

# 致密砂岩油储层裂缝发育特征及其 对剩余油挖潜的启示 ——以鄂尔多斯盆地新安边地区延长组长7<sub>2</sub><sup>2</sup>段为例

路向伟<sup>1</sup> 杜书恒<sup>2,3,†</sup> 郑奎<sup>1</sup> 张换果<sup>1</sup> 孙彤<sup>2,3</sup> 汪贺<sup>2,3</sup>

1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第六采油厂, 西安 710299; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;  
3. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: dushuheng@pku.edu.cn

**摘要** 通过岩芯观察、井间示踪剂测试和水驱前缘测试, 研究鄂尔多斯盆地新安边地区长7致密砂岩油储层的裂缝发育特征。结果表明: 1) 新安边地区长7致密砂岩油储层最大水平主应力方向为NE60°~80°, 裂缝类型以高角度缝或垂直缝为主, 裂缝走向为NE75°~85°, 倾角为70°~85°; 2) 动态监测数据分析显示, 研究区致密砂岩油储层广泛发育的微裂缝在增加渗流通道和提高基质渗透率方面发挥了重要作用, 油水易沿裂缝形成窜流, 导致生产井见水较快; 3) 三维地质建模结果显示, 研究区致密砂岩油储层含油饱和度与裂缝发育程度匹配度较高, 可以有效地佐证裂缝对油气储集和成藏的控制作用。

**关键词** 致密油; 裂缝; 水驱前缘; 地质建模

**中图分类号** TE348

## Fracture Development Characteristics in Tight Sandstone Oil Reservoir and Its Inspiration on Remaining Oil Recovery: A Case Study on the Chang-7<sub>2</sub><sup>2</sup> Layer of Yanchang Formation in Xin'anbian Area, Ordos Basin

LU Xiangwei<sup>1</sup>, DU Shuheng<sup>2,3,†</sup>, ZHENG Kui<sup>1</sup>, ZHANG Huanguo<sup>1</sup>, SUN Tong<sup>2,3</sup>, WANG He<sup>2,3</sup>

1. The 6th Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710299; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 3. Oil and Gas Institute, Peking University, Beijing 100871;  
† Corresponding author, E-mail: dushuheng@pku.edu.cn

**Abstract** Through the core observation, inter-well tracer test and water flooding front test, the fracture development characteristics of Chang-7 tight sandstone reservoir in Xin'anbian area of Ordos Basin are studied. The results show that maximum horizontal principal stress direction of Chang-7 tight sandstone oil reservoir in Xin'anbian area is NE60°~80°. The fracture type is mainly high angle fractures or vertical fracture, and fracture direction is NE75°~85°, the dip angle is 70°~85°. Dynamic monitoring data analysis shows that the micro fracture research area of tight sandstone oil reservoir developed widely and plays an important role in increasing the seepage channel and improving the permeability of matrix, water channeling easily along the fracture formation, resulting in the production of well water is fast. 3D geological modeling results show a high degree between oil saturation of tight sandstone oil reservoir in the study area and the degree of fracture development, which can effectively support the fracture of oil and gas reservoir and accumulation.

**Key words** tight oil; fracture; water drive frontiers; geological modeling

致密油广义上指蕴藏在具有低孔隙度和低渗透率储层中的非常规石油资源,已在美国、加拿大和澳大利亚等国家进行商业性开发<sup>[1-3]</sup>,其地质特征和开发原理受到广泛关注。

近年来的勘探开发实践表明,中国致密油资源较为丰富,潜力巨大,但目前勘探程度和开发技术水平相对落后。随着勘探开发工作的进行,对致密油储层的地质研究正不断深入,目前已在致密油定义及形成条件、储层特征、成藏机理、致密油分布及资源评价方法等方面取得一些成果,为进一步勘探奠定了良好的基础<sup>[4-6]</sup>。

作为储层双重介质模型的重要组成部分,致密砂岩油储层的裂缝在油气运移和流体渗流中均起到重要的作用<sup>[7-10]</sup>。裂缝的发育对油藏的形成或开发具有“双刃剑”的作用,一方面,相对于基质孔隙,裂缝具有很大的导流能力,为油气运移及流体渗流提供重要通道;另一方面,裂缝沟通了较大的断层,使得流体运动轨迹单一化,油气无法储集成藏或造成油井之间的水淹水窜。牛小兵等<sup>[11]</sup>和李乐<sup>[12]</sup>等通过有限元地应力模拟,对鄂尔多斯盆地长6段致密砂岩储层开展裂缝预测,得到该地区的裂缝分布状况。王正国等<sup>[13]</sup>结合测井相识别和岩芯标定,对特低渗透砂岩储层裂缝开展预测。周新桂等<sup>[14]</sup>结合岩芯观测与有限元模拟,对鄂尔多斯盆地沿河湾探区长6储层裂缝开展预测,建立裂缝分布网络模型。戴俊生等<sup>[15]</sup>评价了测井解释和地震解释等裂缝识别方法,以及构造应力场模拟和分形分维计算等裂缝预测方法,指出综合运用多种方法可以提升研究结果的可靠性。

鄂尔多斯盆地新安边地区长7致密砂岩油储层具有岩性致密、裂缝发育、注水见效慢、压力系统难以建立以及产量递减大等显著特征。目前,对该地区长7致密砂岩油储层裂缝发育特征缺乏全面的刻画,裂缝对实际生产的影响程度不够明确,亟待对致密砂岩油储层裂缝系统进行综合研究,寻找提高产能的新方案。本文通过岩芯观察、井间示踪剂测试和水驱前缘测试等手段,对鄂尔多斯盆地新安边地区长7致密砂岩油储层裂缝特征开展深入剖析,以期在一定程度上厘清该区裂缝与油气藏的关系。

## 1 地质概况

鄂尔多斯盆地新安边地区位于陕北斜坡西南

部,整体上呈向西倾斜的单斜构造,坡度较缓,发育一系列由东向西倾没的小型鼻状隆起(图1)。

长7段储层为一套晚三叠世以湖泊沉积为主的陆源碎屑岩系,主要发育水下分流河道、河口坝、分流间湾和前缘席状砂等4种微相类型,岩性致密,平均孔隙度为8.85%,渗透率为 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙类型以粒间孔和溶孔为主,原生粒间孔、次生粒间孔及次生溶孔均较发育。

## 2 新安边地区长7致密砂岩油储层裂缝特征

致密砂岩油储层裂缝不仅控制油气的产出,而且是影响油气富集的重要因素<sup>[16-18]</sup>,对油田产能建设、流体渗流规律、井网设计、压裂设计、套管强度设计和制定合理的注水政策均有重要影响<sup>[19-22]</sup>。本文利用地质剖面、示踪剂试验、干扰试井、水力压裂和注水-采油动态观测资料等数据,对鄂尔多斯盆地新安边地区长7致密砂岩油储层裂缝发育特征进行综合分析。

### 2.1 裂缝观察统计结果

陕北斜坡长期保持台地相沉积,构造活动较少,

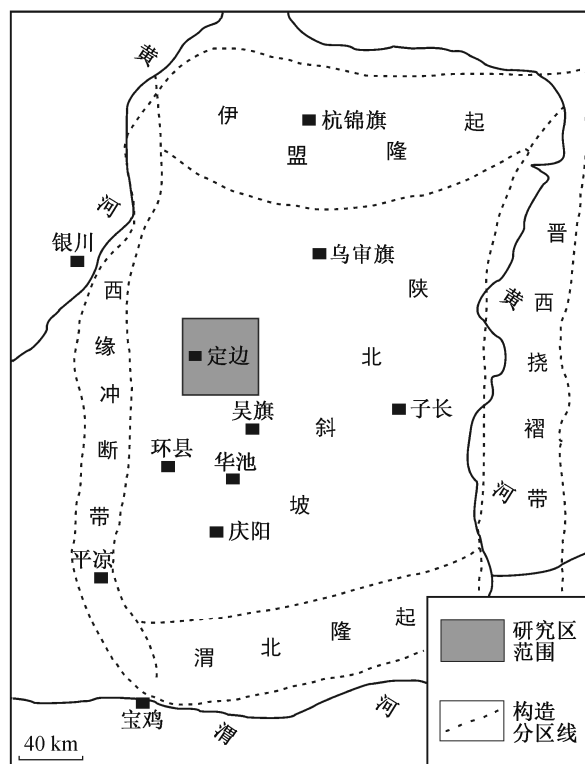


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area location

地层产状平缓,断层和褶皱不发育。但是,岩芯观察和野外露头调查均表明,该区裂缝广泛发育,形成机制有待探索。

野外露头观察表明,该区裂缝产状大多垂直于层面,且缝面无明显错动;岩芯观察表明,高角度裂缝发育较广泛,同时伴有少量斜交缝(图2)。总体而言,长7致密砂岩油储层裂缝主要为区域性构造缝,以高角度缝为主,大面积发育,产状稳定,北东向裂缝更为发育,表现为延伸长,界面平整,近平行分布,为研究区主裂缝。

对54口井的岩芯观察显示,新安边地区长7致密砂岩油储层天然裂缝较发育,以高角度构造缝为主(图2)。高角度微裂缝发育,54口井中,有31口井见裂缝,发育概率为57.4%。单井裂缝为5.6条,裂缝密度为0.3条/m。

## 2.2 成像测井解释结果

基于形态学和小波分析的成像测井裂缝图像识别方法,对小波变换后的图像进行二值化处理,计算裂缝开度、倾角和走向等定量参数<sup>[23]</sup>。

以新安边地区安235-40井2246~2261 m深度段为例,成像测井处理结果(图3)显示,长7储层多发育高角度天然裂缝,局部发育钻井诱导缝。根据诱导缝的方向,可以判断最大地应力方向为NE6°~80°,裂缝走向为NE75°~85°,倾角为70°~85°,裂缝密度平均为0.33条/m。这与野外观测得出的结论相印证。

## 2.3 同位素示踪剂检测结果

同位素示踪剂测井是油藏动态监测的重要手段之一,可监测裂缝发育位置及连通状况。示踪剂监测解释结果表明,长7储层存在微裂缝贯通现象,油井易见水。本文对各井组进行示踪剂测试解释,



图2 新安边地区长7层段内高角度裂缝野外露头  
Fig. 2 High angle fracture in the outcrops of Chang-7 in Xin'anbian area

预测各井组裂缝发育情况(表1)。

## 2.4 水驱前缘测试结果

注水过程会引起流体前缘移动和孔隙流体压力升高,使地层中原来闭合的微裂缝再次张开,引发微地震。应用微地震水驱前缘监测技术,可以对注水井进行监测,得到该井的水驱前缘展布状况、注水波及范围以及水驱主流方向,从而判断微裂缝的发育状况。以安233-35井为例,水驱前缘监测结果显示,裂缝延伸及优势渗流方向以NE55°~70°为主(图4)。

## 2.5 吸水指示法结果

在致密砂岩油储层中,吸水显示法是裂缝存在与否的识别方法之一。有裂缝发育的油层,注水井注水压力不高,但吸水能力很大,视吸水指数往往高于油井的采油指数。当注水压力高于某一阈值后,井吸水指示曲线明显出现拐点,吸水指数急剧跃升。这种现象在致密砂岩油储层中普遍存在。以安259-1井为例,在注水井套管压力为12 MPa时,裂缝开启,注水量急剧增大(图5)。

油井的生产动态可以反映裂缝的发育程度。在裂缝发育程度高的情况下,油井见水快,含水率上升快,见水井多,水驱效果差,常出现水窜与暴性水淹等注采井间强连通现象。新安边地区目前存在的主要问题是油井含水率上升快,更有一些油井刚投产就见到注入水。针对这一问题,现场采取下调注水量或水井停注的应对措施,油井含水率上升趋势减缓,井组产液量明显下降,说明含水率上升快的井组存在高渗带或裂缝。通过油水井注采对应关系分析,明确了裂缝发育方向。

## 3 裂缝对致密砂岩油储层剩余油挖潜的启示

致密砂岩油储层的裂缝在改善储层渗流能力的同时,增加了注水开发的复杂性,新安边地区油井产量下降的主要原因是注入水沿裂缝形成窜流。由于储层裂缝影响,油井过早见水,含水率上升快,调整难度大。安355-101井吸水剖面(图6)显示,相比低注水强度而言,高注水强度易导致地层微裂缝开启,注入水沿裂缝窜流,单井产量低,多方向见水,有效驱替系统难以建立,开发效果差。致密砂岩油储层油井沿裂缝见水后,层内矛盾更加突出,使低含水层难以再动用。偏高的注水强度导致注入

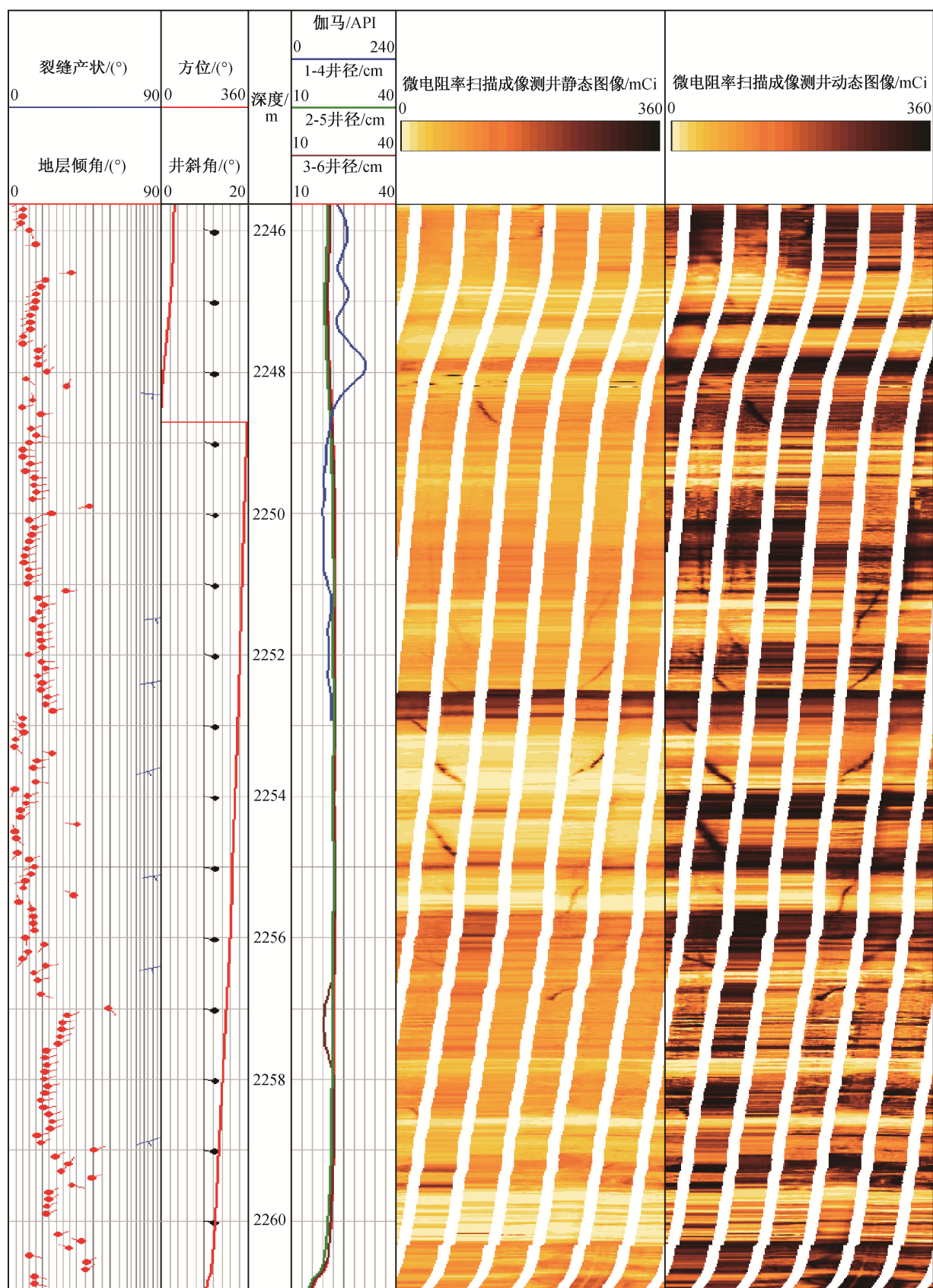


图 3 安 235-40 井 2246~2261 m 段成像特征

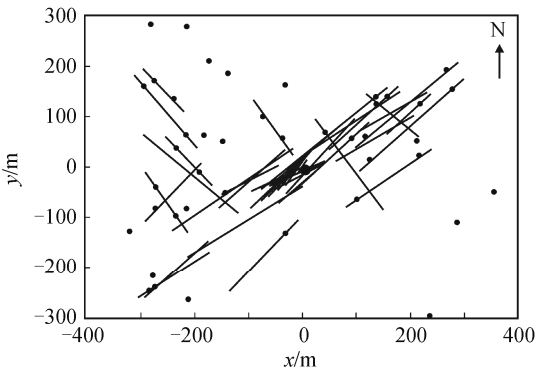
Fig. 3 Imaging characteristics at 2246–2261 m of well An-235-40



表 1 新安边地区示踪剂监测统计  
Table 1 Monitoring statistics of tracers in Xin'anbian area

注水井(组)	水驱联通井	水驱联通井比例/%	吸水层厚度/cm	吸水层平均渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔喉半径/ $\mu\text{m}$	导流能力/ $(\text{mD}\cdot\text{m})$	解释
安 237-39	安平 12	100	25.3	181	2.80	4579	微裂缝贯通
	安平 15	61	26.3	105	2.91	2762	微裂缝贯通
安 239-33	安平 14	17	11.1	88	2.65	977	高渗条带
	安平 10	22	10.4	73	2.65	759	高渗条带
	安 237-34	0.4	3.2	41	2.40	131	微裂缝贯通
	安 243-38	88	66.0	238	4.36	10948	微裂缝贯通
安 242-37	安平 12	10	15.5	55	2.13	853	高渗条带
	安 241-38	2	2.7	53	2.07	143	微裂缝贯通
安 243-30	安 242-29	83	15.4	73	2.40	1124	高渗条带
	安 90-013	17	5.2	63	2.23	328	微裂缝贯通

说明: 高渗透率层数均为 1。



圆点表示微地震事件的位置, 黑线表示潜在裂缝

图 4 安 233-35 井水驱前缘微地震监测结果

Fig. 4 Micro-seismic monitoring results on the water drive front in well An-233-35

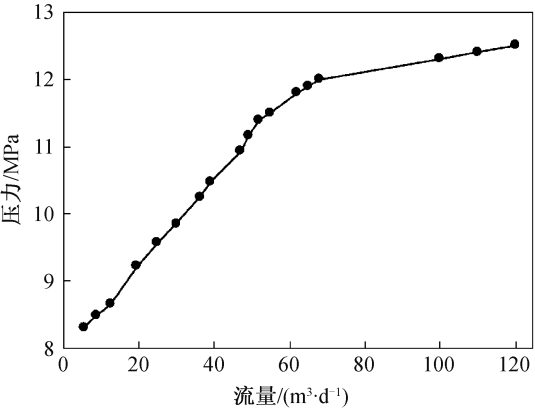


图 5 安 259-1 井吸水指示曲线

Fig. 5 Indicator curve of water absorption in well An-259-1

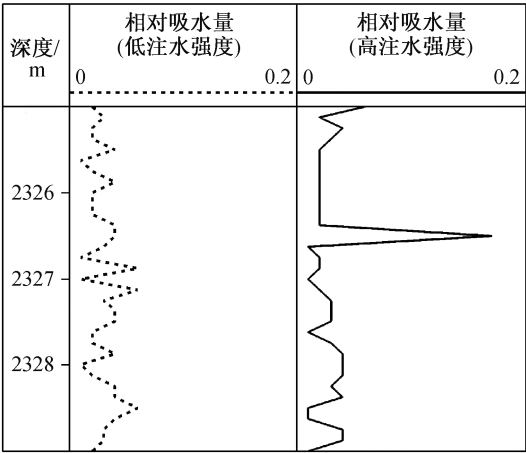


图 6 安 355-101 吸水剖面测井解释

Fig. 6 Logging interpretation of water absorption profile in well An-355-101

水单层突进, 使尚未处于开启状态的微裂缝开启, 油井迅速水淹。

从吸水剖面对比(图 6)可以看出, 随着注入时间延长, 天然裂缝开启, 注水井吸水曲线由相对均匀型转化为尖峰型, 注入水沿裂缝窜流。主向油井见水后, 开发的平面矛盾突出, 注水井压力高, 侧向井供液能力下降较快(图 7)。

杜书恒等<sup>[24]</sup>采用全缝长压裂模拟技术, 提出可以应用于低渗-特低渗储层开发的储层破裂潜能指标——测井可压裂指数, 其值越大, 表示储层破裂潜能越大。实际开发过程中, 可将该指数与含油饱和度的平面分布图叠合, 选择优先开发区块。

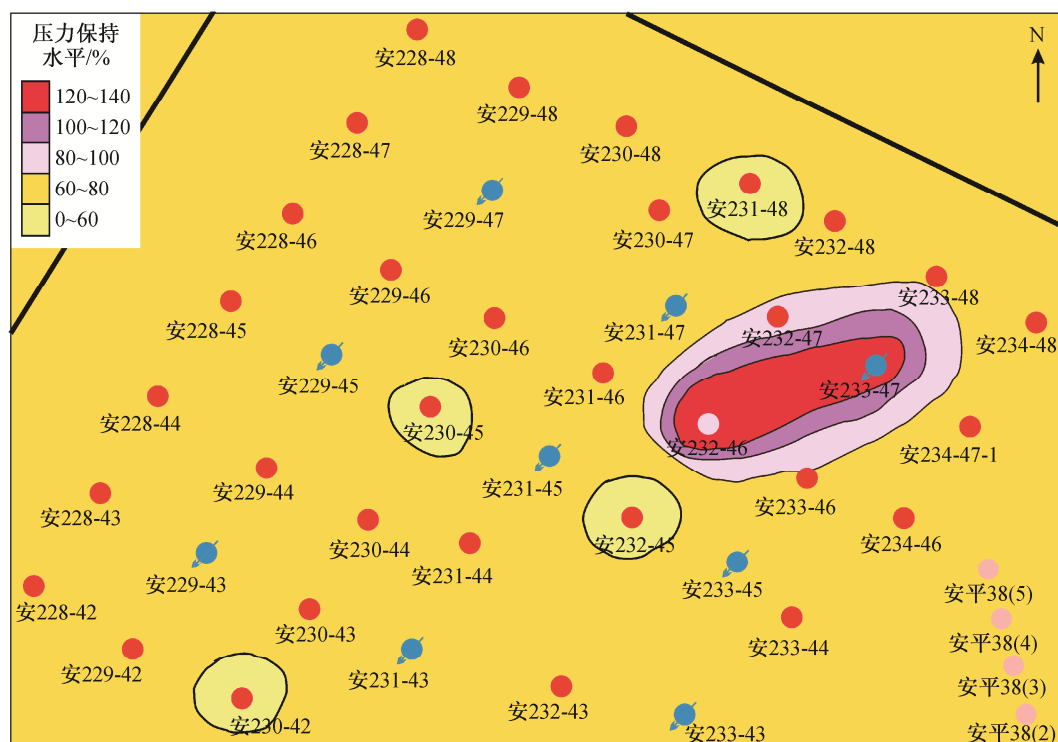


图7 新安边地区裂缝储层地层压力保持水平分布

Fig. 7 Formation pressure retention level distribution in fractured Reservoirs in Xin'anbian area

根据区块测井、沉积微相和地层测试等资料,经过大量目的层取芯观察和统计,本文建立三维地质模型,得到研究井区目的层段含油饱和度以及测井可压裂指数平面图(图8)。可以看出,区块中部和北部为含油饱和度与测井可压裂指数高值叠合

区域,可作为优先开发区块,使得剩余油挖潜“有的放矢”。

## 4 结论

1) 新安边地区长7致密砂岩油储层裂缝主要为区域性构造缝,以高角度缝为主,大面积发育,产状稳定,北东向裂缝更为发育,表现为延伸长,界面平整,近平行分布,为研究区主裂缝。

2) 新安边地区长7致密砂岩油储层最大地应力方向为NE60°~80°,裂缝走向为NE75°~85°,倾角为70°~85°,裂缝平均密度为0.33条/m。

3) 随着注水时间延长,天然裂缝开启,注水井吸水曲线由相对均匀型转化为尖峰型,注入水沿裂缝窜流。主向油井见水后,开发平面矛盾突出,注水井压力高,侧向井供液能力下降较快。

4) 实际开发中,可以通过研究井区目的层段高含油饱和度与高LFI平面图叠合的方法,达到优先开发区块的目的。

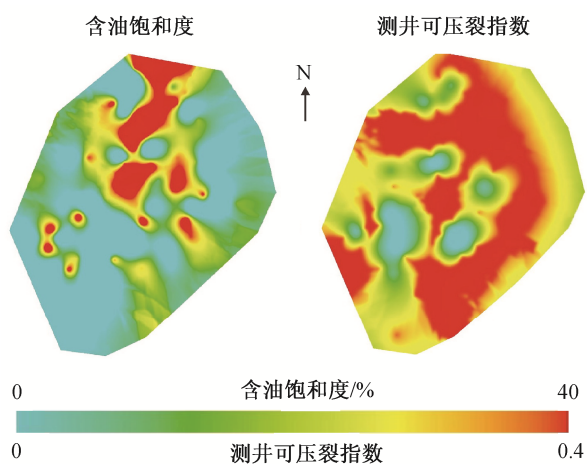


图8 研究井区目的层段含油饱和度与测井可压裂指数三维地质模型平面图

Fig. 8 3D geological model of oil saturation and logging fracture index of target layer in study area

## 参考文献

- [1] 惠克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠

- 系芦苇沟组致密油储层岩石类型及特征. 石油学报, 2015, 36(12): 1495-1507
- [2] 张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义. 石油学报, 2015, 36(2): 127-137
- [3] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3-17
- [4] 王社教, 蔚远江, 郭秋麟, 等. 致密油资源评价新进展. 石油学报, 2014, 35(6): 1095-1105
- [5] 施立志, 王卓卓, 张革, 等. 松辽盆地齐家地区致密油形成条件与分布规律. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 44-50
- [6] 曹喆, 柳广弟, 柳庄小雪, 等. 致密油地质研究现状及展望. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1499-1508
- [7] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198-205
- [8] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1-9
- [9] 湛卓恒, Osadetz K. G. 西加拿大沉积盆地 Cardium 组致密油资源评价. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 320-328
- [10] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350
- [11] 牛小兵, 侯贵廷, 张居增, 等. 鄂尔多斯盆地长 6-长 7 段致密砂岩岩芯裂缝评价标准及应用. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 571-579
- [12] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 逆断层对致密岩石构造裂缝发育的约束控制. 地球物理学报, 2011, 54(2): 466-473
- [13] 王正国, 曾联波. 特低渗透砂岩储层裂缝特征及其常规井识别方法. 国外测井技术, 2007, 22(2): 14-18
- [14] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测. 石油学报, 2009, 30(2): 195-200
- [15] 戴俊生, 汪必峰. 综合方法识别和预测储层裂缝. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 1-8
- [16] 杜书恒, 师永民, 徐启, 等. 井震联合非均质储层改造规模的非线性表征方法. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 241-248
- [17] Du Shuheng, Shi Yongmin, Guan Ping, et al. New inspiration on effective development of tight reservoir in secondary exploitation by using rock mechanics method. Energy Exploration & Exploitation, 2016, 34(1): 1-16
- [18] Du Shuheng, Shi Yongmin, Bu Xiangqian, et al. New expression of the changing stress field in low-permeability reservoir and its application in secondary exploitation. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(4): 491-514
- [19] 杜书恒, 师永民. 低渗油气藏水力压裂理想水驱波及范围预测新方法. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1956-1962
- [20] 杜书恒, 师永民, 关平, 等. 松辽盆地扶余低渗非均质储层压裂缝定量预测. 地学前缘, 2017, 24(6): 1-9
- [21] 杜书恒, 梁耀欢, 师永民, 等. 松辽盆地齐家-古龙凹陷油藏泊松比变化的岩石学机制. 地学前缘, 2017, doi: 10.13745/j.esf.yx.2017-5-12
- [22] 杜书恒, 赵晔, 庞姗, 等. 岩石水力压裂微观破裂机制. 天然气地球科学, 2016, 27(12): 2237-2245
- [23] 严永新, 张永华, 陈祥, 等. 微地震技术在裂缝监测中的应用研究. 地学前缘, 2013, 20(3): 270-274
- [24] 杜书恒, 关平, 师永民, 等. 低渗透油藏砂岩储层可压裂性的新判据. 地学前缘, 2017, 24(2): 257-264