

Identification and Application of Low Level Faults in Deep Fault Block Reservoirs in the Bohai Sea

—Taking JX Oilfield as an Example

Zhicheng Yang, Junting Zhang, Zhiqiang Zhu, Xinran Wang, Haichao Feng

Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin
Email: yangzhch7@cnooc.com.cn

Received: Sep. 24th, 2018; accepted: Oct. 11th, 2018; published: Oct. 18th, 2018

Abstract

In order to clarify the distribution law and characteristics of low-level faults in the middle-deep reservoirs and their impact on development, this paper takes the JX oilfield in Bohai as an example, and combines the conventional interpretation method with ant tracking by reprocessing the 3D seismic data. The control effect of tectonic movement on the fault, using the idea of analytic hierarchy process, established the fault development map, and gradually defined the distribution law and distribution characteristics of different order levels, especially the low order level. The research results had an important impact on the well pattern layout and adjustment tapping.

Keywords

Complex Fault Block, Low Level Fault, Ant Tracking, JX Oilfield

渤海中深层复杂断块油藏低序级断层的识别与应用

—以JX油田为例

杨志成, 张俊廷, 朱志强, 王欣然, 冯海潮

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津
Email: yangzhch7@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018年9月24日; 录用日期: 2018年10月11日; 发布日期: 2018年10月18日

摘要

为了明确中深层油藏低序级断层展布规律与特征以及其对开发的影响,以渤海JX油田为例,通过重新处理的三维地震资料,采用常规解释方式与蚂蚁追踪相结合的方法,结合构造运动对断层的控制作用,采用层次分析的思路,确立了断层发育图版,逐级明确了不同序级特别是低序级的展布规律和分布特征,研究结果对于井网布局和调整挖潜起到重要作用。

关键词

复杂断块, 低序级断层, 蚂蚁追踪, JX油田

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低序级断层由高序级断层派生的,通常是指断层分级在四、五级及以下的断层。由于其规模、断距以及延伸长度较小,往往利用常规的断层识别方法难以刻画,而低序级断层在油田开发中对于井网布局、注采调整和剩余油挖潜往往起到重要作用。国内学者对于低序级断层的起步较早,研究也取得了一系列进展。边树涛(2007)利用地震相干体技术对曲堤油田低序级断层的刻画进行了探索[1],史军(2009)利用蚂蚁体追踪技术解释埕岛油田低序级断层取得了很好效果[2],张美玲(2011)通过井震结合,通过考察构造位置的变化趋势对辽河盆地卫星油田的小断层进行了刻画[3],夏波(2016)通过地震资料优选和平剖组合的方式对辽河油田主力边部断裂系统的低序级小断层进行了识别[4],随着研究的深入,低序级断层的解释方法逐步增多,效果也逐渐变好,但是对于中深层的低序级断层的识别仍有困难,本文以渤海JX油田为例,利用重处理的地震资料,利用常规解释方式与蚂蚁追踪相结合的方法,结合构造运动对断层的控制作用,采用层次分析的方法逐级确立了断层发育模式,并以此为指导识别了JX油田的不同序级的断层,明确了不同序级特别是低序级的展布规律和分布特征,其结果对于明确研究区构造以及油田开发具有重要意义。

2. 研究区概况

渤海海域郯庐走滑断裂带是重要的油气富集带,受郯庐走滑断裂带控制,不同序级的断裂极为发育,构造极其复杂[5],渤海JX油田位于渤海辽东湾海域,其构造位于辽中凹陷中段的注中反转带上,被郯庐断裂的辽中1号大断层分割,划分为东、西两个构造单元[6][7],西块单元为依附走滑断层的长条形半背斜构造,东块构造单元为受到走滑断裂控制,形成一系列复杂断块构造,并被内部次生高序级断层划分为多个井区或断块,油田内部发育多条低序级断层,含油层系为古近系东营组和沙河街组,东块主力含油层系分布于沙河街组一、二段,储层为扇三角洲沉积的砂岩,油藏以层状构造油藏为主,西块主力含油层系分布于东营组二、三段,储层为三角洲-辫状三角洲沉积的砂岩,油藏以层状构造油藏为主[8][9](图1)。

3. JX油田低序级断层识别

3.1. 三维地震资料重处理

清晰的三维地震资料是低序级断层识别的前提,针对中深层断层刻画难度大的问题以及开发阶段研

究任务的特点和重点,采用叠前时间偏移方法开展三维地震资料重处理,特别加强了速度的精细分析和断层的成像处理,采样率为 2 ms,最终处理面元为 25 m × 12.5 m,从而提高了信噪比以及断点清晰程度。通过对 JX 油田地震数据体进行的频谱分析显示,JX 油田有效频带宽为 10~65 Hz,主频大致为 33~35 Hz,纵向分辨率(1/4 波长)约为 18.6~21.2 m。2008 年,针对油田开发阶段的特点和重点,为了进一步加强速度分析以及断层成像问题,从而对低序级断层开展精细描述,对 JX 油田三维地震资料进行重新处理。重新处理后,信噪比提高、断点清晰程度提高、反射特征层次清楚,满足油田范围内低序级断层精细刻画的需要(见图 2)。

3.2. 层位标定及地震反射层特征

结合 JX 油田分布于油田不同断块的 25 口有声波测井资料以及 7 口 VSP 测井,参考本井或邻井 VSP 速度,结合声波及密度等测井资料,较好地约束油田区域速度的横向变化,完成多口井的精细合成地震记录,从研究结果可以看出,合成地震记录与地震剖面的匹配程度较高,各油组的波组特征清晰,横向可追踪(图 3)。结合对 JX 油田地震剖面的分析,JX 油田主力储层东营组二段到东营组三段地震波组反射整体表现为中频、中~强振幅、中~强连续性的特征,各油组顶面反射特征清楚、内部振幅强度及连续性

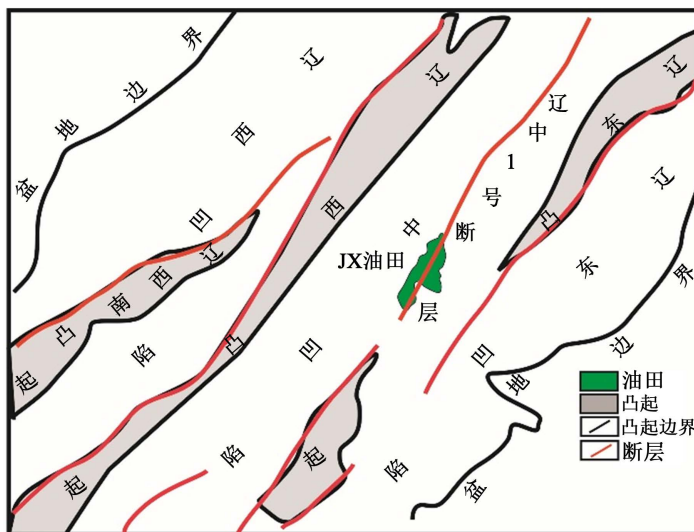


Figure 1. Bohai JX oilfield area location map
图 1. 渤海 JX 油田区域位置图

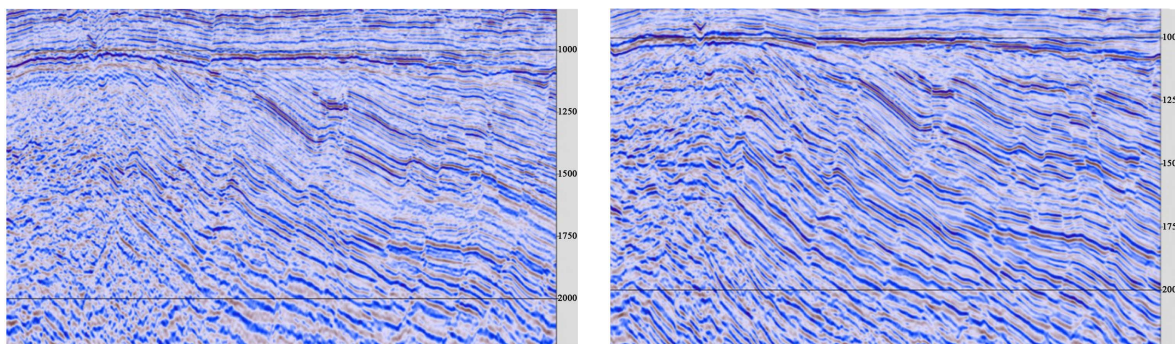


Figure 2. Comparison of the results of seismic data reprocessing in JX oilfield (the old picture on the left and the new picture on the right)
图 2. JX 油田地震资料重处理结果对比图(左图为一老、右图为一新)

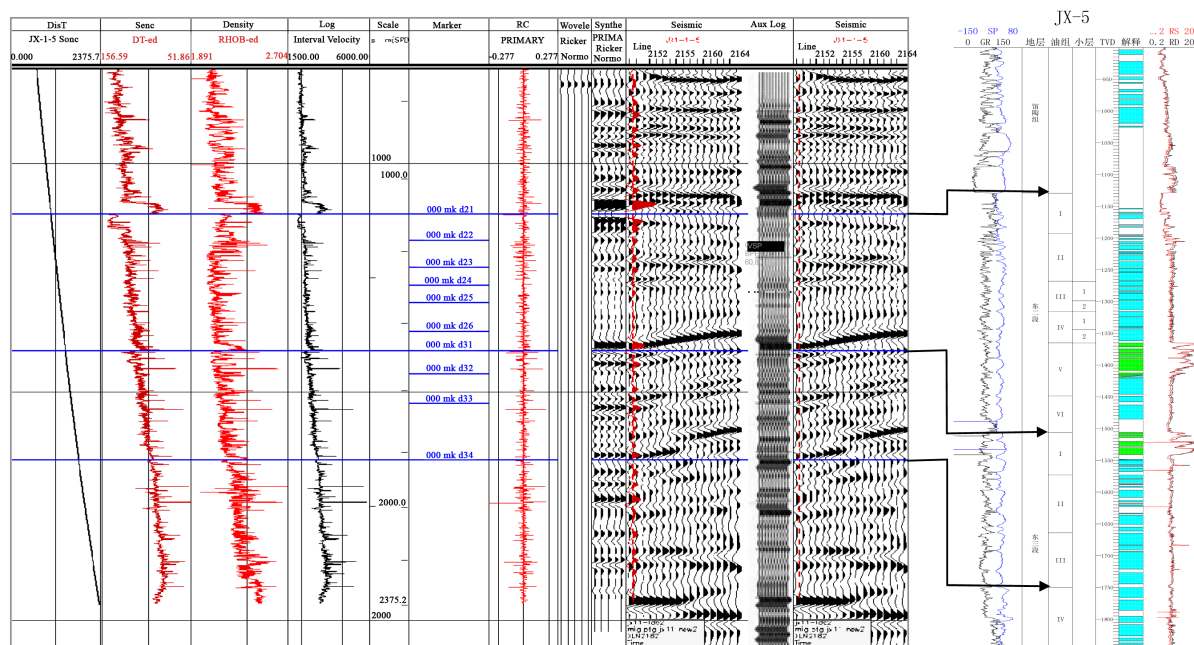


Figure 3. Synthetic seismic record study of JX oilfield

图 3. JX 油田合成地震记录研究

存在一定差异。其中，东二段各油组振幅连续性相对较差，东三段各油组振幅较强，连续性较好；在构造高部位地震反射相对较差，局部受断层影响较大，反射杂乱，结合地震剖面研究以及多数据体叠合显示分析，应用三维空间显示法对断裂结构进行研究，以确保断层在几何形态及动力学特性上的合理性。

3.3. 断裂特征与断层识别

JX 油田位于郯庐断裂走滑带上，断裂活动非常强烈，构造的形成受走滑断裂控制，油田构造整体表现为复杂断块的构造特征。在近南北向走滑断层强烈的走滑作用下，油田区域中部形成一条北东向展布的断块“凹陷”带，主要含油区域发育于该带的东、西两侧。走滑断层主支 F1 贯穿整个油田，本次研究分油田东、西两块，油田西块东营组断裂结构复杂，断层附近发育多条小断层，5、6、2D 井区主要发育两组不同走向及规模的断层。利用常规手段识别规模比较大的高序级断层以及断层相对清晰具有一定规模的低序级断层，具体的思路是层次分析，平面与剖面相结合的方法，由大及小进行识别。如 JX 油田 5 井区一组平面上与边界断层呈斜角相交，由直接与边界断层相交的延伸长度较小(小于 700 米)的多条小断层和离开边界断层一定距离的延伸长度较大(一般大于 600 米)的多条断层组成；另一组平面上与边界断层近于平行，剖面表现为近似“花状”样式(图 4)，根部与边界断层搭接。

3.4. 蚂蚁追踪识别低序级断层

3.4.1. 蚂蚁追踪原理

自然界中，蚂蚁通过分泌信息素在寻找食物过程中确立蚁巢与食物之间的最短路径，蚁群通过信息素浓度较高的最短路径进行前进并规避障碍物，实现觅食的最优方式。而蚂蚁算法基于蚂蚁此种方式的觅食行为，信息素较浓的路径更能吸引蚂蚁，信息素不断的增强最终收敛于最优路径。这种利用积极的正反馈机制确立的群体智能优化搜索模式是蚂蚁追踪技术的基本原理，在二维或三维地震数据体中散播大量电子蚂蚁，释放电子信号并召集其他蚂蚁汇聚，最终完成断层以及裂缝的追踪识别。在断裂系统解释中，蚂蚁追踪技术具有高效、客观、精确等优势[10][11]。

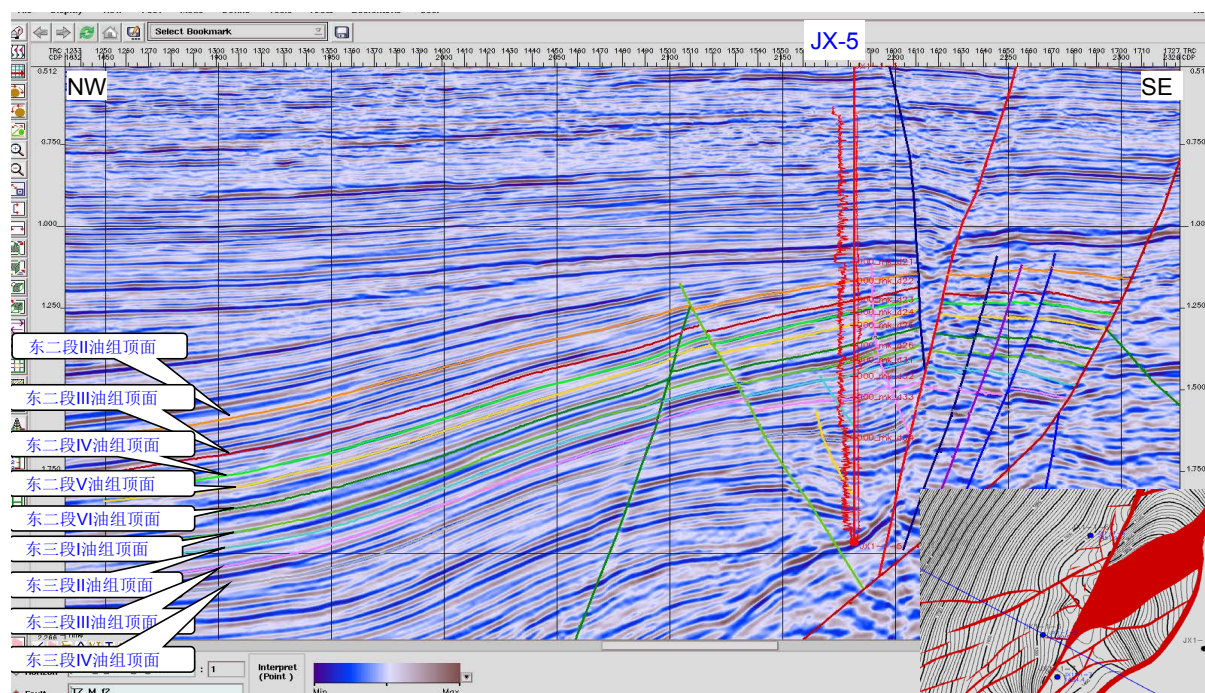


Figure 4. Interpretation results of faults in Well 5 of JX Oilfield

图 4. JX 油田过 5 井断层解释结果

3.4.2. 蚂蚁追踪识别低序级断层

利用常规解释方法能够解释断层规模较大、断距较大的断层，而对于规模较小、断距较小的断层难以刻画，针对低序级的断层识别的难题，利用蚂蚁算法的优势，采用“数据提取、属性追踪、断层识别、约束校验”的低序级断层刻画思路，分为五步开展研究。首先是地震数据体的处理，利用中值滤波算法、地震数据边缘增强处理以及提取蚂蚁追踪属性体，采用蚂蚁追踪算法对断层进行识别，由于蚂蚁追踪的断层识别结果较多，难以明确真正的断层，采用 similarity 算法对断层进行识别，其吻合的结果即为最终的识别结果。最后，利用数值模拟结果、动态资料以及示踪剂实验对识别的断层进行验证。

利用 petrel 地质建模软件对潜在断层进行追踪，第一步是地震资料的处理，具体采用中值滤波算法，通过构造平滑处理以增强地震反射的连贯性。第二步采用地震数据边缘增强处理，对构造平滑后的地震体进行进一步优化处理并生成方差体，增强边界特征，突出特殊的地层不连续性并生成方差体。第三步提取蚂蚁追踪属性体，通过对蚂蚁分布边界、搜索步长、终止标准等参数进行设置，对方差体进行追踪刻画并提取蚂蚁属性体(图 5)。

4. 低序级断层发育模式研究

结合三维地质资料和解释结果以及蚂蚁追踪的断层在平面上的发育特征，在平面范围内对 JX 油田构造的详细分析，开展低序级断层模式的划分，根据其构造活动的强烈程度以及低序级断层与高序级断层的接触关系，将 JX 油田划分为 4 类共 8 种断层发育模式(图 6)。

4.1. 构造活动强烈类

存在 4 种断层发育模式，包括半弧斜列式、半弧平行式、夹持平行式、单向平行式共 4 种。

半弧斜列式发育在构造活动强烈的弧形高序级断层内侧，位于 JX 油田西块北部构造高部位近于高序级断层 F2 东侧，低序级断层呈近平行状发育，为高序级断层的次生断层(图 6)，规模较大主要发育于 3

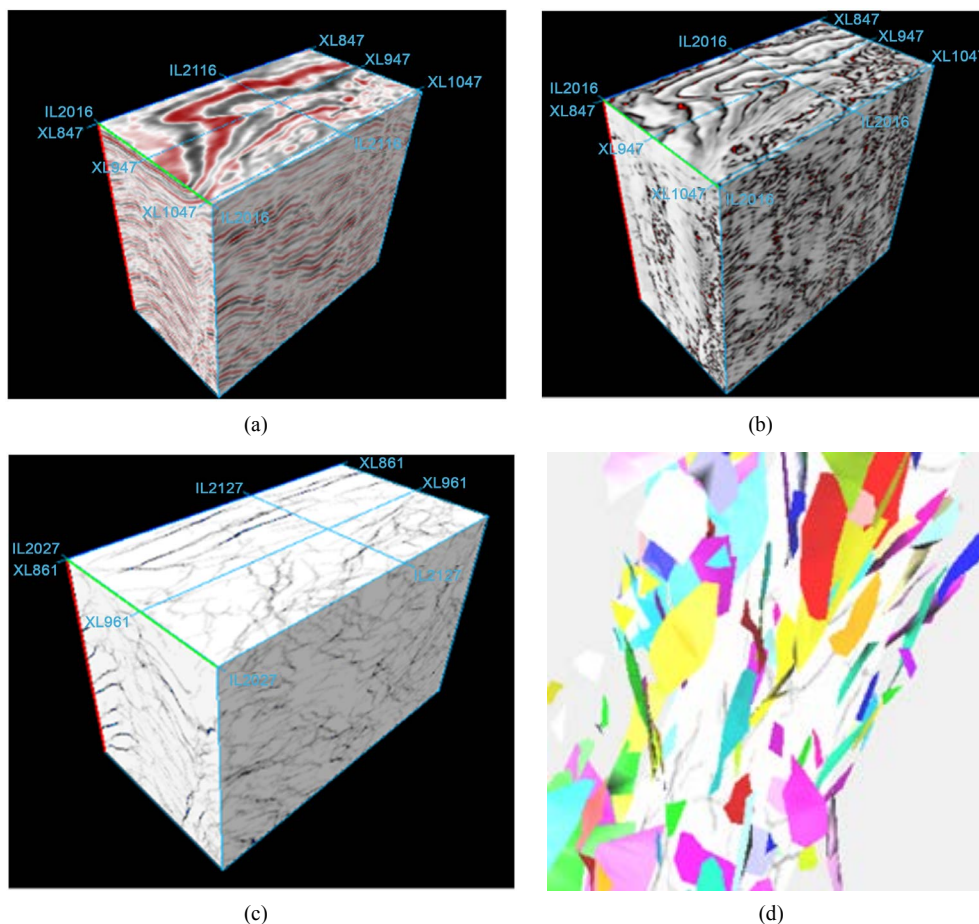


Figure 5. Seismic data volume processing and ant tracking algorithm to determine faults. (a) Construct smooth processing; (b) Edge enhancement processing variance; (c) Ant genus; (d) Fault recognition results
图 5. 地震数据体处理及利用蚂蚁追踪算法确定断层。(a) 构造平滑处理; (b) 边缘增强处理方差体; (c) 蚂蚁属性体; (d) 断层识别结果

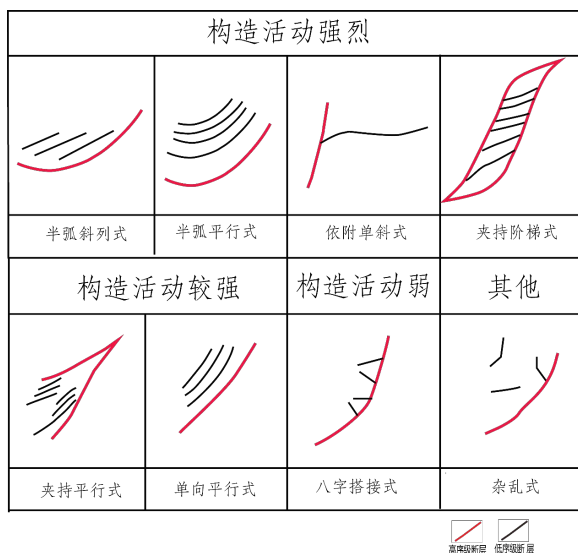


Figure 6. Different types of fault development pattern
图 6. 不同类型断层发育模式图

井区，断层长度 3973~4213 m，平均 2942 m，断距 20~30 m，平均 23 m，断层间距离 456~482 m，平均 469 m。

半弧平行式在构造活动强烈的弧形高序级断层内侧，位于 JX 油田西块北部高序级断层 F2 构造中低部位，低序级断层呈半弧状近平行状发育，为高序级断层的次生断层(图 6)，断层延伸长度较长、断距较大，主要发育于 3 井区，断层长度 3973~4213 m，平均 4218 m，断距 40~140 m，平均 100 m。断层间距离 1343~1121 m，平均 1232 m。

依附单斜式发育于 JX 油田东块高序级断层 F1 东盘，依附于构造高部位高序级断层并与之呈垂直或一定角度搭接，为高序级断层构造活动强烈期的次生断层(图 6)，发育在 JX 油田东块的 E-1/E-2/E-3D/E-4/E-4S 井区，为各个井区的分界断层，具有断层规模大、延伸长度长的特征，将 JX 油田东块分割为不同井区及流体系统，断层长度 2286~5836 m，平均 3972 m，断距 40~280，平均 144 m，断层间距离较大，为 877~1368 m，平均为 1099 m。

夹持阶梯式被构造活动强烈的两条高序级断层 F1 及 F2 所夹持，位于 JX 油田中块 4 井区成阶梯状平行发育与高序级断层内部(图 6)，夹持阶梯式断层长度较长且彼此长度变化不大，1053~1583 m，平均为 1328 m，断距较大变化差异大，20~140 m，平均为 80 m，断层间距离中等，为 390~726 m，平均为 517 m。

4.2. 构造活动较强类

夹持平行式位于高序级断层 F2 以及其次生的低序级断层形成的夹持部位内侧，构造活动较强，平行于高部位高序级断层或其次生低序级断层，断层之间距离较小，呈雁列状排列(图 6)，本区该类断层发育于 JX 油田西块南部 5 井区，共发育两组。东侧一组断层依附于高序级断层，规模较大，具有长度和断距均较大的特征，断层长度 1147~3308 m，平均 1890 m，断距 15~30 m，平均 22 m，而西侧一组断层受控于高序级断层的次生断层，规模较小，具有长度和断距均较小的特征，断层长度为 436~968 m，平均 736 m，断距 10~15 m，平均 13 m，断层间距离较小，120~181 m 直接，平均为 151 m(图 7)。

单向平行式与高序级断层 F2 平行发育，构造活动较为强烈，单向平行式低序级断层发育于 JX 油田西块北部 2D 井区，彼此呈近平行状发育，断层规模大，断层长度 1527~2354 m，平均 2077m，断距 15~20 m，平均 17 m，断层间距离中等，336~440 m，平均为 388 m。

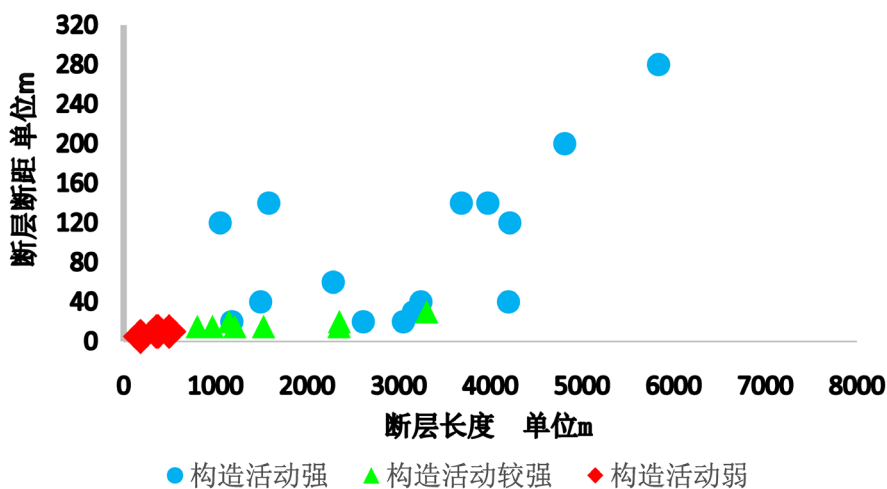


Figure 7. Scatter plot of different types of fault features
图 7. 不同类型断层特征散点图

4.3. 构造活动较弱类

八字搭接式与高序级断层 F2 呈八字形搭接(图 6), 发育于 JX 油田西块中部 6 井区, 构造活动强弱, 断层规模小, 断层长度 187~526 m, 平均 353 m, 断距 5~10 m, 平均 8 m, 断层间距离中等, 相邻断层中部距离 282~602 m, 平均为 384 m。

4.4. 其他类

杂乱式为各类构造活动期高序级断层的次生断层, JX 油田东块和西块均有发育, 断层规模、断距大小不等, 发育于高序级断层附近及其次生断层附近, 其特征不具有规律性本次未进行系统研究(表 1)。

5. 效果与应用

结合不同类型断层发育模式图版对 JX 油田所有断层进行了归类和研究, 通过对构造活动强、构造活动较强和构造活动较弱 3 类统计结果进行分析, 3 类断层具有比较明显的区分特征, 结合对于 JX 油田区域构造的发育特征研究, JX 油田低序级断层主要集中在长度 1000~4000 m、断距 10~40 m, 即以四、五级断层为主, 其中构造活动强类断层最多, 构造活动较强类断层次之, 构造活动弱类断层最少。通过平面上对断层进行分析可得知, JX 油田东块以及西块北部构造活动强, 东块以复杂断块为主, JX 油田西块南部构造较为强烈, JX 油田西块中部构造较弱。

结合油田沉积相类型、储层物性以及水体能量等方面的研究, 对于不同的构造特征的井区采取“因块制宜, 一块一策”的开发方式。对于构造活动强烈的 JX 油田东块的 E-1/E-3D/E-4/E-4S/E-5 井区, 各个井区被依附单斜式断层分割为不同单元, 其沉积相类型为扇三角洲沉积, 高孔高渗储层, 水体能量 5~20 倍, 采用不规则井网注水开发; 对于构造活动强烈的 JX 油田西块北部的 2D 井区, 其沉积相类型为三角洲沉积, 高孔高渗储层, 水体体积 5~10 倍, 采用不规则井网注水开发。对于构造运动比较强烈的 JX 油田西块南部 5 井区, 高孔高渗储层, 水体能量 5~30 倍, 由于构造低部位夹持平行类断层阻隔了水体能量供给, 采用了高部位水平井行列井网开发, 低部位(断层东侧)边外注水的方式进行开发。对于构造运动比较弱的 JX 油田西块中部 6 井区, 三角洲沉积, 高孔高渗储层, 水体能量 60~80 倍, 断层以八字搭接式发育且规模较小, 对水体能量无阻隔作用, 因此采用水平采油井和定向采油井利用天然能量开发的方式(图 8)。

经生产证实, 采用新方法识别出常规手段难以刻画的低序级断层, 根据断层的发育特征油田内部进行了开发调整, 通过完善井网、增加注水量、分层调配等方式改善开发效果, JX 油田连续 3 年开发效果持续改善, 自然递减率保持较低水平, 本次研究可以为类似油田提供借鉴(图 9)。

Table 1. Classification of fault grades

表 1. 断层等级划分表

断层级别	断层性质	断层延伸长度(km)	断层断距(m)	断层作用
一级断层	控制凹陷	>50	>1000	控制凹陷油气聚集
二级断层	控制构造带格架和沉积	10~50	500~1000	控制构造带油气聚集
三级断层	控制后期沉积	5~10	200~500	控制断块区油气聚集
四级断层	三级断层派生断层	2~5	50~200	控制断块油气聚集
五级断层	四级断层派生断层	0.5~2	20~50	控制局部油水关系和剩余油分布
六级断层	四级或五级断层派生断层	<0.02	<20	控制剩余油分布

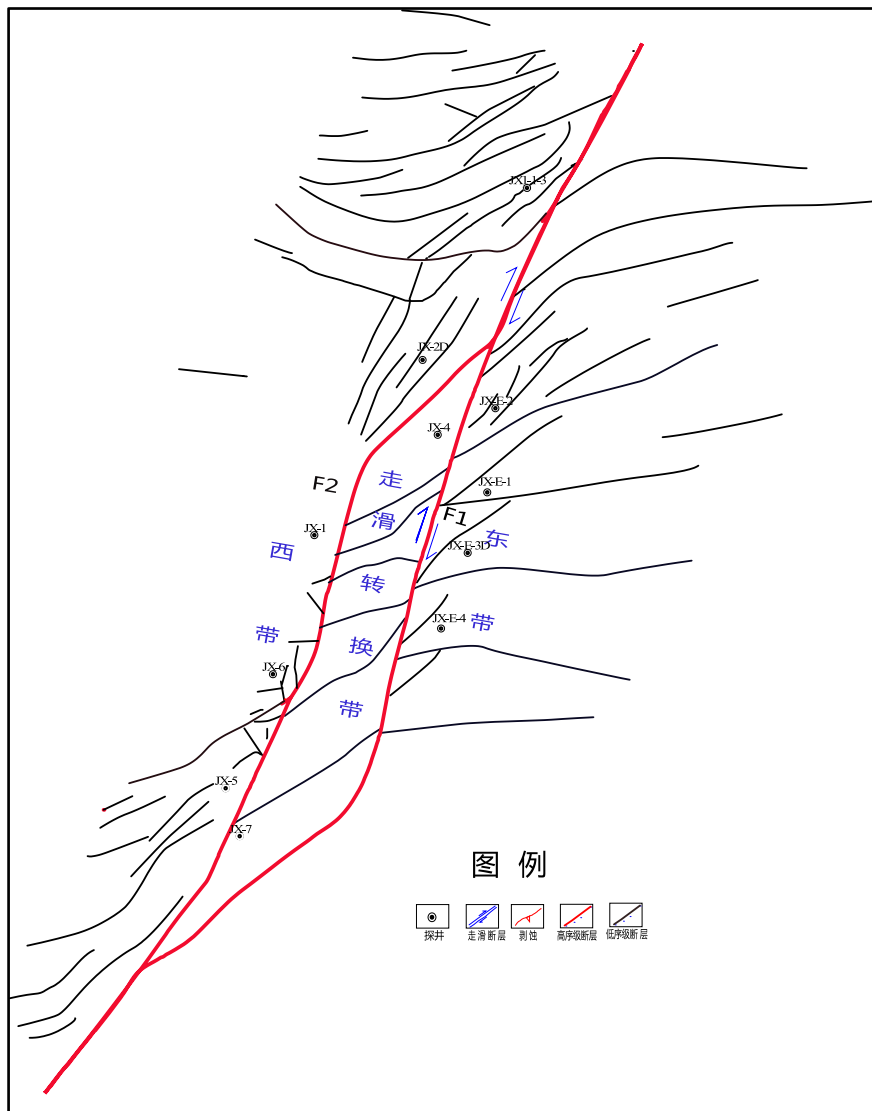


Figure 8. Distribution of fault planes of different order levels in JX oilfield
图 8. JX 油田不同序级断层平面分布图

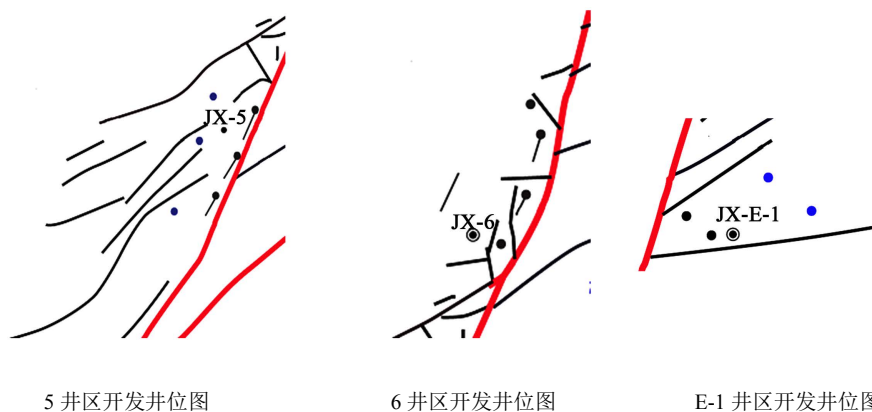


Figure 9. Development well map under different types of fault control
图 9. 不同类型断层控制下的开发井位图

6. 结论

1) 渤海 JX 油田位于郯庐断裂走滑带上, 断裂活动非常强烈, 构造的形成受走滑断裂控制, 油田构造整体表现为东西分块、南北不同的复杂断块构造特征。

2) 利用常规方法与蚂蚁追踪技术相结合的方法, 采用“数据提取、属性追踪、断层识别、约束校验”的低序级断层刻画思路, 对 JX 油田不同序级断层进行识别, 根据构造活动的强烈程度以及低序级断层与高序级断层的接触关系, 划分为 4 类共 8 种断层发育模式, 包括半弧斜列式、半弧平行式、夹持平行式、单向平行式, 夹持平行式和单向平行式八字搭接式以及杂乱式共 8 种断层发育模式。

3) JX 油田低序级断层主要集中在长度 1000~4000 m、断距 10~40 m, 其中构造活动强类断层最多, 构造活动较强类断层次之, 构造活动弱类断层最少。

4) 针对不同构造特征的井区采用不同的开发方式取得较好的开发效果。

基金项目

“十二五”国家科技重大专项“渤海海域大中型油气田地质特征”(2011ZX05023006002)。

参考文献

- [1] 边树涛, 董艳蕾, 苏晓军, 等. 地震相干体技术识别低序级断层方法研究[J]. 世界地质, 2007, 26(3): 368-373.
- [2] 史军. 蚂蚁体追踪技术在低级序断层解释中的应用[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 257-258.
- [3] 张美玲, 包隼, 张士奇, 等. 一种低序级断层识别技术及其应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(20): 4750-4755.
- [4] 夏波, 高荣锦, 史海涛. 低序级断层识别技术在稠油难采区块研究中的应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(2): 324-327.
- [5] 郑华, 刘宗宾, 杨志成, 刘喜林, 等. 渤海古近系复杂断块油藏潜力识别技术研究——以辽中凹陷 W 油田为例[J]. 科学技术与工程, 2016, 1(30): 1671-1815.
- [6] 杨志成, 宋洪亮, 郑华, 张立安, 等. 渤海 Q 油田沙河街组精细地质研究实践[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(4): 62-65.
- [7] 金宝强, 赵春明, 张迎春, 等. 海上复杂卫星断块油田开发实践与认识: 以 JZ 油田东区为例[J]. 海洋石油, 2011(12): 34-37.
- [8] 赵俊省, 孙赞东. 一种改进的蚁群算法在断层自动追踪中的应用[J]. 科技导报, 2013, 31(27): 59-64.
- [9] 史刘秀, 王静波, 张如伟, 黄滨滨. 复值相干模量蚂蚁体技术[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 545-549.
- [10] 金宝强, 杨庆红, 孙红杰, 童凯军, 等. 陡坡带厚砂岩油藏地层划分与对比——以 JX 油田 5、6 井区为例[J]. 海洋石油, 2012, 32(3): 39-43.
- [11] 陈善斌, 李红英, 刘宗宾, 杨志成, 等. 扇三角洲前缘储层构型解剖与实践——以渤海湾 JX 油田东块为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(2): 172-176.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org