王新宙, 兰晓东, 刘豪, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷中洼断裂生长及其对新近系油气富集的控制作用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 73-81.

WANG Xinzhou, LAN Xiaodong, LIU Hao, et al. Faults development controlled the Neogene hydrocarbon accumulation in the mid-Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 73-81.

## 渤海湾盆地黄河口凹陷中洼断裂生长及其对新近系 油气富集的控制作用

王新宙<sup>1</sup>, 兰晓东<sup>1</sup>, 刘豪<sup>1</sup>, 杜晓峰<sup>2</sup>, 王清斌<sup>2</sup>

(1中国地质大学(北京)海洋学院,北京100083;2中国海洋石油(中国)有限公司天津分公司,天津300452)

摘 要:黄河口凹陷是渤海海域重要的富烃凹陷,区域主要的烃源岩沙三段在明化镇组沉积 时期开始大规模生排烃,此时研究区内断裂发育,活动强度较高,因此,断裂有效性分析是确 定区域油气输导体系、判断油气输导运移成藏的重要研究内容。通过三维地震数据及钻井分 析,对黄河口凹陷中洼断裂分布、活动性及生长演化进行了系统的分析,结合区域烃源岩分布 及钻井油气分布特征,总结断裂对新近系油气富集的控制作用。研究表明,黄河口凹陷中洼 断裂活动生长具有"先变弱再变强"的特征——从沙河街组沉积时期到馆陶组沉积时期断裂 活动强度逐渐减弱,断裂活动区域逐渐缩小;明化镇组沉积时,中洼断裂活动增强,区域内断 裂全面活跃。研究区早期断裂多以长度短、断距小为特征;晚期洼陷中心联结组合形成大型 断裂,油源断裂沟通源储,大部分油气沿着断裂运移至浅层馆陶及明化镇组砂体中,再向两侧 砂体构造高部位运移,而南部缓坡带和北部陡坡带因为断裂活动速率不同而具有不同的油气 聚集特征;南部缓坡带断裂晚期活动速率不高,能够对油气进行有效封堵,自深凹而来的油气 沿着砂体构造脊在缓坡带馆陶及明化镇组砂体中聚集成藏;而北部陡坡带晚期断裂活动速率 高,油气在断裂附近合适的明化镇组浅层圈闭中成藏。

关键词:断裂生长;新近系;油气;成藏控制;黄河口凹陷中洼
 中图分类号:P744.4
 文献标识码:A
 DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.265

## 0 引言

断裂在油气的生成、运移、聚集过程中都起到 了重要的作用<sup>[1]</sup>。烃源岩在形成过程中基底大断裂 控制了烃源岩的发育和展布<sup>[2]</sup>, 郯庐断裂走滑活动 可控制生烃凹陷的形成、促进烃源岩演化和油气运 移<sup>[3-4]</sup>。断裂对油气的运移具有两面性, 在活动期对 油气起运移输导作用, 在停止活动期对油气期封闭 遮挡作用, 并且在活动期和封闭期同一条断裂的不 同部位对油气的输导作用也存在差异<sup>[5]</sup>, 而断裂带

**作者简介:**王新宙(1997-),男,硕士,主要从事海洋油气地质方面的研究 工作.E-mail:wangxinzhou727@163.com 的内部结构特征、活动强度、岩性特征和发育阶段 都是断裂输导封堵的影响因素<sup>[6]</sup>。断裂生长会对同 生盆地发育及沉积物分布产生重大影响,一般反映 在不同时期断裂沿走向的位移、几何形状、活动速 率的变化。断裂生长过程是通过断距和长度来增 长来实现的,生长模式可分为孤立生长和合并2种, 一般大型断裂通常是由较小断层段的生长和连接 形成的<sup>[7-9]</sup>。断面形态、断裂活动强度及差异系数 影响油气富集程度<sup>[10-13]</sup>,油气成藏期断裂的活动速 率越大垂向输导油气的能力越强<sup>[14-16]</sup>,同一断裂不 同部位活动速率强的断裂对油气主要起输导作用, 活动速率中等的断裂对油气起输导和封闭作用,活 动性差的断裂主要起封闭作用<sup>[17-19]</sup>。

黄河口凹陷是一个富烃凹陷,截至目前相继发现了渤中29、渤中35-2、渤中34-9、垦利6-1等大型油田。前人从构造-断裂-层序三者间的关系入手

收稿日期: 2021-10-13

**资助项目:** 中央高校基本科研业务费项目"渤海湾盆地黄河口凹陷及周 边新近系油气运移成藏特征及富集规律"(35842019026)

对油气的富集层位和聚集程度进行了分析<sup>[20-21]</sup>,结 合断裂在垂向和平面上与储层的耦合关系分析了 黄河口凹陷的油藏成因<sup>[22]</sup>,总结黄河口凹陷具有近 源成藏和晚期充注的油气成藏特征<sup>[23-27]</sup>,并在一定 程度上探讨了断裂活动对不同构造带油气成藏的 影响<sup>[28-30]</sup>。但前人侧重于从宏观尺度上讨论断裂 活动与油气成藏的关系,忽略了断裂生长演化及自 身局部差异对成藏的影响。本文利用三维地震及 钻井数据,针对黄河口凹陷中挂断裂开展活动速率、 生长演化及断裂控藏分析,总结断裂对新近系油气 富集的控制作用,为区域下一步油气勘探提供理论 依据。

### 1 区域地质概况

黄河口凹陷位于渤海湾盆地的东南部、济阳坳 陷的东北部,面积约为3300 km<sup>2</sup>。其北侧为渤南低 凸起,东南侧为莱北低凸起,南侧为垦东--青坨子凸

起,东接庙西凹陷,西邻埕北凹陷和沾化凹陷,总体 构造面貌表现为北陡南缓、北断南超的箕状凹陷<sup>[31]</sup>。 中洼以 NNE 走向的走滑断裂为界与中央隆起带相 邻、南北以断裂为界与渤南低凸起和莱北低凸起相 邻,为研究方便将研究区从北到南依次划分为北部 陡坡带、洼陷中心及南部缓坡带 3 个次一级构造单 元(图1)。钻井钻遇的地层自基底自下而上主要发 育有古近系孔店组 Ek、沙河街组 Es、东营组 Ed,新 近系馆陶组 Ng、明化镇组 Nm 以及第四系平原组 Qp。区域在沙河街组和东营组发育多套烃源岩<sup>[32]</sup>, 古近系以来发育多套盖层,区域盖层有3套,分别 为明化镇组中下段、馆陶组顶部以及东营组二段中 下部。而油气储层有多套,包括古近系沙河街组、 东营组三段和东营组二段及新近系馆陶组和明化 镇组下段<sup>[33]</sup>。垂向上组成了多套生储盖组合,其中 沙河街组和东营组为河流三角洲、扇三角洲相和浅 湖相砂岩储层,明化镇组为浅水三角洲相砂岩储 层<sup>[18]</sup>。



Fig.1 Structure and assemblage of source, reservoir, and cap in the Mid-Huanghekou Sag

## 2 断裂刻画

范围、贯穿深度、长度、规模越大,根据活动时间和 活动强度将断裂分为一级断裂、二级断裂、三级断 裂(图 2)。一级断裂:从古近纪初期开始活动,在整

长度、规模等,活动时间和活动强度越大断裂控制

断裂的特征主要包括其控制范围、贯穿深度、

个凹陷发育过程中活动性强,一般是研究区边界控 凹大断裂,控制着凹陷的形成发育,其规模和断距 大、延伸性连续性好,贯穿古近系和新近系地层是 沟通烃源岩和浅层砂体的油源断裂,为深层油气向 浅层运移提供了良好的输导通道。二级断裂:从古 近纪初期开始活动,止于新近纪或第四纪,相对于 一级断裂的活动性较弱,活动速率较小、规模和断 距较小,但也沟通深部烃源岩是油气垂向运移的有 利通道,主要发育在洼陷内部。三级断裂主要形成 于新构造运动时期,贯穿层位浅、延伸性差、规模小、 数量多,是走滑断裂或一级断裂的次生断裂。

黄河口凹陷中洼受中生代末期燕山运动和始 新世-渐新世喜马拉雅运动作用形成 NNE-NE 向 平行叠雁列式断裂和 NEE-近 EW 向断裂,新构造 活动期在近 SN 拉张作用下近 EW 向断裂再次活动, 并形成新的走滑断裂派生 EW 向断裂, EW 向断裂 控制着凹陷的格局,使其呈现"南断北超"的箕状结构<sup>[34]</sup>。从剖面上来看研究区断裂形态主要包括铲 式正断裂、阶梯式、地垒式、简单"Y"字型、卷心菜 型(复杂"Y"字型)。阶梯式断裂(如 H6、H2-1 与 H3-1)组合在拉张应力的作用下形成多条倾向相同、 近似平行排列的正断裂,形成阶梯状组合;地垒式 组合(如 W1-1 与 W5)是由于拉张作用由 2 组或 2 条倾向相反的正断裂形成中间地层高、两边地层低 的地垒状;简单"Y"字型(如 D1-1 与 D2)是由主干 断裂与倾向相反的次一级断裂在深部交接而成,主 要发育在主干断裂下降盘一侧;卷心菜型结构(如 H1-6、H2-4 与 H5)是由 2 条或 2 组倾向相反的简单 "Y"字型交叉组合而成,发育良好的构造圈闭<sup>[34]</sup>。



图 2 黄河口凹陷中洼馆陶组断裂级别划分图 Fig.2 Fault classification in the Guantao Formation of mid-Huanghekou Sag

## 3 断裂活动性与生长演化

#### 3.1 研究方法

目前,计算断裂活动性的方法主要有生长指数 法、古落差法、断裂活动速率法<sup>[35]</sup>。生长指数法是 指断裂上盘厚度与断裂下盘厚度的比值,如果地层 受到剥蚀,剥蚀后的地层厚度与剥蚀前的地层厚度 不等,因此,不能代表当时的断裂活动强度。古落 差法是指在某一地质时期断裂上盘与下盘的厚度 差,但不同地质时期沉积时间不同,因而古落差法 不能很好地反应不同地质时期断裂活动强度的变化。断裂活动速率法是指在某一沉积时期特定地层的古落差与相应沉积时间的比值,在古落差的基础上引入了时间的概念,因此,断裂活动速率法能够准确地反应出在某一地质时期特定地层的活动强度<sup>[35]</sup>。

本文挑选了黄河口凹陷中洼规模较大的26条 断裂,测线间隔为256m,统计每条测线各地层反射 层的时间,利用时深转换关系式来进行时深转换, 计算出不同沉积时期的断裂活动速率(图3)。总 体上,黄河口凹陷中洼断裂活动体现出"先变弱再 变强"的特征,沙河街组沉积时期中洼断裂活动速



Y=0.000 098 X<sup>2</sup> + 1.086 953 X - 117.695 529, 其中, X 为地层反射时间(单位: ms), Y 为地层深度(单位: m)。

图 3 黄河口凹陷断裂活动速率

Fig.3 Activity rates of the faults in the Mid-Huanghekou sag

率最高,东营组沉积时期断裂活动速率变低,至馆 陶组沉积时期活动速率最低,而明化镇组沉积时期 断裂再次全面活跃,活动速率仅次于沙河街组。

#### 3.2 断裂生长

ROTEVATNA 将断裂的生长模式归纳为 2 类<sup>[7]</sup>:①断裂长度与断距一起增长;②先急速增长 到一定长度,断距小幅增长,后来长度基本保持不 变,只增加断距。根据中洼断裂活动速率的统计 (图 3),黄河口凹陷中洼各构造单元断裂的生长模 式,除 D1-2 断裂之外,各断裂生长均属于第 1 种 (图 4)。

北部陡坡带主要断裂为 D1-1、D1-2和 D2。 断裂 D1-1形成于沙河街组沉积时期,长度约为现 今的 1/4 (图 4a),在东营组沉积时期逐渐向西部 扩展生长(图 4b),馆陶组沉积时期在其西部形成 小型断裂(图 4c),而在明化镇组沉积时期二者进 一步生长,最终合并成现在的形态(图 4d)。D1-2 断裂形成于沙河街组沉积时期,由于活动强烈便 形成了接近现今的长度,虽然之后依旧活跃,但是 长度基本不变,只是断距增加。D2 断裂形成于馆 陶组沉积时期,长度约为现今的 1/5,主要生长于 明化镇组沉积时期,向西扩展而形成现今形态。 总观其他断裂的生长模式,北部陡坡带断裂在构 造演化过程中均是由东部向西部中央隆起带扩展 生长。

洼陷中心主要断裂为 W1-1、W1-2、W2-1、

W2-2、W2-3,生长规律类似。W1-1断裂形成于沙 河街组沉积时期,在东部形成约现今1/5长度的断 裂,其西部也形成1个小型断裂(图4a);东营组沉 积时期东部断裂向西生长至约现今总长1/2,西部 形成第2个小型断裂(图4b),馆陶组沉积时期东部 断裂继续向西部生长,第1次与小型断裂相交合并, 长度约现今总长的2/3,西部形成新的小型断裂 (图4c);明化镇组沉积时期东部断裂进一步向东扩 展生长,合并了全部的西部小型断裂,形成了现在 的形态(图4d)。总观其他断裂的生长模式,北部陡 坡带断裂在构造演化过程中均是由东部向西部 (中央隆起带)扩展生长。

南部缓坡带主要为 H1、H2、H3 的系列断裂。 H2 断裂形成于沙河街组沉积时期,第一个时期就 形成了一系列的小型断裂(图 4a),到东营组沉积时 期,除断裂进一步增加长度和断距外,断裂开始合 并(图 4b)。馆陶组沉积时期,断裂基本停止生长 (图 4c)。明化镇组沉积时期,断裂重新开始活跃, H2-2 断裂形成,整体长度和断距进一步增加(图 4d)。 H1 断裂中,东部与 H2 较近的位置处(H1-4、H1-5、 H1-6)与 H2 断裂发育情况基本相同。断裂西部 (H1-1、H1-2、H1-3)从馆陶组沉积时期开始形成, 主要生长时间在明化镇组沉积时期。H3 断裂发育 情况基本与 H2 相同。H1、H2、H3 断裂整体上都 是先随时间从东向西扩展的。

尽管不同时期不同区域的断裂活动速率差距 较大,但是中挂各单元各断裂活动速率变化规律相



(a) 沙河街组沉积时期断裂及构造高地分布;(b) 东营组沉积时期断裂及构造高地分布;(c) 馆陶组沉积时期断裂及构造高地分布;
 (d) 明化镇组沉积时期断裂及构造高地分布;(e)四期构造高地叠加;(f) 断裂生长预测

图 4 黄河口凹陷中洼断裂生长及洼陷演化



近。整体上,从沙河街组沉积时期到明化镇组沉积 时期,黄河口凹陷中洼断裂均是由东向西扩展生长, 这个过程可能与太平洋板块 NWW 向俯冲由东向 西逐渐影响研究区相关<sup>[36]</sup>。沙河街组到东营组沉 积时期,太平洋板块俯冲方向由 NNW 向转换为 NWW 向,又因印度洋次大陆与欧亚板块的强烈碰 撞,导致郯庐断裂转变为右旋走滑<sup>[36]</sup>,地幔上涌导 致 NW 向拉张作用强烈,黄河口中洼裂陷发育大量 断裂<sup>[37]</sup>。东营组沉积之后渤海湾盆地受板块运动 影响发生抬升剥蚀,研究区由断陷阶段进入拗陷阶 段<sup>[37]</sup>。裂陷活动强度明显下降,断裂活动速率大幅 下降。明化镇下段沉积时期与馆陶组沉积时期同 属裂后热沉降阶段,断裂变化小<sup>[36]</sup>。而明化镇组上 段以来的新构造运动是断裂再活动期,全区域活动 速率均较高。更多小断裂相互合并,最终形成明化 镇沉积末期的断裂形态特征(图 4 d)。明化镇组沉 积时期结束后,随着构造运动的继续进行,断裂将 持续活动继续生长,延断裂两端继续增加长度,最 终会与其生长方向上的断裂之间相交发生合并,形 成陡坡带断裂 D1、D2, 洼陷中心断裂 W1、W2、W3、 W13、W14 和缓坡断裂带 H1、H2、H3 的断裂分布 样式 (图 4 f)。

#### 3.3 断裂活动期次

同时期断裂两侧沉积厚度差异越大,表该期同 沉积断裂活动速率越大,裂陷作用越强。通过同时 期断裂活动性的比较,可以判断古地貌的相对高低。 从断裂平均活动速率柱状图(图 5)可知,沙河街组 沉积时期研究区内断裂平均活动速率达到 12.11 m/Ma,在4个时期中断裂活动最强,此时北部陡坡 带活动速率最大,断裂平均活动速率为 26.56 m/Ma, 南部缓坡带断裂活动速率(平均11.04 m/Ma)大于 洼陷中心断裂活动速率(平均 9.43 m/Ma),此时中 洼沉积主要受 D1 和 H2 断裂控制:东营组沉积时 期研究区内断裂平均活动速率达到 5.85 m/Ma, 此 时北部陡坡带活动速率最大,平均活动速率为 23.32 m/Ma, 其次是南部缓坡带(平均 5.36 m/Ma), 而洼陷中心断裂活动速率平均值仅为 2.27 m/Ma, 此时中洼沉积主要也受 D1 和 H2 断裂控制; 馆陶组 沉积时期研究区内断裂平均活动速率仅 1.71 m/Ma, 在4个时期中断裂活动最弱,此时北部陡坡带活动 速率最大(平均 7.75 m/Ma),而洼陷中心断裂活动 速率(平均1.56 m/Ma)大于南部缓坡带(平均 0.59 m/Ma), 中洼沉积主要受 D1 和 W1 断裂控制;

77

明化镇组沉积时期断裂平均活动速率略高于东营 组活动时期,达到 6.21 m/Ma,此时北部陡坡带活动 速率最大,平均活动速率为 13.49 m/Ma, 洼陷中心 断裂活动速率(平均 6.76 m/Ma)略大于南部缓坡带 (平均 4.46 m/Ma),此时中洼沉积主要受 D1 和 H3 断裂控制。



Fig.5 Histogram of the average fault activity rate in the Mid-Huanghekou Sag

总体而言,北部陡坡带始终是中洼断裂活动最强的区域,北部断陷边界始终是 D1 断裂。而南部边界在不同的时期是变化的,在沙河街组和东营组沉积时期南部缓坡带断裂活动强度始终强于洼陷中心,控凹边界是最活跃的 H2 断裂;馆陶组沉积时期断裂活动明显减弱,断陷区域缩小,南部缓坡带断裂活动强度低于洼陷中心,控凹边界变为洼陷中心最为活跃的 W1 断裂;明化镇组沉积时期,断裂活动再次全面活跃,断陷区域也进一步扩大,南部控凹边界变为断裂 H3。结合南北控凹断裂位置确定4个时期的构造高地(图4e),反映出黄河口凹陷中洼从沙河街时期到明化镇时期的断陷演化过程。

## 4 断裂对油气富集的影响

#### 4.1 断裂活动期与油气充注

中洼生排烃史研究表明<sup>[16]</sup>,在馆陶组沉积末期 (12.0 Ma BP)仅沙三段底部进入排烃门限开始排烃, 明下段沉积末期(5.2 Ma BP)以来沙三段烃源岩全 部进入生烃门限,所以研究区域的烃源岩大规模的 排烃是在明下段沉积末期开始。明化镇组沉积时 期断裂的活动对油气运移具有重大影响,而此时中 洼陡坡带(平均 13.49 m/Ma)和洼陷中心断裂活动 速率(平均 6.76 m/Ma)较大,活跃的断裂正好成为 洼陷中心烃源岩排烃运移的良好通道,为中洼油气 大面积成藏提供了优质的输导体系。

#### 4.2 断裂活动性与油气运移

断裂活动过程中,会在沿断裂处产生裂缝,可 以形成垂向的油气运移通道。但泥岩具有比砂岩 更强的排替压力,当泥岩厚度相对断裂过厚时,断 裂也可阻止油气在垂向的运移,在此情况下认为断 裂对油气运移只要起到侧向运移的作用。断裂在 停止活动时期,断裂带内往往会由于泥岩涂抹、碎 裂作用、矿物沉淀及沥青侵入作用形成非渗透性物 质阻止油气运移。在这种情况下断裂在垂向上和 侧向上都会对油气起到封闭作用。所以只有在断 裂活跃时期,断裂才能成为油气垂直运移的通道。

前人关于环渤中地区新构造运动期断裂活动 与油气成藏关系的研究认为,断裂活动速率<25 m/Ma时,有利于油气存储,>25 m/Ma时,主要起 垂直输导作用,不利于油气的聚集和保存<sup>[12,15]</sup>。在 基于渤海海域新构造运动期断层活动强度与油气 分布之间的统计规律中发现,活动速率>10 m/Ma 的断层垂向主要起输导油气的作用,<10 m/Ma 的 断层主要起封闭油气的作用<sup>[38]</sup>。由此可知,当断裂 活动速率大于某数值时,对油气主要起输导作用, 反之起封闭作用,且不同区域起输导作用的最低断 裂活动速率也是不同的。研究区油气分布在南部 缓坡带和北部陡坡带,本文统计归纳北部陡坡带 11 口以及南部缓坡带 14 口钻井数据中明化镇下段 油气柱高度与对应断裂活动速率的关系后得到图 6, 基本覆盖了主要的油气储存区。可以看出当断裂 活动速率>5.6 m/Ma时,明化镇下段才有油气存在, 说明当断裂活动速率大于这个数值,断裂才对油气 有足够的垂直运移能力,能让油气能够运移到明化 镇下的储层中。相反,活动速率<5.6 m/Ma的断裂 则对油气主要是封堵作用。

结合断裂平均活动速率(图 5),明化镇组沉积 时期,洼陷中心断裂较为活跃,平均活动速率达到 6.76 m/Ma(>5.6 m/Ma),断裂都具备了油气垂直运 移能力,沟通烃源岩的断裂输送油气到达上覆各套 地层中,再通过储层砂体向高部位运移聚集。大部 分油气运移至浅层拥有良好盖层的馆陶组和明化 镇砂体中,在2套区域性盖层的封盖下聚集形成油 气藏。明化镇下段为三角洲沉积<sup>[39]</sup>,砂体分布广泛, 油气主要依据地势或者通过构造脊运移。馆陶组 主要为辫状河沉积<sup>[40]</sup>,油气主要通过河道砂体运移。 晚期成藏过程中,北部陡坡带断裂非常活跃,



Fig.6 Relationship between fault activity rate and oil column height in the lower Minghuazhen Formation in the Mid-Huanghekou Sag

油气缺乏有效圈闭无法在深部储层中储存,大部分 油气最终都沿着断裂"高速公路"运移到浅部砂体 储层中,在断裂附近的明化镇下段圈闭中聚集成藏, 如井 N1、N2、N3(图1)。南部缓坡带断裂不活跃, 活动速率平均值仅为 4.46 m/Ma(<5.6 m/Ma),大 部分断裂对油气的运移起到封堵作用,为近断层的 油气聚集提供了条件,从深部沙河街组至浅层明化 镇组均能聚集成藏,并不像陡坡带那样只局限于浅 层明化镇组,在缓坡带各地层中均有油气发现,如 井 N4、N5、N6(图7)。



图 7 黄河口凹陷中洼油气成藏模式 Fig.7 The hydrocarbon accumulation model of the Mid-Huanghekou sag

## 5 结论

(1)黄河口凹陷中洼在4个沉积时期内,断裂 活动总体呈"先变弱再变强"的规律。从沙河街组 沉积时期到馆陶组沉积时期断裂活动强度减弱,明 化镇组沉积时期断裂活动开始增强。整体上,黄河 口凹陷中洼的断裂生长是自东向西扩展的,可能是 受太平洋板块的俯冲影响。

(2)沙河街组到明化镇组沉积时期控制北部沉 积边界的始终为 D1 断裂, 而南部控制沉积边界的 断裂是变化的, 4 个时期控制沉积边界的断裂依次 为 H2、H2、W1、H3。这些断裂控制着各时期的构 造高地, 4 期的构造变化共同形成了现今的构造样式。

(3)晚期洼陷中心活跃的断裂成为油气运移的 通道,油气进入储层砂体向南北高构造地区运移。 北部陡坡带断裂非常活跃,油气主要为浅部明化镇 组成藏;南部缓坡带断裂不活跃主要起封堵作用, 有利于油气的储存和深部成藏,油气在各个层位的 圈闭中都有成藏。

#### 参考文献:

- [1] 吴哲,王文勇,张忠涛,等.张扭性断裂带的生长过程与油气穿 断运移评价:以珠江口盆地恩平凹陷为例[J].海洋地质前沿, 2020,36(1):50-58.
- [2] 蒋子文,罗静兰,王嗣敏,等. 郑庐断裂新生代构造演化及其对 烃源岩生排烃的影响:以辽东湾坳陷辽中凹陷为例[J]. 高校地 质学报,2018,24(4):573-583.
- [3] 万桂梅,周东红,汤良杰.渤海海域郯庐断裂带对油气成藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2009,30(4):450-454+461.
- [4] 邓津辉,周心怀,魏刚,等. 郑庐走滑断裂带活动特征与油气成 藏的关系:以金县地区为例[J].石油与天然气地质,2008,29(1): 102-106.
- [5] 付广,王浩然.不同时期油源断裂输导油气有利部位确定方法 及其应用[J].石油学报,2018,39(2):180-188.
- [6] 吴智平,陈伟,薛雁,等.断裂带的结构特征及其对油气的输导 和封堵性[J].地质学报,2010,84(4):570-578.
- [7] ROTEVATN A, JACKSON C A L, TVEDT A B M, et al. How do normal faults grow?[J]. Journal of Structural Geology, 2018, 125: 174-184.
- [8] FOSSEN H, ROTEVATN A. Fault linkage and relay structures in extensional settings: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 14-28.
- [9] LIU Y, CHEN Q, WANG X, et al. Influence of normal fault growth and linkage on the evolution of a rift basin: a case from the Gaoyou Depression of the Subei Basin, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(02): 265-288.
- [10] 范婕, 蒋有录, 刘景东, 等. 长岭断陷龙凤山地区断裂与油气

运聚的关系[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1817-1829.

- [11] HINDLE A. D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional mode[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [12] 蒋有录,刘培,宋国奇,等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动 与新近系油气富集关系[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 525-533.
- [13] 江涛,黄晓波,李慧勇,等. 渤西伸展背景下先存-新生断裂体 系特征及控藏作用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(11): 27-34.
- [14] 姜丽娜, 邹华耀. 郯庐断裂带渤中-渤南段新构造运动期断层 活动与油气运聚[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 8.
- [15] 王军,吴奎,樊建华,等. 辽中凹陷走滑断裂带原油来源、运移 及分布层系[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(6): 707-714.
- [16] 陈云锋.东营凹陷八面河地区西南段断裂输导能力研究[J].天然气地球科学, 2014, 25(S1): 39-45.
- [17] 周心怀,牛成民,滕长宇.环渤中地区新构造运动期断裂活动 与油气成藏关系[J].石油与天然气地质,2009,30(4):469-475,482.
- [18] 庄新兵,邹华耀,滕长宇.新构造运动期断裂活动对油气的控制作用:以渤中地区为例[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):
  452-459.
- [19] 刘涛,但志伟,方中于,等.番禺4地区断裂发育期次与油气藏 形成的关系[J].海洋地质前沿,2015,31(11):18-22.
- [20] 孙和风,周心怀,彭文绪,等.黄河口凹陷新近系浅水三角洲 岩性油气藏成藏模式[J].大庆石油学院学报,2010,34(2):11-15,37,122-123.
- [21] 于海波,王德英,牛成民,等. 层序--构造对黄河口凹陷新近系 油气分布及成藏的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 42-46, 113-114.
- [22] 胡光义,杨希濮,古莉,等.渤海海域黄河口凹陷新近系多油 水系统油藏成因分析[J].地学前缘,2012,19(2):95-101.
- [23] 孙和风,周心怀,彭文绪,等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏 特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 307-313.
- [24] 彭文绪, 孙和风, 张如才, 等. 渤海海域黄河口凹陷近源晚期 优势成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 510-518.
- [25] 陈斌,邓运华,郝芳,等.黄河口凹陷BZ34断裂带油气晚期快速成藏模式[J].石油学报,2006,27(1):37-41.
- [26] 田立新,余宏忠,周心怀,等.黄河口凹陷油气成藏的主控因素[J].新疆石油地质,2009,30(3):319-321.
- [27] 张新涛,周心怀,牛成民,等. 渤海湾盆地黄河口凹陷油气成 藏模式[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(3): 30-36, 5.
- [28] 傅强,刘彬彬,徐春华,等. 渤海湾盆地黄河口凹陷构造定量 分析与油气富集耦合关系[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 112-119.
- [29] 温宏雷,邓辉,李正宇,等. 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[J]. 油气地 质与采收率, 2017, 24(4): 36-42.
- [30] 姜治群, 吴智平, 李伟, 等. 断裂对黄河口凹陷新近系油气分 布的控制作用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 50-54, 143.
- [31] 赵梦,潘文静,郝轶伟,等. 渤海海域黄河口凹陷渤中29-6构造 火山岩锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(1): 22-34.

- [32] 庞雄奇, 郭永华, 姜福杰, 等. 渤海海域优质烃源岩及其分布 预测[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 393-397.
- [33] 朱秀香, 吕修祥, 王德英, 等. 渤海海域黄河口凹陷走滑转换 带对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 476-482.
- [34] 王应斌,黄雷,王强,等. 渤海浅层油气富集规律:以黄河口凹 陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 637-641, 650.
- [35] 雷宝华. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述[J]. 地 球科学进展, 2012, 27(9): 947-956.
- [36] 张晓庆,吴智平,周心怀,等. 渤海南部新生代构造发育与演

化特征[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(1): 50-60.

- [37] 贾博,吴智平,张晓庆,等.黄河口凹陷新生代断裂体系与构造演化[J].特种油气藏,2017,24(1):76-80.
- [38] 滕长宇, 邹华耀, 郝芳. 渤海湾盆地构造差异演化与油气差异 富集[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 579-590.
- [39] 张新涛,牛成民,黄江波,等.黄河口凹陷渤中34区明化镇组 下段油气输导体系[J].油气地质与采收率,2012,19(5):27-30,112-113.
- [40] 何仕斌,朱伟林,李丽霞. 渤中坳陷沉积演化和上第三系储盖 组合分析[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 38-43, 121-122.

# Faults development controlled the Neogene hydrocarbon accumulation in the mid-Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

WANG Xinzhou<sup>1</sup>, LAN Xiaodong<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, DU Xiaofeng<sup>2</sup>, WANG Qingbin<sup>2</sup>

(1 School of Ocean Sciences, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2 Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract: Huanghekou Sag is an important hydrocarbon-rich sag in Bohai Sea and can be divided into West-, Mid-, and East-Huanghekou sags. The source rocks of the third member of Shahejie Formation in the Mid-Huanghekou sag began to generate and expel hydrocarbons on large scale during the sedimentary period of Minghuazhen Formation. The analysis of active faults and their impact on the Mid-Huanghekou sag evolution is important to understand the regional hydrocarbon migration and accumulation. Based on 3D seismic and drilling data analyses, the distribution, activity, and growth evolution of the faults in the Mid-Huanghekou sag were systematically analyzed. Combined with the distribution characteristics of regional source rocks and oil-gas resources, the controlling effect of faults on hydrocarbon accumulation in the Neogene was summarized. The study shows that the development of faults in the mid-Huanghekou sag is characterized by "weakening first and then strengthening". From the deposition period of Shahejie Formation to the deposition period of Guantao Formation, the intensity of fault activity gradually decreased and the fault activity area gradually shrank. During the deposition of Minghuazhen Formation, the fault activity was enhanced and the faults were fully active in the region. In the early stage, faults were small-sized; and in the late stage, they developed and merged into large ones in the central area of the sag, forming network of active faults-source rocks-reservoirs. Most of oil and gas migrated to the sand bodies of shallow facies of the Guantao and Minghuazhen Formations along active faults, and further to the both sides the structural highs of reservoirs. The north and south secondary structures have different hydrocarbon accumulation characteristics. In the southern gentle slope zone, the fault activity rate is small in the late stage, which effectively favored the sealing of the oil and gas, and finally formed large-scale oil-gas accumulation in the sand body along structural ridge. In the northern steep slope zone, the fault activity rate is great in the late stage, and the oil and gas formed in certain shallow structural traps nearby faults.

Key words: fault growth; Neogene; hydrocarbon; accumulation pattern; mid-Huanghekou Sag