

引用格式: 林伟强, 曲丽丽, 朱露, 等. 井震藏结合判定井间砂体连通性研究及应用——以南堡油田M区中深层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 373-381.

LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, et al. Evaluation of inter-well sand body connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: Taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 373-381.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.013

井震藏结合判定井间砂体连通性研究及应用

——以南堡油田M区中深层为例

林伟强, 曲丽丽, 朱露, 冯林平

(中国石油冀东油田公司南堡油田作业区, 河北唐山 063200)

摘要: 南堡油田M区是冀东油田的主力注水开发区块, 目前已进入中含水阶段, 主体区域注水效果显著, 局部区域受井间砂体连通性认识不清的影响, 注水效果不明显, 水驱储量动用程度较低。准确判定井间的砂体连通性, 对于完善该区注采井网, 提高采收率意义重大。该区砂体横向变化快, 纵向砂体层数多而薄, 叠置关系复杂, 井间砂体连通认识难度大。针对这个问题, 通过地质、地震、测井、油藏等多学科综合技术来判定井间砂体连通性, 其中包括地震相技术、地震属性技术、地震反演技术、油藏动态分析技术等。井震藏结合的技术手段, 已广泛应用于该区的井间砂体连通性判定, 并在开发实践中取得了良好效果。研究成果提高了该区井间砂体连通性判定的准确率, 为指导该区的油藏开发调整提供了有利依据, 对同类型油藏的井间砂体连通性判定具有较好的借鉴意义。

关键词: 南堡油田; 井间砂体连通性; 井震藏结合; 地震相技术; 地震属性技术; 地震反演技术; 油藏动态分析技术

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Evaluation of inter-well sand body connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: Taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example

LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, FENG Linping

(Nanpu Oilfield Operation Area of Jidong Oilfield Branch Company, CNPC, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: M area in Nanpu Oilfield is the main water injection development block of Jidong Oilfield, and it has entered the middle water cut stage at present. The water injection effect in the main area is remarkable, but in some areas, the effect is not obvious due to the unclear understanding of inter-well sand body connectivity, and the utilization degree of water injection reserves is low. An accurate evaluation of inter-well sand body connectivity is of great significance for improving injection and production well pattern and enhancing oil recovery in this area. The sand bodies in this area change rapidly in transverse direction, and the number of layers in longitudinal direction is large and small, thus it is difficult to recognize the inter-well sand body connectivity. In order to solve this problem, the inter-well sand body connectivity is evaluated by the multi-disciplinary comprehensive technology including including seismic phase technology, seismic attribute technology, seismic inversion technology and reservoir performance analysis technology. With the combination of well, seismic and reservoir, this technology has been widely used to determine the inter-well sand body connectivity in this area, and achieved good results in development practice. The research improves the accuracy of inter-well sand body connectivity evaluation, and provides a favorable basis for guiding reservoir development adjustment in this area. It is of good reference for the evaluation of the inter-well sand body connectivity in the same type reservoir.

Keywords: Nanpu Oilfield; inter-well sand body connectivity; combination of well, seismic and reservoir; seismic phase technology; seismic attribute technology; seismic inversion technology; reservoir performance analysis technology

收稿日期: 2021-04-29。

第一作者简介: 林伟强(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事开发地质研究工作。地址: 河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号, 邮政编码: 063200。E-mail: 769016781@qq.com

南堡油田M区中深层($NgIV-E_d1$)为辫状河三角洲相储层形成的多层砂岩交互油藏,储层成因类型丰富、横向变化快、接触关系复杂,井间砂体连通性认识是否清楚是能否实现精细开发的关键^[1-2]。

判定井间砂体连通性的方法有很多,有多级次旋回对比和沉积微相分析等传统方法,有RFT测井、测井曲线响应、测井曲线叠加等测井方法,有属性提取、地震反演、井间地震等开发地震方法,有示踪剂等地球化学方法^[3-4],以及井间综合分析、产吸剖面对比等油藏工程方法^[5-9]。单一的识别方法各有优缺点,难以匹配该区复杂的地质情况。因此,提出井震结合技术,即地震相技术来确定砂体几何形态和边界,地震属性技术和地震联合反演技术判定砂体之间的连通性和连通程度;通过示踪剂、产吸剖面、注采关系等油藏动态资料分析^[10],验证井间砂体的连通关系,为后期开发调整提供可靠依据。

1 问题背景

南堡油田M区位于南堡凹陷西南部的沙垒田凸起北部斜坡带上,是一个被断层复杂化的潜山披覆背斜构造(图1),属于中孔中渗复杂断块油气藏。该区为注水开发,反七点法注水井网,井距250~300 m,油藏注水开发三大矛盾突出,水驱储量动用程度较低。如何完善注采井网,增加受效方向,提高水驱动用程度,是该区所面对的迫在眉睫的问题。井间砂体是否连通,连通程度如何,对于完善注采井网具有重要的指导意义。该区断块复杂,储层非均质性强,砂体展布认识及井间单砂体连通关系判定难度较大。

2 井间砂体连通性

砂体在三维空间上直接接触是砂体之间相连通

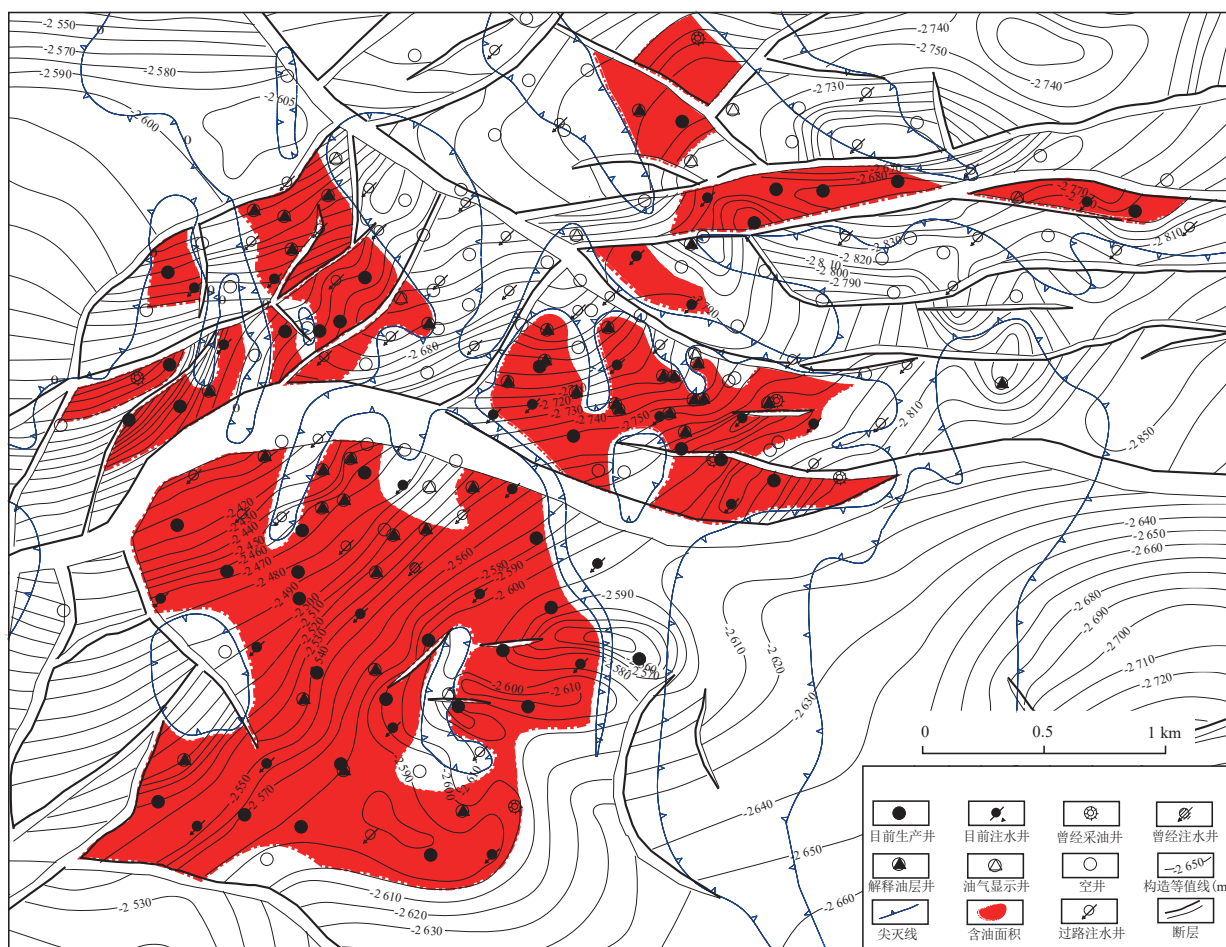


图1 南堡油田M区 $Ed_1 II \textcircled{2}1$ 小层平面

Fig. 1 Plan of sublayer $Ed_1 II \textcircled{2}1$ in M area of Nanpu Oilfield

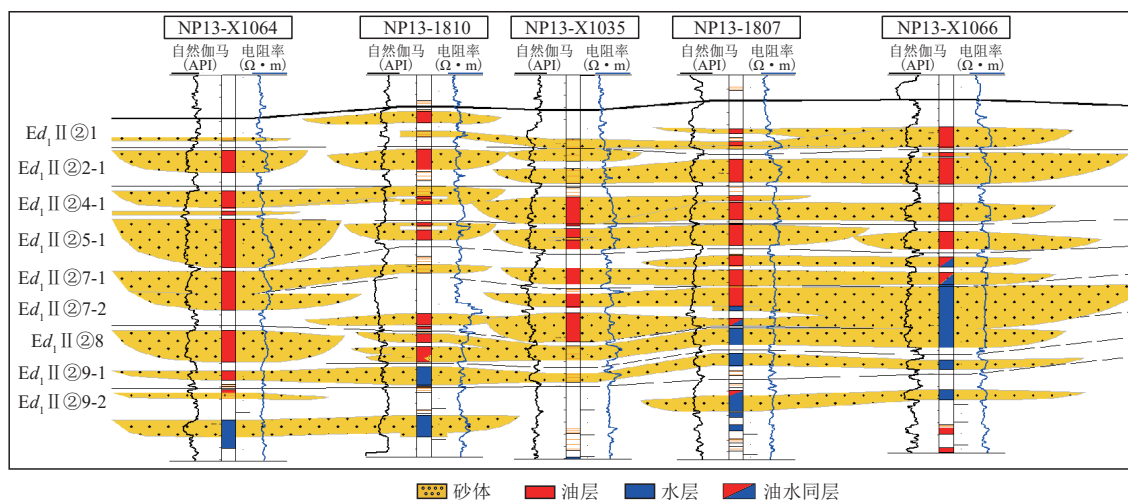


图2 南堡油田M区主体区砂体连井剖面

Fig. 2 Cross well section in sand body of main M area of Nanpu Oilfield

的必要条件。南堡油田M区是浅水环境下辫状河三角洲前缘沉积,为南、北两个物源的交汇区,河道横向变迁频繁,造成砂体横向变化快。相带上主要表现为水下分流河道,河道分叉、摆动、切叠特征明显,砂体叠置现象明显(图2)。

2.1 砂体接触关系

利用地质统计学反演结果,刻画砂体期次及边界,该区的砂体接触关系进一步得到确认(图3)。从反演剖面可以看出,相邻砂体存在多种形态的叠置接触关系,主要存在拼接型、垂叠型和侧叠型。拼接型为砂体横向搭接接触;垂叠型为上覆砂体对前期沉积砂体冲刷造成,垂向上两期砂体叠置在一起;侧叠型为后期砂体从侧面切叠前期砂体,横向上砂体相连。

由于水下分流河道频繁分叉改道,单砂体相互叠切,接触关系复杂。在划分不同期次河道,明确不同砂体叠置的基础上,进一步识别砂体接触关系,主要有切叠接触、削截接触、拼接接触、不接触4种类型(表1)。

2.2 砂体接触关系的动态响应

根据M区的砂体接触关系,把井间砂体连通性分为3类:连通、弱连通、不连通。砂体接触关系不同,其接触类型和开发治理对策各异,动态响应特征也不同,可以分为4类:Ⅰ类注水见效快、见效特征明显,产量升高,压力升高;Ⅱ类注水见效特征不显著,产量略微升高或产量平稳;Ⅲ类注水见效所需时间长,递减变小;Ⅳ类注水不见效。

3 地震勘探技术

在“沉积模式边界”控制下,以沉积地质库数据为基础,开展地震相、地震属性、特征参数反演联合

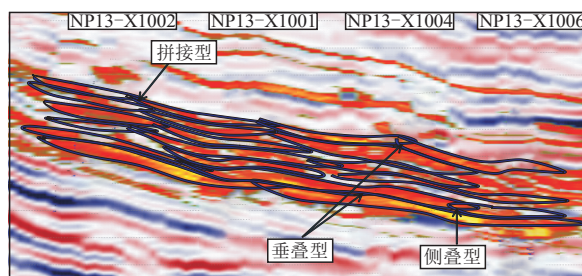


图3 地震识别南堡油田M区砂体叠置类型

Fig. 3 Seismic identification of sand body superimposition types in M area of Nanpu Oilfield

表1 不同砂体叠置类型的特点

Table 1 Characteristics of different sand body superimposition types

砂体叠置类型	砂体接触关系	剖面样式	成因机制
垂叠型	切叠接触		河道进积
	削截接触		河道多期充填
侧叠型	拼接接触		河道摆动
拼接型	拼接接触		河道分叉
	拼接接触		河道分叉 河道侧缘
	不接触		孤立河道沉积

等地震技术刻画砂体边界方法摸索,进而预测沉积朵体边界,在此基础上进一步预测井间的砂体连通性。

3.1 地震相分析技术

根据地震反射的外形,同相轴的形态产状、强弱特征、相位终止特征、接触关系等多种要素,总结出与地质特征的相关性,完成地震剖面的地质解释。利用地震相分析,把井间砂体连通性分为三类:连通、半连通和不连通(表2)。

地震相技术可以确定砂体的形态和边界。但因为地震波在向下传播过程中高频部分出现衰减,地震资料主频会降低,纵向分辨率有限。而且有的砂体为不规则条带状,仅仅依靠地震相不能完成井间砂体连通关系认识。

3.2 地震属性分析技术

利用地震属性分析方法,发挥地震资料的横向连续性优势,反映沉积演化特征并有效预测井间砂体展布特征,评价砂体连通性。

经过筛选,能够反映地下岩性变化的振幅类属性最适合本区的砂岩研究^[11-12]。振幅类地震属性一方面可以检测砂体的平面分布规律,展示朵体形态。该区物源为南北双向供给,北部物源方向以东北、北西向为主,南部物源方向为南西向;垂利物源方向上,朵体的形态清晰;宏观上朵体有迁移,局部交汇处朵体间砂体间有叠置;北物源有3个沉积(朵)体,宽度300~1500m;南物源有5个沉积(朵)体,宽度200~1200m。另一方面可以描述井间的平面砂体连通关系,但多解性较强,而且无法描述储层纵向上

的叠置关系,不能直观地解释纵向上各井不同油水层之间的关系。

3.3 地震反演分析技术

地震反演的主要任务是弥补常规地震剖面分辨率低的缺陷,高分辨率的地震反演剖面,是判定井间砂体连通性的常用参考手段。

传统地震反演的目标就是在井的控制下把近炮检距反射振幅资料转换成波阻抗资料,即为井控波阻抗反演。波阻抗反演的分辨率不高^[13],与砂岩纵向上做不到一一对应,无法达到识别该区井间单砂体连通性的要求。

3.3.1 波形指示模拟反演

波形指示模拟反演充分利用地震波形的横向变化来反映储层空间的相变特征,是一种真正的井震结合高频模拟方法,是针对薄层开发应用的高精度波阻抗反演方法^[14]。该反演方法对井位分布的均匀性没有严格要求,反演效率较高。

波形指示模拟反演纵向分辨率较高,横向连续性较强;但是对于断层较多,断块比较复杂的地区,适用性一般;可以在该区井网稀疏、构造相对简单、相位比较连续的区域使用。

3.3.2 地质统计学反演

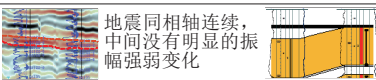
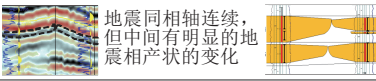
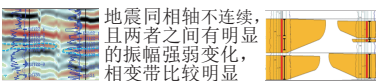
地质统计学反演是目前高分辨率储层预测的手段之一,是波阻抗反演效果不理想情况下的岩性反演,适用条件是储层特征曲线同地震记录能建立良好关系。

通过编制该区自然伽马曲线和波阻抗曲线的交汇图(图4)可见,自然伽马曲线对于识别砂泥岩的界线比较明显。在统计学反演中,拟合变差函数和进行随机模拟反演是最重要的两个环节。在该区的实际反演中(图5),利用反映地层和岩性变化比较敏感的自然伽马测井曲线构建具有声波量纲的新曲线,结合声波的低频模型,合成拟声波曲线,使它既能反映地层速度和波阻抗的变化,又能反映岩性的细微差异性。反演结果既能保留地震横向连续性的优势,又继承了测井曲线纵向高分辨率优点,井间砂体纵向叠置关系清晰。

拟声波地质统计学反演适用于沉积现象较明显,易追踪的岩性体,适合开发中后期断层复杂、井网密集、分布规律的区块,广泛适用于该区。

表2 地震相判定砂体连通性

Table 2 Evaluation of sand body connectivity by seismic phase

连通级别	连通性	描述	地震相特征	对比方式
一类	连通	同一砂体	地震同相轴连续,中间没有明显的振幅强弱变化	
二类	半连通	同一时期沉积的不同河道砂体相交或相切接触	地震同相轴连续,但中间有明显的地震相产状的变化	
三类	不连通	河道砂体与其他类型的砂体连接时,两者岩性物性有很大的差异	地震同相轴不连续,且两者之间有明显的振幅强弱变化,相变带比较明显	

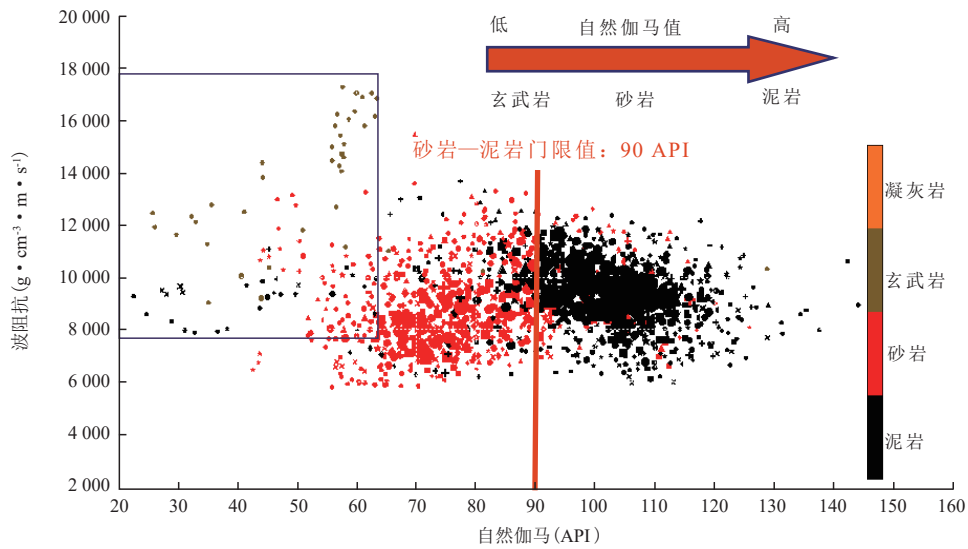


图4 南堡油田M区岩性测井识别交汇图

Fig. 4 Intersection map of lithology logging identification in M area of Nanpu Oilfield

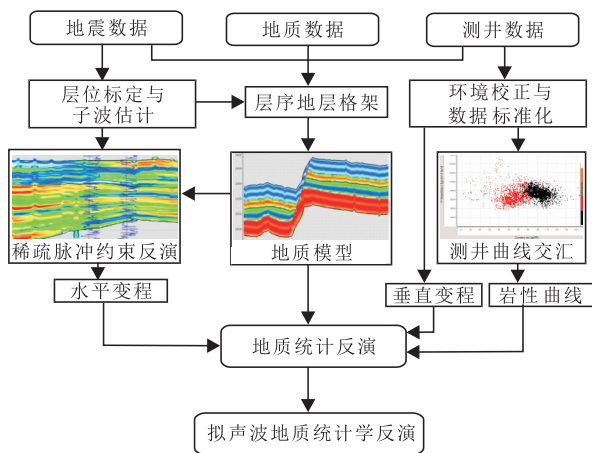


图5 拟声波地质统计学反演流程

Fig. 5 Fitting acoustic geostatistical inversion process

3.3.3 反演技术优选

要预测多层砂岩储层,必须根据不同地区的不同地质条件,根据其断层分布情况和储层发育状况,尝试多种反演方法(表3),综合多项结果分析,才能较好地描述多层砂岩储层的叠置关系和展布特征。

根据南堡油田M区开发程度较高,断层多期发育,井网密集,砂体窄而薄、规模小、横向变化快等特点,主要选取拟声波地质统计学反演进行连通性判定^[15];同时,针对部分构造简单、储层横向连续性强、井网比较稀疏的区块,辅以波形指示模拟反演技术,有助于提高反演效率。由图6可以看出,地质统计学反演的纵向分辨率更高,与单井砂体的匹配程度也较高,基本上厚度大于4 m的储层,可以清晰地呈现

表3 地震反演方法优选

Table 3 Optimization of seismic inversion methods

反演方法	分辨率	符合率	识别岩性体能力及适用性
波阻抗反演 (无井)	与原始地震相当	较低,与原始地震相当,仅有60%	沉积现象明显,易追踪岩性体,适合开发初期
波阻抗反演 (用井)	略高于原始地震	一般,为70%	沉积现象较明显,易追踪岩性体,适合开发初期到中期,构造复杂区块
相控波形指示 反演	高,与井相当	参与反演井能达到85%左右,非参与反演井约70%	沉积现象明显,易追踪岩性体,适合断块相对简单、相位连续、井网不规则的开发区块
拟声波地质 统计学反演	高,与井相当	参与反演井符合率取决于拟合波阻抗区分砂泥岩的能力,一般能达到80%,非反演井约65%	沉积现象较明显,易追踪岩性体,适合开发中后期构造复杂、井网密集、分布规律的区块

出井间砂体的纵向叠置关系和连通情况。

综上所述,对比地震相技术、地震属性技术、地震反演技术这3种方法,存在不同的特点:地震相波峰、波谷均有砂体,终止边界不能确定,纵向分辨率有限,对地震资料的依赖性较强;属性预测能展示砂体平面展布特征,但无法展示砂体的纵向叠置关系,存在一定多解性;地震反演能够确定横向砂体边界,且纵向砂体交切关系更清晰,纵向分辨率更高。

4 油藏动态分析技术

几何连通的砂体经过储层改造可以成为水动力连通砂体^[16]。油藏开发过程中,油水井连通关系变化受到开发方式、井网、注采强度及储层改造等多种因素影响。目前国内研究动态砂体连通性的方法有很多^[17-18],要根据油藏的砂体发育特点和开发形势来选取适合的方法。

4.1 南堡油田M区油藏开发形势

南堡油田M区为注水开发,采出程度8.1%,采油速度0.4%,采出程度和采油速度较低。受平面注水突进和层间动用程度不均衡影响,区块含水上升速度较快,综合含水68.0%,处于中含水阶段。水驱储量控制程度为74%,水驱储量动用程度为48.9%,各断块水驱控制和动用差异较大,主体断块动用状况相对较好。根据主要开发矛盾,把该区分分为三大区域:未建立驱替区域、驱替不均衡区域和需有效驱

替区域,其中,驱替不均衡区域的产量占比最大,达到了69%,是重点治理的目标区。

井间砂体连通性的正确判定,对于建立均衡而有效的驱替意义重大。在通过井震结合对连通性进行认识的基础上,要结合油藏动态资料和生产实践进行综合分析。根据该区的油藏开发形势和砂体发育特点,常利用地层压力资料、示踪剂及水淹数据、产液吸水剖面、生产动态数据等方法进行验证和判定^[19]。

4.2 油藏动态分析方法

1) 地层压力资料反映井间连通性。连通砂体中压力传导较快,水井注水后,周围邻井地层能量得到补充,地层压力恢复,甚至出现地层超压现象。M区测压资料丰富,对于判定井间砂体连通性具有参考意义。

2) 示踪剂及水淹层明确井间连通性^[20]。由水井注入示踪剂,采油井采出示踪剂,说明砂体连通。若新钻井与周围水井连通,并在注水层位中钻遇水淹层,说明井间连通性好。M区绝大部分水井已注入示踪剂,统计各注采井组油井见剂时间,显示全区油井平均见效时间为207 d,水线推进速度平均1.38 m/d。

3) 产液吸水剖面资料反映井间连通性。当注水层吸水,对应油井产液时,可以认为油水井具有良好的注采对应关系,反映注水井与生产井砂体连通。由于M区的油水井多为合采合注,现场工艺中很难做到逐层测试,不能具体判断某一小层砂体连通性,具有一定的局限性。

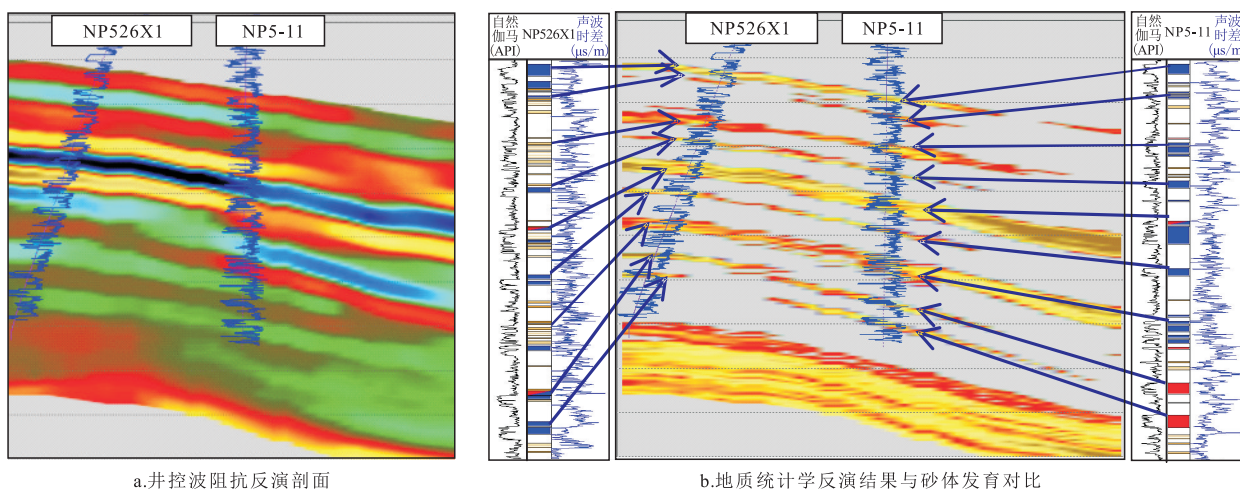


图6 波阻抗反演与地质统计学反演剖面对比

Fig. 6 Comparison between impedance inversion section and geostatistical inversion section

4) 生产动态数据反映井间连通性。利用注采数据动态变化,对比分析相邻油水井注水是否见效,见效井间砂体连通性好。注采压差反映油水井间压力变化,压力相关性越好,说明砂体连通性越好。采液指数及视吸水指数反映油水井动态采出程度及吸水程度,指数越高,井间砂体连通的可能性越大。由于M区中深层油藏油层厚度大,边底水范围小且能量不足,所以当油井含水时多数为注水见效反应,说明周围邻井水井注水见效,可以反映油水井砂体连通性。

5 应用情况

通过对M区的砂体展布及井间连通性研究,调整局部井区注采关系,完善开发注采井网。以朵体为背景,河道为单元,以微相为引导,连通性为基础,实施井网加密和调整、压裂、注采调控等措施,缓和注采平面矛盾,实现均衡水驱。

1) 对于不连通井组,实施井网调整

该区的 Ed_1 II ②1 小层 NP13-X1704 井砂体的厚度为 8.9 m,水井 NP13-X1041 井砂体的厚度为 2.2 m,沉积特征指示均为河道及河道侧缘沉积,从产液剖面看水井吸水,油井却未见明显反应,注采矛盾明显,连通关系待落实。

地震剖面无法精确判定井间是否连通(图7a),利用反演方法判定砂体不连通(图7b),2019年两井间加密新井(NP13-1808)钻遇薄层砂岩,判断为河道侧缘,无水淹迹象,说明原来两井之间存在河道分流,是中间存在泥质隔挡的两个河道砂体(图7c),与综合判断认识一致。根据油水井间连通关系,重新布置井网,转注 NP13-X1702 井给周围邻井注水,补充邻井地层能量,完善注采井网。

2) 对于弱连通井组,实施压裂引效

该区 NP13-1502 井组发育在朵体边部河道侧缘上,通过提取地震振幅属性,分析认为 NP13-1502 井与 NP13-1015 井属于同一河道,顺物源方向;与 NP13-X1054 井属于不同河道(图8a)。

此断块断层发育相对简单,选取反演效率更高的波形指示模拟反演方法,反演结果显示 NP13-1502 井与 NP13-1015 井都存在弱连通关系(图8b),与平面振幅属性预测结果一致。

根据物性分析,2017年对 NP13-1015 井进行压裂引效,压裂后 NP13-1502 井日注水由 60 m^3 升

至 80 m^3 ,NP13-1015 井受效明显,初期日增油 8 t ,已保持高产稳产 3 年多,截至 2020 年底累计增油 $0.77 \times 10^4 \text{ t}$ (图8c)。

3) 对于连通性较好井组,实施注采调控

对该区高含水井组落实油井出水层,实施层段调控。对于注水突进区实施调剖,缓解注水矛盾。2020 全年累计调控 34 井次,实现增油 $0.34 \times 10^4 \text{ t}$ 。

立足油藏整体能量恢复,加强层段注水。根据压力监测与动态分析,结合沉积特征及井组平面渗

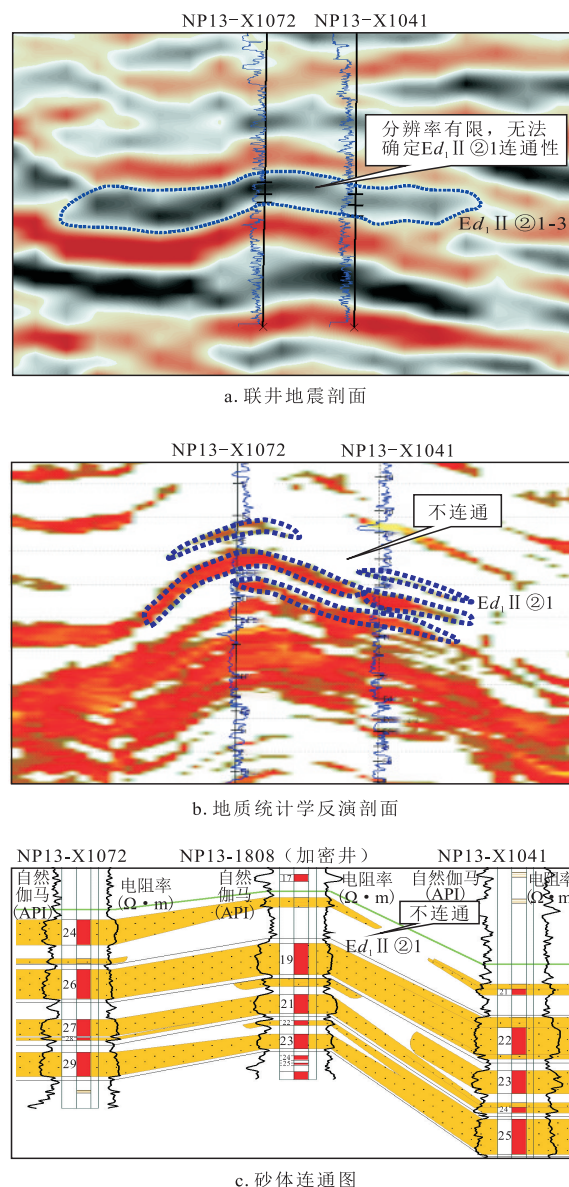


图7 NP13-X1072井—NP13-X1041井井间砂体连通性认识

Fig. 7 Understanding of sand body connectivity between Well-NP13-X1072 and Well-NP13-X1041

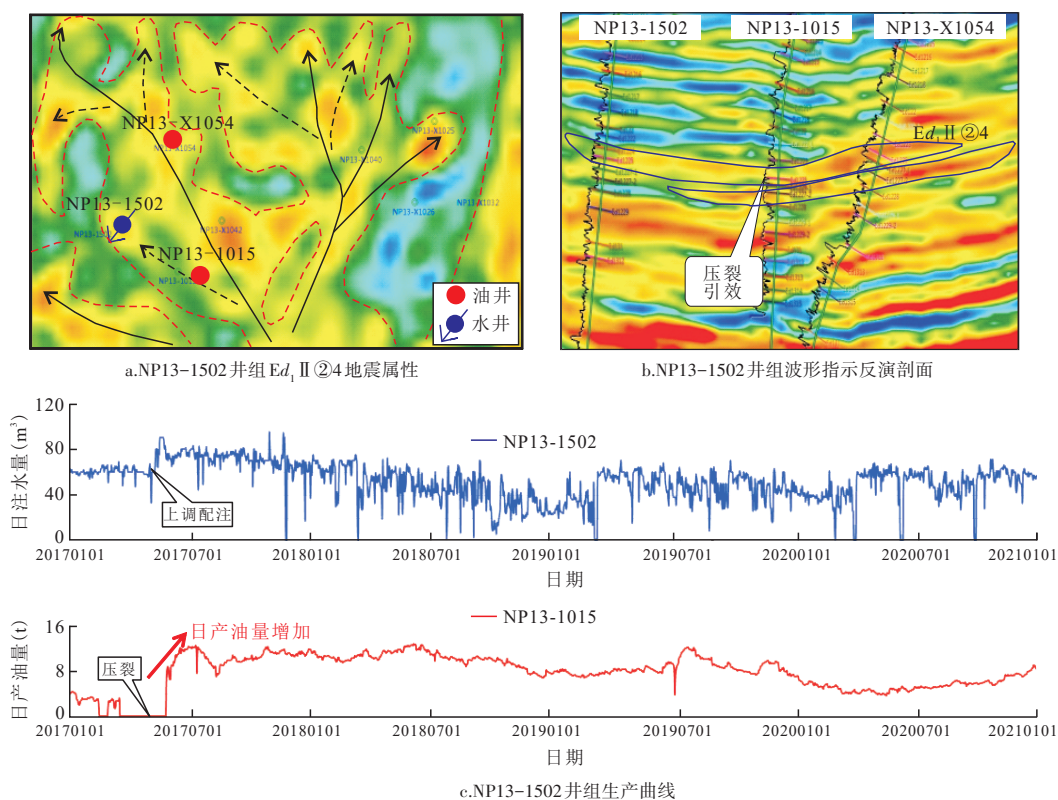


图8 压裂引效措施效果评价

Fig. 8 Effect evaluation of fracturing massures

透率,2020全年实施水量上调17井次,调整段内注水27段,日上调水量 325 m^3 ,累计增油 $0.23\times 10^4\text{ t}$ 。

6 结论

1) 南堡油田M区砂体横向变化快,纵向叠置明显,主要的砂体接触类型为切叠接触、削截接触、拼接接触、不接触4种类型,井间砂体连通性分为连通、弱连通、不连通3类,井间砂体连通性认识难度大。

2) 井震结合判定井间砂体连通性的主要方法包括:地震相技术确定砂体边界和范围;地震属性技术刻画砂体平面展布规律;以拟声波地质统计学反演为主、波形指示模拟反演为辅刻画砂体的纵向叠置关系;油藏动态分析技术与生产实践相结合,验证连通性判定的准确程度;该方法有助于降低判定南堡油田M区井间砂体连通性的多解性,提高判定精度。

3) 根据井震结合技术的判定结果,针对不连通井组实施井网加密调整,弱连通井组实施压裂引效等措施,连通性较好的区域实施注采调控等综合

治理措施,取得了良好的效果,为南堡油田M区完善注采井网、提高采收率提供了有利指导。

参考文献

- [1] 梁文富,余兴华,贾春雨.完善单砂体注采关系的做法及效果[J].大庆石油地质与开发,2002,21(3):38-41.
LIANG Wenfu, YU Xinghua, JIA Chunyu. Comprehensive use of pattern to improve the injection-production relation of single sand body[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(3): 38-41.
- [2] 路遥.新民扶余油层单砂体分布及连通关系研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
LU Yiao. Study on distribution and connectivity of single sand body in Fuyu reservoir of Xinmin Oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [3] 杨虹,王德山,黄敏.示踪剂技术在营八断块的应用[J].油田化学,2002,19(4):343-345.
YANG Hong, WANG Deshan, HUANG Min. A case of using water soluble tracer to investigate interwell connectivity at fault block Y8[J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(4): 343-345.
- [4] 张钊,陈明强,高永利.应用示踪剂技术评价低渗透油藏油水井间连通关系[J].西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(3):48-49.
ZHANG Zhao, CHEN Mingqiang, GAO Yingli. Estimation of

- the connectivity between oil wells and water injection wells in low-permeability reservoir using tracer detection technique[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2006, 21(3):48-49.
- [5] 付辉.油藏井间动态连通性及地质控制因素研究——以南图尔盖盆地 Konys 油田为例[J]. *东北石油大学学报*, 2016, 40(3):89-96.
FU Hui. Dynamic connectivity between wells and geological control factors: Taking Konys oilfield in South Turgay basin as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2016, 40(3): 89-96.
- [6] 赵辉,李阳,高达.基于系统分析方法的油藏井间动态连通性研究[J]. *石油学报*, 2010, 31(4):633-636.
ZHAO Hui, LI Yang, GAO Da. Research on reservoir interwell dynamic connectivity using systematic analysis method[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 633-636.
- [7] 石广志,冯国庆,张烈辉.应用生产动态数据判断地层连通性方法[J]. *天然气勘探与开发*, 2006, 29(2):29-31.
SHI Guangzhi, FENG Guoqing, ZHANG Liehui. Inferring stratal connectivity from production performance data[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2006, 29(2):29-31.
- [8] 杜庆军,侯健,刘业俊.准噶尔盆地陆9井区J2X4油藏井间动态连通性[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6):621-623.
DU Qingjun, HOU Jian, LIU Yejun. Dynamic connectivity between wells of J2X4 reservoir in well block Lu 9, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 621-623.
- [9] 赵辉,姚军,吕爱民.利用注采开发数据反演油藏井间动态连通性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(6):91-98.
ZHAO Hui, YAO Jun, LYU Aimin. Reservoir interwell dynamic connectivity inversion based on injection and production data [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(6): 91-98.
- [10] 盖平原.注采井间连通性的定量研究[J]. *油气田地面工程*, 2011, 30(2):19-21.
GAI Pingyuan. Quantitative study on inter-well connectivity of injection production well[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2011, 30(2): 19-21.
- [11] 李伟,岳大力,胡光义,等.分段地震属性优选及砂体预测方法——秦皇岛32-6油田北区实例[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(1):121-130.
LI Wei, YU Dali, HU Guangyi, et al. Seismic attribute optimization and sand body prediction method in frequency division: A case study of north area of Qinhuangdao 326 oilfield [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(1): 121-130.
- [12] 刘威,罗珊珊,李银婷,等.地震属性技术在碳酸盐岩储层预测及其应用[J]. *石油化工应用*, 2011, 30(5):67-69.
LIU Wei, LUO Shanshan, LI Yinting, et al. The prediction and application of seismic attribution technique in the carbonate reservoir[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2011, 30(5): 67-69.
- [13] 李占东,赵伟,李阳,等.开发地震反演可行性研究及应用——以大庆长垣北部油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(5):797-806.
LI Zhandong, ZHAO Wei, LI Yang, et al. Feasibility study and application of development seismic inversion: A case study from northern Changyuan oilfield of Daqing area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(5): 797-806.
- [14] 钱银磊,胡清雄,王晓辉,等.地震波形指示反演在薄储层预测中的应用[J]. *重庆科技学院(自然科学版)*, 2017, 19(6):17-20.
QIAN Yinlei, HU Qingxiong, WANG Xiaohui, et al. Application of seismic waveform indicator inversion in thin sandstone prediction Technology[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2017, 19(6): 17-20.
- [15] 李文龙.密井网区井震结合储层描述方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2016, 35(4):137-142.
LI Wenlong. Reservoir describing technique by the well-seismic combination for the dense well patterns[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(4): 137-142.
- [16] 吴胜和,岳大力,刘建民,等.地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2008, 38(S1):111-124.
WU Shenghe, YU Dali, LIU Jianmin, et al. Study on hierarchical modeling of reservoir architecture of underground paleochannel[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2008, 38(S1): 111-124.
- [17] 王任一.基于生产动态数据的井间储层连通性识别方法[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2):443-450.
WANG Renyi. An approach to recognize interwell reservoir connectivity based on production data[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 443-450.
- [18] 邓英尔,刘树根,麻翠杰.井间连通性的综合分析方法[J]. *断块油气田*, 2003, 10(5):50-53.
DENG Ying'er, LIU Shugen, MA Cuijie. Aggregate analysis method of continuity of formation between wells[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2003, 10(5): 50-53.
- [19] 岳大力,吴胜和,刘建民.曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. *石油学报*, 2007, 28(4):99-103.
YUE Dali, WU Shenghe, LIU Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 99-103.
- [20] 陈坤,何文祥,魏君.井间示踪剂在油藏连通性分析中的应用——以马厂油田为例[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2015, 12(8):70-73.
CHEN Kun, HE Wenxiang, WEI Jun. Application of interwell tracer in reservoir connectivity analysis: A case study of Machang Oilfield[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(8): 70-73.

(编辑 尹淑容)