https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.052



渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展 布规律与储层发育特征

杨海风,钱 赓,徐春强,高雁飞,康 荣

中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459

摘 要:中央构造脊是在黄河口凹陷内受走滑挤压作用形成的水下同沉积洼内隆起,同时也是黄河口凹陷重要的油气聚集带;但脊内沙河街组储层非均质性强,其砂体展布与储层发育规律尚不明确,制约了深部勘探部署.通过三维地震、钻测井、岩矿数据分析恢复了沙河街组沉积期中央构造脊古地貌特征、落实构造脊东西砂体展布与南北物源供给界限,并将构造脊细分为东、西、南3个主要单元对储层发育的差异性进行详细研究.通过微观储层分析刻画结合构造一沉积特征总结不同单元储层发育特征,表明东脊沙三段沉积期地势较低,为主物源通道,南北搬运距离远,砂体成熟度高;后期隆升诱导裂缝发育,渗透率升高,优质储层发育;西脊沉积期地势较高,为主物源侧翼,薄层杂砂岩,泥质含量高,局部钙质发育,储层欠发育;南脊持续隆升,作为南北物源交互区,脊内微隆起周期出露水面沉积淋滤碳酸盐岩造成临近砂体碳酸盐胶结强,物性相对较差.
关键词:沙河街组;沉积体系;储层特征;差异性;中央构造脊;黄河口凹陷;石油地质学.
中图分类号: P618.13
文章编号: 1000-2383(2023)08-3068-13

Sandstone Distribution and Reservoir Characteristics of Shahejie Formation in Huangheko Sag, Bohai Bay Basin

Yang Haifeng, Qian Geng, Xu Chunqiang, Gao Yanfei, Kang Rong Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300459, China

Abstract: The Central Structural Ridge, a synsedimentary subaqueous uplift controlled by strike-slip movement in Huanghekou Sag, is an important hydrocarbon bearing zone in Bohai Sea area. It is characterized by inapparent altitude difference, frequent internal reliefchange and strong reservoir heterogeneity. The characteristics sandbody distribution and reservoir development of thirdmemberof Shahejie Formationinthisbelt are not clear yet. In this paper, weconductpalaeogeomorphologic reconstruction bycombining seismic and drilling data and subdivide the belt into east, west and south parts. We separated the ranges of southern and northern source areas through light and heavy mineral data. Through synthetic analysis, we build the tectonic-deposition-reservoir patterns which could guide the exploration effectively. During the deposition of the thirdmemberof Shahejie Formation, the east Ridge was relativelylow and played the role of the major sediment channel. The sediment could transport longdistance towards the south with high maturity. The fractures developing inside the particles due to following tectonic inversion highly improved the permeability and resulted in development high-quality reservoirs. The west Ridge was relatively high and located aside the major channel and deposited thin sandstones with thick mudstone showing poor reservoir quality. The south Ridge

基金项目:"十三五"国家科技重大专项(No. 2016ZX05024-003);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(No. YXKY-2017-TJ-01). 作者简介:杨海风(1981-),男,高级工程师,主要从事油气成藏及油气勘探研究工作.E-mail:yanghf3@cnooc.com.cn

引用格式:杨海风,钱赓,徐春强,高雁飞,康荣,2023.渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展布规律与储层发育特征.地球科学, 48(8):3068-3080.

Citation: Yang Haifeng, Qian Geng, Xu Chunqiang, Gao Yanfei, Kang Rong, 2023. Sandstone Distribution and Reservoir Characteristics of Shahejie Formation in Huangheko Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 48(8): 3068–3080.

第8期

located in the intersecting zone between north and south sediments adjacent to the central high landform causing strong carbonate cementing in sandstones.

Key words: Shahejie Formation; depositional systerm; reservoir characteristic; difference; central structural ridge; Huangheko Sag; petroleum geology.

0 引言

中国东部典型箕状断陷主要包含斜坡带(也称 缓坡带)、深陷带和陡坡带3个主要地质单元(童晓 光,1984;康南昌等,2013;张亚雄等,2014),然而在 特定的凹陷内,受挤压隆升或差异沉降,断陷盆地 内易形成洼内隆起(李丕龙等,2000;张忠民等, 2006;温宏雷等,2017;易士威等,2020).由于临近 深陷带烃源岩,油气运移距离短,洼内隆起成为油 气聚集的优势区.加上埋深相对较浅,成岩强度弱, 且易形成构造圈闭,从而成为诸多富烃凹陷的有利 勘探区带(李丕龙等,2000;张忠民等,2006;温宏雷 等,2017;易士威等,2020;Cui et al., 2021).渤海湾 盆地黄河口凹陷在中央构造脊相继发现了渤中34-2/4、渤中28-2S、渤中34-1等大中型油田(周心怀 等,2019),使其成为渤海海域重要的油气发现带.

然而,关于砂体的展布规律,相关研究多集中 于箕状断陷的陡坡带与斜坡带,凹陷中心多发育明 显的深陷带,沉积深湖相泥岩,不同物源供源界限 及砂体展布范围相对明确(童晓光,1984;康南昌 等,2013;张亚雄等,2014;赵贤正等,2017;刘强虎 等,2020;徐燕红等,2020;张自力等,2021).黄河口 凹陷中央构造脊地势整体相对较高,砂体搬运距 离、汇集方式与传统箕状凹陷陡坡与斜坡带存在较 大差异,针对盆内构造脊沉积砂体展布与储层发育 规律研究相对缺乏.在构造脊不同区带构造、沉积 与成岩背景下,内部储层物性差异大,呈现强非均 质性特点.在浅部储层勘探殆尽,勘探向深部发展 的背景下,砂体展布特征不明与储层物性强非均质 性严重约束了中央构造脊下一步勘探部署.

基于此,本文基于地震、岩矿资料明确中央构 造脊南北砂体分界,东西砂体展布,划分构造脊内 部构造沉积单元.通过储层微观分析手段,落实盆 内高地貌背景下不同单元内储层发育特征与控制 因素,进行构造一沉积一成岩耦合分析,对于挖掘 相关类型构造隆起勘探潜力,预测优质储层分布具 有重要意义.

1 区域地质概况

黄河口凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东北 部,北侧为渤南低凸起,南侧为垦东一青坨子凸起 和莱北低凸起,东侧为庙西凹陷,西侧为沾化凹陷 (图 1a),凹陷总面积约3 309 km².古近系孔店组一 沙河街组沉积期盆地为北断南超的箕状凹陷,构造 面貌表现为西深东浅、北陡南缓、凹中有隆的特征. 盆地次级构造单元受两组近东西向(或北东东向) 伸展断裂和北北东向走滑断裂控制(薛永安等, 2016;周心怀等,2019).

北北东向郯庐走滑断裂带贯穿渤南地区并派 生出3组基底主干走滑正断层(漆家福等,2008, 2010),张婧等(2017)将其划分为东、中、西3个走滑 带.中央构造脊位于中部走滑带.古新世一早始新 世,中带在左旋走滑挤压作用下开始隆升,导致黄 河口凹陷被分割为东、西两个次洼;中始新世(沙三 段沉积期)以来,郯庐断裂带转为右旋走滑,两条分 支断裂的右旋左阶排列形成具压扭性质的中央构 造脊(张婧等,2017).从沉积地层来看,构造脊与东 西洼陷一致,地层发育完整,为凹陷内部受走滑挤 压作用形成的水下同沉积洼内隆起(图1中A-A'; 温宏雷等,2017;张婧等,2017).

黄河口凹陷中央隆起带为西次洼中部低隆区, 东部与中央构造脊相连(刘豪等,2017).一般认为 中央隆起带隆升作为对北部控挂断裂强烈活动的 应力调节.地震资料显示,中央隆起带南部断层上 升盘与下降盘厚度差异明显,显示出孔店组与沙河 街组沉积期断层活动明显,控制沉积作用(图1中*B* -*B*').

黄河口凹陷中央构造脊古近纪和新近纪地层 发育较为完整,古近系自老到新发育孔店组、沙河 街组和东营组(图2).沙河街组又分为1、2、3、4段; 东营组又分为1、2、3段.沙三段细分为上、中、下亚 段,但由于侵蚀作用较强,构造脊沙三段主要保留 沙三中亚段(刘豪等,2017).沙河街组(E₂₃s)为黄河 口凹陷古近系主要油气富集层段,与下伏孔店组为 整合或假整合的接触关系.由于黄河口凹陷仅在西



图 1 黄河口凹陷区域地质图与典型剖面 Fig. 1 Regional geological map and typical seismic sections of the Huanghekou Sag

第8期

部发育和保存了很薄的沙四段地层,因此本文以沙 三与沙一二段为主要研究层位.

2 中央构造脊构造一沉积规律与单元划分

碎屑岩储层质量(孔隙度和渗透率)是物源、构 造、沉积等多因素控制下原始沉积物组成和后期成 岩改造的综合反映(Ramm, 2000; Kordi et al., 2011; Ozkan et al., 2011; Zhou et al., 2016), 优质 储层发育预测是多因素综合分析过程.近年来,渤 海湾盆地深部储层勘探开发需要更精准的砂体与 优质储层预测,从而要求精细的构造沉积单元划分 与细致的构造一沉积一成岩过程恢复,而构造脊沉 积期砂体展布决定了储层发育的物质基础,是优质 储层预测的重中之重,沉积区砂体的展布受沉积期 古地貌与构造演化过程所控制,与中央构造脊两侧 东次洼与西次洼相比,沙河街组相对较薄的沉积厚 度指示中央构造脊沉积期地势相对较高(图1),薄 层砂体使得依靠地震资料预测构造脊砂体展布更 具挑战性.因此结合三维地震、钻测井资料以及岩 性组合进行综合分析,恢复构造脊构造一沉积演化 过程,对于弥补地球物理分辨率不足,增强砂体预 测可靠性具有重要意义.

2.1 中央构造脊沉积体系展布

黄河口凹陷中央构造脊沙河街组以北部渤南

低凸起以及西南部垦东凸起为主力物源区(周晓光 等,2020;庞小军等,2021).与一般箕状断陷不同, 其中部不发育深陷带深湖相泥岩,导致过渡带物源 界限不明确,南北砂体展布范围从地震技术手段难 以确定.而理清构造脊砂体南北供源范围关键在于 确定过渡带砂体物源差异性.中央构造脊中部砂体 卸载区B与C油田钻井较为丰富,为南北物源体系 划分与砂体展布刻画提供了条件.

2.1.1 轻矿物分析 定量的砂岩岩相学分析是碎 屑岩研究的基本方法.准确获得砂岩的碎屑组分, 有助于探讨沉积物的源区、背景和沉积盆地性质 (Dickinson and Suczek, 1979;何杰等, 2020).过去 几十年中,基于全岩与单矿物地球化学与地质年代 学组成进行物源分析的技术突飞猛进,但砂岩主矿 物分析仍然是物源分析根本性手段,其中,基于主 要骨架颗粒 QFR 的砂岩分类方案应用最为广泛 (Folk, 1968, 1980).因此本文基于构造脊中部 B、C 两个构造钻井岩心沙河街组骨架颗粒进行 QFR分 类.如图 3 所示,沙三段数据相对局限,沙二段数据 量充足,但在 QFR三角图中两个构造钻井岩心分析 数据投点可以明显区分开来, B构造成熟度明显偏 高,石英含量高, 岩屑长石含量低; 而 C构造岩屑长 石含量明显偏高, 体现出明显不同的物源体系.



Fig. 2 The stratigraphic column of the Huanghekou Sag



Fig. 3 The mineral compositions of the Shahejie Formation from Structures B and Structures C located in the transition zones of north and south source areas, Central Structural Ridge





Fig. 4 Heavy mineral compositions of the Shahejie Formation from the Structure B and Structure C located in the transition zones of north and south source areas, Central Structural Ridge

饼图内数字为样品深度,单位为m

2.1.2 重矿物分析 重矿物相对稳定,能够一定程度 保留母岩的特征且分选技术成熟,已经成为物源示踪 的重要技术之一(赵红格和刘池洋,2003).对中央构 造脊中部B构造与C构造主要钻井选取沙河街组85 个岩心样品进行重矿物分析(图4),每个样品相对含 量前五的重矿物类型对比分析发现,北部B构造重矿 物以石榴子石(黄)、锆石(蓝)和白钛矿(红)为主,沙 三段到沙一、二段具有继承性.南部C构造重矿物以 锆石(蓝)、白钛矿(红)为主,除沙一段少量样品外,其 他普遍缺乏石榴子石(图4).重矿物组成的显著差异 性同样显示出B与C具有明显物源差异性.

轻重矿物的明显差异性揭示出黄河口凹陷中央 构造脊中部B、C构造的物源差异性,结合区域地质背 景,可以推测B构造以北部物源为主,而C构造以南部 物源为主,南北物源交互于构造脊中部.同时B、C分 属南北物源体系,证实中央隆起带在沙河街组沉积期 呈隆起状态,分隔南北物源.

2.2 中央构造脊砂体展布东西差异性

中央构造脊位于走滑转换带,东西两侧下倾明显, 同时受东西向调节断层的切割作用,由北向南形成堑、 垒相间的构造格局.中央构造脊现有勘探成果及钻井 揭示储层发育呈现明显非均质性,体现出沙河街组沉 积期构造脊东西两侧砂体展布与差异性演化特征.针 对于此,基于三维地震、钻井资料、岩性微观特征等多因素分析,落实沉积期构造脊东西两侧地形地貌特征 与对沉积的控制作用.

中央构造脊东西两侧沙河街组沉积厚度与岩性 组合特征呈现明显差异性(图5).A构造与B构造分 别位于中央构造脊东西两侧,三维地震剖面(图1,B-B')显示A-1井与B-1井位于东西两侧构造高部位,且 B构造现今处于更高部位.然而三维地震与钻井均显 示东侧B-1井比西侧A-1井沙河街组地层厚约190m (图5).从岩性组合来看,西侧沙河街组以泥质杂砂岩、 灰质砂岩、泥岩沉积为主,夹杂少量湖相碳酸盐岩薄 层(图5a,5b),西侧的D-1井与E-2井钻遇目标层位, 揭示类似特征,这种岩性组合特征体现出弱物源供给



图5 中央构造脊A与B构造典型钻井(左)与岩性特征(右)

Fig 5 Typical boreholes (left) and reservoir lithologic features of Structure A and Structure B in Central Structural Ridge a. A-1井, 3 460.70 m, 杂砂岩, 粒间充填绘制, 单偏光; b. E-2井, 3 383 m, 灰质杂砂岩, 钙质充填; c. B-1井, 3 365.70 m, 净砂岩, 孔隙发育, 铸体薄片, 红色铸体; d. B-2AD井, 3 725 m, 净砂岩, 孔隙发育, 铸体薄片, 红色铸体

条件,主体物源通道侧翼及水下高地貌特征(薛永安 等,2020;叶子倩等,2020).而构造脊东侧沙河街组砂 体相对丰富,以净砂岩、砂砾岩沉积为主,砂体淘洗充 分,成熟度高,粒度较粗,反映出主物源搬运通道特征, 为辫状河三角洲前缘主体,水下分流河道微相特征, 东侧B-2D/3D/4D等探井均揭示类似特征(图5c,5d). 结合沉积厚度与岩性组合推测,沙河街组沉积期构造 脊东西两侧存在明显地貌差异,西侧地势相对较高, 约束主要位于东侧的沉积物搬运.沙河街组沉积后期, 两侧沉积厚度差异逐渐减小,东营组沉积期东西两侧 沉积厚度近似,揭示中央构造脊东侧经历了沙河街组 沉积早期相对低地貌,而东营组沉积期地貌隆升,东 西沉积厚度相当.总而言之,中央构造脊沙河街组沉 积期古地貌呈现出西高东低,东侧富砂特点.

2.3 中央构造脊古地貌恢复、构造单元划分与砂体展 布特征

骨架颗粒与重矿物分析指示南北物源供给交汇 于中央构造脊中部,中央隆起带地震反射特征显示出 构造脊中部继承性高地貌分隔南北物源.而东西向地 震反射、钻井以及取芯岩性组成特征揭示构造脊东西 两侧沉积期呈现东低西高,东侧输砂的特征.基于以 上两点认识与三维地震资料对中央构造脊沙河街组 沉积期古地貌进行恢复,在此基础上,通过井震标定, 岩心约束对构造脊沉积体进行刻画(图6).来自于南 北物源体系的砂体在构造脊中部汇集,形成与东西两 侧典型箕状断陷近源砂体尖灭于深陷湖盆的最大差 异性.沙河街组沉积期,中央构造脊整体呈现水下高 地貌,导致沉积砂体厚度相对较小.但构造脊南北高 差变化小,深陷带不发育,湖水浅,对砂体水下搬运阻 力小,来自南北物源砂体延伸范围广,全脊均有砂体 发育,形成构造脊独特地貌特征下砂体薄,规模大,南 北交互的沉积特点(图6).

然而, 脊内构造演化与地貌格局的差异性造成构 造脊内部砂体展布与储层物性的非均质性.基于关键 认识下的古地貌特征恢复显示中央隆起带向东延伸 至中央构造脊, 将中央构造脊划分为南北两大物源体 系, 北部物源体系控制下构造脊东西两侧呈现明显的 地貌差异性, 从而将中央构造脊分隔为东、西、南3个 构造单元, 分别称其为中央构造脊东脊、西脊与南脊, 3个单元呈现不同的构造演化与沉积充填特点(图 6a).



图 6 中央构造脊古地貌特征与砂体展布模式图 Fig. 6 Paleogeographic features and sandbody distribution pattern of the Central Structural Ridge

西脊在沙河街组沉积期地势相对较高,作为水下 分水脊分隔黄河口凹陷西洼与中央构造脊沙河街组 沉积体系(图 6b).因此沉积厚度小且以河道边缘泥质 与水下高部位碳酸盐岩沉积为主,砂体欠发育.东脊 沙河街组沉积期地势相对较低,位于构造脊北部物源 体系主供给通道,砂体富集,厚度大,自北向南长距离 搬运淘洗.沙河街组沉积后期至东营组沉积期,东脊 西脊沉积厚度相当,意味着地貌隆升与西脊接近.中 央隆起带持续性隆起,分隔南北物源,南部物源供给 充足,砂体富集,相关储层在C油田得以钻遇.总而言 之,中央构造脊特殊地貌背景下差异性发育远源搬运 辫状河三角洲(图 6b).

3 储层物性非均质性与构造一沉 积一成岩耦合分析

3.1 物性分布与储层非均质性

第8期

构造脊东脊、西脊与南脊沙河街组储层呈现强 非均质性.勘探实践及物性分析发现相对于东脊B 油田沙河街组优质储层发育,西脊A构造,D/E等 构造沙河街组砂薄泥厚,储层主要为薄层杂砂岩. 沉积主导下泥钙质含量高,造成相关储层物质基础 差,原生孔隙欠发育,后期成岩改造难度大,优质储 层欠发育. 黄河口中央构造脊南北高差相对小,脊内起伏 大的构造地貌特征以及远距离搬运的沉积过程使 得主物源砂体储层发育具有显著特点,长途搬运淘 洗造成位于物源远端的构造脊中部砂体结构与成 分成熟度高,泥质含量低,X衍射分析显示B、C构 造储层黏土含量在5%以内.高成熟度净砂岩成为 B/C油气田优质储层发育的基础.



图7 中央构造脊沙河街组西侧E,东侧B与南部C构造储 层物性特征

Fig. 7 Reservoir physical property of Shahejie Formation from Structure E in west part, Structure B in east part and Structure C in south part of the Central Structural Ridge



图 8 中央构造脊 B 构造沙河街组储层发育特征

Fig 8 Reservoir features of Shahejie Formation from Structure B, Central Structural Ridge

a. 粒间孔与砾内裂缝发育,铸体薄片(蓝色铸体),3365.7m,B-1井;b.A的局部放大,可见铸体充注砾内裂缝;c. 粒间孔与砾内缝发育,铸体薄片(红色铸体),3724m(斜深),A-2D井;d. 砾内裂缝发育联通粒间孔隙,电子扫描电镜背散射图像,3724.6m(斜深),B-2D井;e. 裂缝切穿局部方解石胶结物,电子扫描电镜背散射图像,3724.6m(斜深),B-2D井;f. 典型样品矿物相对成分组成,X衍射数据,B-1井,沙三段

而同样位于主力砂体通道之上,分别位于中央 隆起带南北两侧的东脊(B构造)与南脊(C构造)物 性差异明显.如图7所示,沙二段晚期厚层砂体,B 构造与C构造孔隙度均在10%~20%之间,但渗透 率差异显著,B渗透率明显高于C构造,沙三段及沙 二段早期砂体,B构造发育优质高产储层,C构造多 为致密层(图8,图9).这种储层的强非均质性与中 央构造脊的构造沉积特征关系密切.基于岩心观 察,铸体薄片,扫描电镜,阴极发光等微观储层分析 手段,对B/C构造储层发育特征进行对比分析,探 讨储层发育主控因素.

3.2 东脊(B构造)

东脊在沙河街组沉积期处于主物源通道,B构 造受北部渤南低凸起物源供给.塑性易风化产物受 长距离搬运淘洗殆尽,前寒武变质花岗岩母岩风化 剥蚀后石英长石颗粒与变质花岗岩岩屑形成B构造 沙河街组储层主要骨架颗粒(图8),高成熟度下原 生粒间孔得以充分保留(图7),形成深部储层较高 孔隙度.

东脊在沙河街组沉积后发生了构造隆升,受郯 庐断裂带右旋挤压影响,背斜特征逐渐显现(图1中 B-B'). 脆性颗粒受隆升构造活动及压实影响易产 生脆性破裂. 储层微观分析发现,较粗脆性矿物内 部发育大量砾内微裂缝(图8a~8e),且部分构造裂 缝切穿局部发育的方解石胶结物(Cal)(图7e),显 示裂缝发育于沉积后成岩期.砾内裂缝及构造裂缝 的发育,联通粒间孔,形成良好的孔渗结构(图7,图 8a~8e),使得储层渗透率相对较高,从而发育B油 田优质高产储层.



图 9 中央构造脊 C 构造沙河街组储层发育特征

Fig. 9 Reservoir development characteristics of Shahejie Formation in Central Structural Ridge C Structure a. 为C-3井单井柱状图;b. 湖相泥晶云岩岩心照片,见岩溶角砾,3 303 m,C-3井;c. 湖相云岩岩溶角砾,原岩(Dol-1),发育一期白云石胶结

(Dol-2),一期方解石胶结充填(Cal),可见残留粒间孔(P),铸体薄片,3 300 m,C-3井;d. 碳酸盐胶结砂岩,发育两期白云石胶结(Dol-1),及目一,Dol-2),一期方解石胶结充填(Cal),铸体薄片,3 297.7 m,C-3井;e. 云质胶结砂岩,扫描电镜背散射图像,3 510 m,C-5井;f. 云质胶结砂岩,阴极发光,首期白云石发亮橘黄色,次期发暗橘黄色光,3 510 m,C-5井



图 10 中央构造脊南北物源体系与储层改造示意图 Fig. 10 Schematic diagrams of the north-south provenance system and reservoir reformation in the Central Structural Ridge

3.3 南脊(C构造)

C构造以西南部垦东凸起物源供给为主,在沙 河街组沉积期南部物源长距离搬运,经过充分搬运 淘洗,在中央隆起带以南沉积了高成熟度中砂岩, 以辫状河三角洲前缘亚相为主,粒度相对较细,磨 圆分选好,以粒间孔为主要孔隙类型(图9). 而靠近 中央隆起带,受继承性隆起影响,沉积湖相碳酸盐 岩及陆源碎屑混积岩.前人研究认为湖相云岩及混 积岩发育受古构造、古地貌、古气候、陆源碎屑供给 以及湖平面等多因素联合控制(叶子倩等,2020). 中央构造脊内部多微型起伏,最为典型的为构造脊 中部的持续高地,作为中央隆起带向东部构造脊方 向的延伸,具备湖相云岩发育的构造地貌条件,且 构造脊中部南北物源交汇,受物源供给强度变化影 响大,低陆源供给期间,温暖气候条件下具备沉积 湖相云岩条件.且较高的地貌与构造脊浅水条件使 得微型高地对湖平面变化更加敏感,呈现周期性没 于水面沉积碳酸盐岩及出露水面遭受淡水淋滤特 点.这种特点得到C构造钻井的证实.最为临近中 央隆起的B-3井钻遇湖相白云岩夹层(图8a),揭示 沉积期水下高地特征(薛永安等,2020;叶子倩等, 2020).

基于距离中央隆起带较近的C-3井取芯标定的 测井特征显示云岩段呈现低自然伽马及显著的深、 浅侧向电阻率正向尖峰与自然电位低值(图9).基 于此,依据测井特征与岩屑录井资料在单井柱状图 中沙河街组识别出3期典型云岩发育段,其周缘砂 岩均为致密层(图9a).该井取芯段显示湖相云岩发 育周期性岩溶角砾层段(图9b),指示周期性水下沉 积碳酸盐岩与水面暴露淋滤.湖相云岩的沉积与淋 滤与构造脊内部浅水高地的周期性没于水下与暴 露水面相匹配.微观储层发现,泥晶云岩与邻近砂 岩均发育3期云钙质沉淀,首期云质为泥晶云岩,为 准同生期形成,陆源碎屑供给较弱时直接沉淀(图 9c),陆源净砂岩供给较强时附着于陆源碎屑颗粒表 面形成泥晶套(图9d,9e,9f);第二期云质胶结物呈 枳壳状包裹颗粒,晶型较为完整,指示地表暴露淋 滤后沉淀特征;第三期为方解石胶结物,充填粒间 孔隙,是储层致密的主要原因.基于宏观构造地貌 特征与微观储层特征认为,构造脊中部继承性高地 貌湖相云岩的水下沉积与水上暴露淋滤形成富 Ca²⁺、Mg²⁺流体,渗流进入附近的保留大量原生粒 间孔隙的净砂岩,造成临近砂体多期碳酸盐胶结与 充填(图 9c~9f,图 10),从而降低了储层物性,是C 储层物性相对较差的重要原因.

总而言之,中央构造脊储层发育非均质性受特殊背景下构造一沉积与成岩过程的综合影响.沉积 期差异古地貌背景下不同沉积作用决定性影响了 构造脊北部东西两侧储层发育差异性.构造脊南北 低高差、水体浅,远距离搬运的构造沉积条件决定 了中部净砂岩的沉积物质基础,而构造脊内隆起微 地貌及差异演化控制了东脊的裂缝发育与南脊的 致密胶结成岩作用(图10).

4 结论

(1)三维地震与岩矿资料分析显示沙河街组沉 积时期中央构造脊中部B构造砂体属北部物源体 系,C构造属南部物源体系,来自南北物源砂体在构 造脊中部聚集.揭示与典型箕状断陷近源砂体尖灭 于深陷带不同,中央构造脊整体古地貌较高,湖水 浅,对砂体水下搬运阻力小;南北高差变化小,深陷 带不发育,来自南北物源砂体搬运距离远,并在构 造脊中部汇聚,全脊砂体发育,形成构造脊独特地 貌特征下砂体薄,规模大,南北连片的特点.

(2)中央构造脊东脊沙河街组沉积期位于低部 位,砂体主通道,南北搬运距离远,储层成熟度高, 原生物质基础好;后期构造隆升诱导构造裂缝发 育,提高渗透性,改造条件好,成为优质储层发育重 要因素;中央构造脊内部地貌起伏多,中部继承性 微隆起交替出露与没入水下,导致泥晶云岩周期性 沉积与淋滤,相关流体产物造成南脊C构造砂体碳 酸盐胶结强,储层物性相对较差.

References

- Cui, J.W., Yuan, X.J., Wu, S.T., et al., 2021. Rock Types and Reservoir Characteristics of Shahejie Formation Marl in Shulu Sag, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Science*, 32(4): 986-997. https://doi.org/ 10.1007/s12583-020-1092-5
- Dickinson, W. R., 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol, 63(12): 2164-2182. https://doi.org/10.1306/2f9188fb-16ce-11d7 -8645000102c1865d
- Folk, R. L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, 170.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, 184.
- He, J., Wang, H., Eduardo, G., 2020. Petrographic Analysis and Classification of Sand and Sandstone. *Earth Science*, 45(6):2186-2198(in Chinese with English abstract).
- Jin, L., Wang, G., Song, W., et al., 2018. Review of Diagenetic Facies in Tight Sandstones: Diagenesis, Diagenetic Minerals, and Prediction Via Well Logs. *Earth-Science Reviews*, 185:234-258.
- Kang, N. C., Cao, Y. Z., Zhang, X. Q., et al., 2013. Stand-by Exploration Field of Rift Basin: Deep Sag Belt. *China Petroleum Exploration*, 18(1): 29-34(in Chinese with

English abstract).

- Kordi, M., Turner, B., Salem, A. M. K., 2011. Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy in Fluvial and Shallow Marine Sandstones: Evidence from the Cambrian-Ordovician Lower Sandstone Unit in Southwestern Sinai, Egypt. Marine and Petroleum Geology, 28(8): 1554– 1571. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.05.003
- Li, P. L., Zhai, Q. L., Rong, Q. H., et al., 2000. Migration and Accumulation of Hydrocarbons in the Central Anticline Belt of Dongying Depression, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4):64-66(in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Tian, L.X., Zhou, X.H., et al., 2017. Slope Break Systems of Rift Lacustrine Basin and Erosion Depositional Response: A Case Study of the Paleogene in Huanghekou Sag, Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4):28-38(in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, H.T., Du, X.F., et al., 2020. Development and Hotspots of Sedimentary Response of Glutenite in the Offshore Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 45(5): 1676– 1705(in Chinese with English abstract).
- Ozkan, A., Cumella, S. P., Milliken, K. L., et al., 2011. Prediction of Lithofacies and Reservoir Quality Using Well Logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek Field, Piceance Basin, Colorado. AAPG Bulletin, 95(10): 1699-1723. https://doi.org/10.1306/ 01191109143
- Pang, X.J., Niu, C.M., Du, X.F., et al., 2020. Differences and Genesis of High-Quality Reservoirs of Mixed Siliciclastic Carbonate Rocks in the Es12 around Bozhong Depression, Bohai Sea. *Earth Science*, 45(10): 3853-3869(in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., Zhou, X. H., Deng, R. J., et al., 2008. Structural Characteristics of the Tan-Lu Fault Zone in Cenozoic Basins Offshore the Bohai Sea. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(S2): 20-31(in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., Zhou, X. H., Wang, Q. S., 2010. Structural Model and Cenozoic Kinematics of Tan-Lu Deep Fracture Zone in Bohai Sea Area. *Geology in China*, 37(5):1231-1242(in Chinese with English abstract).
- Ramm, M., 2000. Reservoir Quality and its Relationship to Facies and Provenance in Middle to Upper Jurassic Sequences, Northeastern North Sea. *Clay Minerals*, 35(1): 77-94. https://doi.org/10.1180/000985500546747
- Tong, X. G., 1984. On the Petroleum Geological Features of Tertiary Half-Graben in Eastern China. Oil & Gas Geology, (3):218-227(in Chinese with English abstract).

- Wen, H. L., Deng, H., Li, Z. Y., et al., 2017. Quantitative Evaluation of Control Effect of Faults on Hydrocarbon Accumulation in the Minghuazhen Formation, Bohai Sea: a Case Study of Central Structural Ridg in Huanghekou Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 24(4): 36-42(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. H., Yang, X. H., Mei, L. F., 2020. Reservoir Characteristics and Main Control Factors of Conglomerate Reservoir of El₃ in the Northwest Steep Slope Zone of Weixinan Depression. *Earth Science*, 4(5):1706-1721(in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Yang, H. F., Xu, C. G., 2016. Differential Reservoir Control and Hydrocarbon Accumulation Rule in the Slope Belt in the Yellow River Estuary Depression in Bohai Sea. *China Petroleum Exploration*, 21(4):65-74(in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.A., Pang, X.J., Hao, Y. W., et al., 2020. Genesis of High-Quality Mixed Rock Reservoir and Its Exploration Significance in Es1around Southeast Margin of Qinnan Sag, Bohai Sea. *Earth Science*, 45(10): 3527-3542 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Z. Q., Zhu, H. T., Du, X. F., et al., 2020. Sedimentary Characteristics and Model of Mixed Siliciclastic-Carbonates of Member 1 of Paleogene Shahejie Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 4(5):1706– 1721(in Chinese with English abstract).
- Yi, S. W., Li, M. P., Xu, S. J., et al., 2020. Accumulation Condition and Model of Buried Hill in the Central Uplift, Songliao Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 6(3): 121–135(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Li, W., Wu, Z. P., et al., 2017. Structural Characteristics of Tan-Lu Fault Zone in South Area of Bohai Sea and Its Control on Basin Structure. *Earth Science*, 42 (9):1549-1564(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Zhu, X. M., Chen, H. Q., 2014. Slope-Break Types and Sequence Stratigraphic Styles of the Oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea. Oil & Gas Geology, 35(4):473-479(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. L., Zhu, X. M., Liao, F. Y., et al., 2021. Features and Control Factors of Gentle-Sloped Fluvial Sand Bodies in Rift Basins: An example from the Wen'an Slope, Baxian Sag. *Earth Science Frontiers*, 28(1):141-154(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Zhou, J., Wu, X. W., 2006. Oil and Gas Migration Periods and Accumulation Process in Central Anticlinal Zone in the Xihu Sag, the East China Sea Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 1: 30-33+37(in

Chinese with English abstract).

- Zhao, H.G., Liu, C.Y., 2003. Approaches and Prospects of Provenance Analysis. Acta Sedimentologica Sinica, 21 (3): 409-415(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Pu, X. G., Wang, J. H., 2017. Sand and Reservoir Controlling Mechanism and Exploration Discovery in the Gentle Slope of Fault Basin: a Case Study of Qibei Slope in Qikou Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 38(7):729-739 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. G., Huang, X. B., Ma, Z.W., 2020. Development Characteristics and Geological Significance of Recessive Thrust Provenance: A Case Study in Laibei Low Uplift of Bohai Sea. Journal of Xi'an University of petroleum: Natural Science Edition, 4:26-29(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhang, X. T., Niu, C. M., 2019. Growth of Strike-Slip Zone in the Southern Bohai Bay Basin and Its Significances for Hydrocarbon. *Oil & Gas Geology*, (2), 215-222(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Ji, Y. L., Zhang, S. W., et al., 2016. Controls on Reservoir Quality of Lower Cretaceous Tight Sandstones in the Laiyang Sag, Jiaolai Basin, Eastern China: Integrated Sedimentologic, Diagenetic and Microfracturing Data. *Marine and Petroleum Geology*, 76(Suppl. 1): 26– 50. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.019

附中文参考文献

- 何杰, 王华, Eduardo, G., 2020. 砂岩(砂)的岩相分析和分类标 准. 地球科学, 45(6):2186-2198.
- 康南昌,曹永忠,张秀颀,等,2013.断陷盆地的后备勘探领域 ——深陷带.中国石油勘探,18(1):29-34.
- 李丕龙,翟庆龙,荣启宏,等,2000.东营凹陷中央背斜带油气 运移聚集特征.石油勘探与开发,(4):64-66+113-121.
- 刘豪,田立新,周心怀,等,2017.断陷湖盆坡折体系与剥蚀沉 积响应——以黄河口凹陷古近系为例.中国海上油气, (4):28-38.
- 刘强虎,朱红涛,杜晓峰,等,2020. 渤海海域砂砾岩体沉积响 应进展及热点. 地球科学,45(5):1676-1705.
- 庞小军,王清斌,冯冲,等,2021. 渤海海域黄河口凹陷北缘沙 河街组优质储层差异及成因. 沉积学报,39(3):751-766.
- 漆家福,邓荣敬,周心怀,等,2008.渤海海域新生代盆地中的 郯庐断裂带构造.中国科学(D辑:地球科学),(S1):19-29.
- 漆家福,周心怀,王谦身,2010. 渤海海域中郯庐深断裂带的 结构模型及新生代运动学.中国地质,(5):1231-1242.
- 童晓光, 1984. 中国东部第三纪箕状断陷斜坡带的石油地质特征. 石油与天然气地质, (3):218-227.
- 温宏雷,邓辉,李正宇,等,2017. 渤海海域新近系明化镇组断 裂控藏作用定量评价——以黄河口凹陷中央构造脊为例.

油气地质与采收率, 24(4):36-42.

- 薛永安,杨海风,徐长贵,2016. 渤海海域黄河口凹陷斜坡带 差异控藏作用及油气富集规律.中国石油勘探,21(4): 65-74.
- 薛永安, 庞小军, 郝轶伟, 等, 2020. 渤海海域秦南凹陷东南缘 沙一段混积岩优质储层成因及勘探意义. 地球科学, 45 (10):3527-3542.
- 徐燕红,杨香华,梅廉夫,2020. 涠西南凹陷西北陡坡带流三 段砂砾岩储层特征与主控因素.地球科学,45(5):1706-1721.
- 叶子倩,朱红涛,杜晓峰,等,2020. 渤海湾盆地黄河口凹陷古 近系沙一段混积岩发育特征及沉积模式.地球科学,45 (10):3731-3745.
- 易士威,李明鹏,徐淑娟,等,2020.松辽盆地中央隆起潜山成 藏条件及模式.天然气地球科学,31(12):1663-1676.
- 赵红格, 刘池洋, 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3):409-415.
- 张婧,李伟,吴智平,李春锐,等,2017. 郯庐断裂带渤南段构

造特征及其控盆作用.地球科学,42(9):1549-1564.

- 周晓光,黄晓波,马正武,等,2020. 渤海海域莱北低凸起隐性 "逆冲物源"发育特征及地质意义. 西安石油大学学报:自 然科学版,(4):26-29.
- 周心怀,张新涛,牛成民,等,2019. 渤海湾盆地南部走滑构造 带发育特征及其控油气作用.石油与天然气地质,(2): 215-222.
- 赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 等, 2017. 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. 石油 学报, 38(7):729-739.
- 张亚雄,朱筱敏,陈欢庆,等,2014.琼东南盆地渐新统陵水组 坡折带类型及层序地层样式.石油与天然气地质,35(4): 473-479.
- 张自力,朱筱敏,廖凤英,等,2021.断陷盆地缓坡带河流沉积 砂体定量表征及控制因素分析:以霸县凹陷文安斜坡东 营组三段为例.地学前缘,28(1):141-154.
- 张忠民,周瑾,邬兴威,2006.东海盆地西湖凹陷中央背斜带 油气运移期次及成藏.石油实验地质,(1):30-33+37.