

引用格式: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.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.003

复杂断块油藏精细描述关键技术与应用

李国永

(中国石油冀东油田分公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 针对渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷冀东油田古近系复杂断块油藏地质条件复杂、断层多、断块小、主体油藏埋藏深,且受广泛发育火山岩屏蔽作用,地震资料品质差、地层对比与精细构造解释难度大、盆地面积小、物源近、沉积速率快、砂体叠置关系复杂的问题,为了能够有效识别井间砂体分布与连通关系、精细刻画构造形态,近年来冀东油田持续针对地质条件的“复杂”开展精细描述攻关,逐步形成了复杂断块油藏小层划分与精细对比、低级序断层识别、三角洲储层综合表征、注水开发过程中优势渗透通道形成与主控因素、复杂断块油藏三维地质建模、剩余油定量表征与分布规律6项关键技术。应用于5个典型区块,包括扇三角洲、辫状河三角洲2种储层沉积类型,中渗、低渗2类物性类型,中含水、高含水2个开发阶段,正常注水开发与整体压裂注水开发2种开发方式,为冀东油田复杂断块油藏合理开发奠定理论基础。

关键词: 精细油藏描述;储层成因类型;开发方式;复杂断块;古近系;冀东油田

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application

LI Guoyong

(PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: The geological conditions of the complex fault block reservoir in the Paleogene of Jidong Oilfield, Nanpu Sag, northern Huanghua Depression, Bohai Bay Basin are complex. There are many faults, small fault blocks, the main reservoir is deeply buried, and it is shielded by the widely developed volcanic rocks. Therefore, the quality of seismic data is poor, the stratigraphic correlation and fine structural interpretation are difficult, the basin area is small, the source is close, the deposition rate is fast, and the sand body superposition relationship is complex. In order to effectively identify the distribution and connectivity of inter-well sand bodies and finely characterize the structural morphology, fine description and research on the complexity geological conditions in Jidong Oilfield have continuously carried out in recent years. Six key technologies have been gradually formed, including small layer division and fine correlation of complex fault block reservoirs, low-order fault identification, comprehensive characterization of delta reservoirs, formation and main controlling factors of dominant permeability channels in the process of water injection development, three-dimensional geological modeling of complex fault block reservoirs, and quantitative characterization and distribution of remaining oil, which are applied to five typical blocks, including two types of reservoir genesis of fan delta and braided river delta, and two types of physical properties of medium permeability and low permeability. In the development stages of medium water cut and high water cut, normal water injection development and overall fracturing water injection development are the theoretical basis for the rational development of complex fault block reservoirs in Jidong Oilfield.

Keywords: fine reservoir description; reservoir genetic type; development method; complex fault block; paleogene; Jidong Oilfield

油藏描述经过20多年的发展已经成为认识油气藏最为有效的一项综合技术。早在2003年7月,针

对中国石油多数已开发油田进入“双高”及“双高”后期开发阶段,剩余油分布越来越复杂、挖潜难度越来越

收稿日期:2022-11-03。

作者简介:李国永(1979—),男,博士,高级工程师,从事油气田开发地质研究。地址:河北省唐山市路北区新华西道101号,邮政编码:063000。E-mail:lgyairen@163.com

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地黄骅坳陷滩海开发技术示范工程”(2011ZX05050)。

越大的现实,作出了“对已开发油田全面开展精细油藏描述,努力搞清剩余油分布,不断挖掘老区潜力,夯实老油田稳产基础”的工作部署,并明确指出要力争用3~5 a覆盖已开发重点油田,逐步将精细油藏描述工作纳入规范化、制度化、日常化的管理轨道^[1-4]。通过十几年攻坚克难,呈现出大量丰硕的成果,例如基于开发地震技术的复杂构造精细研究、井震结合储层精细预测、特低渗透储层裂缝表征、储层三维地质建模等方面,有力支撑了油田开发方案的设计、老油田滚动扩边、油田开发调整方案、规模化水平井设计、重大开发方案的制定等油田开发生产实践工作。

复杂断块油藏的精细描述技术作为其中一个独立的专项研究内容,关键在于断块的特殊性,具体体现在断块小、断块内构造支离破碎、低序级断层普遍发育且对开发的影响不确定;储层砂体纵向差异大、平面相变快,井间砂体分布与连通关系认识不清;与整装油气田相比,测井、地震等常规技术手段的分辨率难以细致刻画复杂断块地质特征、三维空间关系难组合存在多解性。精细油藏描述的研究本质,是一个透过现象不断靠近客观实际的过程,需要“认识研究—验证效果—再次研究—再次验证”反复迭代,以推进认识的深入和精度,这一过程在复杂断块油藏的研究中有着更为深刻的意义。由于断块的复杂、极复杂,不可能将所有的低序级断层、小砂体、砂体内的隔夹层、砂体间的叠置关系认识清晰准确,而应该努力对随着开发的进行,逐步显现为主要矛盾、影响着持续深入精细开发的地质特征不断挖掘,并针对性进行开发调整,化解开发矛盾。同时继续深入研究,进行合理推断,将调整赋予预见性和前瞻性,以保持较高的开发水平和开发效益,不断深入挖潜剩余油,达到较高的最终采收率^[5-7]。

渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷冀东油田下第三系储层是典型的复杂断块油藏,油层分布受断层、岩性等多重因素控制,且不具统一油水界面,规模效益开发难度很大。随着开发的进行,显现出浅层天然水驱剩余油分布状态不明确、中深层注水开发见效比例和多向注水见效比例偏低、深层压裂开发方案及相关技术政策不明等问题^[8-9]。为了深化油藏地质认识,为生产提供支撑,冀东油田持续攻关,逐步形成了复杂断块油藏小层划分与精细对比、低级序断层识别、三角洲储层综合表征、注水开发过程

中优势渗透通道形成与主控因素、复杂断块油藏三维地质建模、剩余油定量表征与分布规律6项关键技术,并应用于典型区块,为冀东油田复杂断块油藏合理开发奠定了理论基础。

1 区域地质特征

冀东油田所辖南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷北部,是在华北地台基底上经历中新生代地块运动发育的典型新生代北断南超的箕状凹陷^[1]。凹陷北部以西南庄断层为界与老王庄凸起相隔,东北和东界经柏各庄断层与马头营凸起相连,西与涧东断层及北塘凹陷相邻,南与沙垒田凸起呈断超式接触(图1)^[10]。

南堡凹陷平面上受控于北部西南庄、柏各庄2条控凹边界断层和6条内部控带断层,将盆地分割为7个二级构造带和3个次凹。1号、2号、3号构造带呈NE斜列展布,4号构造带呈NW展布且与3号构造带呈帚状组合,形成曹妃甸次凹;凹陷北部高柳断裂带呈NW走向分割林雀—柳南次凹和拾场次凹,为重要的控带断裂。区内下第三系发育明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组4套储集岩,其中沙三段、沙二段和沙一段3套优质烃源岩,沙三段、沙一段—东二下段和明化镇组下段3套区域性盖层,形成3套生储盖组合。

2 复杂断块油藏精细描述关键技术

针对南堡凹陷复杂断块及储层发育特点,结合开发生产需求,分别选取典型扇三角洲、辫状河三角洲2种储层成因类型,中渗、低渗2类物性类型,中含水、高含水2个开发阶段,正常注水开发与整体压裂注水开发2种开发方式的典型单元进行技术攻关,形成以下6项重点技术。

2.1 复杂断块油藏小层划分与精细对比技术

复杂断块油藏小层划分与精细对比技术的核心是层次约束“三控两验”。沉积背景与构造演化作为砂体沉积形态的主控因素,控制着对比界面的形态,突破依据“相似性”进行对比,提出了应基于沉积过程,对等时单元进行划分,这种对比方式很多时候呈现出“异相同时”的特征^[10-15]。

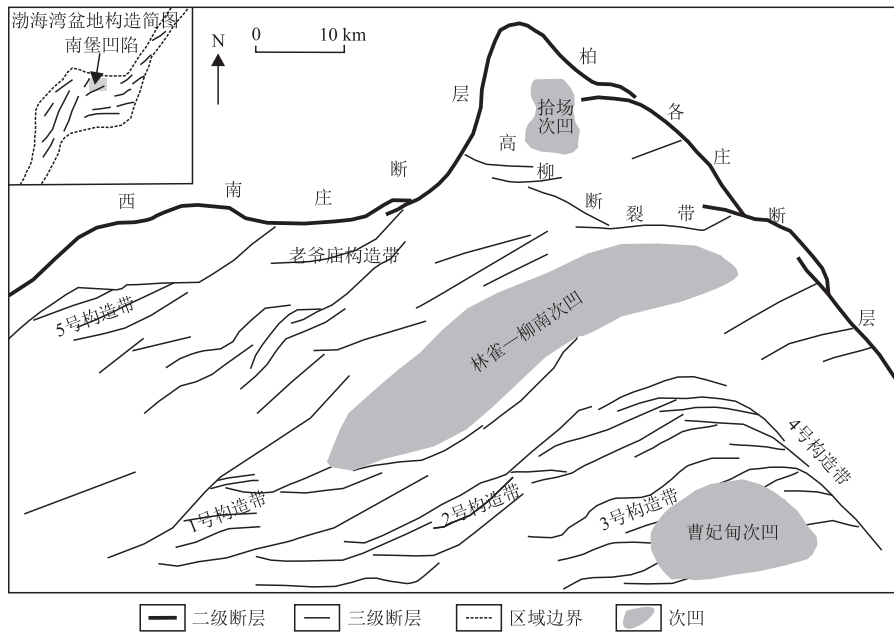


图1 渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷区域构造

Fig. 1 Regional location map of Nanpu Sag, northern Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

具体步骤是:①层序控格架,井震结合依据不同的地形、沉积背景和相类型,建立组段级别等时地层格架;②旋回控对比,油组、砂组对比过程遵循旋回一致性原则,旋回分级控制,不同相带区别对待;③地震验结构,通过地震地层结构分析,修正层面和断点位置,加密趋势线约束小层级对比;④微相控变化,地震属性、反演约束、微相发育模式指导单砂层划分;⑤动态验连通,充分应用动态资料不断验证砂体连通关系,校正划分结果。

位于北部柏各庄边界断层与南部调节断层夹持的斜坡带处的高柳断层北部构造带,其沙河街组沉积背景为扇三角洲沉积储层^[16-18]。从构造形态看,主要特征体现为断层活动—挠曲坡折—楔状体沉积。挠曲坡折—楔状体造成地层厚度变化。坡折带之下可容空间增大,沉积物集中沉积在坡折带之下,富油气凹陷斜坡区陡缓坡折控砂。随着断层活动,坡折点后移,沉积物呈现上超现象,坡折带之下无剥蚀作用,之上路过不留(图2)。

与传统“相似性”对比不同,该对比模式反映了构造沉积特征,在沉积过程界面的控制下,不同油组采用不同的小层对比模式,很好地解释了储层地层厚度变化的原因,同时解决了以往井震矛盾突出、地震窜层的问题。

2.2 低级序断层识别与表征技术

由于地震资料分辨率的限制,断距小的断层,特别是落差十几米甚至不足十米的,在地震剖面上表现得不明显^[19],主要表现为地震同相轴的能量突变、扭曲、分叉、合并、错位等,但也不排除是其他现象,如相变造成的同相轴异常,存在多解性^[20-23]。针对这一问题,采用形成机理预判—断层精细成像—断层精细解释—封堵性分析—一体化研究理念,完成断层成像技术攻关,提出了分频—前处理—边缘加强—边缘检测—蚂蚁体的成像技术流程,使断层识别精度达10~15 m。

1) 滤波处理

滤波处理能够最大限度地保护构造信息和小断层的成像能力,压制随机噪声,提高信噪比,使地震同相轴连续性和间断性特征更明显,提高低级序断层识别能力^[24](图3)。滤波需满足3个条件:①定向性;②边缘检测;③边缘保护性定向滤波。利用地层倾角和方位角沿地层进行定向性滤波,并利用相干和曲率计算结果进行筛选。

对地层展示的不连续同相轴进行边缘检测,分析不连续性的意义,有意义的平滑,没有意义的进行平滑,从而达到边缘保护性滤波的目的(图4)。

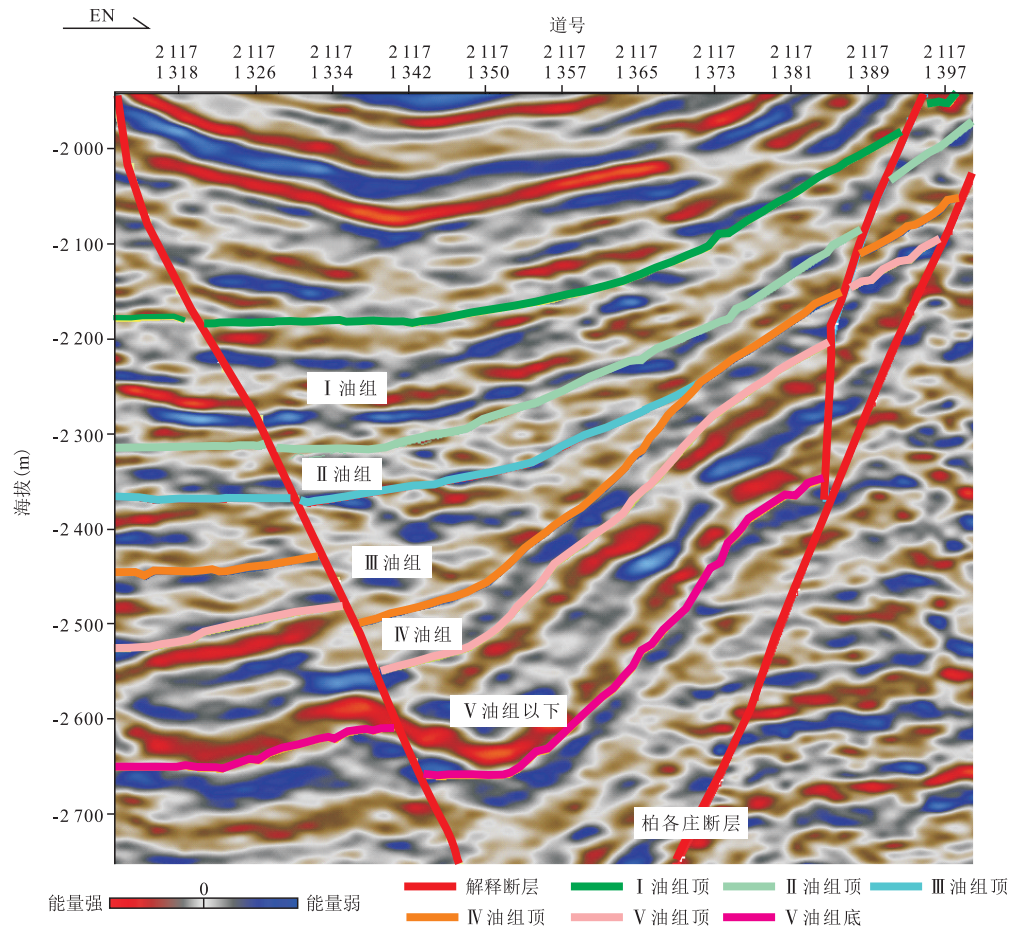


图2 渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷柳北地区 $E_{s_3}^{2-3}$ 沉积模式

Fig. 2 Deposition mode of $E_{s_3}^{2-3}$ in Liubei Area, Nanpu Sag, northern Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

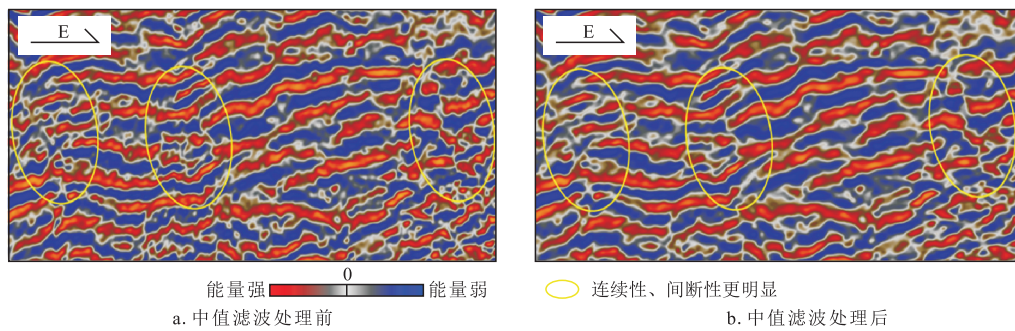


图3 中值滤波处理前后地震剖面对比

Fig. 3 Comparison of seismic section before and after median filtering

2) 分频+融合成像技术

挖掘地震数据里中、高频携带的小断层信息,保留中、低频所携带的大断层信息,大小兼顾,利用分频+融合成像技术加强低序级断层成像^[25]。分频技术是一种基于频谱分析的地震成像方法,可揭示地层的纵向整体变化规律。对断层而言,高频地震数据体对于微小断层的响应更明显。将频谱分解技术

引用到蚂蚁追踪断层检测工作中,能够提供更细致的断层及微断层刻画结论。该技术在实际应用中能够更清晰地刻画小断层(图5)。

2.3 储层综合表征技术

储层表征的基础是准确的地层对比。从静态资料出发,综合运用测井、高分辨率层序地层学、井间

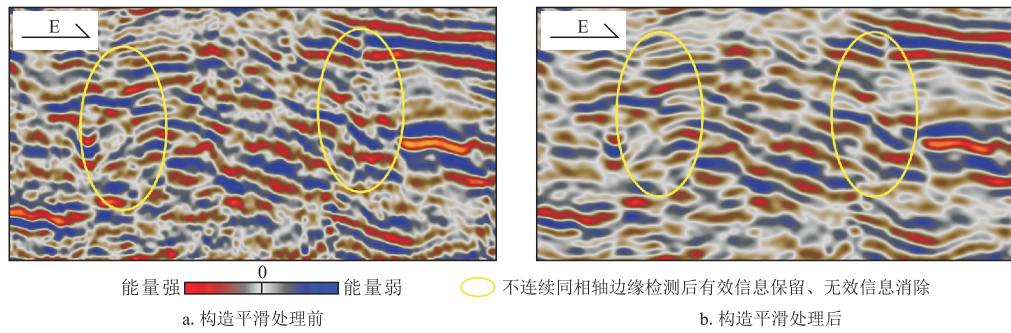


图4 构造平滑处理前后地震剖面对比

Fig. 4 Comparison of seismic section before and after structural smoothing

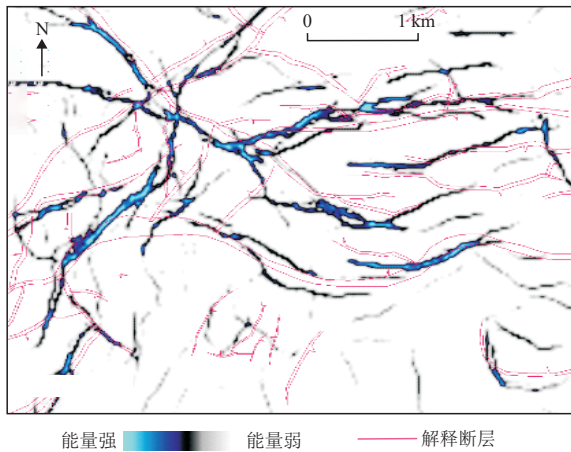


图5 分频+融合成像技术解释断层

Fig. 5 Interpretation of fault by frequency division + fusion imaging technique

地震、油藏地球化学等多种技术手段进行分析^[26-27]。从动态资料出发,利用动态响应特征验证井间砂体连通性,如压力、水淹数据、产吸剖面等^[28]。

以南堡凹陷典型的扇三角洲沉积储层为例,此类砂体侧向变化较快,分析井间不同微相叠置关系是判断井间砂体连通性,分析注采受效情况的地质支撑。

1) 单一河道识别标志

根据生产动态资料总结已确定连通层、不连通层的静态地质特征,提出单一河道识别标志。切物源方向连通方式主要有2种:河道与河道侧缘(图6a)、不同河道侧向拼接(图6b);不连通砂体,两条独立河道(图6c)、河道经河间泥与河道(图6d)。顺物源方向连通方式主要有2种:稳定发育(厚度)的同一河道砂体(图6e),厚度渐变的同一河道砂体(图6f)。

2) 河道边界识别

利用生产动态资料,结合单一河道识别标志,确定部分砂体规模。如通过对高中深北区Es₃亚段I、II油组单砂层河道宽度和厚度的统计,得出单一河道的宽厚比介于50~80,通过对已有数据进行拟合,得到河道宽度和厚度的经验公式:

$$\begin{cases} y = 3.9703 \ln x - 18.51 \\ R^2 = 0.7278 \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 为单砂体宽度,m; x 为单砂体厚度,m;相关系数 $R^2=0.7278$ 。

利用经验公式,可为全区河道边界预测提供依据(图7)。

2.4 优势渗流通道形成与主控因素研究技术

优势渗流通道是指由于地质及开发因素导致在储层局部形成的低阻渗流通道,注入水沿此通道形成明显的优势渗流而产生大量无效水循环。在优势渗流通道的作用下,劣势渗流的部位水驱效果差,有的甚至未被波及而形成剩余油富集区,优势渗流通道在流体的分布和运移过程中起主导作用,控制着剩余油的形成和分布^[29-32]。

优势渗流通道形成后,注水井的注入动态和生产井的生产动态均会发生明显的变化,主要表现为:注水井流压低,视吸水指数高;部分油井含水上扬快,采出程度相对较低;注入水单层突进严重;地层存水率低(无效水循环严重)。

如柳北Es₃油藏的阶段存水率、阶段水驱指数与年注水量成正比。开发前10年油藏存水率保持较好,平均值约80%,第11年开始较上年突降10%,并随着一直下降到高峰期的47%后才趋于稳定。存水

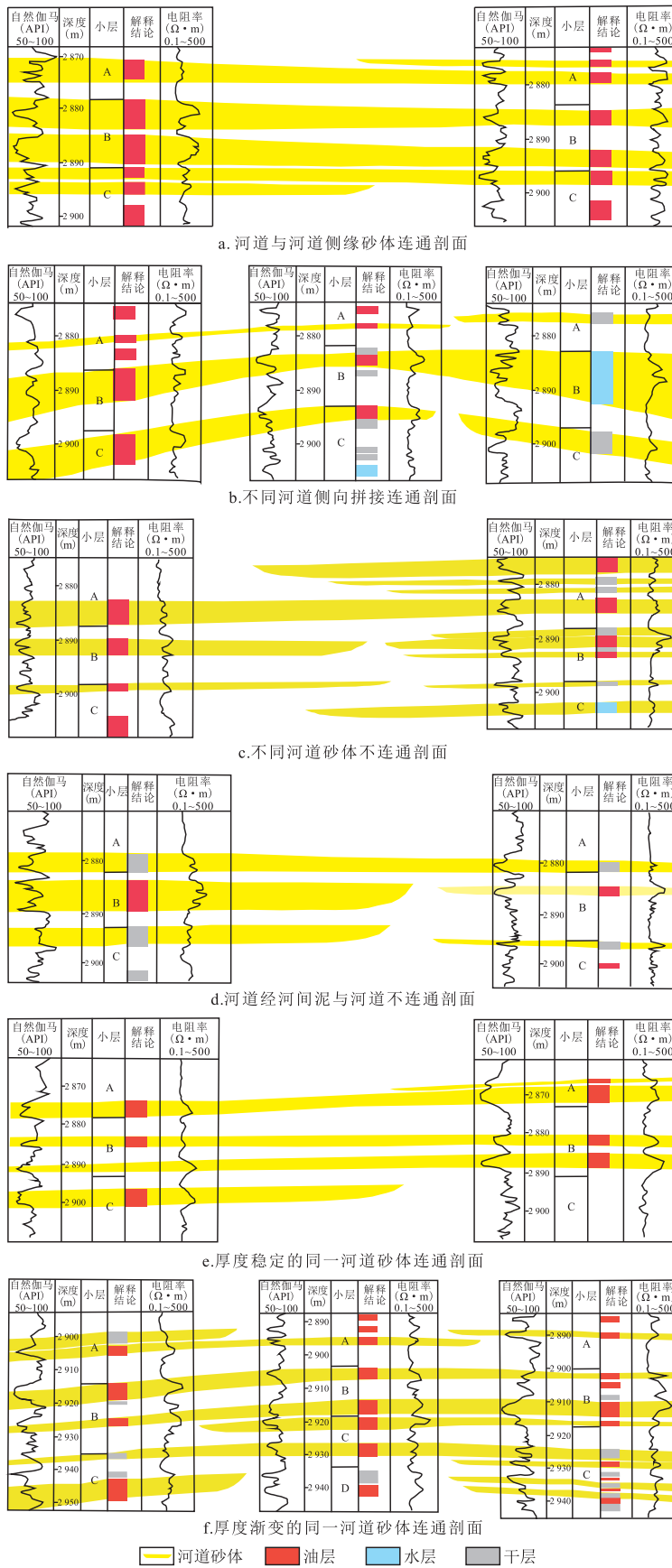


图6 不同沉积微相连通关系

Fig. 6 Connection of different sedimentary microfacies

率持续上升期综合含水率不到50%，注入水还没有较大幅度地推进突破到采油井。开发高含水后，先后对5口油井提液，对应的注水井同时增注，部分油井含水率快速上升，甚至水淹，导致存水率降低。

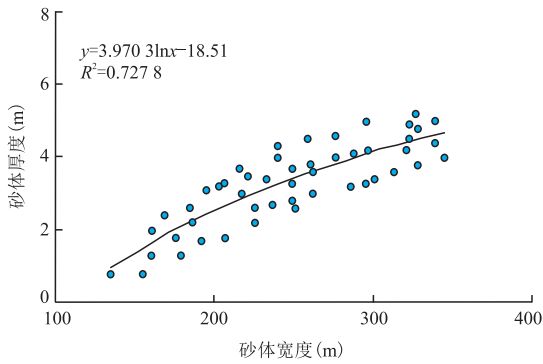


图7 单一河道宽度与厚度关系式
Fig. 7 Relation between width and thickness of single channel

2.5 复杂断块油藏三维地质建模技术

储层物性建模是地质建模的最终结果，是储层物性参数在三维空间上变化和分布的表征。关键和基础在于准确揭示沉积微相展布范围和分布特征。若没有充分考虑沉积相对储层参数分布的控制作用，做出的储层参数分布常常出现围绕井点的“牛眼”现象，无法体现地质参数分布的非均质性^[33]。

相控随机建模方法能够有效解决这一问题，即在细分小层网格的基础上首先建立沉积相分布模型，并应用沉积微相模型进行趋势控制建立储层物性模型。其优势有：在精细解释出单井隔层、夹层以及细分小层纵向网格的基础上能够精细刻画出小层内隔层与夹层的空间分布，更精细地展现井间砂体的空间连通关系(图8)；在建立二元解释模型及精细解释出单井储层内部纵向上物性的非均质性基础上，精细刻画厚砂层纵向上物性的各种韵律性分布

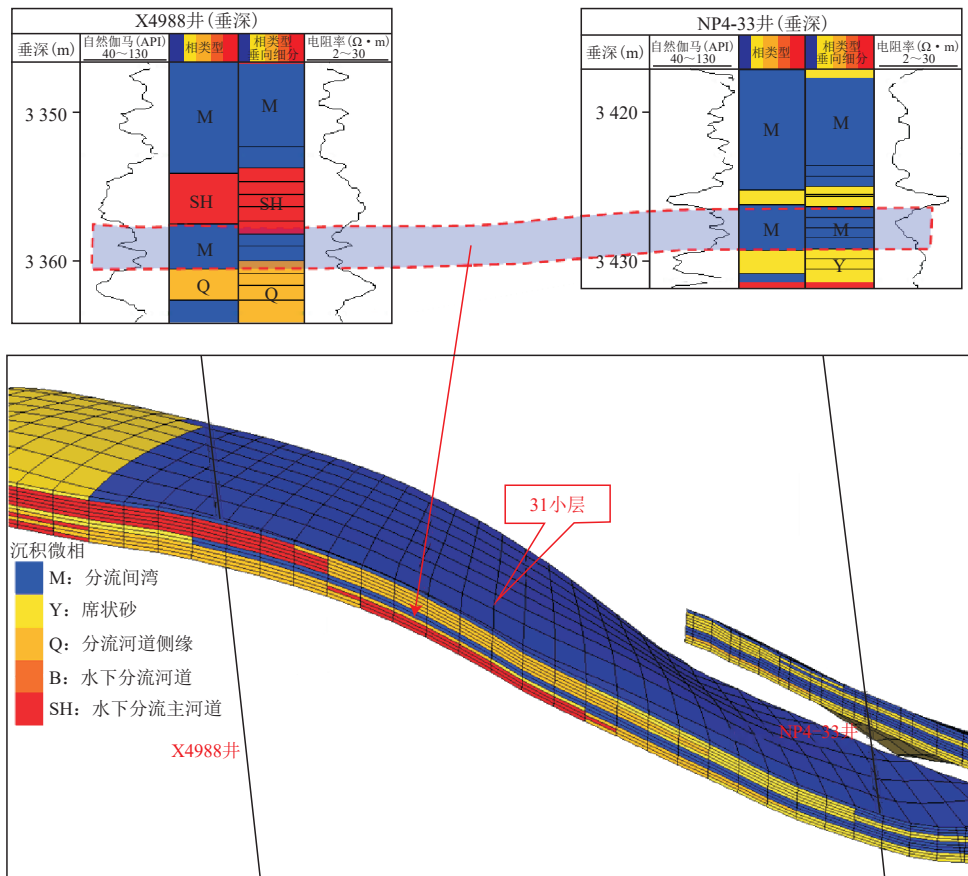


图8 相控建模小层沉积微相剖面
Fig. 8 Sedimentary microfacies profile of facies controlled modeling small layer

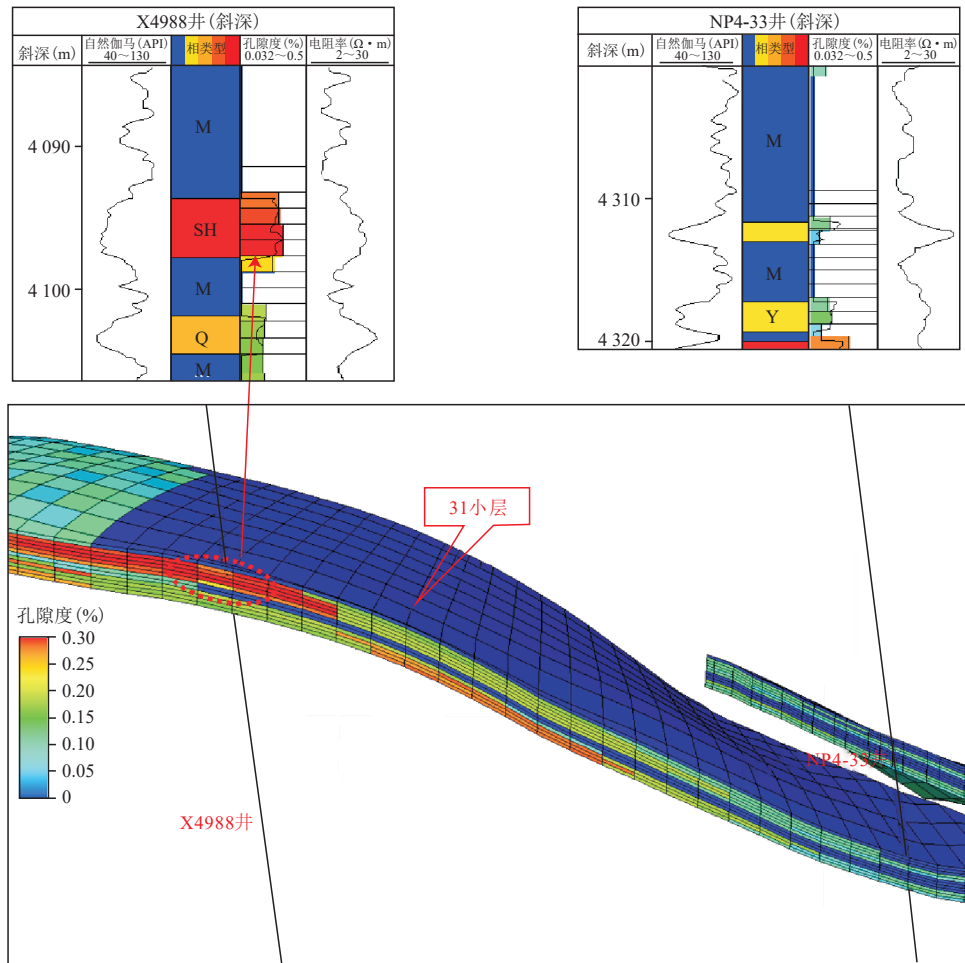


图9 相控建模小层孔隙度剖面

Fig. 9 Profile of phased modeling small layer porosity

特征(图9);在沉积微相的约束下模拟出的储层物性分布,无论在平面分布上,还是在纵向韵律上与沉积微相的分布趋势一致,符合地质规律(图10)。

在基于构造模型、沉积相模型的基础上,完成储层物性模型,通过3个步骤,不断约束校准参数,使模型参数与沉积相规律进行匹配,将取心井的岩心进行深度归位后,根据岩心样品化验分析数据及其对应深度的测井响应值,建立了储层物性的二次解释模型(图11),以此为依据对储层的物性进行解释,进而将孔隙度、渗透率等物性参数曲线离散化到模型中。最后利用具有地质规律的沉积微相模型控制下的序贯高斯模拟算法对储层物性参数进行模拟。

2.6 剩余油表征与分布规律研究

冀东油田整体开发阶段属于中后期,剩余油分布规律主要体现在分散且复杂。以其中难度较大的

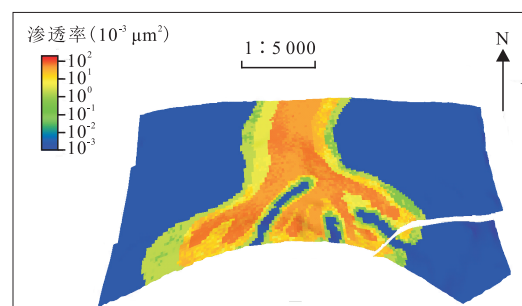


图10 相控建模渗透率平面图

Fig. 10 Phased modeling permeability plane diagram

低渗压裂开发区块南堡凹陷4-3区Ed₁组为例,对区块剩余油分布进行表征^[34-35]。

常规动态分析与数值模拟综合研究表明,在微相控制、断层分割和限制多重作用下,剩余油主要富集于井间、注采不完善区、靠近断层根部、隔夹层控制区等滞留性剩余油,占总体剩余油的85.9%(图12)。

其中,平面上井间滞留型占比63.4%,主要由于裂缝方向分布的油水井容易造成注水突进,水驱波及范围小,油井多伴有压裂后含水快速上升,造成沿裂缝两侧井间残余大量剩余油,是下步转向压裂主要挖潜对象;而注采不完善、隔夹层控制及断层根部影响造成的滞留型剩余油占比为22.5%。

由于油层较多、分布跨度较大、层间非均质性强,加之大段合采合注、层间矛盾突出、小层动用差异大、非主力层采出程度低、剩余油挖潜难度大,纵向上主要根据渗透率级差进行组合压裂、主攻差动用层和未动用层以挖潜剩余油。

3 结论

复杂断块油藏是冀东油田主要的开发类型,通过多年的开发实践,逐步形成了复杂断块油藏小层划分与精细对比、低级序断层识别、三角洲沉积储层综合表征、注水开发过程中优势渗流通道形成与主控因素、复杂断块油藏三维地质建模、剩余油定量表征与分布规律6项关键技术,有力支撑了油田的精细效益开发。但精细油藏描述工作是一个不断实践、不断认识的过程,对油藏地质认识的探讨永远无法达到

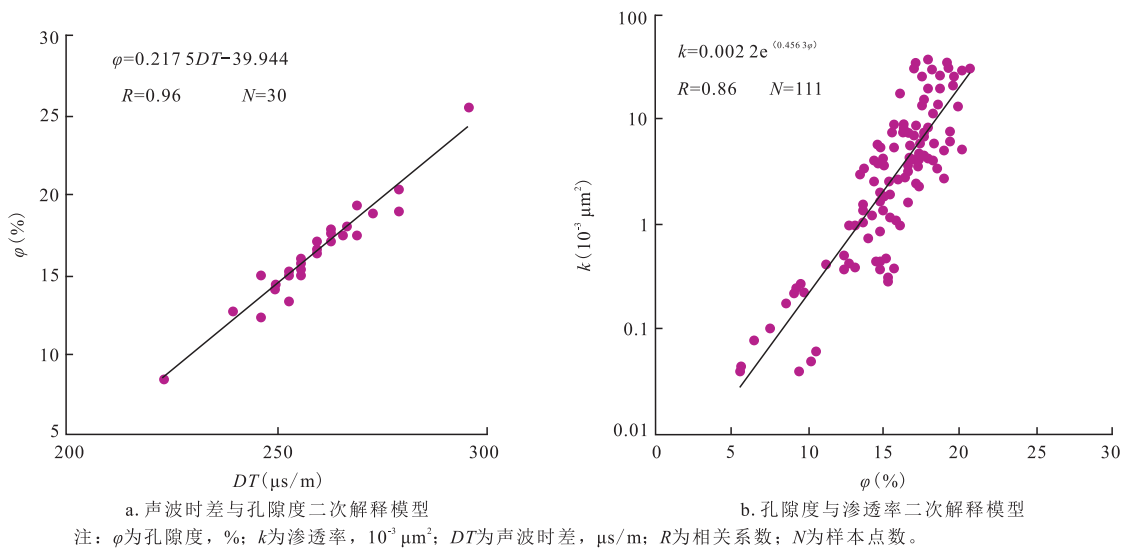


图11 储层物性二次解释模型

Fig. 11 Secondary interpretation model of reservoir physical properties

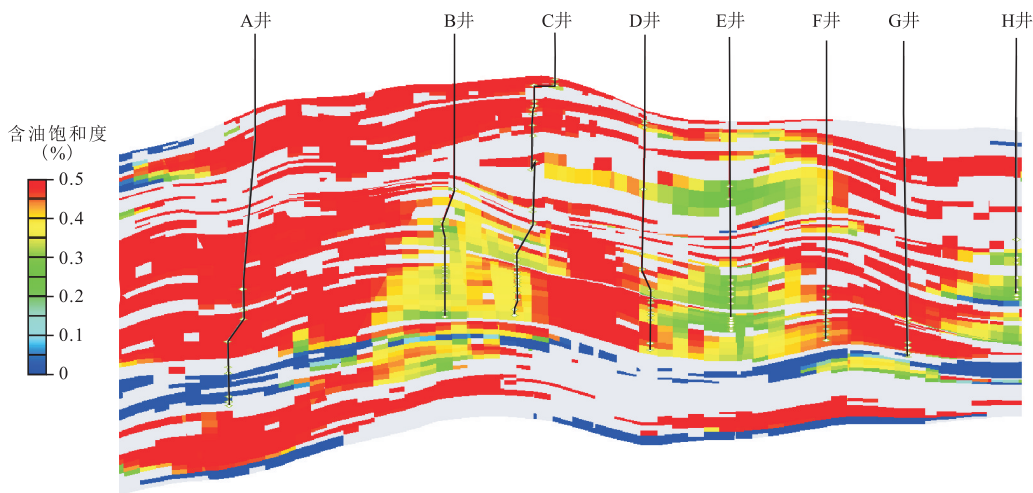


图12 渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷4-3区剩余油饱和度剖面

Fig. 12 Remaining oil saturation profile of 4-3 area in Nanpu Sag, northern Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

高度的精准,将复杂问题简约化、避免将精细描述走向“精准描述”的死胡同是科研工作者需要注意的问题。从对开发生产的影响上探讨精细研究可以得出更加清晰的思路,即支撑开发不断走向更集约、更适合工业化、更高效持久是精细油藏描述追求的目标。

参考文献

- [1] 陈欢庆. 中国石油精细油藏描述进展与展望[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 424-446.
CHEN Huanqing. Progress in the fine description of reservoirs in China and its prospect[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 424-446.
- [2] 陈欢庆, 石成方, 曹晨, 等. 精细油藏描述研究中的几个问题探讨[J]. 石油实验地质, 2016, 38(5): 569-576.
CHEN Huanqing, SHI Chengfang, CAO Chen, et al. Problems with the fine description of reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(5): 569-576.
- [3] 李文科, 吴小洲, 王君, 等. 南堡1号构造带新生代断层与火成岩发育特征及其联合控藏作用[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 957-968.
LI Wenke, WU Xiaozhou, WANG Jun, et al. Development characteristic of the Cenozoic faults and igneous rocks and their joint control of hydrocarbon accumulation in the Nanpu No. 1 structural belt[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 957-968.
- [4] 王恩泽, 刘国勇, 庞雄奇, 等. 南堡凹陷中深层碎屑岩储集层成岩演化特征及成因机制[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 321-333.
WANG Enze, LIU Guoyong, PANG Xiongqi, et al. Diagenetic evolution and formation mechanisms of middle to deep clastic reservoirs in the Nanpu sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 321-333.
- [5] 童亨茂, 范彩伟, 孟令箭, 等. 中国东—南部裂陷盆地断裂系统复杂性的表现形式及成因机制——以南堡凹陷和涠西南凹陷为例[J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1753-1765.
TONG Hengmao, FAN Caiwei, MENG Lingjian, et al. Manifestation and origin mechanism of the fault system complexity in rift basins in Eastern-Southern China: Case study of the Nanpu and Weixinan Sags[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(9): 1753-1765.
- [6] 常学军, 尹志军. 高尚堡沙三段油藏储层敏感性实验研究及其形成机理[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 84-88.
CHANG Xuejun, YIN Zhijun. Sensitivity experimental study and its mechanism analysis of reservoirs in the third member of the shahejie formation, Gaoshangpu oilfield[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2004, 26(1): 84-88.
- [7] 廖保方, 张为民, 李列, 等. 辫状河现代沉积研究与相模式——中国永定河剖析[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 34-39.
LIAO Baofang, ZHANG Weimin, LI Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies model: Taking the Yongding River as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 34-39.
- [8] 常学军, 廖保方. 油藏精细描述在老区调整挖潜中的初步实践[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 114-118.
CHANG Xuejun, LIAO Baofang. Preliminary application of accurate reservoir description for adjusting and tapping potential of maturing tracts[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 114-118.
- [9] 缪欢, 王延斌, 何川, 等. 渤海湾盆地埕北断阶带断裂发育特征及其控藏作用[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 105-115.
MIAO Huan, WANG Yanbin, HE Chuan, et al. Fault development characteristics and reservoir control in Chengbei fault step zone, Bohai Bay Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 105-115.
- [10] FISK H N, MCFARLAN JR E, KOLB C R, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi Delta[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(2): 76-99.
- [11] COLEMAN J M, GAGLIANO S M. Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1964, 14: 67-80.
- [12] TYE R S. Geomorphology: An approach to determining subsurface reservoir dimensions[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(8): 1123-1147.
- [13] 李彦泽, 王志坤, 商琳, 等. 小湖盆浅水三角洲沉积特征及其等时格架划分方案——以南堡4-3区东二段为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 1079-1086.
LI Yanze, WANG Zhikun, SHANG Lin, et al. Study on sedimentary characteristics of shallow water deltas and isochronous stratigraphic framework: An example of Ed² of 4-3 zone of Nanpu oilfield[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 1079-1086.
- [14] 余成林, 李志鹏, 熊运斌, 等. 心滩储层内部构型分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 19-23.
YU Chenglin, LI Zhipeng, XIONG Yunbin, et al. Analysis on internal architecture of batture bar reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition)*, 2012, 34(3): 19-23.
- [15] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.
ZHU Weilin, LI Jianping, ZHOU Xinhuai, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582.
- [16] 李俊飞, 霍春亮, 叶小明, 等. 渤海海域L油田砂质辫状河储层构型特征[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 48-53.
LI Junfei, HUO Chunliang, YE Xiaoming, et al. Internal architecture characteristics of sandy braided-river reservoirs in L Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(6): 48-53.
- [17] ZENG H L, ZHU X M, LIU Q H, et al. An alternative, seismic-assisted method of fluvial architectural-element analysis in the subsurface: Neogene, Shaleitian area, Bohai Bay Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 118: 104435.
- [18] ZENG H L. Thickness imaging for high-resolution stratigraphic interpretation by linear combination and color blending of multiple-frequency panels[J]. *Interpretation (Tulsa)*, 2017, 5(3): T411-T422.
- [19] 马佳国, 王建立, 周卿, 等. 分频RGB融合技术在精细刻画沉

- 积微相中的应用[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(3): 27-31.
- MA Jianguo, WANG Jianli, ZHOU Qin, et al. Frequency division RGB fusion technique for fine description of sedimentary microfacies[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(3): 27-31.
- [20] 徐安娜, 董月霞, 韩大匡, 等. 地震、测井和地质综合一体化油藏描述与评价——以南堡1号构造东营组一段油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(5): 541-551.
- XU Anna, DONG Yuexia, HAN Dakuang, et al. Integrated description and evaluation of reservoirs based on seismic, logging and geological data: Taking Dongying Formation Member 1 oil reservoir of No. 1 structure, Nanpu Sag as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(5): 541-551.
- [21] 贾爱林, 程立华. 数字化精细油藏描述程序方法[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 709-715.
- JIA Ailin, CHENG Lihua. The technique of digital detailed reservoir characterization[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 709-715.
- [22] 周天伟, 周建勋, 董月霞, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 12(1): 12-17.
- ZHOU Tianwei, ZHOU Jianxun, DONG Yuexia, et al. Formation mechanism of Cenozoic fault system of Nanpu sag in Bohai Bay Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 12(1): 12-17.
- [23] 王家豪, 王华, 周海民, 等. 河北南堡凹陷老爷庙油田构造活动与油气富集[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 205-208.
- WANG Jiahao, WANG Hua, ZHOU Haimin, et al. Tectonic activity and petroleum enrichment in the Laoyemiao oilfield in the Nanpu depression in Hebei[J]. *Geoscience*, 2002, 16(2): 205-208.
- [24] 杨延强, 吴胜和, 齐立新, 等. 南堡凹陷柳赞油田沙三³亚段扇三角洲相构型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(5): 21-30.
- YANG Yanqiang, WU Shenghe, QI Lixin, et al. Study on microfacies architecture of fan delta in Es³ reservoir of Liuzan Oilfield, Nanpu Sag[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 2014, 29(5): 21-30.
- [25] 谢建磊, 杨坤光. 冀东南堡凹陷关键成藏时刻主要断裂封闭性分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(3): 5-8.
- XIE Jianlei, YANG Kunguang. Analysis of the closeness of the main faults in Nanpu Sag in southeastern Hebei at key hydrocarbon accumulation moments[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 2006, 21(3): 5-8.
- [26] 刘萱, 谢占安, 张国栋, 等. 南堡油田叠前反演技术与储层预测[J]. 天然气工业, 2007, 27(S1): 439-442.
- LIU Xuan, XIE Zhan'an, ZHANG Guodong, et al. Prestack inversion technology and reservoir prediction in Nanpu Oilfield[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(S1): 439-442.
- [27] 庞雄奇, 霍志鹏, 范泊江, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷源控油气作用及成藏体系评价[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 28-36.
- PANG Xiongqi, HUO Zhipeng, FAN Bojiang, et al. Control of source on hydrocarbon accumulation and assessment of gas pools in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(1): 28-36.
- [28] 徐亚军, 杨坤光, 马乾. 冀东南堡凹陷断裂系统分形研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(15): 619-621.
- XU Yajun, YANG Kunguang, MA Qian. Study on fractal of faults system in the Nanpu Sag, Jidong[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(15): 619-621.
- [29] 郑红菊, 董月霞, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡富油气凹陷烃源岩的形成及其特征[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 78-83.
- ZHENG Hongju, DONG Yuexia, WANG Xudong, et al. The generation and characteristics of source rocks in Nanpu oil-rich depression, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(1): 78-83.
- [30] 陈吉, 吴远坤, 孙爱艳, 等. 南堡油田沙一段储层特征及控制因素[J]. 特种油气藏, 2015, 22(1): 36-40.
- CHEN Ji, WU Yuankun, SUN Aiyan, et al. Reservoir features and controlling factors of Shayi Member, Nanpu Oilfield[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2015, 22(1): 36-40.
- [31] 崔建, 李海东, 冯建松, 等. 辫状河储层隔夹层特征及其对剩余油分布的影响[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 26-30.
- CUI Jian, LI Haidong, FENG Jiansong, et al. Barrier-beds and inter-beds characteristics and their effects on remaining oil distribution in braided river reservoirs: A case study of the Ng IV oil unit in shallow north Gaoshangpu oilfield[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013, 20(4): 26-30.
- [32] 朱文慧, 曲希玉, 查明, 等. 南堡凹陷下古生界流体包裹体特征及成藏期研究[J]. 世界地质, 2015, 34(1): 148-156.
- ZHU Wenhui, QU Xiyu, ZHA Ming, et al. Study on fluid inclusion characteristics of Lower Paleozoic reservoirs in Nanpu Depression and hydrocarbon accumulation phases[J]. *Global Geology*, 2015, 34(1): 148-156.
- [33] 刘君荣, 王晓文, 赵忠新, 等. 南堡凹陷拾场次洼的构造-沉积特征及其对岩性油藏勘探的影响[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 601-608.
- LIU Junrong, WANG Xiaowen, ZHAO Zhongxin, et al. Tectonic-sedimentary characteristics and their influences on the forming of lithologic hydrocarbon reservoirs in the Shichang Subsag of the Nanpu Sag[J]. *Oil and Gas Geology*, 2014, 35(5): 601-608.
- [34] 孙永河, 赵博, 董月霞, 等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 540-549.
- SUN Yonghe, ZHAO Bo, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(4): 540-549.
- [35] 周海民, 魏忠文, 曹中宏, 等. 南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 345-349.
- ZHOU Haimin, WEI Zhongwen, CAO Zhonghong, et al. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu Sag[J]. *Oil and Gas Geology*, 2000, 21(4): 345-349.

(编辑 黄颖)