郝冉冉, 吴智平, 王永诗, 等. 埕北凹陷沙河街组构造-沉积响应特征与油气勘探意义[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(3): 22-30. HAO Ranran, WU Zhiping, WANG Yongshi, et al. Tectonic-sedimentary features of the Shahejie Formation in Chengbei Sag and its implications for oil and gas exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(3): 22-30.

埕北凹陷沙河街组构造-沉积响应特征与 油气勘探意义

郝冉冉^{1,2},吴智平¹,王永诗²,武群虎²,王蛟³

(1中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛 266580; 2中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司,东营 257000; 3山东石油化工学院石油工程学院,东营 257000)

摘 要:通过三维地震、岩芯、测井、录井资料,以"源-沟-汇"思想为指导,分析了埕北凹陷沙河 街组构造断裂体系演化及其沉积响应特征,梳理了不同构造演化阶段沉积体系发育类型与时空 展布。研究表明,沙河街组沉积期埕北断层、埕子口断层具有典型幕式构造演化特征。沙三段 沉积期表现为强烈断陷幕,埕北断层活动强烈,陡坡带沿大型古沟谷发育扇三角洲沉积体系;西 斜坡沿断槽型沟谷发育三角洲沉积体系;沙二—沙一段沉积期为走滑改造断陷幕,埕北断层活 动明显减弱,埕子口断层活动相对较强,陡坡带和西斜坡沿物源通道均继承性发育三角洲沉积 体系。勘探实践验证了砂体发育区为构造-沉积响应的结果,为研究区油气勘探指明方向。 关键词:埕北凹陷;沙河街组;构造演化;沉积体系;油气勘探

中图分类号:P736;P744; 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2023.023

0 引言

断陷湖盆幕式构造演化与断裂差异活动,控制 着盆地结构、古地貌特征、沉积可容空间和地层充 填样式^[1-2],通过影响剥蚀区供源强度,古沟谷、断 槽物源通道分布与规模,以及汇水沉积中心迁移和 相对湖平面变化^[2-4],最终控制了沉积体系类型、时 空展布与演化。勘探实践中,盆地构造演化的沉积 响应特征与成藏要素密切相关^[5-6],对预测烃源岩、 储层、盖层配置关系、地层岩性圈闭分布及成藏组 合具有重要意义^[2]。

埕北凹陷是渤海湾盆地中生界剥蚀面背景上 发育的新生代小型箕状断陷盆地^[5-8]。经过几十年 的油气勘探,胜利油田在埕北低凸起和埕子口凸起 先后发现了埕岛油田、老河口油田和飞雁滩油田^[8-11]

收稿日期: 2023-02-12

(图 1), 而盆地内部缓坡带、陡坡-洼陷带勘探程度 仍然较低。前人对埕北凹陷的研究主要集中于盆 地构造演化[5-9],对沉积体系、有利砂体刻画方面的 研究相对滞后,一些学者认为沙河街组陡坡带发育 近岸水下扇、扇三角洲沉积体系,缓坡带发育辫状 河三角洲沉积体系,有利砂体沿洼陷呈环带状展 布^[8-11]。现有沉积体系的认识对物源通道和砂体时 空展布刻画不清晰,无法满足精细地质勘探的需求, 制约了规模油藏的突破。本研究通过三维地震解 释,结合岩芯、测井、录井资料,通过单井沉积学分 析、古地貌恢复、地震属性砂体刻画,以"源-沟-汇" 思想为指导, 梳理了不同构造演化阶段沉积体系发 育类型与时空展布规律。在此基础上通过成藏条 件分析,结合勘探实践,对有利砂体发育区带进行 预测,以期为埕北凹陷沙河街组下一步的油气勘探 提供地质依据。

1 工区概况

埕北凹陷位于渤海湾盆地中南部滩海地带,夹 持于埕子口凸起与埕北低凸起之间(图1),古近系

资助项目:国家科技重大专项"渤海湾盆地精细勘探关键技术" (2016ZX05006)

第一作者:郝冉冉(1991—),女,在读博士,助理研究员,主要从事油气地 质勘探方面的研究工作. E-mail: zrhrw2010@163.com



Fig.1 The tectonic setting of Chengbei Sag and the stratigraphic column of Shahejie Formation in Well CD6

沉积时期,整体分为东、西2个次洼,受埕北断层控制,形成"北东断、西南超"的构造格局,是济阳坳 陷勘探程度较低的富油凹陷^[8]。

埕北凹陷发育 NW 和 NE/NEE 走向 2 组主干 断层,其中,呈 NW 走向的埕北断层为控凹断层, NE/NEE 走向的"顺坡"断层对凹陷具有切割改造 作用^[5-10]。埕北凹陷古近系经历了 3 次下降(沙四 段沉积初期、沙三段沉积早中期、沙二段沉积晚 期—东营组)和 2 次抬升(沙四段沉积晚期、沙三段 沉积晚期—沙二段沉积早期)过程,多期构造运动 控制了地层和砂体的沉积展布。在盆地快速沉降 阶段,形成了沙三段(Es₃)、沙一段(Es₁)和东三段 (Ed₃)优质烃源岩,为古近系储层提供了充足的油源 条件;在抬升阶段,发育沙四段顶面(T₆)、沙三段顶 面(T₃)区域地层不整合面,形成了多种类型的地层 圈闭,为古近系油气成藏创造了有利条件^[12-13]。

2 沙河街组构造演化特征

2.1 断裂特征

据研究区的断层平面展布和成因组合特征 (图 2),可将该区的断裂系统分为 NW 走向断裂体 系、NE/NEE 走向断裂体系与近 EW 走向断裂体系 3 部分。

NW 走向断裂体系指埕北断层及其伴生的次级 断层。埕北断层是控制埕北低凸起与埕北凹陷的 边界断层,具有断距大、延伸距离远、切割层系多的 特点,控制了凹陷内古近系的沉积。同时,该断层 又是一个长期继承性活动的大断层,是凹陷内生成 的油气向上运移的主要通道。

NE/NEE 走向断裂体系主要发育于埕子口断 层附近,呈雁行式展布。平面延伸距离不等(3~ 10 km),断距最大可达 200 m,活动时间较长,主要 控制埕北凹陷西斜坡古近系沉积,形成的断槽型古 沟谷控制物源通道。

近 EW 走向断裂体系主要发育于凹陷东部区域, 延伸距离一般<4 km, 活动时间短, 断距较小, 活动期一般从沙一段沉积时期开始, 明化镇组沉积 时期结束, 是局部应力场的产物, 对该区的沉积基 本不起控制作用, 是油气向浅层运移的重要通道。

在上述3组断裂作用下,除了在埕北断层下降 盘形成一些面积较小、构造幅度较大的断鼻圈闭外, 在凹陷内,由于 NE 向与 EW 向2组断裂基本上独 立分布,且走向与地层倾向基本一致,难以形成有 效的构造圈闭。埕北凹陷这3组不同时期、不同走 向断层的空间组合与地层匹配形成了埕北凹陷的 构造格局。

2.2 构造演化

埕北凹陷是在古生界和中生界古地貌背景上 形成的古近纪小型箕状断陷盆地,受区域构造演化 的影响,自始新世的沙四段沉积期开始发育(图 3)。 裂陷期构造活动具有"幕式"特征。

沙四段沉积时期(对应裂陷Ⅱ幕)是该凹陷的 初始断陷期,受早期埕北断层、埕子口断层强烈活 动的控制,沙四段表现出鲜明的断槽充填沉积特征 (图4),其厚度中心靠近凹陷主控断层并与主控断 层走向一致;后期构造活动减弱直至末期回返抬升 遭受剥蚀,由此形成了沙四段与沙三段之间的削蚀



图 2 埕北凹陷沙二段顶面构造 Fig.2 Structure of the top surface of Es₂ member in the Chengbei Sag



图 3 埕北凹陷过 CD11 井-CB42 井 (AA') NE 向地震剖面 Fig.3 The (AA') seismic profile of Well CD11 -CB 42 of Chengbei Sag in the northeast direction

不整合。沙四段地层由洼陷向南部斜坡带急剧减 薄直至尖灭。 断陷期。断陷初期(沙三下亚段沉积时期)埕北断 层、埕子口断层活动强烈,断层下盘地层厚度明显 加厚(图 4)。断陷中期(沙三中亚段沉积时期),2



Fig.4 The tectonic-sedimentary evolution profile of Chengbei Sag

The recome seamentary evolution prome of changeer

组主干断层活动加剧,湖盆进一步扩张,凹陷沉积范 围增大,表现出较为开阔的沉积构造背景,其沉降 中心仍保持了与主控断层走向的高度一致。沙 三段沉积期末,盆地又一次大幅度回返抬升,使沙三 上亚段大部地层被剥蚀,仅在洼陷中心部分地区残 留,由此形成与上覆沙二一沙一段的削蚀不整合。

沙二一沙一段沉积期(对应裂陷Ⅳ幕)为走滑 改造断陷期。断陷初期(沙二段沉积期)埕北断层 活动明显较弱,断陷特征不清晰,凹陷的沉降幅度 较小;"顺坡"埕子口断层活动较强,表现为对凹陷 的切割改造。断陷中期(沙一段沉积期), 埕北断 层活动较强, 湖盆快速扩张, 但由于物源供应较弱, 因而在湖盆内发育了一套广泛分布的暗色油页岩 沉积。

3 沉积体系发育特征

3.1 沉积相类型

本文系统观察了研究区沙河街组3口取芯井,

分别为位于西斜坡的 CD6 井、位于陡坡带的 CB42 井和 CB43 井。

西斜坡 CD6 井沙三下亚段底部发育较粗碎屑 沉积,可见灰白色砂砾岩-含砾粗砂岩正旋回,砾径 最大 10 cm,一般为 3~8 cm,呈次圆-次棱角状,分 选较差,发育平行、粒序层理,常见冲刷面(图 5a), 上部沉积旋回主体为中细砂岩,总体表现为南部缓 坡带物源区三角洲平原亚相,分流河道微相特征。 沙二段发育中细砂岩正旋回沉积,砂岩厚度大,物 性较好,条带状含油,总体呈现砂包泥特征(图 5b); 泥岩颜色为浅灰色、灰色,指示半还原浅水沉积环 境,总体表现为南部远物源三角洲平原亚相,分流 河道微相特征。沙一段发育厚层泥页岩,颜色为深 灰色、黑色,可见水平层理油页岩(图 5c),表现为半 深湖-深湖相沉积环境。



图 5 埕北口阳沙河田组石心村征

Fig.5 The core characteristics of Shahejie Formation in Chengbei Sag

陡坡-洼陷带 CB42 井沙三中亚段发育中粗砂 岩,可见明显下细上粗反旋回沉积特征,砂岩物性 好、含油均匀(图 5d);泥岩为深灰色-黑色,可见水 平层理油页岩(图 5e),指示半深湖-深湖相还原沉 积环境,陡坡带扇三角洲前缘亚相,河口坝微相特征。

陡坡-挂陷带 CB43 井沙三中亚段发育黑色、深 灰色泥岩(图 5f,g),指示半深湖-深湖相沉积环境; 与黑色泥岩交互的砂岩条带粒度较粗,为中砂岩 (图 5f),表现为陡坡带扇三角洲前缘亚相席状砂微 相特征。

在岩芯沉积学分析的基础上,通过测、录井资料,开展岩性、砂地比及测井相分析(图 6),明确了 沙河街组不同沉积时期物源相及暗色泥岩相的发 育特征,建立了单井约束的"源-汇"体系,即CB244-CB242 井区、SH5 井区为陡坡带主要物源井,CD6 井区为西斜坡主要物源井,CB43、CB258 井区为汇 水中心暗色泥岩发育区。

总体来看, 埕北凹陷沙三段沉积时期西斜坡发 育三角洲沉积体系, 北部陡坡带发育扇三角洲沉积 体系, 向洼陷中心方向, 发育前缘河口坝、席状砂微 相; 沙二段沉积时期, 湖盆水体较浅, 为滨浅湖沉积 环境,西斜坡、北部陡坡带均发育三角洲前缘河口 坝微相,向洼陷方向发育席状砂微相;沙一段沉积 时期,湖盆快速扩张,发育湖泛暗色泥岩沉积,西斜 坡、北部陡坡带三角洲前缘河口坝、席状砂局限 发育。

3.2 构造-沉积响应

3.2.1 沙三段沉积期裂陷幕

强烈断陷初期(沙三下亚段沉积时期),随边界断层活动速率逐渐增加,湖平面缓慢上升,汇水沉积中心靠近埕北断层一侧,在陡坡带沿SH5井区和CB24井区古沟谷发育扇三角洲沉积体系(图7),地震剖面中可见明显的楔形沉积体(图3),向洼陷带延伸距离较短,相变快;缓坡带沿埕子口断层控制的断槽型古沟谷发育三角洲沉积体系,向汇水中心方向延伸距离较远,砂体连通性强。

强烈断陷中期(沙三中亚段沉积时期),边界断 层强烈伸展,凹陷沉积范围增大,表现出较为开阔 的沉积构造背景。湖盆的容空间的快速增大,使盆 缘砂体表现出明显的退积旋回,在陡坡带发育扇三 角洲沉积体系,缓坡带发育三角洲沉积体系。







图 7 埕北凹陷沙三段沉积前古地貌恢复图 Fig.7 Paleo-geomorphological reconstruction before the deposition of Es₃ in the Chengbei Sag

强烈断陷末期,盆地又一次大幅度回返抬升, 使沙三段上亚段与部分沙三中亚段地层被剥蚀。

3.2.2 沙二—沙一段走滑改造裂陷幕

走滑改造裂陷期初期(沙二段沉积时期), 埕北 断层活动明显减弱, 凹陷的沉降幅度较小, 湖盆整 体表现为浅湖-半深湖环境,陡坡带物源供给相应减 弱,沿继承性古沟谷发育细粒三角洲沉积体系;西 部缓坡带"顺坡"埕子口断层活动增强,对凹陷起到 明显走滑改造作用,沿断槽型古沟谷,发育三角洲 沉积体系,并向汇水沉积中心延伸较远距离。

走滑改造裂陷期中期(沙一段沉积时期), 埕北 断层活动加剧, 凹陷快速沉降, 湖盆范围快速扩张, 发育了一套广泛分布的湖泛暗色油页岩沉积, 砂体 沿物源通道局限发育。

3.3 沉积体系展布

研究区沉积体系发育与展布主要受构造-湖盆 演化和"源-汇"系统所控制^[14-22]。在构造-沉积响 应分析的基础上,应用地震属性砂体刻画(图 8),分 析了沉积体系的空间展布(图 9)。

沙三下亚段沉积总体表现为半深湖-深湖环境, 陡坡带发育扇三角洲沉积体系,西部斜坡带发育三





Fig.8 The amplitude attribute of Es₃ in the Chengbei Sag





角洲沉积体系,向洼陷带方向发育河口坝、席状砂。 到沙三中亚段沉积时期,湖盆快速沉降,可容空间 增大,陡坡带扇三角洲沉积体系和西部斜坡带三角 洲沉积体系均有所减弱。

沙二段沉积总体表现为浅湖-半深湖环境, 陡坡带、西部斜坡带均发育三角洲沉积体系, 洼陷带为 浅湖席状砂发育区。沙一段沉积时期湖盆快速扩 张, 发育暗色泥页岩、油页岩沉积, 总体表现为深湖 环境, 砂体展布范围局限, 陡坡带、西部斜坡带均发 育三角洲前缘亚相。

4 油气勘探实践

埕北凹陷沙河街组发育多套烃源岩,埕北断层 及不整合面是凹陷内生成油气的主要运移通道,油 气成藏表现为近源存储的特点。依据不同构造部 位、不同层段发育的圈闭类型建立了油藏发育模式 (图 10)。



Fig.10 Reservoir development model of Shahejie Formation in the Chengbei Sag

北侧陡坡带沙三段发育由扇三角洲前缘砂体 与致密砂砾岩体所构成的岩性圈闭,近源存储形成 岩性油藏;沙二段发育三角洲前缘砂体与 NW 向断 裂体系所构成的构造-岩性圈闭,经近源存储或断层 输导,形成构造-岩性油藏。向洼陷带方向延伸的前 缘河口坝、席状砂有利砂体上倾尖灭,可形成近源 存储的岩性油藏。

南侧缓坡带发育2类圈闭,沙三下亚段三角洲前缘砂体地层超覆圈闭和沙三中亚段三角洲前缘 砂体不整合遮挡圈闭。地层超覆圈闭可通过近源 存储或捕获不整合面运移而来的油气,形成地层超 覆油藏;不整合遮挡圈闭由近源存储形成不整合遮 挡油藏。

近期部署于埕北凹陷陡坡带的 CB42 井沙三段 构造-岩性油气藏日产油 54.3 t;缓坡带 CD11 侧井 沙二段、沙三段地层不整合油气藏日产油分别为 46.2 t和 16.1 t。2 口井均处于有利砂体发育区,印 证了本次构造-沉积响应的研究成果。研究区沙河 街组有利砂体精细刻画,配合陡坡带、西斜坡构造-地层圈闭,指明了未来油气勘探的方向。

5 结论

(1) 埕北凹陷沙河街组构造演化具有典型幕式 特征,可划分为沙四段沉积期初始断陷期、沙三段 沉积期强烈断陷期和沙二—沙一段沉积期走滑改 造断陷期3个阶段。 (2)幕式构造演化控制了埕北凹陷"源-沟-汇" 沉积体系响应。埕北凹陷强烈断陷期, 控凹断层强 烈活动, 陡坡带沿埕北凸起 CB24 井区、SH5 井区 大型古沟谷发育扇三角洲沉积体系, 延伸至凹陷带; 西斜坡沿埕子口凸起 CD6 井区断槽沟谷发育三角 洲沉积体系, 向汇水中心延伸较远。

(3)明确了埕北凹陷沙河街组沉积响应水下分 流河道、河口坝等有利砂体发育区,指导了近期勘 探实践,同时指明了下一步油气勘探的方向。

参考文献:

- [1] 郭伟,徐国强,柳保军,等.珠江口盆地白云凹陷文昌组构造--沉积响应关系[J].地球科学,2022,47(7):2433-2453.
- [2] 朱筱敏,陈贺贺,葛家旺,等.陆相断陷湖盆层序构型与砂体 发育分布特征 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 746-762.
- [3] 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等.沙全田凸起前古近系基岩分布
 及源汇过程[J].地球科学,2016,41(11):1935-1949
- [4] 冯有良, 胡素云, 李建忠, 等. 准噶尔盆地西北缘同沉积构造 坡折对层序建造和岩性油气藏富集带的控制 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 14-25.
- [5] 刘一鸣,吴智平,刘丽芳,等. 埕北凹陷及邻区新生代断裂体 系与构造格局 [J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(6): 1133-1143.
- [6] 沈朴,刘丽芳,吴克强,等. 渤海海域埕岛油田新近系油气差异聚集主控因素 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(2): 138-142.
- [7] 李伟,吴智平,张明华,等. 埕岛地区中生代和新生代断层发 育特征及其对沉积的控制作用 [J]. 中国石油大学学报(自然 科学版),2006,30(1):1-6.

[8] 张晓庆, 宋明水, 侯中帅, 等. 裂陷盆地构造-沉积耦合关系及

其控藏作用: 以渤海湾盆地埕北凹陷古近系为例 [J]. 中国矿 业大学学报, 2019, 48(6): 1317-1329.

- [9] 张强,刘丽芳,张晓庆,等. 埕北凹陷古近系构造对沉积的控制作用[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(4): 88-98.
- [10] 付兆辉,张在振,李德纯,等.渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积体系分析与油气成藏[J].沉积学报,2009,27(1):26-31.
- [11] 付兆辉,秦伟军,李敏. 渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积特征 与油气圈闭 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(1): 9-15.
- [12] 郭涛,李慧勇,石文龙,等. 渤海海域埕北低凸起及周围地区 构造沉积特征与有利勘探目标 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 28-32.
- [13] 王六柱,董冬冬,石晓光,等.渤海湾盆地埕北凹陷东营组构 造沉积特征及油气成藏条件 [J].海洋地质与第四纪地质, 2013,33(5):131-136.
- [14] 朱红涛,朱筱敏,刘强虎,等. 层序地层学与源-汇系统理论内在 关联性与差异性 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 763-776.
- [15] 杨棵,董艳蕾,朱筱敏,等. 渤海湾盆地渤中凹陷埕岛东坡古 近系东营组二段下部源-汇系统 [J]. 石油与天然气地质, 2018,

39(6): 1280-1292.

- [16] 操应长,徐琦松,王健. 沉积盆地"源-汇"系统研究进展[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 116-131
- [17] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地"源-汇"系统研究新进展 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 1-11.
- [18] 林畅松,夏庆龙,施和生,等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析 [J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 9-20.
- [19] 杨丽莎,陈彬滔,马轮,等.陆相湖盆坳陷期源一汇系统的要素特征及耦合关系:以南苏丹 Melut 盆地北部坳陷新近系 Jimidi 组为例[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 27-38.
- [20] 黄军立,张伟,刘力辉,等.珠江口盆地番禺4洼古近系文昌 组三元地震构形解释技术[J].岩性油气藏,2023,35(2):103-112.
- [21] 陈骥,姜在兴,刘超,等."源-汇"体系主导下的障壁滨岸沉积 体系发育模式:以青海湖倒淌河流域为例 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 71-79.
- [22] 杜晓峰, 王清斌, 庞小军, 等. 渤中凹陷石南陡坡带东三段源 汇体系定量表征[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5): 1-10.

Tectonic-sedimentary features of the Shahejie Formation in Chengbei Sag and its implications for oil and gas exploration

HAO Ranran^{1,2}, WU Zhiping¹, WANG Yongshi², WU Qunhu², WANG Jiao³

(1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2 Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying 257000, China; 3 School of Petroleum Engineering, Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257000, China)

Abstract: Based on three-dimensional seismic, core, logging, and logging data, guided by the "source-valleysink" concept, the evolution of the structural fault system in the Shahejie Formation and its sedimentary response characteristics in the Chengbei Sag were analyzed. The development types and spatiotemporal distribution of sedimentary systems in different stages of structural evolution were clarified. Results show that the sedimentation of the Shahejie Formation was controlled by the Chengbei Fault and Chengzikou Fault, reflecting typical episodic structural evolution characteristics. The sedimentation period of the third member of the Shahejie Formation is characterized by strong faulting and subsidence, during which the activity of the Chengbei Fault was strong. A fan delta sedimentary system was developed in steep slope zone along a large ancient valley, while a delta sedimentary system was developed in the western slope along a fault-trough-typed valley. The sedimentary period from the first to second members developed a strike-slip-fault depression, during which the activity of the Chengbei Fault was significantly weakened, and that of the Chengzikou Fault remained relatively strong. The steep slope zone and the western slope both inherited the development of the delta sedimentary system along material supply route. The exploration practice has verified that the sand-body development area was resulted from the structural sedimentary response, indicating the direction for oil and gas exploration in the study area.

Key words: Chengbei Sag; Shahejie Formation; structural evolution; sedimentary system; oil and gas exploration