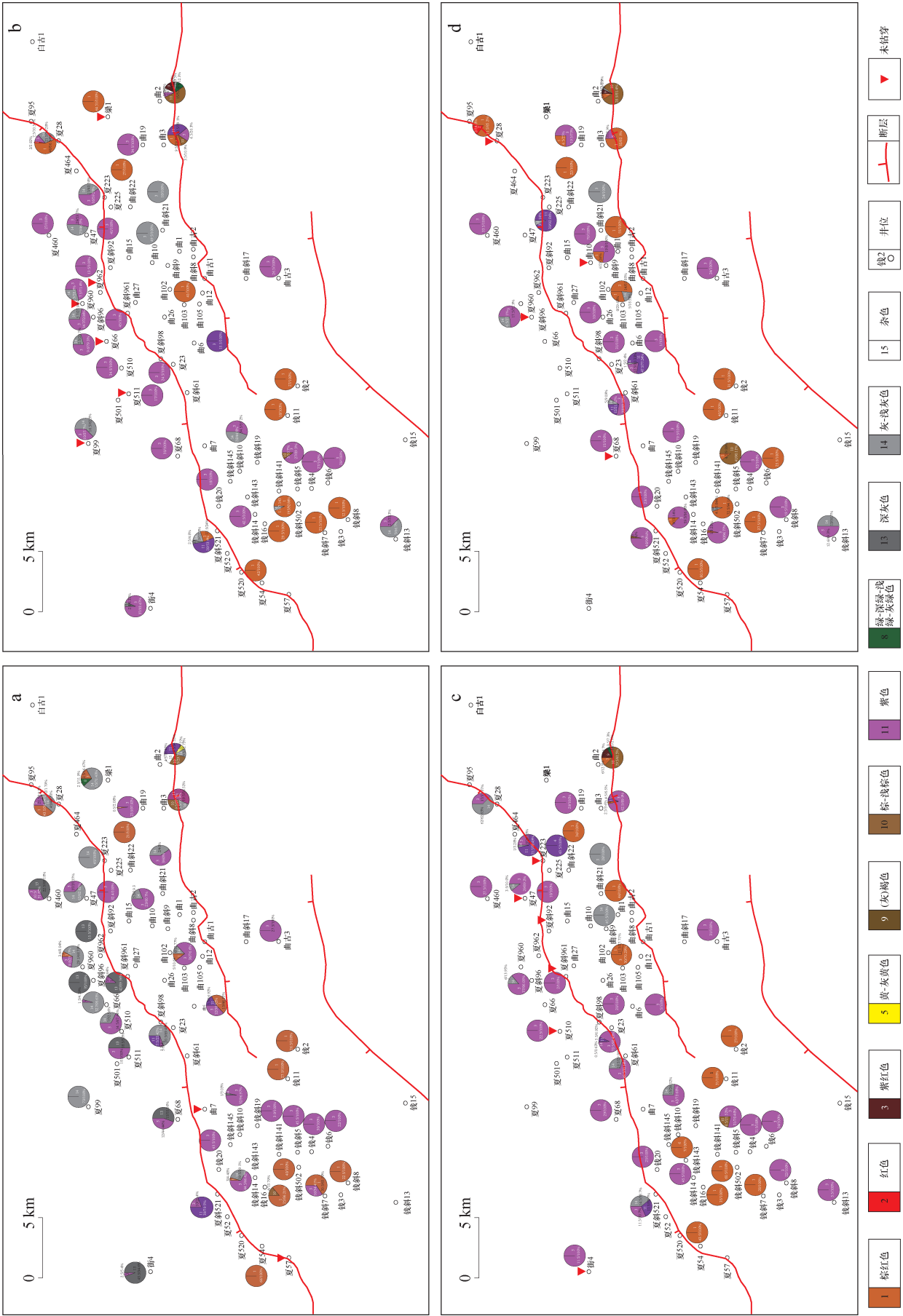


图6 惠民凹陷南坡沙四上亚段泥岩颜色
a. 4砂组; b. 3砂组; c. 2砂组; d. 1砂组

参 考 文 献

- [1] 操应长,王健,刘惠民,等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(6):5-10.
Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6): 5-10.
- [2] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学报,2011,32(3):417-423.
Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: a case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 417-423.
- [3] 张宇,唐东,周建国. 东营凹陷缓坡带滩坝砂储层描述技术[J]. 油气地质与采收率,2005,12(4):14-16.
Zhang Yu, Tang Dong, Zhou Jianguo. Reservoir description technology of beach-bar sand in the gentle slope belt of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(4): 14-16.
- [4] 赵宁,邓宏文. 沾化凹陷桩西地区沙二上亚段滩坝沉积规律及控制因素研究[J]. 沉积学报,2010,28(3):441-450.
Zhao Ning, Deng Hongwen. Beach-bar depositional laws and controls of the 2nd member of Shahejie Formation in Zhuangxi area, Zhanhua Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 441-450.
- [5] 邓宏文,马立祥,姜正龙,等. 车镇凹陷大王北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究[J]. 沉积学报,2008,26(5):715-724.
Deng Hongwen, Ma Lixiang, Jiang Zhenglong, et al. Sand bank generation types and its controls on their distribution, the second member of Shahejie Formation, Lower Tertiary, Dawangbei, Chezheng Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 715-724.
- [6] 冯兴雷,马立祥,邓宏文,等. 大王北洼陷浅水漫湖砂质滩坝沉积微相特征[J]. 地质科技情报,2009,28(1):9-14.
Feng Xinglei, Ma Lixiang, Deng Hongwen, et al. Microfacies characters of sandy beach and bar in shallow water over-lake, with an example from the Dawangbei Sag[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 9-14.
- [7] 陈世悦,杨剑萍,操应长. 惠民凹陷西部下第三系沙河街组两种滩坝沉积特征[J]. 煤田地质与勘探,2000,28(3):1-4.
Chen Shiyue, Yang Jianping, Cao Yingchang. Sedimentary characteristics of two kinds of beach-bars of Oligocene Shahejie Formation in western Huimin Sag[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(3): 1-4.
- [8] 张鑫,张金亮. 惠民凹陷中央隆起带沙四上亚段滩坝与风暴岩组合沉积[J]. 沉积学报,2009,27(2):246-253.
Zhang Xin, Zhang Jinliang. Composite deposits of beach-bar and tempestite in the upper fourth member of Shahejie Formation in the central uplift belt of Huimin Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 246-253.
- [9] 贾红义,路慎强,陈海云,等. 惠民凹陷南斜坡构造体系研究[J]. 石油物探,2012,51(1):91-96.
Jia Hongyi, Lu Shenqiang, Chen Yunhai, et al. Study of the tectonic system of the south slope of Huimin Sag[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 91-96.
- [10] 冯增昭,王英华,刘焕杰,等. 中国沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Liu Huanjie, et al. Sedimentology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [11] 姜素华,许新明,康恒茂,等. 惠民凹陷新生代构造沉降史及波动旋回性分析[J]. 石油天然气学报——江汉石油学院学报,2007,29(5):1-7.
Jiang Suhua, Xu Xinming, Kang Hengmao, et al. Analysis of Cenozoic tectonic subsidence history and wave cycle in Huimin Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology—Journal of Jianghan Petroleum University, 2007, 29(5): 1-7.
- [12] Davis R A, Fox Jr W T. Coastal processes and nearshore sand bars[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1972, 42(2): 401-412.
- [13] 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):246-253.
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): 246-253.
- [14] Jiang Zaixing, Liu Hui, Zhang Shanwei, 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.
- [15] 田继军,姜在兴. 惠民凹陷与东营凹陷沙四上亚段滩坝沉积特征对比与分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):612-622.
Tian Jijun, Jiang Zaixing. Comparison and analysis of beach bars sedimentary characteristics of upper Es⁴ in Huimin and Dongying Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 612-622.
- [16] Roelvink J A, Stive M J F. Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(C4): 4785-4800.
- [17] 邓宏文,高晓鹏,赵宁,等. 济阳坳陷北部断陷湖盆陆源碎屑滩坝成因类型、分布规律与成藏特征[J]. 古地理论,2010,12(6):737-747.
Deng Hongwen, Gao Xiaopeng, Zhao Ning, et al. Genetic types, distribution patterns and hydrocarbon accumulation in terrigenous beach and bar in northern faulted-lacustrine-basin of Jiyang Depression[J]. Journal of Paleogeography, 2010, 12(6): 737-747.

(编辑 张玉银)