

岳军培, 黄晓波, 刘朋波, 等. 断裂凸面脊的刻画及“源-断-圈”耦合的控藏作用:以庙西南凸起南侧边界为例[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 32-38.

# 断裂凸面脊的刻画及“源-断-圈”耦合的控藏作用: 以庙西南凸起南侧边界为例

岳军培, 黄晓波, 刘朋波, 熊煜, 杨传超

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

**摘要:**为研究庙西南凸起南侧断阶带油藏油气差异分布规律,快速寻找油气高丰度区,结合该区油气成藏期,新建立了一套适用于研究区断裂高效输导效率的确定方法。通过新采集处理的三维地震资料,结合已有的钻井和测井资料,从几何学和运动学方面对该构造的 4 条边界断裂进行精细刻画研究,结果表明 F1 和 F2 断裂不存在凸面脊,且油气成藏期活动速率小,不利于油气向上输导;F3 断裂在油气成藏期最大活动速率达 106 m/Ma,并与断裂凸面脊重合,油气输导效率较高;F4 断裂存在的凸面脊在油气成藏期活动速率为 63 m/Ma,油气高效输导效率次之。最后结合烃源岩和断圈配置的关系,确定 F3 断裂具有较好的“源-断-圈”耦合关系,对应的 W 圈闭具有较大可能成为油气高丰度区块。该方法不仅在渤海秦皇岛 33 构造区和旅大 16 构造区的勘探中得到了较好的应用,而且也将为渤海地区下一步浅层油气的勘探提供重要的参考意义。

**关键词:**庙西南凸起;边界断裂;高效输导;精细刻画;凸面脊;“源-断-圈”耦合

中图分类号:P744.4;P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2020.031

## 0 引言

作为连接烃源岩与圈闭之间的“桥梁和纽带”,油源断层是油气成藏的关键因素之一<sup>[1-3]</sup>。然而前人对断层的描述主要集中在二维空间的剖面上,而且较多的学者将断层面理想化为平面型<sup>[4-5]</sup>,真正对断层三维几何学和运动学特征的精细分析描述较少<sup>[5]</sup>,已经不能满足目前日益精细的勘探研究工作。近期,较多学者在断裂断面精细刻画和油气输导效率等方面进行了研究,其中高丽明等<sup>[5]</sup>根据断层走向、倾角和倾向清晰地刻画了断面的发育形态,凹面型断面对油气运移起发散作用,凸面型断面才能

导致油气汇聚向上高效输导运输<sup>[6-11]</sup>;付广和王浩然<sup>[12]</sup>最新的研究成果认为,油源断裂在活动时期,油气在剩余地层压力差和自身浮力的驱使下,沿断裂伴生裂缝和诱导裂缝向上输导运移;油源断裂在停止活动时期,油气只能依靠自身的浮力沿断裂填充物连通孔隙向上输导运移,两者部位重合之处是油气主要规模成藏区,运用这种不同时期油源断裂输导有利部位的确定方法在冀中凹陷廊固凹陷得到了较好的应用。

本文的研究对象位于庙西南凸起之上,该区长期处于合作区块,基础研究相对薄弱,勘探步伐一度停滞。矿权回归以后,通过近 5 年的艰辛勘探,结束了庙西南凸起长期以来没有油田的历史,但是已发现的油田埋藏浅,油层薄(以 2~3 m 为主),油品性质较差(重质稠油),难以直接开发动用,目前急需寻找高丰度区块,打破目前油田现状。庙西南凸起南侧边界断裂深切富烃洼陷—庙西北洼,凸起之上圈闭发育,如果断裂输导效率较高,发现高丰度区块的潜力较大,其油气丰度和油品性质也定会

收稿日期:2020-03-30

资助项目:“十三五”国家科技重大专项“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测”(2016ZX05024-002)

作者简介:岳军培(1987—),男,硕士,工程师,主要从事油气成藏综合研究工作。E-mail: yjp3@cnooc.com.cn

得到改善。因此,本文利用新采集处理的三维地震资料,选取临近井的 VSP 数据建立速度模型,从几何学和运动学方面对该构造的边界断裂进行精细刻画研究,明确断裂发育形态和输导效率,建立了一套适用于渤海地区断裂高输导效率的确定方法,并结合该区的烃源岩和圈闭发育情况探讨“源-断-圈”耦合的控藏作用。

## 1 概况

庙西南凸起位于渤海海域中东部,北以斜坡和构造脊与庙西北洼和渤东凹陷相接,南以断阶带与庙西南洼相接,成藏条件优越。该区地质结构被走滑作用改造复杂化,加之晚期构造活动强烈<sup>[13-14]</sup>,新近系主要发育馆陶组和明化镇组,钻井揭示油气主要集中于馆陶组。本文围绕断裂与油气成藏的关系,选取庙西南凸起南侧边界断裂为研究对象,该边界断裂由 F1、F2、F3 和 F4 等 4 条断裂组成(图 1)。



图 1 研究区区域位置及新近系馆陶组顶面构造图

Fig.1 Location of study area and Neogene top structure of Guantao Formation

## 2 高输导效率的确定方法

断裂活动期断裂开启,油气在地层剩余压力差和浮力的作用下,沿断裂伴生裂缝和诱导裂缝向上输导运移,当断裂活动速率 $>25\text{ m/Ma}$ <sup>[15-17]</sup>时,断裂对油气起向上输导作用,因此断裂活动期寻找断裂活动速率 $>25\text{ m/Ma}$ 的部位,确定为油气输导有利部位;断裂活动停止期或弱活动期,油气只能依靠自身的浮力沿断面向上运输,此时凸面型断面是油气高效输导的有利部位,所以断裂活动停止期或弱活动期,寻找凸面型断面确定为油气有利部位<sup>[12]</sup>。渤海湾盆地冀中坳陷廊固凹陷的钻探已证实,在旧州油源断裂停止期或弱活动期的有利部位与断裂活动期的有利部位重合处的圈闭均发现了较好的含油气构造<sup>[12]</sup>,说明了断裂凸面脊和较

大活动速率的重合处具有最高效的油气输导效率。

庙西南凸起已钻井揭示馆陶组流体包裹体均一温度集中分布在 $60\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,结合该区埋藏史和热史确定油气主要在 $2\text{ Ma}$ 以后充注,属于新构造运动导致的油气晚期成藏,晚期断裂活动发育(明下段晚期至现今),而且本区在复杂的构造背景下,断裂断面弯曲多变,因此结合本区实际情况,选择深切烃源岩的断裂,从几何学和运动学方面对该构造的边界断裂进行精细刻画研究,确定明下段晚期至现今断裂活动速率 $>25\text{ m/Ma}$ 和凸面型断面重合区即为油气高效输导最有利部位。

## 3 断裂精细刻画与高效输导有利部位的确定

断裂的断面在二维空间是 1 条直线或曲线,而在三维空间则是 1 个曲面,该曲面可以看作由 1 个或多个倾斜面组成,因此按照不同的组合方式,三维空间的断面可以形成许多形态。本次研究基于三维地震资料,从几何学和运动学方面对选取的 4 条断裂进行精细刻画研究,从而定量描述断裂的活动速率和几何形态。

### 3.1 断裂几何学特征

根据新三维地震资料提取的断层断面平面等值线和断裂断面方位角属性图(图 2),同时结合断裂平面展布,可以看出:F1 断裂延伸 $9\text{ km}$ ,近 EW 走向,深度 $200\sim 3\ 000\text{ m}$ ,发育最深部位偏西侧,倾角为 $22^{\circ}\sim 46^{\circ}$ ,方位角属性图揭示断面中部和东侧存在脊(即凸面脊)或槽(即凹面槽),其中断面中部方位角变化区对应的等值线整体“包注”,可以确定该变化区为凹面槽;断面东侧的方位角变化区对应的等值线较平直,脊或槽不明显,因此,F1 断裂整体存在 1 个凹面槽。

F2 断裂延伸 $6\text{ km}$ ,走向 NEE,深度 $500\sim 3\ 800\text{ m}$ ,发育最深部位在西侧,倾角为 $36^{\circ}\sim 46^{\circ}$ ;方位角属性图揭示的断面方位角变化区虽有,但不太集中,对应的等值线也较平直,说明不存在凸面脊和凹面槽,因此,F2 断面形态整体呈平坦的“板状”。

F3 断裂延伸 $8\text{ km}$ ,整体呈 EW 走向,深度 $150\sim 4\ 600\text{ m}$ ,发育最深部位在东侧,倾角为 $34^{\circ}\sim 46^{\circ}$ ,方位角属性图揭示的变化区主要有 1 个,而且自下而上

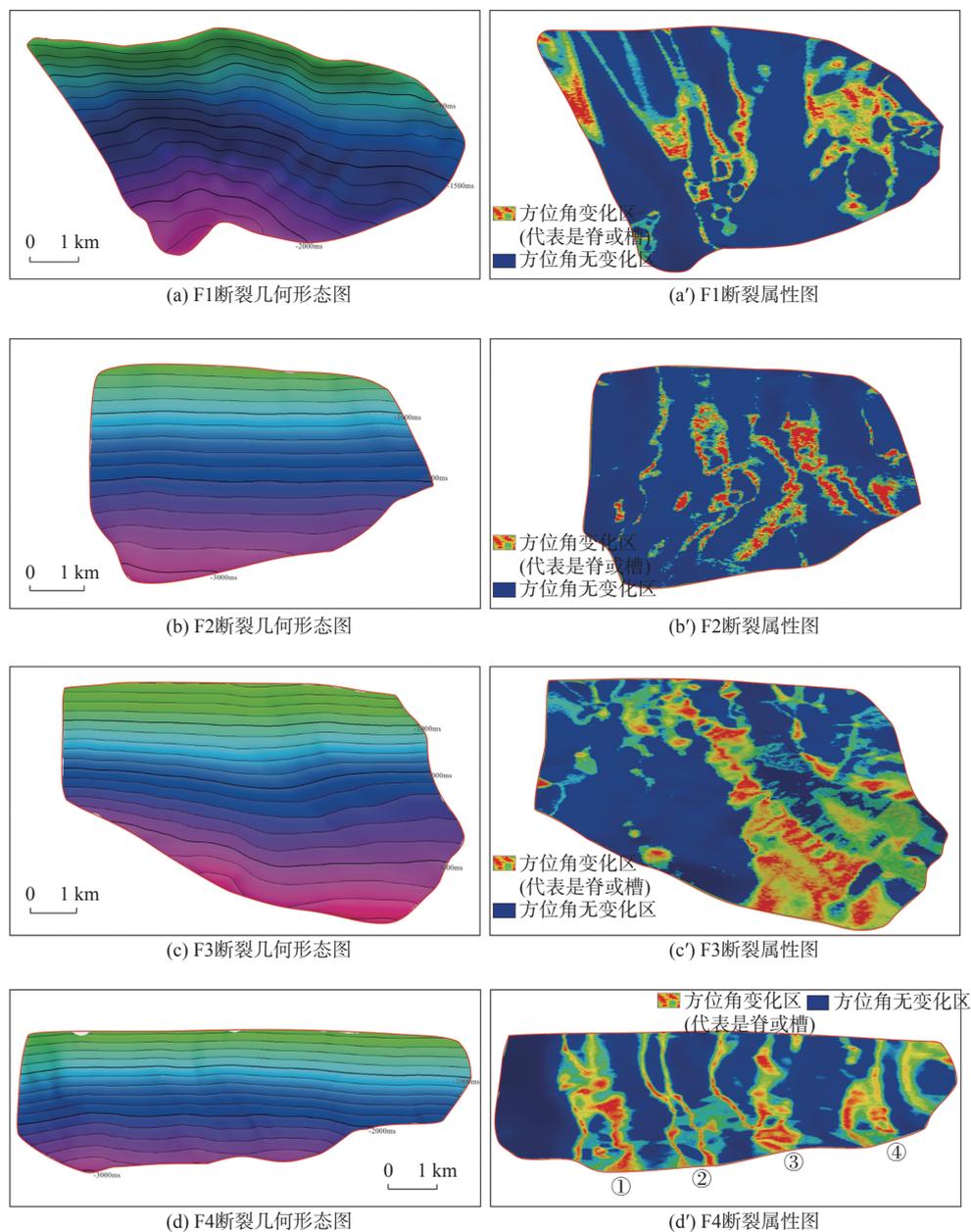


图2 F1、F2、F3和F4各断裂几何形态图和属性图

Fig.2 Geometric shape and property of the faults F1, F2, F3 and F4

较集中连续,对应的等值线明显“包高”,因此,F3断裂存在1个为较为明显的、且具有一定规模的凸面脊。

F4断裂延伸11 km,NEE走向,深度100~3700 m,西段发育相对东段深,倾角主要为 $35^{\circ}\sim 46^{\circ}$ ;方位角属性图上明显存在4个方位角变化区,图2d'中标号为①和③的方位角变化区的位置对应等值线“包洼”,而标号为②处“包高”,标号为④处等值线较平直,说明①和③处的脊为凹面槽,②处为凸面脊,④处没有脊或脊发育不明显,综上认为F4断裂断面形态多变,存在1个凸面脊和2个凹面槽。

### 3.2 断裂运动学特征

研究区南侧边界断裂均为伸展性质的断裂,不同部位不同时期具有明显的活动差异性,并具有不同的形成演化过程和演化期次,对油气成藏有着重要的控制作用。通过地层回剥法恢复边界断裂各时期的发育状态,统计不同测线处各断裂在孔店组—沙三段沉积期、沙二段—东营组沉积期、馆陶组沉积期和明下段晚期至现今等4个时间的古断距,重点对油气成藏期对应的明下段晚期至现今断裂活

动速率进行统计(图 3)。从统计的结果可以看出, F1 断裂早期活动强烈, 后期活动很弱, 最大断距 139 m, 最大活动速率 17 m/Ma, F2 断裂长期活动不强烈, 最晚期断距最大 162 m, 最大活动速率最大

仅 20 m/Ma, F3 断裂早期活动, 中期减弱, 后期再次活化, 晚期最大断距达 844 m, 活动速率达 106 m/Ma, F4 断裂经历了弱—强—弱—强的反复活动, 晚期最大断距达 595 m, 活动速率达 74 m/Ma。

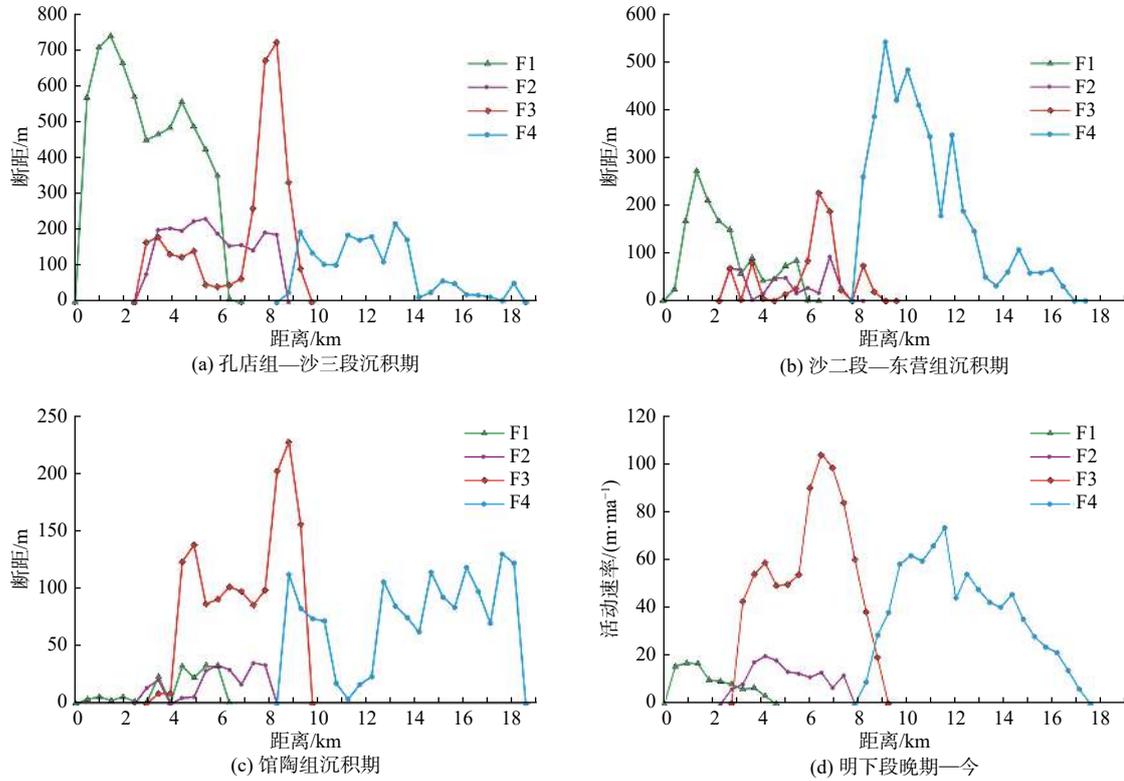


图 3 研究区 F1、F2、F3 和 F4 断裂各时期的活动性

Fig.3 Activity of faults F1, F2, F3 and F4 in different periods

### 3.3 断裂输导有利部位

结合断面平面等值线和断裂的断面方位角属性图可以确定 F1 存在 1 个凹面槽(图 2), 且油气成藏期的活动速率为 17 m/Ma(小于前文中的 25 m/Ma 判定标准), 最不利于油气高效输导; F2 断裂活动速率为 20 m/Ma( $< 25$  m/Ma), 断面平坦, 无凸面脊, 油气输导效率也不高; 而 F3 断裂存在的 1 个较大规模的凸面脊, 而且对应活动速率达 106 m/Ma( $> 25$  m/Ma), 根据脊和油气活动期断裂活动速率的配置关系, 认为 F3 断裂的凸面脊为油气最有利的输导部位; F4 断裂存在 1 个凸面脊, 对应的活动速率  $> 60$  m/Ma( $> 25$  m/Ma), F4 断裂控制的构造高部位与 F4 上的凸面脊配置关系较好, 在对应的圈闭构造上 A 井已发现近 30 m 的油气成藏。整体来看, F3 断裂凸面脊为最有利的油气输导部位, 其次为 F4 断裂的凸面脊, 而 F2 和 F1 断裂不存在油

气输导有利部位。

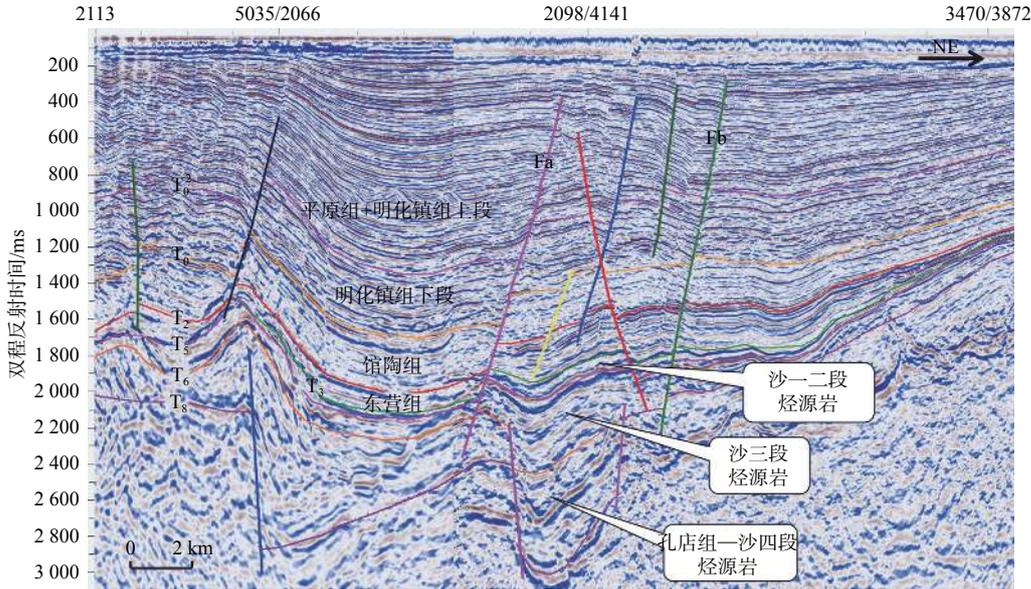
## 4 “源-断-圈”耦合的控藏作用

烃源岩评价结果表明本区沙三段和沙二段烃源岩有机质丰度高, 生烃潜量大, 为优质烃源岩, 东营组为中等烃源岩。3 套烃源岩有机质类型主要为 I、II<sub>1</sub> 和 II<sub>2</sub>, 有机质类型好。除此之外, 最近研究中结合邻区已钻地层、地震反射特征类比、不整合面识别, 结合道集速度界面分析、莱州湾洼陷的钻探情况和近年一些区域的研究结果等多方面综合考虑, 认为庙西南洼沙四段+孔店组地层可能具备一定的生烃能力<sup>[18]</sup>。综上, 本区具有孔店组—沙四段、沙三段和沙一二段—东营组 3 套烃源岩。

从近平行于断裂走向的剖面上可以看出, F3 断裂凸面脊所在位置位于断裂 Fa 和 Fb 之间(对应图 1 中的 AB 段), 其沙四段—孔店组和沙三段烃源岩沉积地层最为发育(图 4), F3 断裂发育深度最深, 接触

烃源岩面积最大,凸面脊与烃源岩最发育区耦合好,非常有利于油气向凸面脊汇聚并向上高效传导,因此

从烃源岩方面分析,F3 断裂也是最有利的油源断裂,F4 断裂次之,F2 和 F1 断裂与烃源岩配置关系较差。



剖面位置见图 1

图 4 庙西南洼地区烃源岩发育剖面图

Fig.4 Seismic profile of source rock distribution in southern sag of Miaoxi

除“源-断”配置外,还要结合“断-圈”的配置关系来进一步确定油气成藏潜力。从断面和圈闭的接触关系来看,F3 断裂与圈闭的配置关系最优:F3 断裂凸面脊位置与 W 圈闭中部的-1 160~ -1 200 m

的等值线接触(油气注入点),其距圈闭幅度较大(60~100 m),为 W 圈闭高部位油气成藏提供了足够的空间(图 5)。因此,在“源-断-圈”优越的配置关系下,W 圈闭具备成为油气高丰度区的较大潜力,

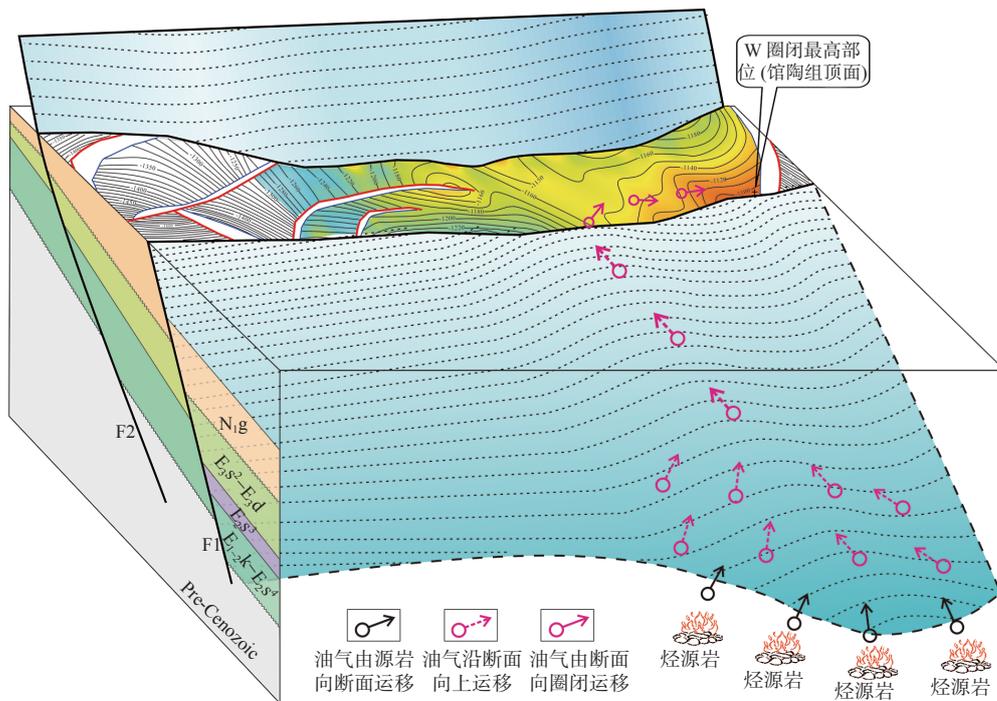


图 5 研究区南侧断阶带 W 圈闭油气成藏模式图

Fig.5 Oil and gas accumulation model of trap W in the step-fault zone of study area

是带动庙西南凸起下一步的勘探和开发的主要靶区。

## 5 勘探实例

根据断裂断面脊优势运移通道和“源-断-圈”的配置关系, 在渤海油田多个含油气构造中均得到了较好的应用, 合理解释了浅层新近系油气差异聚集的成因, 并优选出有利勘探目标。例如, 石臼坨凸起的秦皇岛 33 构造区, 边界断裂凹凸起伏,

具有 4 个凸面脊, 其断层活动速率  $> 50 \text{ m/Ma}$ , 深层断面通过砂体中转能够汇聚大量的油气, “源-断-圈”的配置关系中, 西侧的①号断面脊与烃源岩和圈闭的耦合关系最优<sup>[19]</sup>, 因此目前仅在秦皇岛 33 构造区的西南侧新近系发现了较大的地质储量(图 6)。同样, 在旅大 16 构造区的勘探中, 通过断面脊的刻画, 并寻找“源-断-圈”良好的配置关系为确定高丰度区块的勘探提供了很大的帮助。

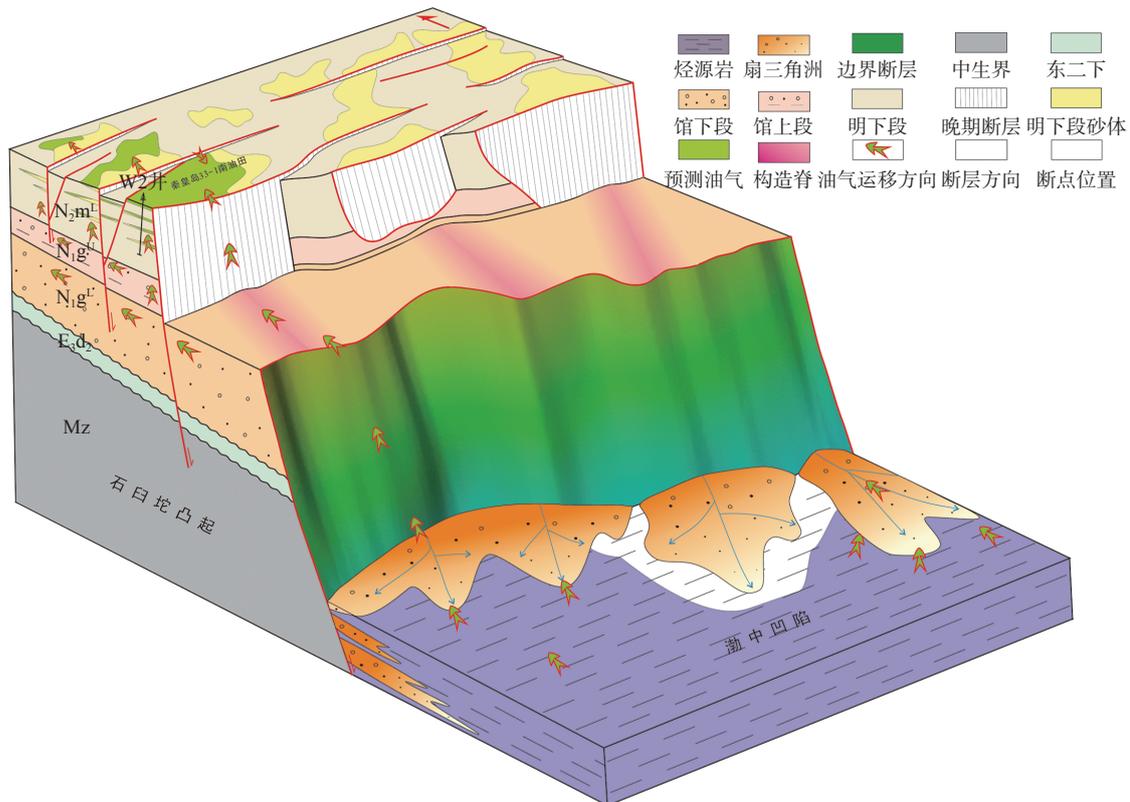


图 6 石臼坨凸起秦皇岛 33 构造区“源-断-圈”良好耦合的成功实例<sup>[19]</sup>

Fig.6 A successful example of “source-fault-trap” coupling in QHD33 area of Shijiutuo Uplift<sup>[19]</sup>

## 6 结论

(1) 建立了一套适用于渤海地区近源成藏模式下油气高效输导部位的确定方法: 油气成藏期较晚, 油源断裂在新近系时期活动速率  $> 25 \text{ m/Ma}$  处与凸面型断面重合之处, 为油源断裂最为高效的油气输导部位。

(2) 庙西南凸起南侧边界断裂中, F1 和 F2 断裂凸面脊不发育, 且整体在油气成藏期活动速率较小, 不利于油气高效输导; 而 F3 断裂存在 1 个凸面脊, 其凸面脊在油气成藏期活动速率为  $106 \text{ m/Ma}$ ,

利于油气高效输导; F4 断裂存在 1 个凸面脊, 其凸面脊在油气成藏期活动速率为  $63 \text{ m/Ma}$ , 该部位也利于油气高效输导。

(3) 根据断裂接触烃源岩的规模和油气充注点与圈闭的配置关系, 确定 F3 断裂具有较好的“源-断-圈”耦合关系, W 圈闭具有成为油气高丰度区块的较大潜力, 这种断裂凸面脊的刻画与“源-断-圈”良好耦合相结合的方法已在渤海多个油田的勘探中得到较好的勘探应用。

### 参考文献:

- [1] 付广, 吕延防, 薛永超, 等. 油气运移通道及其对成藏的控制[J].

- 海相油气地质, 1999, 4(3): 24-28.
- [2] 牛成民, 杜晓峰, 邹华耀, 等. 渤海海域石臼坨凸起油气输导体系与运聚模式[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 44-49.
- [3] 李明诚. 石油与天然气运移研究综述[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 3-10.
- [4] 张丹峰, 周进峰, 王震宇, 等. 曲面型断层的露头特征及其地质意义[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 462-465.
- [5] 高丽明, 何登发, 桂宝玲, 等. 东营凹陷民丰洼陷边界断层三维几何学及运动学特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 546-553.
- [6] HINDLE A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a Three-Dimensional model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [7] 蒋有录, 刘景东, 李晓燕, 等. 根据构造脊和地球化学指标研究油气运移路径: 以东濮凹陷濮卫地区为例[J]. 地球科学, 2011, 36(3): 521-529.
- [8] 孙同文, 付广, 吕延防, 等. 南堡1号构造中浅层油气富集主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1042-1051.
- [9] 平贵东, 刘云燕, 高煜婷, 等. 走滑断裂端部破碎带发育特征及控藏作用: 以方正断陷大罗密地区走滑断裂系为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 553-561.
- [10] 姜贵璞, 付广, 孙同文. 利用地震资料确定油源断裂输导油气能力及油气富集的差异性[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 160-166.
- [11] 姚城, 张新涛, 于海波, 等. 石臼坨凸起东南斜坡带输导体系与油气运聚模式[J]. 断块油气田, 2017, 24(6): 755-759.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘朋波, 官大勇, 王昕, 等. 渤东地区新近系“脊-断”耦合控藏模式与定量表征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 470-477.
- [15] 邹华耀, 周心怀, 鲍晓欢, 等. 渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 885-893.
- [16] 娄国泉. 高邮凹陷断裂对始新统油气成藏的控制作用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(1): 1-5.
- [17] 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.
- [18] 王昕, 高坤顺, 王玉秀, 等. 庙西南凸起勘探发现与油气成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2013, 20(2): 16-19.
- [19] 杨传超, 张新涛, 郭涛, 等. 源外斜坡区油气运移主控因素及优势路径刻画: 以渤海海域石臼坨凸起斜坡区为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 699-703.

## FAULT CHARACTERIZATION AND RESERVOIR FORMING UNDER CONTROL OF “SOURCE-FAULT-TRAP”: A CASE OF THE BOUNDARY FAULTS IN THE SOUTHERN PART OF MIAOXINAN UPLIFT

YUE Junpei, HUANG Xiaobo, LIU Pengbo, XIONG Yu, YANG Chuanchao

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** In order to reveal the petroleum distribution pattern in the southern part of the Miaoxinan Uplift so as to quickly find some oil and gas enriched areas, various approaches are used to seek for favorable paths for efficient migration and accumulation of oil and gas, based on the hydrocarbon reservoir forming stages established for this area. Four boundary faults are depicted meticulously in geometry and kinematics by the recently collected and processed 3D seismic data, the completed well information and logging data. The results show that the faults F1 and F2 have no convex surface ridge, and their activity rate is too small in the period of hydrocarbon reservoir formation, and thus they are disadvantaged for hydrocarbon to migrate up to higher position. However, the F3 fault has an obvious convex surface ridge and most of the activity rate may be as high as 106 m/Ma, so the oil and gas transporting efficiency of this fault is relatively high. The fault F4 has also some convex surface ridges and the activity rate is 63 m/Ma, so it is advantaged for hydrocarbon migration to higher position. Finally combining source rock and the disposition relationship between faults and traps, it is concluded that the fault F3 has good coupling relationship of “source-fault-trap”, and the trap W in the step-fault zone of the southern part of Miaoxinan Uplift has bigger potential in oil and gas enrichment. This method is not only applied in the exploration of QHD33 and LD16 areas of the Bohai Sea, but also provide important reference for oil and gas exploration in the Bohai area.

**Key words:** Miaoxinan Uplift; boundary faults; high efficiency transport; meticulous depiction; convex surface ridge; the coupling relation of “source-fault-trap”