

引用格式:李伟忠,宋力,张华锋,等.胜利油田油藏描述技术回顾与发展方向[J].油气地质与采收率,2024,31(5):171-185.
LI Weizhong, SONG Li, ZHANG Huafeng, et al. Reviews and development directions of reservoir description technologies in Shengli Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 171-185.

胜利油田油藏描述技术回顾与发展方向

李伟忠,宋力,张华锋,郭长春,武刚,刘丽,李坚,路言秋
(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015)

摘要:胜利油田为典型的陆相复式油气区,油藏类型多、含油层系多、断裂系统复杂,20世纪90年代初进入含水率为90%以上的特高含水开发阶段,如何针对不同类型油藏和开发阶段,精细刻画地下储层变化、精准认识剩余油,是实现高含水老油田提高采收率的基础。为此,从1996年始开展了针对老油田剩余油挖潜的精细油藏描述,通过精细储层构型表征、低序级断层精细描述、砂砾岩期次划分与连通性评价、薄互层滩坝砂储层预测、三维精细地质建模及剩余油精细描述等关键技术攻关,以及多轮次油藏描述技术迭代,形成了一套胜利特色的精细油藏描述技术,编制了精细油藏描述技术规范。截至2023年累计描述开发单元600余个,覆盖石油地质储量为 43.6×10^8 t,建模数模技术在老区调整和新区方案编制中得到广泛应用,有效支撑了油田的规模建产与效益稳产。系统分析胜利油田油藏描述技术发展历程,总结不同类型油藏形成的特色技术,分析特高含水后期老油田精细油藏描述面临的5项挑战,阐述下一步油藏描述技术的5个发展方向,对推动陆相油田精细油藏描述技术具有指导和借鉴意义。

关键词:油藏描述;技术历程;技术进展;发展方向;胜利油田

文章编号:1009-9603(2024)05-0171-15

DOI:10.13673/j.pgre.202405031

中图分类号:TE32⁺1

文献标识码:A

Reviews and development directions of reservoir description technologies in Shengli Oilfield

LI Weizhong, SONG Li, ZHANG Huafeng, GUO Changchun, WU Gang, LIU Li, LI Jian, LU Yanqiu
(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Shengli Oilfield is a typical continental compound oil and gas area with various reservoir types, many oil-bearing strata, and complex fault systems. It entered the extra-high water cut development stage with a water cut of more than 90% in the early 90s of the 20th century. The basis for enhanced oil recovery in mature oilfields with high water cuts is how to accurately characterize the changes of underground reservoirs and accurately recognize the remaining oil according to different types of reservoirs and development stages. To this end, the oilfield has carried out the fine reservoir description for the remaining oil potential in mature oilfields since 1996. A set of fine reservoir description technologies aligning with Shengli Oilfield characteristics has been formed through breakthroughs in critical technologies such as the fine characterization of reservoir architectures, fine description of low-sequence faults, phase division and connectivity evaluation of glutenites, prediction of thin beach dam sand reservoirs, three-dimensional geological modeling, and the fine description of the remaining oil, as well as multiple rounds of iterations of reservoir description technologies, and the technical specifications of fine reservoir description have been compiled. As of 2023, more than 600 development units have been described, covering 43.6×10^8 t of original oil in place. The modeling technology has been widely used in the

收稿日期:2024-05-20。

作者简介:李伟忠(1970—),男,山东招远人,研究员,硕士,从事精细油藏描述、页岩油基础研究、稠油热采开发、水驱提高采收率等研究。E-mail:Liweizhong867.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化股份公司科技攻关项目“多层系高含水油藏大幅度提高采收率关键技术(P22021)”。

adjustment of mature areas and the scheme preparation of new areas, which effectively supports the large-scale production of oil-fields and stable production with benefits. This paper systematically analyzed the development process of reservoir description technologies in Shengli Oilfield, summarized the characteristic technologies of different types of reservoirs, analyzed five challenges faced by fine reservoir description in mature oilfields in the late stage of extra-high water cut, and expounded on five development directions of reservoir description technologies in the next step, which had guiding and reference significance for promoting fine reservoir description technologies in continental oilfields.

Key words: reservoir description; technical history; technological advance; development direction; Shengli Oilfield

胜利油田是典型的陆相复式油气区,是中国东部老油田的典型代表,具有油藏类型多样、含油层系多、断裂系统复杂的特点,被地质学家称为石油地质“大观园”。自1961年胜利油田发现至今,经过60余年的勘探开发,上报探明石油地质储量为 54×10^8 t,累计产油量为 12.7×10^8 t。

油藏描述伴随着胜利油田开发的各个阶段,其核心是运用钻井、录井、测井、地震及油藏工程等资料,对油藏的外部几何形态和内部层次特征进行三维空间的定量表征,建立精细三维地质模型,精准刻画剩余油分布规律。1996年以整装构造、复杂断块油藏为主的中高渗透油藏进入特高含水阶段,胜利油田开展了第一轮精细油藏描述,形成了“54321”精细油藏描述研究工作流程、方法^[1]。针对不同类型油藏地质研究面临的主要矛盾,胜利油田先后开展了4轮精细油藏描述,由特高含水阶段的中高渗透油藏逐步扩展到低渗透、海上和潜山等油藏,描述精度不断向精细化、量化方向发展^[2-6]。特别是进入“十三五”以来,特高含水油藏剩余油分布更加复杂,整装构造油藏储层非均质性(尤其夹层)对剩余油分布的控制作用更加突出,油藏内出现极端耗水层带^[7-12];断块油藏低序级断层、较大规模断层断棱对剩余油分布的控制作用更加凸显,构造精细描述要求也越来越高^[13-16];砂砾岩、滩坝砂油藏面临如何精细刻画储层期次分布及其连通性等挑战^[17-21],胜利油田加大低序级断层解释、断棱精准刻画、夹层表征、储层预测及非均质性描述等关键技术攻关,建准精细地质模型,搞清剩余油和极端耗水层带分布,为高效开发调整提供坚实的地质基础。

1 油藏地质特征及油藏描述技术发展历程

胜利油田沉积类型复杂,涵盖中国陆相70%以上的沉积类型,按照圈闭类型、岩石类型、储层物性、原油物性、陆上与海上等因素综合分类,将油藏

划分为7类:整装构造油藏、复杂断块油藏、低渗透油藏、稠油热采油藏、火山岩及灰岩等特殊岩性油藏、浅海油藏和天然气藏。不同类型油藏的地质特征、开发方式以及主导开发技术不同,对精细油藏描述的要求不同。中高渗透整装构造油藏、复杂断块油藏投入开发时间早、采出程度高、含水率高,剩余油分布规律复杂,是精细油藏描述的主体,也是油藏描述技术的代表。

1.1 油藏主要地质特征

胜利油田发育4个整装构造油田,包括胜坨油田、孤岛油田、孤东油田和埕东油田,累计探明石油地质储量为 12.90×10^8 t。胜坨油田是胜利油田矿权区最大的油田,也是渤海湾盆地发现的第一个整装亿吨级大油田^[22],是以古近系沙二段河流、三角洲沉积为主的背斜构造油藏;孤岛、孤东、埕东油田是新近系馆陶组河流相以疏松砂岩为主的大型披覆背斜构造油藏。整装构造油藏具有圈闭完整、构造相对简单、多套储层连片分布、油层厚度大、油气富集程度高的特点,岩石类型以砂岩为主,储层物性好,渗透率多为500~3 500 mD,储层非均质性强;油藏埋深为1 100~3 000 m,其中馆陶组油层多为1 500 m以浅。整装构造油藏经历了水驱或化学驱开发,含水率超过了96.0%,进入了特高含水后期开发阶段,仍有60%的剩余油在地下,精准描述剩余油分布是整装特高含水油藏进一步提高采收率的关键。

胜利油田属于典型的陆相断陷盆地,东辛、现河庄、临盘等油田为典型的复杂断块油田,断层发育密度为3条/km²以上,主要特征为低序级断层发育,断层组合样式复杂,油藏边界多为二、三级大断层,内部自然断块边界为四级断层,断块内部多发育五、六级小断层(图1),储层以河流、三角洲沉积的砂岩为主,纵向上含油小层多、含油井段长,含油井段达2 000 m以上,油水关系复杂,不同小层的厚度、物性有较大差异。精细刻画低序级断层分布、描述层间和平面剩余油差异是复杂断块油藏精细刻画的关键。

胜利油田低渗透油藏分布非常广泛,主要分布在渤南、纯化、牛庄、五号桩、滨南、大芦湖、正理庄等油田,沉积类型以滩坝砂、浊积砂和砂砾岩为主,一般为低渗透、特低渗透储层,储层厚度差异大、裂缝发育、非均质性强。以牛庄油田为代表的浊积岩透镜体岩性油藏具有细(粉、细砂岩)、薄(单层厚度为3~5 m)、小(面积小,85%的砂体面积在0.5 km²以下)、多(单井平均钻遇25~30层)、差(储层物性差,孔隙度为5%~20%,渗透率为5~20 mD)、高(油层压力高,压力系数为1.5~1.75)等特点;以纯化、正理庄油田为代表的滨浅湖滩坝砂油藏储层分布广泛,埋深一般大于2 800 m,渗透率一般小于5 mD,纵向上单井平均钻遇10个小层左右,平均单层厚度仅为1.4 m;平均储量丰度不足50×10⁴ t/km²。以盐家为代表的砂砾岩油藏为多期碎屑流沉积物的快速堆积,横向变化快、内幕复杂,岩石骨架电阻率高,油、水层均表现为较高的视电阻率,常规测井有效储层、油水层识别及评价难度较大。

1.2 油藏描述技术发展历程

油藏描述最早由斯伦贝谢公司于20世纪70年代初提出,最早以测井为主。胜利油田针对牛庄沙三段浊积岩油藏虽有多口井获得工业油流,但砂体面积小、井距大、一井一样的问题,开展国家“七五”攻关课题“牛庄油田岩性油藏描述技术”,开启了油藏描述技术发展的序幕。

20世纪90年代,随着孤岛、胜坨等中高渗透水驱油藏在中国率先进入高含水开发阶段,长期的水驱冲刷使得储层非均质程度加剧,要继续提高采收率,必须重新认识变化的地下状态。1992年11月,中国石油天然气总公司召开全国油气田开发地质

工作交流会,针对陆相沉积储层非均质性严重的特点,提出开展精细油藏描述,深化油藏沉积微相、储层物性变化及剩余油分布认识。1995年以高含水整装构造、高渗透复杂断块、中低渗透断块老油田为主要研究对象,开展了精细地层对比、储层参数井间插值、沉积微相定量表征、精细建模与数值模拟、剩余油综合定量描述等为重点的第一轮精细油藏描述,总结形成了建立地层、构造、储层、流体、油藏等5大模型,应用地质综合分析、水淹层测井解释、精细油藏数值模拟、油藏工程综合分析等4项技术,搞清剩余油平面、层间、层内等3个分布,提出新井精细挖潜、老井综合治理2项措施,达到提高采收率目标的特高含水油藏精细描述基本程序与技术方法,为胜利油田特高含水阶段的科学、效益开发提供了坚实的地质基础。

“十五”到“十一五”期间,精细油藏描述技术得到进一步深化发展,攻关形成复杂断块油藏低级序断层识别及其分割控油研究技术、整装构造油藏夹层定量描述和预测技术。2011年承担国家重大专项“胜利油田特高含水期提高采收率技术”研究,重点围绕三角洲-辫状河-曲流河储层构型表征技术、特高含水期剩余油描述、低级序断层精细描述技术、极端耗水层带理论与描述等技术开展攻关,精细油藏描述技术不断向精准化、量化方向发展。

经过近30 a探索与实践,形成了一套胜利特色的精细油藏描述关键技术(表1),编制了精细油藏描述技术规范,建模数模实现了由“粗”到“精”到“准”,累计描述600余个开发单元,覆盖石油地质储量为43.6×10⁸ t,建模数模技术在100%的老区调整和70%的新区方案编制中得到了广泛应用,有效支

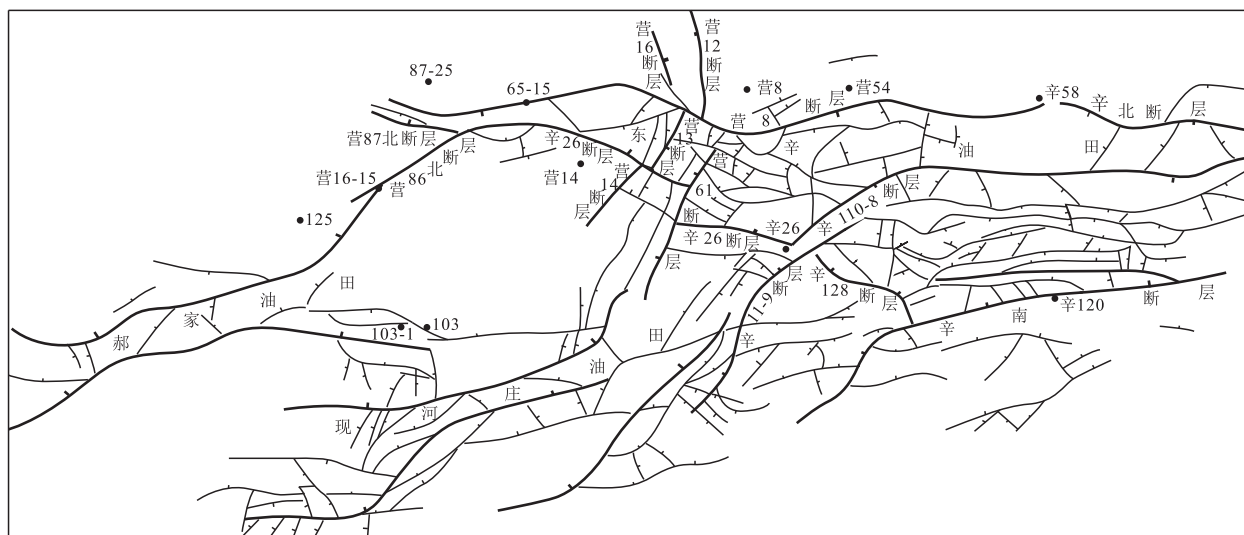


图1 东辛油田复杂断块油藏构造图

Fig.1 Structure of complex fault-block reservoir in Dongxin Oilfield

表1 “十三五”以来不同类型油藏精细油藏描述技术
Table1 Fine reservoir description technologies for different types of reservoirs since “13th Five-Year Plan in 2016-2021” period

油藏类型	主要问题	关键技术
整装构造油藏	特高含水后期高渗透条带发育,无效水循环	河道砂体精细表征技术
		极端耗水层带识别技术
		剩余油及流场描述技术
复杂断块油藏	低序级断层、复杂断裂系统控制剩余油	低序级断层识别与组合技术
		断棱精细刻画技术
低渗透油藏	储层类型多样、非均质性强,水窜、注采能力低	浊积岩油藏精细描述技术
		滩坝砂油藏精细描述技术
		砂砾岩油藏精细描述技术
		地应力分析技术
		复杂裂缝系统建模技术
稠油热采油藏	浅薄储层展布,油水关系复杂,高轮次吞吐后期汽窜、水淹	高轮次吞吐后汽窜识别技术
		敏感稠油储层伤害预测技术
		2 m浅薄储层预测技术
浅海油藏	井距大、储层变化快,非均质性强	大井距河道砂预测
		砂体叠置及连通性评价
		复杂地质条件建模数模一体化
特殊岩性油藏	断裂系统复杂,断-缝-溶预测难	火成岩油藏精细描述技术
		潜山油藏精细描述技术
不整合油藏	不整合面与下伏砂体接触界面描述难	不整合面差异化处理技术
		单砂体露头精细描述技术

撑了油田的规模建产与效益稳产。

2 油藏描述技术进展

围绕精细刻画储层、精准描述剩余油的目标,开展地质油藏一体化、建模数模一体化攻关,逐步形

成了精细储层构型表征、低序级断层精细描述、砂砾岩期次划分与连通性评价、薄互层滩坝砂储层预测、三维精细地质建模与剩余油精细描述等关键技术。

2.1 精细储层构型表征技术

“十五”期间,引进储层构型理论与分析方法,开展野外露头与现代沉积构型分析,综合应用岩心、测井、地震及开发动态资料,识别各级构型要素,建立储层构型模式,预测构型要素空间分布,形成了曲流河、辫状河、三角洲等精细储层构型表征技术。

2.1.1 不同沉积类型储层构型模式建立

2009年10月,针对孤岛油田中一区Ng3储层构型复杂、缺乏定量模式指导的问题,依托国家重大专项,与中国石油大学(北京)联合开展了伊敏河三道湾点坝探地雷达采集分析,开挖1条探槽(图2),对雷达剖面进行系统标定及取样,完成了27条测线的探测与解释,获得了解剖点坝构型的第一手详实资料。通过沉积环境相似、沉积规模相当的探地雷达研究区、野外露头、现代沉积构型分析,明确了侧积层角度与河流宽深比具有较好的相关性,建立了点坝定量构型模式。为了揭示储层内部结构并准确建立构型模式,陆续开展胜二区三角洲和孤东油田七区西辫状河水槽模拟实验。胜二区为断陷淡水湖盆,坡度为4°~5°,水体较深,约为40 m,物源供给量大;沙二段8砂层组纵向划分为3个韵律,地震上具有明显的前积特征,是以惯性力为主控的朵状河口坝。实验总结出3种河口坝组合模式,通过测量河口坝长度、宽度、厚度,建立河口坝规模经验公式,为河口坝平面预测提供指导。

2.1.2 密井网条件下曲流河储层构型分析

曲流河储层构型分析按照复合河道、单河道、点坝、侧积层等层次开展。通过储层预测研究储层

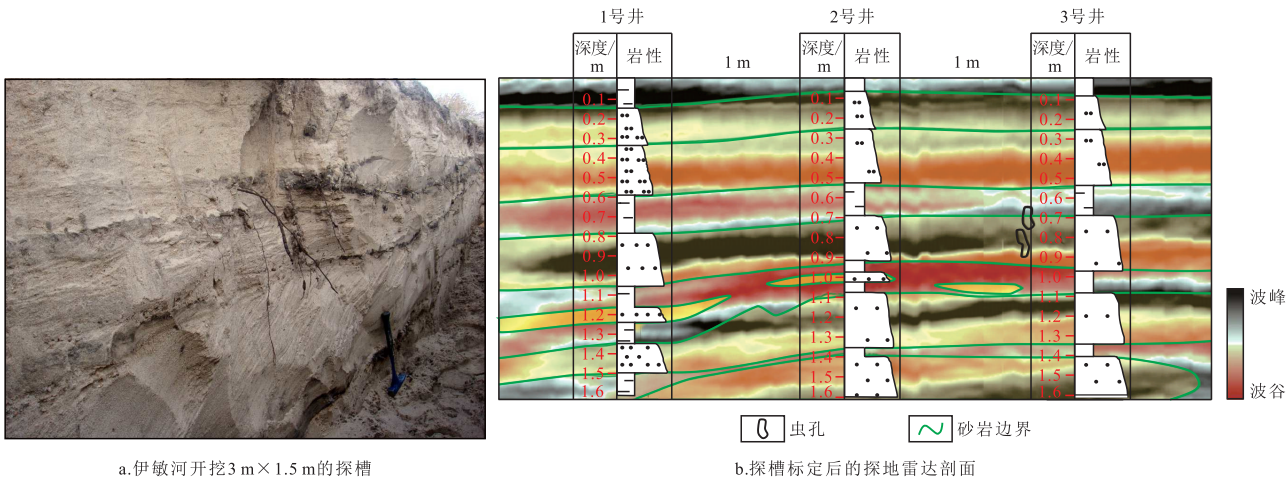


图2 曲流河探槽与探地雷达研究构型模式

Fig.2 Architecture model study on meandering river by trench and ground-penetrating radar

平面展布规律,结合岩心特征与测井相特征,划分沉积亚相,表征复合河道。单河道识别应遵循以下步骤:首先根据测井分析,识别出单河道边界识别标志;其次根据密井网及水平井资料,运用定量预测公式(如Leeder建立的高弯曲流河的深度-宽度预测公式),确定单河道规模。点坝规模与河道满岸宽度密切相关,通过对点坝宽度和河道满岸宽度进行统计分析,建立点坝宽度预测公式(图3),相关系数达到0.797 7。点坝内部侧积层有3种构型模式,通过分析河道沉积时是干旱还是潮湿、河道规模大小等,确定侧积层的类型;通过研究区密井网解剖和水平井钻遇侧积泥岩信息,判断单一侧积体及侧积层的规模,结合经验公式确定单一侧积体宽度及侧积层倾角。孤岛油田中一区Ng3侧积层的倾角较小,约为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,侧积层水平宽度为6~12.4 m,2个侧积层所夹侧积体水平宽度为21~35 m。

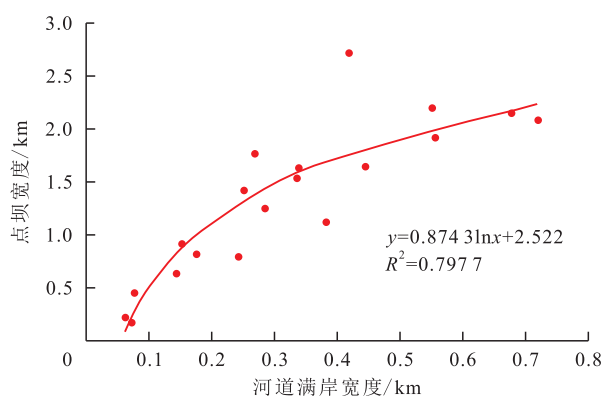


图3 河道满岸宽度与点坝宽度的关系
Fig.3 Relationship between river channel width and point bar width

2.1.3 基于构型的储层连通性评价

滩浅海油田井距大、斜井多,井震结合研究构型面临诸多挑战。应用小波分频技术重构地震数据体,利用属性切片RGB融合技术、波动方程正演与分频属性反演相结合,确定河道边界地震相模板,结合动态资料识别单一河道边界。在储层连通性评价方面,通过对砂体连通关系的定性分析,挑选出砂顶相对深度差/砂体深度相对较小砂体厚度、砂体宽度/井距、注采方向与物源方向偏离程度、渗透率差/井距、砂体厚度差/井距5个连通性评价参数,采用主成分分析确定各个参数权重,建立平面砂体连通程度定量评价方法,砂体连通程度符合率为85%(图4)。

2.2 低序级断层精细描述技术

2.2.1 井震交互的断点精细对比技术

极复杂断块区断层发育,一口井平均钻遇多个

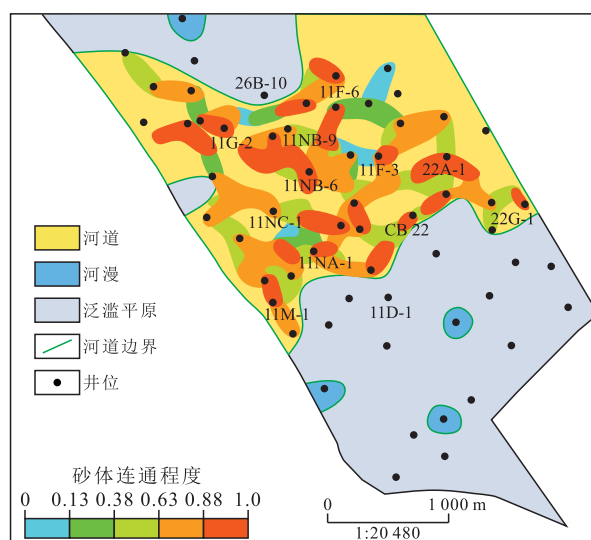


图4 埕岛油田馆陶组5⁴小层砂体连通程度分布
Fig.4 Sandbody connectivity of Ng5⁴ layer in Guantao Formation of Chengdao Oilfield

断点且缺少对比标志层,小断点与沉积变化不易区分,需要改变传统的先地质后地震、地震服从于地质的工作模式,井震联合开展断点的精细对比。

强化断层解释性处理 当断层带内部有微细裂缝、两侧易发育诱导裂缝时,会对地震波的高频成分吸收较多,以突出薄层信息为目的的拓频提频方法不适用于小断层解释,为此提出了基于分频与能量再分配的解释性资料处理技术,通过对地震资料进行分频处理,利用井资料约束及高精度匹配追踪算法,计算能量分配函数,通过分步拓频以突出高频成分,有效地避免出现断层假象。临58块经处理后主频由25 Hz提高到35 Hz,频宽由10~40 Hz拓宽到9~56 Hz,地震剖面与合成地震记录吻合性明显提高,实现了常规三维地震资料条件下10 m以下小断层的准确识别。

井震联合对比 在对比过程中,针对不同井钻遇地层厚度的突变,优先应用沉积规律解释地层变化,对于不符合沉积规律的变化再解释小断点。其次,从地震多井多层系追踪出发,根据断裂组合关系初步判识给出断点所在大致层位,再从剖面上找对应层位没有断失的井,通过精细对比落实断点准确位置并返回给地震,通过不断迭代提高井震断点的吻合程度。

地震属性切片与井对比联合解释 对于少井钻遇的孤立小断层,在井断点引导下,采用相干属性分析进行识别描述,关键是确定相干体的时窗。孤东二六区沙河街组时窗为100 ms时,相干属性分析能够较清楚地展现落差大于25 m的断层,而落差为10 m左右的低序级断层断点信号连续性差;将属性

提取出的时窗缩小到 60 ms 时,落差为 10 m 左右的小断点在相干切片上明显地展现(图 5)。对于储层沉积较稳定的区块,先计算得到相干体,再基于相干体分析利用蚂蚁追踪算法计算得到蚂蚁体,通过属性与地震联合,实现常规地震资料条件下无井钻遇 5~7 m(埋深为 1 500~2 000 m)、7~8 m(埋深为 2 000~2 500 m)低序级断层的地震解释。

2.2.2 基于精细标定的断棱精细刻画技术

复杂断块油藏多为典型的多层油藏,目的层标定位置不一定在波峰或波谷,很多时候可能会标定在反射零相位或反射半幅点位置,追踪较强的反射轴便于发现其横向变化^[7-8],整体构造趋势影响不大但会导致断棱位置整体偏移。当解释层位与实际

井标定偏差 1/4 个波长时,以层速度 2 500 m/s 为例,地震主频取 25 Hz,断层倾角取 30°,断棱平面位置与实际偏差为 43 m(图 6);当断层倾角为 45°时,断棱平面位置偏差为 25 m;当断层倾角为 60°时,断棱平面位置偏差为 14 m。因此,断棱精细刻画时除了对标准层、标志层的准确标定外,需要对不同目标层位进行多井联合标定,地震解释时除了追踪较强反射轴外,需要对标定弱轴进行追踪闭合,以确定每个小层断棱平面位置。

2.2.3 由面到体的断裂系统空间组合技术

复杂断块断层多、断裂系统空间组合多解性强,建立了地质、地震、动态相结合的“四步”断裂系统组合:①通过构造样式分析,明晰断裂系统宏观

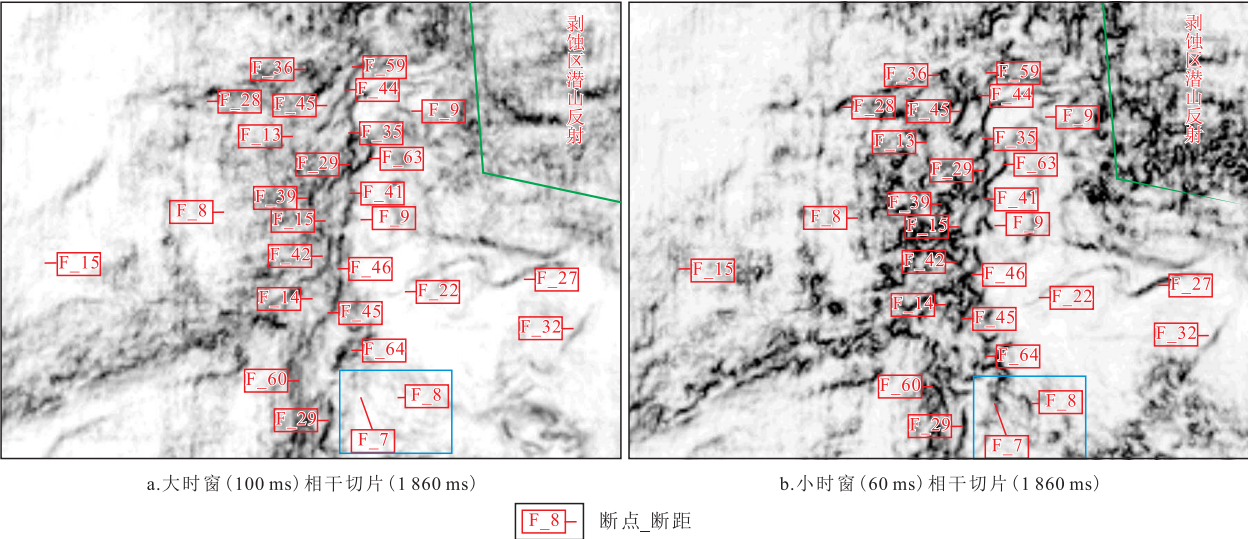


图 5 孤东二、六区不同时窗地震属性切片分析

Fig.5 Slice analysis of seismic attributes under different time windows in District 2 and 6 of Gudong

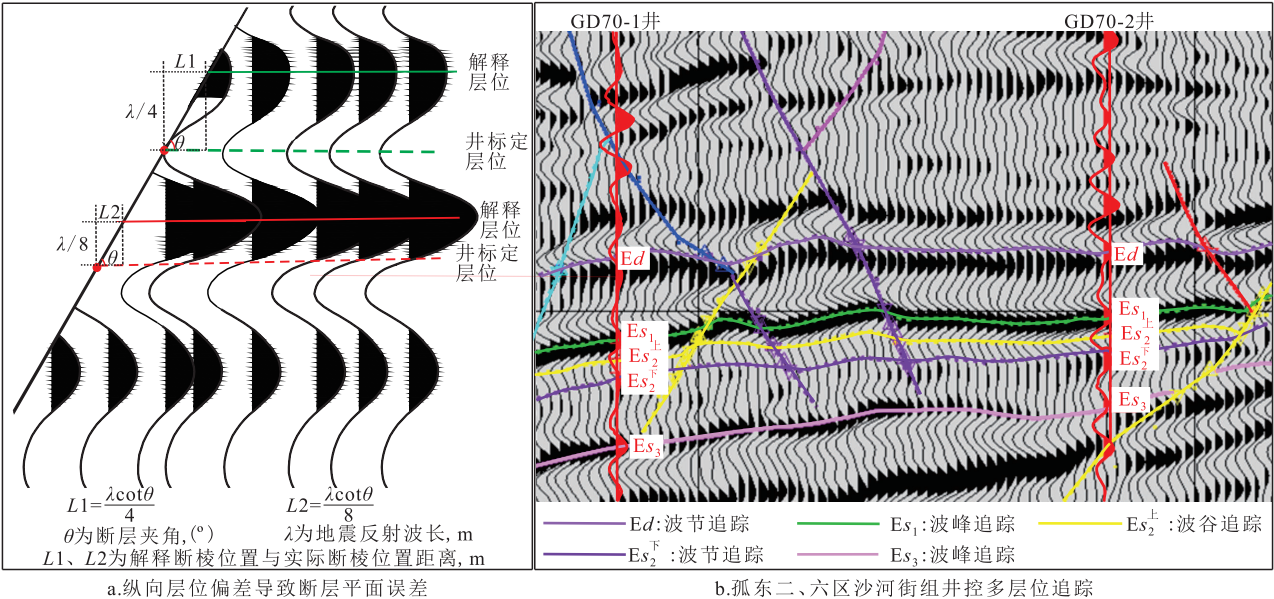


图 6 井控多层位追踪精细刻画断棱断面

Fig.6 Fault-edge section finely depicted with multi-layer tracking controlled by wells

特征;②不同属性沿层切片相结合,明晰断裂系统组合规律,通过沿层曲率切片、沿层相干切片等多种地震沿层切片技术相结合,优势互补,明晰断层组合规律,指出平面组合特点;③加密解释与分层系组合,通过加密纵/横测线解释,在剖面准确描述每条断层断面位置的基础上,根据相邻剖面的相似性分层系进行断层平面组合,再结合水平切片、相干切片进行校验,对不同的断层位置和延伸长度、组合连接方式进行仔细推敲,分层系实现断层的平面合理组合;④通过全层系组合叠合验证,对不同砂层组断层平面组合进行叠合,进一步验证断层组合及空间展布的正确性和合理性。

2.3 砂砾岩期次划分与连通性评价技术

胜利油田砂砾岩油藏主要发育在东营凹陷和沾化、车镇凹陷陡坡带,是胜利油田增储建产的主要阵地之一。砂砾岩泛指在近源、坡陡的沉积环境中,多期具有相对低的成分成熟度和结构成熟度的粗碎屑沉积堆积物^[23],岩性以砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩为主,混杂堆积,内部泥岩夹层少,平面上呈单个扇体或裙带状连片分布,纵向上多呈块状多期叠置。

2.3.1 砂砾岩期次划分对比技术

砂砾岩属于事件性沉积,具有沉积厚度大、泥岩隔夹层不发育的特征,陡坡砂砾岩和湖相泥岩对比难度大,常规的旋回对比适用性差、期次划分难度大。经过多年技术探索,形成了基于岩心、成像测井、常规测井小波变化等资料的由粗到细、逐级划分的砂砾岩期次划分对比技术^[24-27]。

井震结合定一级期次界面 综合地震、常规测井、成像测井、岩心等资料,依据稳定泥岩与包络面相结合的原则划分一级期次界面。旋回顶部发育较厚的泥岩段,其界面为明显的岩性突变面;测井

上每个一级期次为一个相对完整的正旋回或复合旋回,旋回的界面对应了常规曲线上明显的变化点,表现为自然电位曲线基线偏移、电阻率曲线突变等。

岩心、录井、成像作标定,曲线重构划分二级期次界面 二级期次为砂砾岩沉积过程中短期旋回形成的一期扇体的总称,其识别要对常规测井资料进行特殊处理并利用地震资料标定来实现。首先从取心井入手,利用岩心和成像刻画二级期次界面;其次筛选敏感测井曲线进行小波变换,对地震资料的二级期次界面进行标定,在地震资料约束下,利用小波变换曲线进行二级期次的划分。

井震结合定格架进行井间对比 井间对比主要在砂砾岩体精细沉积模式的指导下,采用中子测井小波变换资料完成单井期次的划分,用地震和小波变换资料联合开展井间期次对比,对比仍遵循“旋回对比、分级控制”原则(图7)。砂砾岩体横向变化快、纵向叠置关系复杂,多采用“切片式”对比;顺物源方向上按照“稳定泥岩分期次、迁移规律解内幕”开展对比,垂直物源方向上按照“稳定泥岩分期次、包络面定范围”开展对比,最后在地震资料的约束下,进行全区的统一、闭合。

2.3.2 砂砾岩有效连通体的分类评价

按照砂砾岩纵向上泥岩发育程度和砂体接触关系,将砂砾岩油藏分为块状和层状2种类型:东营北带块状砂砾岩油藏主要分布在盐家地区,一般采用大规模压裂弹性开发;层状砂砾岩油藏主要分布在永安和利津地区,一般采用注水开发。块状砂砾岩多为近岸水下扇多期砂砾岩扇体切割叠加(图8),不同期次之间没有稳定的泥岩隔层,测井曲线和地震上较难识别,从注水区块的注采对应性及效果分析,各期次砂砾岩体属于跨期次穿时泛连通

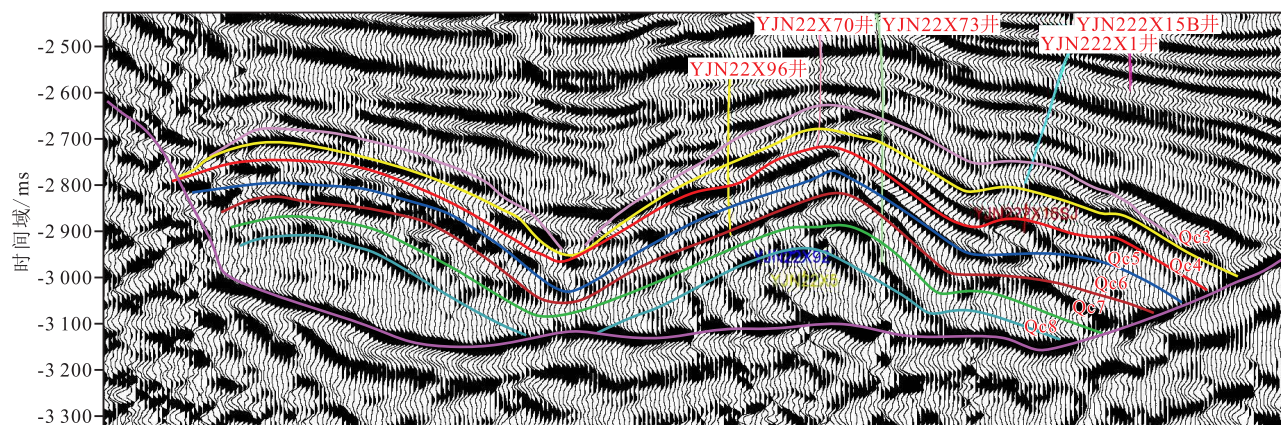


图7 盐家油田垂直物源方向期次划分地震剖面

Fig.7 Seismic profiles for phase division in vertical source direction in Yanjia Oilfield

体,扇体规模较大、注入量巨大、注水见效缓慢,期次界面为逻辑界面,不具有渗流屏障作用。层状砂砾岩粒度较细,一般为砾状砂岩或含砾砂岩,多期砂砾岩之间有稳定的泥岩隔层,测井上易识别划分期次。动态资料表征各期次之间纵向不连通,期次界面为物理界面,具有渗流屏障作用,各期砂砾岩受期次控制,层状连通。

2.4 薄互层滩坝砂储层预测技术

滩坝砂主要分布在湖泊边缘、湖中局部隆起的缓坡一侧,是波浪和湖流对搬运的碎屑组分再改造后在有利场所堆积形成,是薄互层砂体的典型代表^[28]。

古地貌恢复技术 古地貌控制着滩坝砂体的搬运及沉积,古水动力、湖浪能量分带及滨岸环流系统控制滩坝砂的相分异及空间分布。宽缓的古地貌特征有利于滩坝砂储层发育,因此,古地貌恢复是寻找滩坝砂发育带的基础。为获得高精度古地貌恢复图,在构造解释基础上,选择标志层进行层拉平,并进行压实校正和沉积环境校正,落实不同时期滩坝砂沉积有利区。

地震资料提频处理技术 识别与描述坝砂和滩砂是当前滩坝砂油藏开发的关键地质问题。滩坝砂储层埋藏深,单砂体厚度薄,同时受上覆沙三段下亚段油页岩“强屏蔽层”影响,地震反射信号弱,储层刻画难度很大。针对滩坝砂岩埋藏深、薄互层、地震分辨率低的预测难题,开展地震地质多信息约束、叠前叠后全过程拓频的提高地震分辨率处理,拓宽地震资料频带,突出小、薄砂体反射;针对上覆地层“强轴”屏蔽,开展地震子波分解、匹配追踪等去强屏蔽处理,剔除顶面强屏蔽层,进一步增强储层弱反射信号,为储层精细描述奠定基础。

基于敏感属性的滩坝砂储层预测分布 滩坝砂储层横向连续性差,常规地震方法描述精度低,目前中国针对湖相滩坝砂主要采用地震属性分析、地震反演等技术开展滩坝砂储层预测研究。通过井震对比分析有利储层的振幅、频率、波形等地震响应特征,分频提取对岩性、地层厚度变化、储层物性变化敏感的地震属性(图9),分析优势频率及敏感属性与滩坝砂岩单层厚度和层数、砂泥岩分布的关系,明确有效储层展布范围。

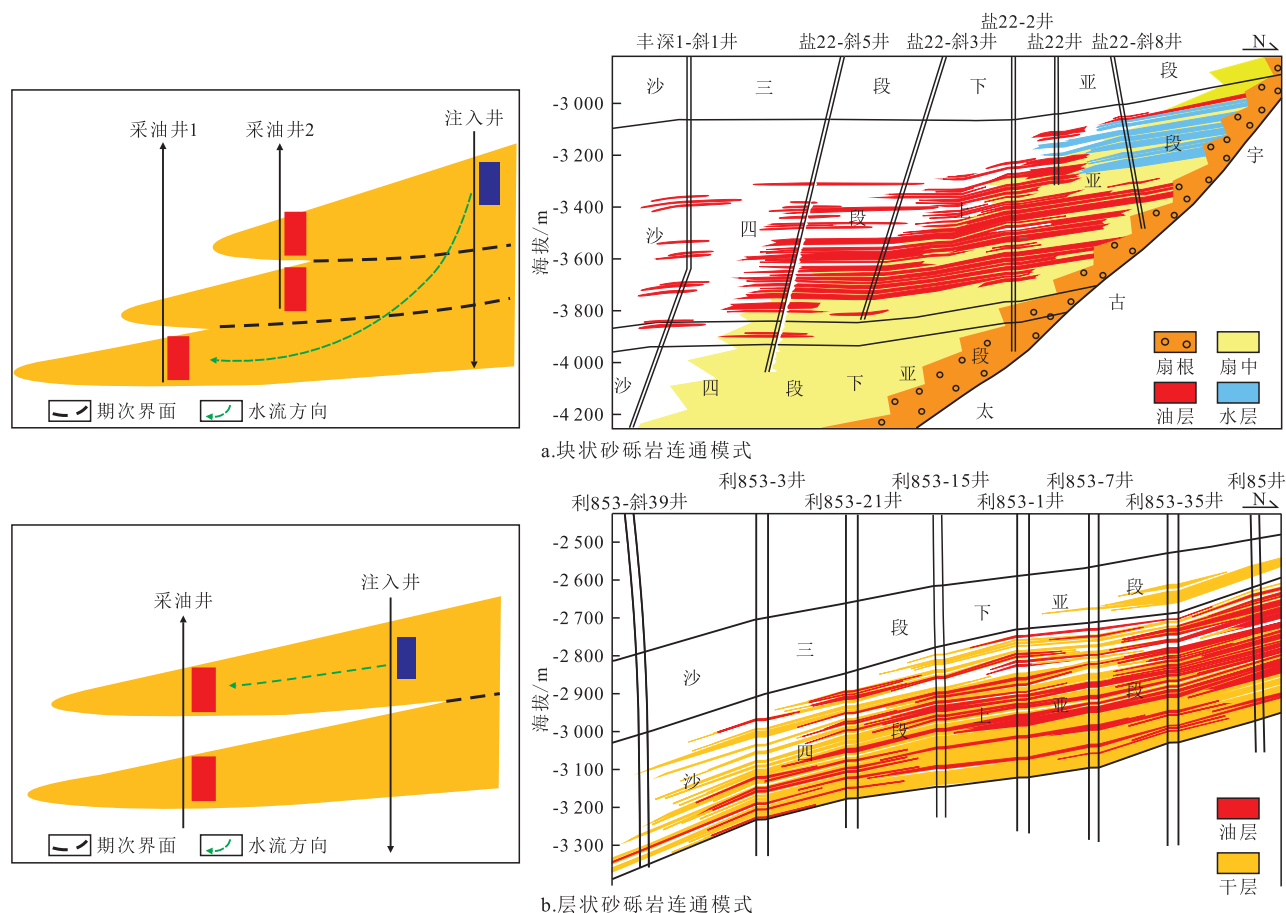


图8 不同沉积类型砂砾岩连通模式

Fig.8 Connectivity patterns of glutenites of different sedimentary types

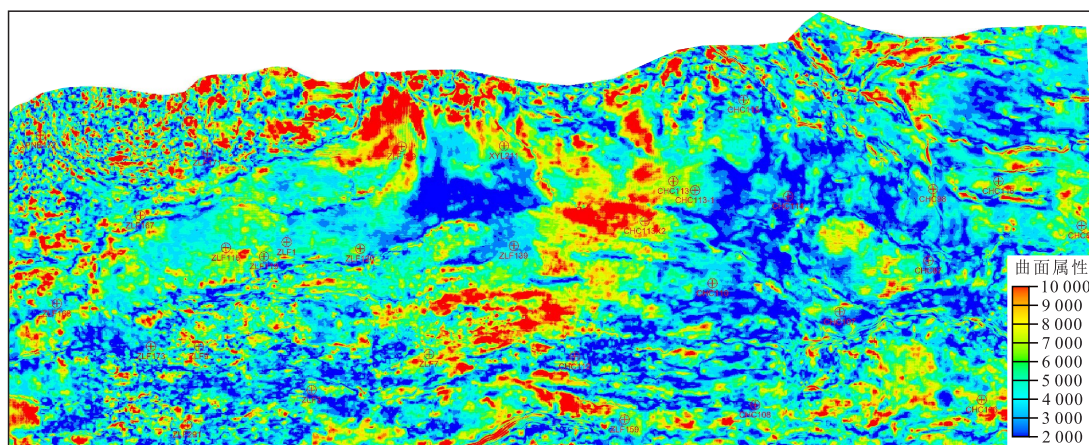


图9 单井钻遇与地震时频分析优势储层地震响应特征

Fig.9 Seismic response characteristics of dominant reservoirs through single well drilling and seismic time-frequency analysis

2.5 三维精细地质建模技术

随着开发不断深入,建模技术从地质成果模型化、建立 50 m×50 m 大网格地质模型开始,逐步形成了复杂断层建模、纵向单砂体及韵律段建模等精准建模技术。

复杂断层搭建关系优化调控建模技术 在建立地质和地震匹配的断层面以后,根据地震剖面断层接触关系,确定空间各条断层之间存在以下相互接触关系:交叉型、悬挂型、削截型(图 10a—10c)。针对 3 种接触关系选择不同的处理方法。对于交叉型断层(图 10a),选择断层复制、断层劈分的方法,即将断层劈分成 2 个简单的削截型断层进行处理;对于悬挂型断层(图 10b),将其在纵向上延伸,选择层面是否激活的方法进行断层的处理;对于削截型断层(图 10c),在三维空间里定义主断层及控制线,同时在二维空间调控削截关系线,使其完全重合。

嵌入式储层构型建模技术 根据储层构型研究成果建立心滩、点坝、河道、废弃河道等成因砂体的格架模型,采用稳定夹层确定性+不稳定夹层随机、侧积层网格加密+属性赋值方法,实现侧积层等渗流屏障空间刻画。首先,以单井识别成果为基础在

空间上对不同夹层进行组合,根据侧积层倾向、倾角和延伸范围等参数,应用模式拟合曲面建模技术建立侧积面模型,表征侧积层的空间分布与形态;其次根据井点对初始模型进行优化调整,使得每一个侧积面与井点位置吻合,以校正侧积层厚度,从而建立侧积层厚度模型;最终在建立好的点坝砂体模型中嵌入侧积层厚度模型。该方法有效预测了侧积层空间分布,较好地刻画曲流河储层复杂内部结构。

海上油田级大模型构建技术 为了更好地反映埕岛油田在三维空间储层的分布特征及连通状况,分布稳定的夹层采用嵌入法建立,分布零散的夹层采用随机模拟刻画,同时充分考虑不同沉积相带间储层发育差异,采用分相带、多方向变差函数、地震反演属性约束三级控制准确模拟属性三维空间分布,应用解释油层饱和度建立纯油层饱和度模型,应用相渗曲线归一化的 J 函数约束建准油水过渡带饱和度模型,应用油水界面建立纯水层饱和度模型,以提高饱和度模型精度,实现 $3\,000\times 10^4$ 节点油田级精细三维地质模型构建,为油藏-工艺-海工统筹规划部署提供支撑。

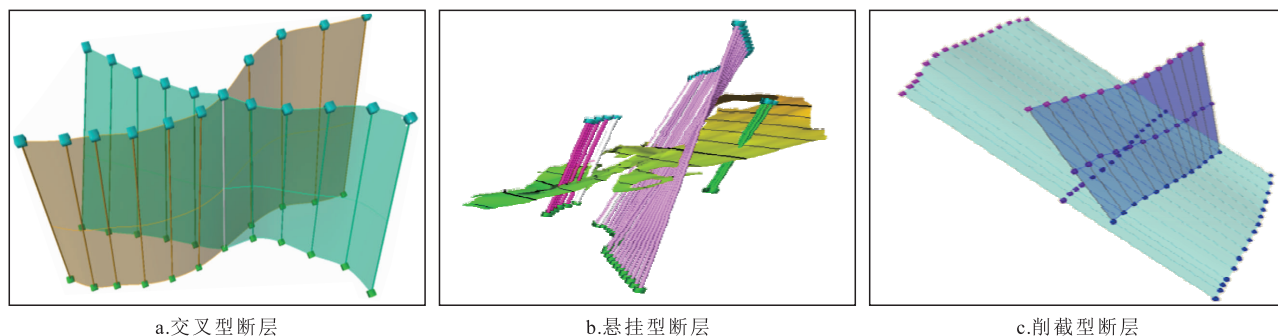


图10 复杂断层搭建关系建模处理方法

Fig.10 Modeling and processing methods of relationships between complex faults

2.6 剩余油精细描述技术

基于密闭取心井的剩余油精细描述技术 为了落实剩余油分布,胜利油田不断加大密闭取心力度,截至目前已实施密闭取心井170余口。孤岛油田完钻22口密闭取心井,岩心总长度为1 219.14 m,油砂长度为710.14 m,涉及水驱、后续水驱、二元驱后等不同驱替方式剩余油饱和度分析5 294块。统计平均剩余油饱和度为35.4%,主要分布区间为25%~50%(图11a)。计算平均驱油效率为41.96%,水淹级别主要为见水及水洗,占比分别为40.8%、33.6%;其次为强水洗及弱见水,占比分别为16.4%、9.2%(图11b)。取心资料表明,整装构造油田进入特高含水后期,依然具有20%~30%普遍分布的剩余油,局部存在饱和度大于40%的富集剩余油。

耗水层带描述技术 在井网固定、长期注水开发的条件下,油藏易形成高耗水层带,是生产井高含水的主要因素,精细刻画高耗水层带分布规律,是特高含水油藏高效调整的关键。一是基于渗流力学的势场理论,揭示高耗水层带形成机理,表现为在长期注水冲刷下,注入水平面上向主流线汇聚,纵向上向正韵律底部汇集,逐渐形成高含水饱和度区域小范围强冲刷,研究结果表明10%的厚度消耗了90%的注水量。二是基于物质守恒定理,推导高耗水层带发育体积表征模型和耗水量模型,结合室内实验将高耗水层带演变过程划分为出现、形成和稳定3个阶段,明确特高含水油藏高耗水层带演变规律。三是建立特高含水油藏高耗水层带形成界限和形成时机预测模型,渗透率及级差、油层厚度、油水黏度比越大,注采强度越高,越易形成高耗水层带。通过建立考虑渗透率、渗透率级差、油水黏度比、油层厚度、注采强度等动静结合的高耗水层带形成时机预测模型,可实现对耗水层带的超

前预防。基于耗水层带描述技术,将特高含水油藏高耗水层带划分为局部点状型、规则条带型、交织连片型等类型,提出了注采优化、井网调整变流线及“水驱+”等调控技术,覆盖石油地质储量为 $1\,742\times 10^4$ t,增加可采储量为 35.2×10^4 t,累积增油量为 3.4×10^4 t。

特高含水油藏精细数值模拟技术 针对特高含水后期高耗水层带发育、相渗曲线发生拐点的问题,建立了基于油水差异化渗流的精细数值模拟方法。一是创建水驱高倍驱替相渗曲线拓展方法,利用极限残余油饱和度和极限水相渗透率标定,得到每个模型网格的水驱高倍驱替相渗曲线,实现特高含水油藏油水差异化渗流的精细表征。二是引入水相和油相修正系数,改进渗流方程,实现物性干扰引起的渗流差异现象的描述,表征特高含水阶段的差异化渗流规律。通过差异化模拟(渗流模拟),动态非均质性被进一步放大,可全方位定量描述剩余油,找出剩余潜力区和极端耗水层带。孤东油田七区早期地质建模没有刻画侧积层分布(图12a),未引入水驱高倍驱替相渗曲线时,模拟结果无法反映底部极端耗水层带,顶部剩余油饱和度为0.62;通过建立储层精细的构型模型,采用差异化渗流模拟,准确预测底部极端耗水层带、侧积层处和顶部存在的剩余油分布,顶部富集区剩余油饱和度为0.66(图12b)。

3 老油田精细油藏描述面临的挑战

随着油田进入特高含水阶段,注采井网长期固定导致局部发育高耗水层带,无效、低效耗水急剧增加,剩余油分布更加复杂,储层动静态非均质性控油越来越突出,如何充分利用丰富的动静态资料

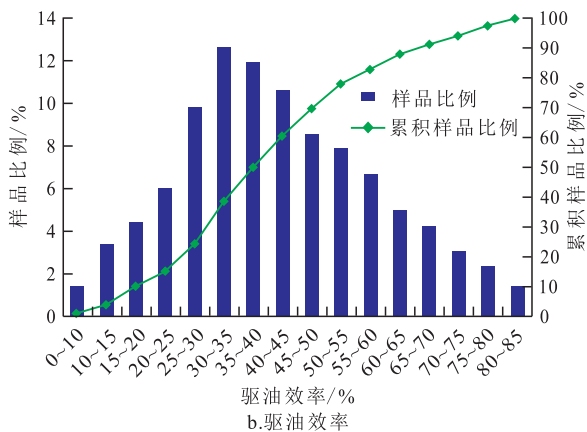
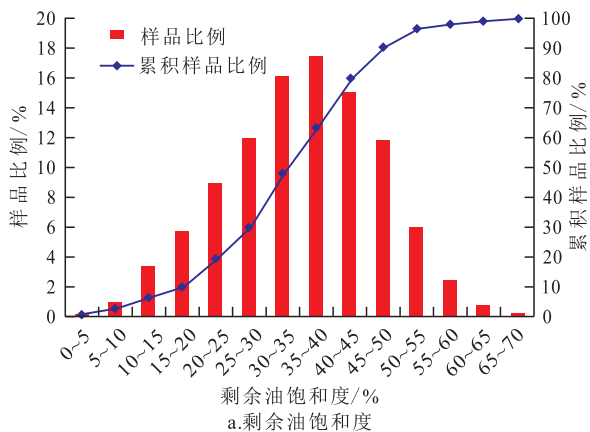


图11 岩心分析剩余油饱和度及驱油效率区间分布直方图与累积曲线

Fig.11 Distribution and cumulative curves of oil saturation and displacement efficiency by core analysis

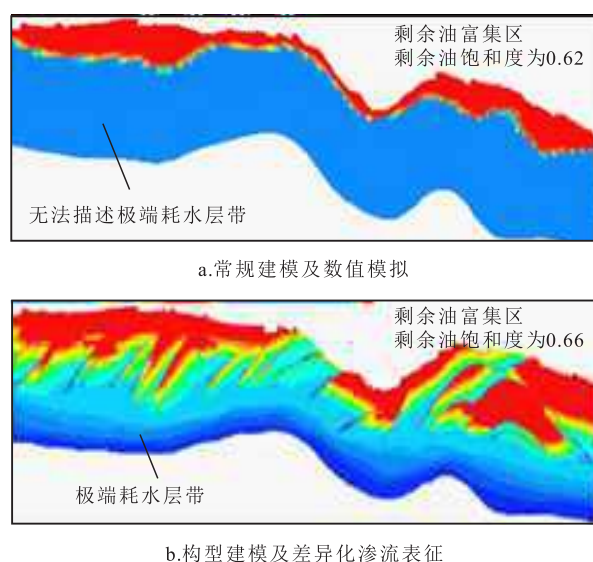


图12 孤东油田七区西Ng5²⁺³传统与改进数值模拟剩余油分布

Fig.12 Traditional and improved numerical simulation of remaining oil distribution in west Ng5²⁺³ of District 7 in Gudong Oilfield

和高精度三维地震建立复杂地质体的精准模型并精细刻画剩余油分布规律,是老油田进一步提高采收率的基础和关键。

3.1 成因砂体描述

准确刻画砂体连通性及分隔性是特高含水后期整装构造油田油藏描述的重点。成因砂体横向变化快、叠置关系复杂,不同沉积类型变化规律不同,目前井距条件下(200~300 m)刻画单砂体难度大(图13)。成因砂体空间变化快,模型中单成因砂体格架建立、多级次渗流屏障建模、结构非均质模型表征技术仍不成熟,亟待攻关井震结合、动态约束的复杂结构砂体建模技术;特高含水后期剩余油分布复杂,储层构型及韵律控制的大量剩余油滞留于地下,砂体叠置连通关系、夹层发育、注采井网、开发方式不同,剩余油分布规律不同,需要攻关动静结合、宏微一体剩余油综合评价方法,认识剩余油可动潜力,为老油田精细开发提供可靠依据。

3.2 低序级断层的识别描述

低序级断层的识别描述与复杂断裂系统的准确组合仍然面临着极大的挑战,一方面目前开发阶段下,地质条件本身变得更加复杂,低序级断层往往与复杂地层接触关系、同沉积作用共存,识别难度更大;另一方面,地震资料分辨率的局限性难以满足埋藏更深(3 000 m以下)、断距更小(1~3 m)的断层精细表征的需求,亟需发展复杂地质条件下,多尺度资料综合应用的低序级断层识别描述技术。

3.3 低渗透油藏有效储层描述

低渗透油藏包括砂砾岩、滩坝砂、浊积岩以及超深层碎屑岩等类型,其中一般低渗透油藏(渗透率为10~50 mD)以水驱和压驱方式开发为主,在地质上主要面临如何精细描述储层连通性、认识剩余油,改善水驱开发效果的挑战;特低渗透油藏(渗透率为1~10 mD)和超低渗透油藏(渗透率小于1 mD)储量动用程度低,通过采用压驱开发、CO₂驱等开发新技术,主要面临储层沉积和成岩、精确描述甜点的挑战。深层滩坝砂油藏具有储量丰度低、物性差的特点,需考虑砂体间泥岩性质、成岩作用以及压裂对有效储层下限的影响,构建含油性、渗透性、脆性等评价参数体系,探索考虑地质、工程、经济因素的甜点分类评价方法。

3.4 储层动静态非均质性评价

储层非均质性是影响剩余油的主要因素,取心井证实特高含水油藏夹层发育影响剩余油分布,沉积结构差异、渗透率差异控制耗水层带发育,长期注水开发导致物性、孔喉结构等非均质性更加严重。从胜二区沙二段8砂组取心资料统计看(图14),中能带渗透率增加17%,低能带渗透率降低33%,开发过程中中能带发生颗粒运移,部分随流体由生产井采出,部分则运移到低能带部位发生堵塞。因此,储层非均质性研究除了描述静态非均质性外,还需根据开发阶段特点开展动态非均质性研究。

3.5 剩余油精细刻画

剩余油的研究主要利用密闭取心井、动态资料及监测资料、数值模拟等技术手段,特高含水后期不同级次的构型界面及层内韵律控制的大量剩余油滞留于地下,逐渐成为挖潜的主要目标。孤东油田七区西利用新井及数值模拟成果统计了成因砂体剩余油分布,心滩坝、河道等优势成因砂体驱替程度高,剩余油饱和度低,其值为26.3%~32.7%,但剩余储量占比较高,达到90%;非优势成因砂体剩余油饱和度可达43%,储量规模占比小于10%,反映剩余油普遍分布,富集剩余油占比越来越少,靠新井提高采收率难度越来越大。如何深化不同沉积类型砂体叠置及连通关系、层内夹层发育等储层结构差异研究,结合注采井网、开发方式、动态规律精准认识剩余油分布,是进一步提高采收率的关键。地下的剩余油不是固定的,会发生二次运移,如何深化剩余油二次影响因素和富集规律,对实现老油田剩余油挖潜具有重要的指导意义。

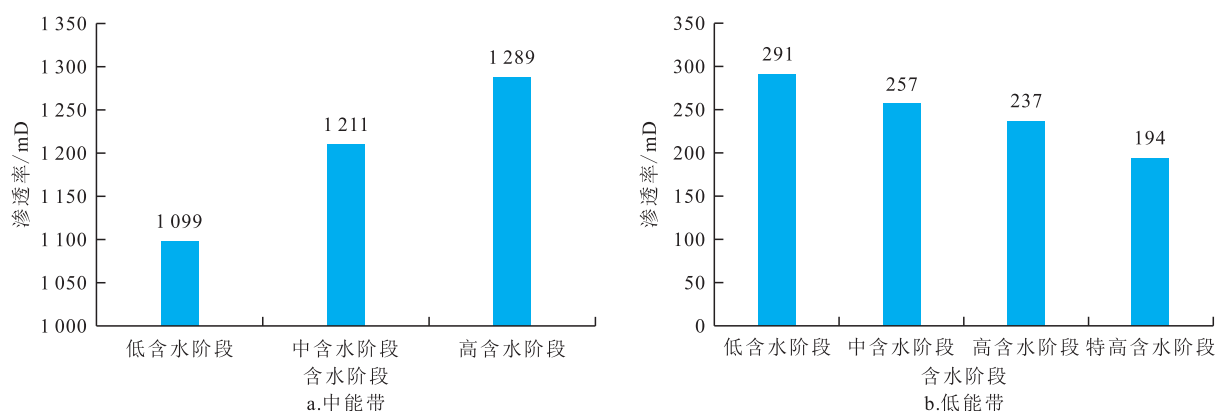


图 14 不同区带不同开发阶段渗透率变化规律

Fig.14 Variation of permeability in different zones and at different development stages

4 发展方向

聚焦不同类型油藏面临的开发主要矛盾和油藏描述关键点,明确了未来油藏描述的重点,以实现更精准地认识储层、认识剩余油,指导老油田的精细挖潜。

4.1 发展宏微一体的特高含水剩余油富集理论

加强不同时期密闭取心井系统总结,深化不同类型、不同位置、不同方式、不同阶段储层含油性变化规律,建立全方位、全生命周期地质认识。加大对新井饱和度分析,老井饱和度重新测井及测井解释力度,开展不同驱替方式可动剩余油研究,为后期的开发调整奠定扎实的地质基础。

4.2 攻关动静结合的储层连通性表征技术

胜坨油田开展的立体示踪剂监测表明,砂体连通性复杂,出现应见未见、隔小层见剂、一线不见等复杂的流线。需要加大基于井震结合、动静结合的成因砂体表征,描述储层变化及耗水层带,强化示踪剂、吸水、产液剖面监测,明确砂体叠置和连通关系,指导基于成因砂体的井网重构转流线开发调整。

4.3 多信息融合的复杂断层刻画技术

要不断加强基础研究,通过地震正演、构造物理模拟,在已有构造几何学成果的基础上,建立不同应力条件下复杂断层切割组合模式。要深化解释性处理、地震多属性分析等技术攻关,开展多地震信息融合的低序级断层刻画技术的研究。在地质描述自身向精细化、精准化发展的同时,要更加注重与开发阶段、开发方式的结合,要突出目标及问题导向。

4.4 发展复杂地质体的三维建模技术

针对目前建模方法砂体预测连续性差、渗流屏

障产状无法准确刻画的难题,开展储层结构非均质性建模方法研究,在地震属性约束下,表征成因砂体的边界及搭接关系,建立能够反映不同级次渗流屏障、具有成因意义、反映非均质性差异的地质模型,预测成因砂体空间展布。

4.5 大数据和人工智能的一体化研究技术

随着油田开发逐步深入,地质研究的精度要求越来越高,油藏描述不再局限于静态地质研究,海量开发数据、动态监测数据对于认识耗水层带、动态剩余油研究具有重要意义,如何充分挖掘各种资料作用,发挥建模数模一体化研究优势,需要攻关和发展大数据、人工智能在断层智能解释、测井自动解释、储层连通性预测等方面的优势,为推动数字化油田建设提供依据。

5 结论

经过近 30 a 的油藏描述技术探索,胜利油田形成了针对不同类型油藏、不同开发阶段的油藏描述技术,在储层构型表征、低序级断层描述、精细三维建模与数模、剩余油精细刻画等方面形成技术系列,为老油田的增储上产稳产做出了重大贡献,精细油藏描述技术也成为胜利油田的十大品牌技术。

随着油田进入特高含水开发阶段,油藏描述的任务发生了变化,研究技术和手段也发生了变化,单成因砂体的描述、结构非均质性的表征、动态非均质性刻画、耗水层带及剩余油动态演变、数字化油田建设等要求也越来越高,需要开发地质人员从基础地质理论和规律出发,加大基础研究力度,推动关键技术攻关,发展智能化技术,实现油田数字化建设,进一步夯实老油田提高采收率的地质基础,探索老油田大幅度提高采收率对策。

参考文献

- [1] 王端平,柳强.复杂断块油田精细油藏描述[J].石油学报, 2000,21(6):111-116.
WANG Duanping, LIU Qiang. Fine reservoir description of complex fault-block oil field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21 (6): 111-116.
- [2] 李阳.陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J].石油学报, 2009,30(3):396-399.
LI Yang. Study on enhancing oil recovery of continental reservoir by water drive technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 396-399.
- [3] 韩大匡.关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J].石油勘探与开发,2010,37(5):583-591.
HAN Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (5): 583-591.
- [4] 贾爱林.精细油藏描述与地质建模技术[M].北京:石油工业出版社,2010.
JIA Ailin. Fine reservoir description and geological modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [5] 陈欢庆,石成方,胡海燕,等.高含水油田精细油藏描述研究进展[J].石油与天然气地质,2018,39(6):1 311-1 322.
CHEN Huanqing, SHI Chengfang, HU Haiyan, et al. Advances in fine description of reservoir in high water-cut oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1 311-1 322.
- [6] 付亚荣,窦勤光,刘泽,等.中国老油田二次开发现状及前景[J].新疆石油地质,2023,44(6):739-750.
FU Yarong, DOU Qinguang, LIU Ze, et al. Secondary development of mature oilfields in China: current status and prospects [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(6): 739-750.
- [7] 束宁凯,宋力,汪新文.基于地震正演与井震结合的低序级断层描述技术及应用[J].现代地质,2017,31(2):338-348.
SHU Ningkai, SONG Li, WANG Xinwen. Technology of fine characterization of lower-class fault based on seismic forward modeling and well-seismic combination[J]. Geoscience, 2017, 31(2):338-348.
- [8] 束宁凯,刘丽杰,姚秀田,等.极端耗水层带形成机制及流场调控增效模式——以陆相砂岩特高含水后期整装油田为例[J].油气藏评价与开发,2024,14(2):237-246,266.
SHU Ningkai, LIU Lijie, YAO Xiutian, et al. Formation mechanism of extreme water consumption zone and synergistic mode of flow field regulation: a case study of uncompartimentalized oilfield of continental sandstone in the late stage of ultra-high water cut [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 237-246, 266.
- [9] LI S S, FENG Q H, ZHANG X M, et al. A new water flooding characteristic curve at ultra-high water cut stage [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2023, 13 (1): 101-110.
- [10] 张赫,单高军,杜庆龙,等.大庆长垣油田特高含水后期水驱开发技术难题及其对策[J].大庆石油地质与开发,2022,41(4): 60-66.
ZHANG He, SHAN Gaojun, DU Qinglong, et al. Technical challenges and solution of water flooding development in late stage of ultra-high water cut in Placanticline oilfield in Daqing [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(4): 60-66.
- [11] 崔传智,韩兴源,邴绍献,等.水驱油藏高含水期耗水条带表征指标及分级方法[J].油气地质与采收率,2022,29(3):85-91.
CUI Chuanzhi, HAN Xingyuan, BING Shaoxian, et al. Characterization indexes and grading method of water-consumption zones in waterflooding oil reservoirs during high water cut period [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29 (3): 85-91.
- [12] 刘丽杰,张先敏,魏祥祥,等.特高含水期剩余油分类评价方法[J].油气地质与采收率,2022,29(5):83-90.
LIU Lijie, ZHANG Xianmin, WEI Xiangxiang, et al. Classification and evaluation method of remaining oil in ultra-high water cut stage [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 83-90.
- [13] 李国永.复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):152-162.
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 152-162.
- [14] 李鑫,金利,沈忠山,等.特高含水老区油田断层构造大斜度定向井挖潜技术探讨[J].非常规油气,2023,10(2):80-87, 120.
LI Xin, JIN Li, SHEN Zhongshan, et al. Discussion on tapping potential technology of highly deviated directional well along fault edge in ultra-high water-cut old oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2): 80-87, 120.
- [15] 吴立志,王建,武刚.断层气密性定量评价方法及其在油田开发中的应用[J].断块油气田,2022,29(2):261-264, 277.
WU Yizhi, WANG Jian, WU Gang. Quantitative assessment of fault gas-sealing capacity and its application in oilfield development [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29 (2): 261-264, 277.
- [16] 王奇韵,侯庆杰,钱志.复杂断块老区油藏精细构造解释技术研究及应用[J].地球物理学进展,2021,36(6):2 610-2 617.
WANG Qiyun, HOU Qingjie, QIAN Zhi. Study and application of fine structure interpretation technology in old reservoir of complex fault block [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(6): 2 610-2 617.
- [17] 王永诗,邱贻博,茆书巍,等.济阳拗陷东营凹陷古近系隐蔽油气藏勘探实践及展望[J].中国海上油气,2023,35(3):12-24.
WANG Yongshi, QIU Yibo, MA Shuwei, et al. Exploration practice and prospect of Paleogene subtle oil and gas reservoirs in Dongying sag, Jiyang depression [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 12-24.
- [18] 周立宏,韩国猛,马建英,等.渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙二段滨浅湖滩坝沉积模式与勘探实践[J].中国石油勘探,2023,28(3):64-77.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, MA Jianying, et al. Depositional pattern and exploration practice of shallow shore lake

- beach bar sand body in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope in Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 64-77.
- [19] 宋晨,杨兵,张超谟,等.渤中19-6孔店组砂砾岩孔隙结构和渗透率估算模型[J].地质科技通报,2023,42(1):274-285.
SONG Chen, YANG Bing, ZHANG Chaomo, et al. Investigation of pore structure and permeability estimation models of Kongdian Formation glutenites in the Bozhong 19-6 Gasfield [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 274-285.
- [20] 吴颜雄,薛建勤,施奇,等.柴西南区岩性油气藏地质特征及控制因素[J].石油实验地质,2024,46(1):22-31.
WU Yanxiong, XUE Jianqin, SHI Qi, et al. Geological characteristics and controlling factors of lithologic reservoirs in southwestern Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 22-31.
- [21] 廉桂辉,朱亚婷,王晓光,等.叠前反演技术在玛湖油田储层预测中的应用[J].特种油气藏,2022,29(1):80-84.
LIAN Guihui, ZHU Yating, WANG Xiaoguang, et al. Application of pre-stack inversion technology to reservoir prediction of Mahu Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 80-84.
- [22] 宋明水.胜坨油田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2021,42(1):128-142.
SONG Mingshui. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Shengtuo oilfield in Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 128-142.
- [23] 姜素华,林红梅,王永诗.陡坡带砂砾岩扇体油气成藏特征——以济阳坳陷为例[J].石油物探,2003,42(3):313-317.
JIANG Suhua, LIN Hongmei, WANG Yongshi. Reservoir characteristics of glutenite fan at steep slope belt: an example of Jiyang Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(3): 313-317.
- [24] 宋明水,李存磊,张金亮.东营凹陷盐家地区砂砾岩体沉积期次精细划分与对比[J].石油学报,2012,33(5):781-789.
SONG Mingshui, LI Cunlei, ZHANG Jinliang. Fine division and correlation of conglomerate sedimentary cycles in Yanjia area of Dongying Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 781-789.
- [25] 王洪宝.东营凹陷盐家油田砂砾岩体内幕沉积期次精细划分[J].石油天然气学报,2009,31(5):45-49.
WANG Hongbao. Research of the depositional period inside glutenite body in Yanjia Oilfield of Dongying Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(5): 45-49.
- [26] 鲜本忠,王永诗.基于小波变换基准面恢复的砂砾岩期次划分与对比[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(6):1-5, 11.
XIAN Benzong, WANG Yongshi. Division and correlation of glutenite sedimentary cycles based on base-level restoration using wavelet transform [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(6): 1-5, 11.
- [27] 郭玉新,隋风贵,林会喜,等.时频分析技术划分砂砾岩沉积期次方法探讨——以渤南洼陷北部陡坡带沙四段—沙三段为例[J].油气地质与采收率,2009,16(5):8-11.
GUO Yuxin, SUI Fenggui, LIN Huixi, et al. Discussion on the division and correlation of glutenite sedimentary period by time-frequency analysis—a case study of Sha4 to Sha3 member of northern abrupt slope zone in Bonan depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 8-11.
- [28] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等.陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J].石油学报,2011,32(3):417-423.
YANG Yongqiang, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: a case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 417-423.

编辑 刘北羿