

少井条件下的复杂岩性储层地质建模技术 ——以渤海湾盆地石臼坨凸起A油田为例

张宇焜,王 晖,胡晓庆,张显文,卜范青,高玉飞,范廷恩
(中海油研究总院,北京 100028)

摘要:钻井揭示渤海湾盆地石臼坨地区沙河街组一段、二段储层垂向岩性为复杂的碎屑岩和碳酸盐岩混杂堆积,总体物性为低孔、特低渗,储层厚度大但隔夹层不发育,且横向变化快,内部非均质性严重。勘探评价阶段由于海上油气田评价井数量有限,储层认识难度大。针对此类储层的精细表征,单井上通过元素俘获谱测井技术识别储层复杂岩性,并结合核磁共振测井技术完成不同岩性储层的渗透率优化解释,在此基础上根据岩性和物性特征划分储层岩相。同时结合地层切片演绎技术和井点岩性分布进行扇三角洲沉积期次划分,从而搭建精细地层格架。以地层格架为单元,利用地震多属性分析技术预测扇体的空间展布范围,并通过确定性建模和随机模拟相结合的方法多级约束建立储层岩相模型,最终通过相控随机模拟的方法得到定量的储层物性空间分布。该套建模技术合理表征了石臼坨地区古近系复杂岩性储层的空间分布特征。所建立的地质模型在确保等时性的同时,细化了储层层系,明确了优质储层的分布特征,提高了勘探评价阶段古近系中深层复杂岩性储层预测的精度。

关键词:多级约束;复杂岩性识别;地层切片;地质建模;古近系;石臼坨凸起;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Reservoir modeling of complex lithologies with sparse wells: A case from A oilfield in Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin

Zhang Yukun, Wang Hui, Hu Xiaoqing, Zhang Xianwen, Bu Fanqing, Gao Yufei, Fan Tingen

(CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The 1st and 2nd Member of Shahejie Formation reservoir in Shijiutuo uplift of Bohai Bay Basin are complex in vertical lithology because of the nature of mixed clastics and carbonates. The reservoirs feature in low porosity and super-low permeability, large thickness but underdeveloped barriers and baffles with quick lateral variance, and strong internal heterogeneity. As there are limited appraisal wells available in offshore oilfield during the exploration and evaluation stage, it is difficult to understand the reservoirs. In order to finely describe these reservoirs, element capture spectroscopy logging was used to identify the complex reservoir lithology in single well, and nuclear magnetic resonance logging technique was used to optimize permeability interpretation of different lithologies. Then the reservoir lithofacies were divided according to the identified lithologies and petrophysics. By combining seismic attribute slice analysis with lithology distribution of wells, we identified different sedimentation stages of fan deltas and established a stratigraphic framework. By taking the stratigraphic framework as units, we predicted spatial extent of sandbody through seismic multi-attribute analysis and finished the lithofacies model with multilevel constraints by integrating deterministic modeling with stochastic simulation. Finally, we established the reservoir physical parameter modeling by using the lithofacies model as constraint. The modeling method adequately simulated the Paleogene reservoir heterogeneity in Shijiutuo uplift. In addition to ensuring isochronisms, the model with stratigraphic framework can realize fine subdivision of the reservoirs, and accurately map the high quality reservoir distribution, thus improve the prediction accuracy of the deep Paleogene reservoir with complex lithology in exploration and evaluation stages.

Key words: multilevel constraint, complex lithology recognition, stratal slice, geological modeling, Paleogene, Shijiutuo Uplift, Bohai Bay Basin

收稿日期:2014-10-28;修订日期:2016-04-15。

第一作者简介:张宇焜(1986—),男,硕士、工程师,油藏描述及开发地质。E-mail:zhangyk3@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-005-03)。

中国陆相盆地短物源沉积体系较为发育,储集砂体分布多变,沉积相横向变化快,岩性分布复杂,储层中的流体分布多数受构造和岩性的双重控制^[1-2]。复杂的储层岩性和多变的沉积体系造成了油气储集层连续性和连通性相对差,储层非均质性严重^[3]。

渤海湾盆地富集了我国多个重要的含油气盆地,古近系中深层储集体广泛发育,沉积类型多以扇三角洲为主^[4-6]。勘探评价结果显示,虽然某些古近系储层岩性复杂、认识困难,但是蕴藏着巨大的油气资源。由于扇三角洲沉积多期叠置,且受深层地震资料品质以及海上钻井资料有限等因素的影响,渤海古近系多为区域性的沉积特征研究,制约了储层研究的精度^[7]。如何有效的认识并描述储层,对油田的高效开发显得意义重大。

渤海湾盆地石臼坨凸起北部的A油田,古近系沙河街组一段和二段(下文简称沙一、沙二段)储层储量规模大,但岩性复杂,隔夹层不发育,储层横向变化快。同时受制于海上油田评价井井距大,古近系地震资料品质低的特点,地质建模难度极大。通过地质、测井、地球物理等多专业的结合,对储层复杂岩性进行识别与分类,并对孔渗关系进行优化重构,同时提取地震信息确定各沉积时期的扇体展布范围,从而建立可靠的储层地质知识库。在此基础上针对不同级别沉积参数的特征,建立多级次的储层相模型,以此对后续相控物性随机模拟进行有效约束,提高了少井条件下复杂岩性储层建模结果的可信度。

1 建模意义及难度

渤海A油田位于石臼坨凸起东倾末端北侧边界断裂下降盘的断坡带上,南依石臼坨凸起,北临秦南生油凹陷,构造上为一断鼻构造,属于断层和地层超覆共同形成的构造-地层复合圈闭。勘探评价发现古近系沙一、沙二段扇三角洲沉积体为主要含油层系,油田范围内仅钻探A-4和A-5两口评价井。钻井揭示,单井油层累积厚度达200 m,最大单油层厚度约130 m。储层垂向上发育鲕粒白云岩、生物白云岩、白云质砂岩、凝灰质砂岩、砂岩和灰质砂岩等不同岩性。储层平均孔隙度和渗透率分别为14.5%和 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,虽然为低孔特低渗储层,但储层酸化后测试单井日产量可达1 000 m³。

在储量评价阶段,沙一、沙二段储层垂向上并未考虑内部岩性的变化,仅依据构造层状模式,笼统按2个单元计算油田储量。油田开发阶段,若储层空间分布模式不清,仍按照构造层状模式采用常规规则井网开发,势必在开发过程中造成巨大的不确定性,并加大早

期投资风险。因此,为合理开发此类复杂低渗油藏,通过地质模型定量表征优质储层的空间分布,能在油田前期研究阶段有效规避储层认识不清带来的开发风险。而地质建模的难度主要体现在,如何利用有限的井资料和品质较低的地震资料,对这类岩性复杂、厚层、储层横向变化快且低渗的油藏进行合理表征。

2 储层表征关键技术

储层表征的关键在于通过钻井、测井、地震等资料的分析,解剖储层内部结构特征和变化规律。同时确定单一成因单元的定量几何形态和各成因单元的定量组合模式,从而建立研究区的地质统计学特征,进而建立合理的地质知识库,以此为储层表征提供可靠的输入参数^[8-9]。针对研究区岩性复杂、储层分布认识困难,并且井资料少、地震资料品质不高的特点。笔者通过元素俘获谱测井(ECS)、核磁共振测井以及地层切片演绎和地震多属性分析等新方法的应用,完成了储层复杂岩性的识别与分类,提高了渗透率解释精度,并确定了不同沉积时期储层的展布范围,为地质建模提供了可信度更高,也更为精细的输入参数。

2.1 复杂岩性识别

受复杂岩性的影响,研究区2口评价井的常规测井曲线规律性不强,但2口井都进行了ECS测井,其中A-5井较A-4井而言,测井项目更加齐全,岩心、壁心资料包含了该区所有复杂岩性。根据ECS测井利用快中子与地层中的原子核发生非弹性散射碰撞及热中子俘获的原理,通过解谱并利用氧化物闭合模型得到地层中主要造岩元素硅、钙、铁、铝、硫、钛、钪的相对含量,并通过地层元素含量和矿物含量的关系,经特定的闭合模型,可以得出地层中各种矿物含量的特性^[10-11]。

结合ECS测井技术可以宏观判断岩性矿物组合的特点,同时根据中子、密度曲线与岩性有较好的一致性关系,以A-5井为学习井,利用基于图形的聚类分析法划分岩性。如图1所示,灰质砂岩段中子、密度曲线重合,自然伽马中值,硅元素含量在0.25、钙元素含量在0.1左右。而凝灰质砂砾岩的中子、密度曲线呈反交会特征,自然伽马低值,硅元素含量在0.4左右、钙元素含量低,其值低于0.05,铝元素含量在0.2左右,也表现为低值。在ECS测井划分岩性的基础上,结合岩心和薄片资料进一步识别岩性。通过该方法确定了沙一、沙二段共发育灰质岩屑砂岩、鲕粒白云岩、表鲕状岩屑砂岩、含生屑白云质砂砾岩、生屑白云岩、凝灰质砂砾岩这6类岩性。

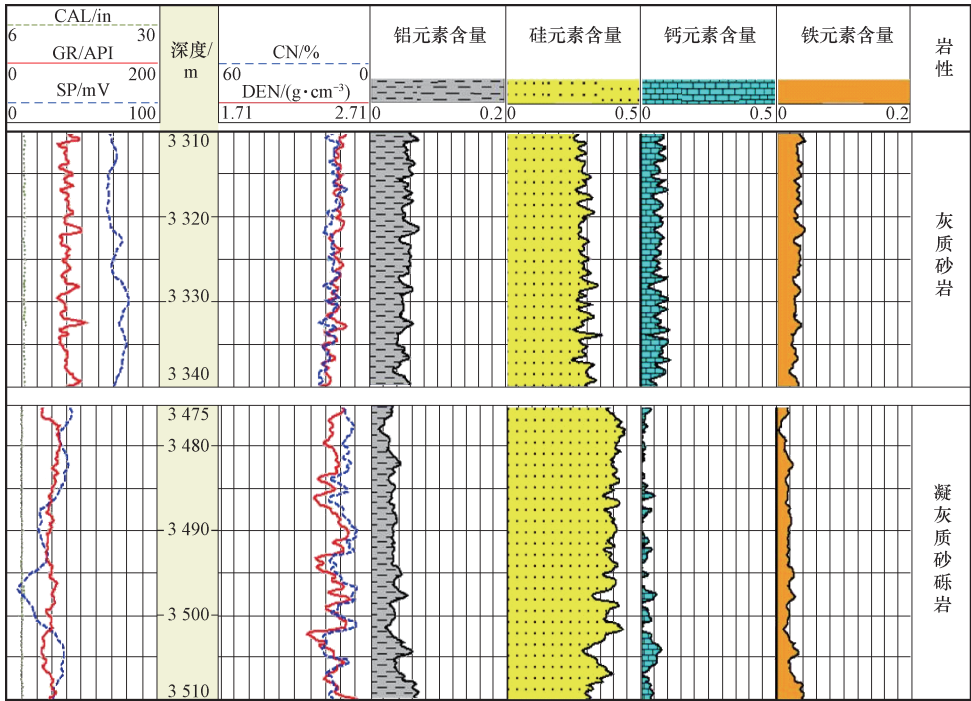


图 1 石白坨凸起 A 油田 A-5 井沙一、沙二段储层典型岩性测井曲线特征

Fig. 1 Typical lithologic logs of the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation for Well A-5 in A oilfield, Shijiutuo Uplift

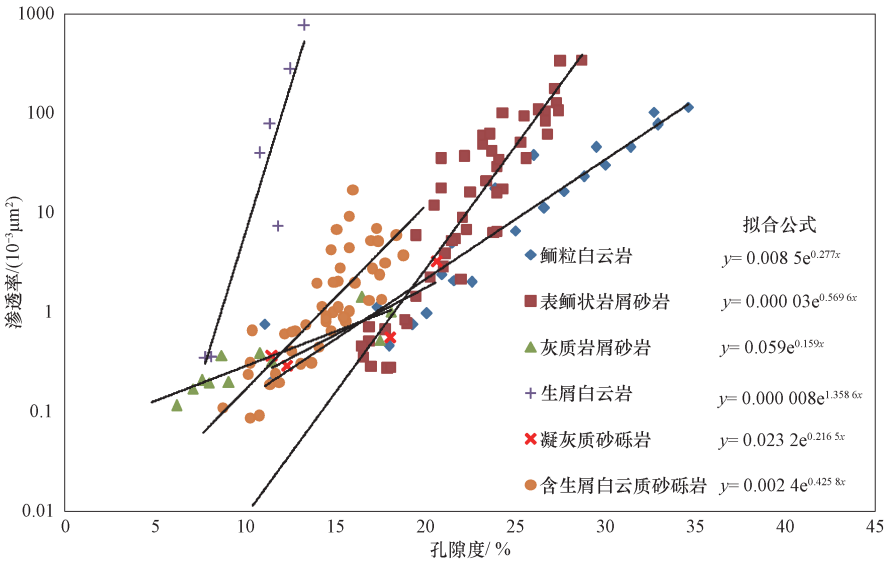


图 2 石白坨凸起 A 油田沙一、沙二段储层岩性孔 - 渗关系拟合图

Fig. 2 Fitting relationship between the reservoir porosity and permeability for the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation in A oilfield of Shijiutuo Uplift

2.2 孔 - 渗关系重构与岩相分类

由于研究区岩性垂向变化复杂多样,全井段统一进行孔隙度和渗透率拟合时,整体相关性较差。通过储层岩性的识别为不同岩性段的孔渗关系重构提供了地质依据,但是在同一岩性段内,孔渗关系重构还需要考虑相似性的原则。例如 A-5 井岩心分别取在鲕粒白云岩段储层的顶部和底部,但是孔渗关系略有差异,核磁共振测井的 T2 谱特征显示,未取心段与底部鲕粒

白云岩相似,T2 谱峰长,有拖尾现象,因此未取心段可借鉴底部鲕粒白云岩段的储层孔渗关系。总体而言孔渗关系重构按照岩性相同或相似,物性相近的原则,少数服从多数,成层成段的进行孔渗关系拟合,孔渗关系重构结果如图 2。

根据不同岩性孔渗重构拟合关系对渗透率进行再解释,在此基础上,结合岩性、物性以及毛管压力曲线特征对垂向储层岩相由好到差依次划分为 I 类、II 类和 III 类(表 1)。

表 1 石臼坨凸起 A 油田沙一、沙二段储层岩相划分依据

Table 1 Criteria for lithofacies division of the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation in A oilfield, Shijiutuo Uplift

储层岩相	主要岩性	物性特征		微观特征		
		孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	排驱压力/MPa	饱和度中值压力/MPa	孔喉中值半径/μm
I 类	鲕粒白云岩、生屑白云岩	20 ~ 25	≥10	0.041 ~ 0.710	0.8 ~ 4.2	0.17 ~ 0.92
II 类	含生屑白云质砂岩、表鲕状岩 屑砂岩、凝灰质砂砾岩	15 ~ 20	1 ~ 10	0.32 ~ 2.40	8.2 ~ 24.1	0.03 ~ 0.09
III 类	灰质岩屑砂岩	9 ~ 15	≤1	8.5 ~ 13.0	27.0 ~ 42.5	0.02 ~ 0.03

2.3 扇三角洲沉积特征

古近系扇三角洲储层埋藏深,地层厚度横向变化快^[12]。扇体的沉积期次划分和平面展布范围刻画,是储层认识的关键,也是地质建模的重要约束条件。储层沉积特征的空间认识主要依靠地震资料丰富的井间横向信息,但限于中深层地震资料品质原因,如何提高地震垂向分辨率,降低其多解性是提高储层预测精度的关键^[13-15]。

目标层位扇三角洲储层为杂乱、不连续的地震反射特征,仅根据地震相横向的变化,追踪同相轴确定沉积体系边界较难实现。通过旋回对比,结合垂向岩性、油水关系和地震层序,将目标层段划分为 3 套油组。其中上部的 I 油组自下而上发育白云质砂砾岩、白云质砂岩、灰质砂岩,总体来看碳酸盐含量高,油组厚度大。中部的 II 油组发育砂砾岩和生屑白云岩,碳酸盐含量低。下部的 III 油组发育凝灰质砂砾岩,无碳酸盐成分。在地震可识别的地层格架间按线性比例做切片,用地层切片来适应倾斜且厚度横向变化的地层内部地震属性提取的等时性,从而使地震属性能够刻画不同沉积时期扇体的延伸范围,客观反映沉积体系的变化特征。以上部最厚的 I 油组为例,在其顶底面之间内插非等间距时间层面,沿层提取地震属性,所生成的地层切片清晰地反映出了不同沉积期次扇体的展布特征。最终确定了 I 油组内的 3 个二级层序界面,并自下而上细分出 I - 1, I - 2 和 I - 3 这 3 期扇体。依次对这 3 期扇体进行顶底面的多属性提取并进行敏感属性分析,从属性图(图 3)上可以看出自下而上各期扇体的发育范围呈现出依次减小的特征。

3 复杂岩性地质建模

针对此类复杂油藏,以储层表征关键技术所建立的地质知识库为依托,采用确定性和随机性相结合的建模思路,通过多级约束的方法逐级降低模型的不确定性^[16-17]。

3.1 多级约束相控建模

根据地震解释成果确立断层的空间分布和组合关

系,并以地层切片演绎技术所识别出的 5 个扇三角洲沉积时期的二级构造框架层面数据为控制条件,结合小层划分与对比所取得的地层顶底深度数据作为主变量,通过收敛性算法建立构造模型。它有效表征了各层序界面的形态,细分了大套储层,并体现了地层厚度的变化特征,是相模型的空间格架基础。在构造框架的控制下,结合地震多属性分析技术所刻画的各沉积期次扇体的展布范围,采用确定性建模的方法建立扇体沉积模型。扇体沉积模型在空间上反映了各单期扇体的沉积期次和展布特征,体现了储层的结构性和连续性。

由于扇三角洲的空间展布特征决定了不同类型储层岩相的分布规律,而储层流体的分布又受控于不同类型的储层岩相。以扇体沉积相模型为约束,对单井划分的储层岩相进行特征分布函数分析,并采取序贯指示随机模拟法建立储层岩相模型。其结果在保证模型等时性的同时,对不同类型岩相的空间分布进行了合理的预测。从图 4 中可以看出,物性最好的 I 类储层在 I - 2 小层全区都有较好分布,而 I - 1 小层主要以 III 类储层为主,整个沙一、沙二段储层非均质性严重。

在储层岩相模型的基础上,可在不同类型岩相的约束下根据储层物性的分布规律,通过序贯高斯随机模拟方法分相控制进行井点属性的插值外推,从而建立储层物性模型。笔者首先应用该方法建立研究区的孔隙度模型,进而根据孔隙度和渗透率的相关性,以孔隙度模型为第二变量协同约束渗透率模型的随机模拟过程。通过储层岩相(图 4)和储层物性(图 5)的对比可以看出,两者的分布特征有较好的对应关系。

3.2 模型质控及应用

通过有效厚度、孔隙度、渗透率和净毛比等参数的井点值和模型平均值之间的对比,发现误差均控制在 1.5% 以内,反映出应用复杂岩性地质建模技术所建立的地质建模具有较高的置信度,并对储层非均质性进行了合理的定量表征。

该套地质模型不仅为油藏数值模拟提供了可靠的地质平台,同时也成为指导开发层系划分和井网、井型

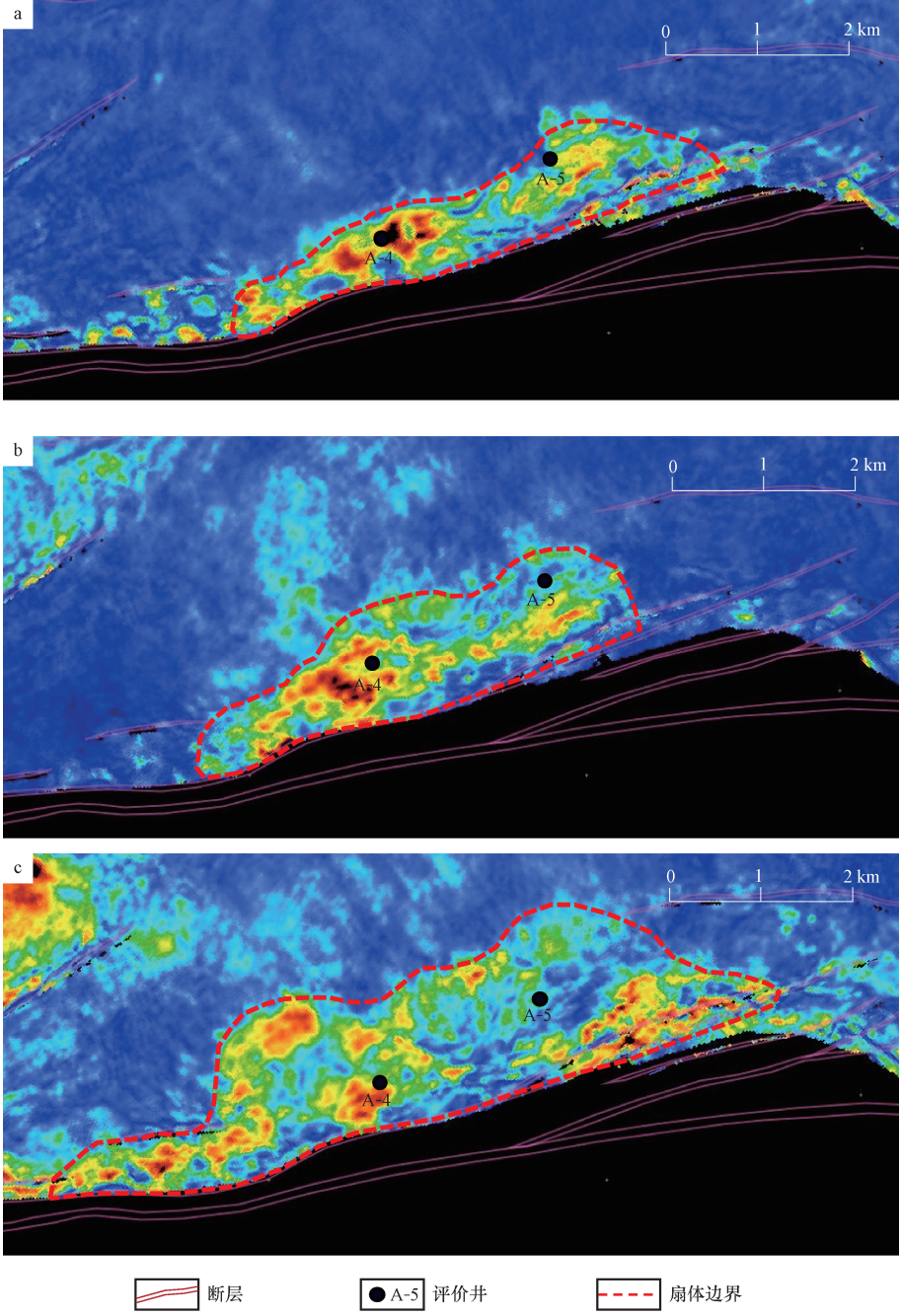


图 3 石臼坨凸起 A 油田沙一、沙二段 I 油组地震属性

Fig. 3 Seismic attributes for I oil unit in the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation in A oilfield, Shijiutuo Uplift
a. I - 3 小层; b. I - 2 小层; c. I - 1 小层

部署的有效载体。基于该模型重新计算了地质储量,确定了原探明石油地质储量中存在约 20% 的地质风险。储层在垂向上细化了 5 套层系,平面上确定了各沉积期次的岩性边界,有效指导了开发层系划分。依据储量计算结果和层间属性对比分析得出 I - 2 小层为本区的优势层位,确立了优先开发该层位,进而带动其他层位开发的策略。在井位部署和钻井顺序优化方面,依托模型依次确立了 5 口开发兼评价井用于揭示储层是否存在气顶、评价南部主断层位置、落实油水界面和井间储层变化、并确立东西两侧储层边界。

4 结论

1) 复杂岩性储层地质建模的关键在于岩性的识别与分类,以及扇体展布特征研究。通过地层切片演绎、地震多属性分析、元素俘获谱测井、核磁共振测井等新方法的应用,细化了地层格架,确定了不同沉积时期储层的展布范围,识别并分类了储层的复杂岩性,并以此为基础提高了渗透率解释精度。基于上述认识建立了储层地质模式,并取得了更能客观反映地质特征的建模参数。

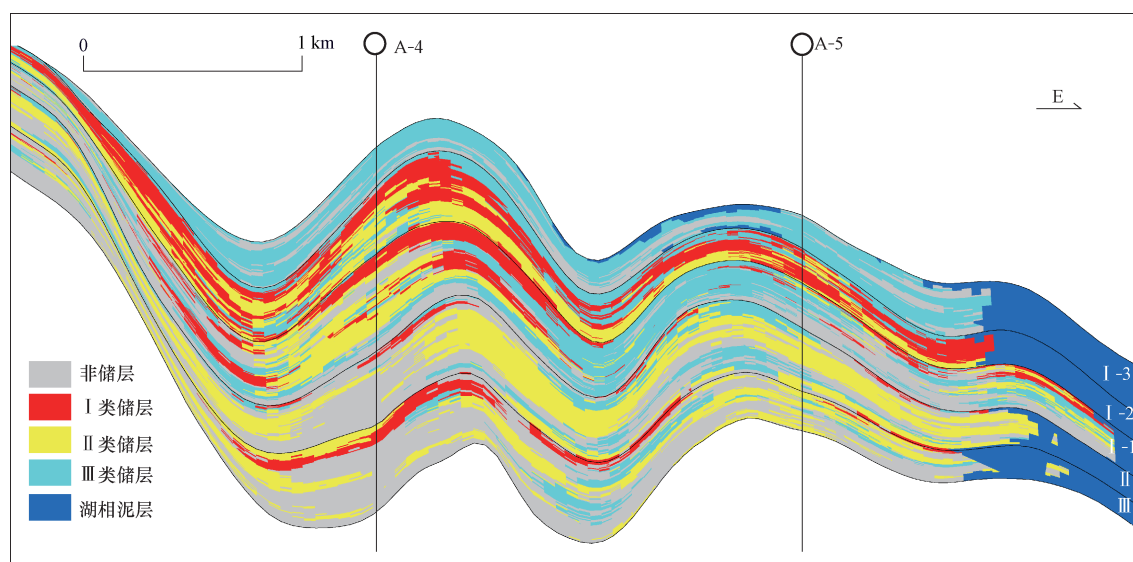


图4 石臼坨凸起A油田沙一、沙二段东西向储层岩相模型过井剖面

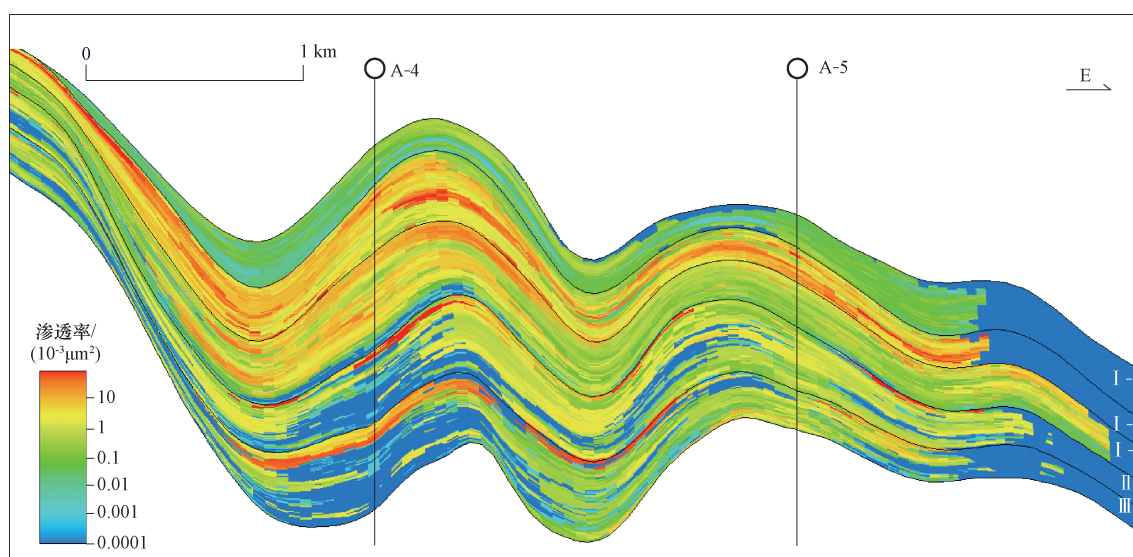
Fig. 4 East-west well-tied profile of the lithofacies model for the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation in A oilfield, Shijiutuo Uplift

图5 石臼坨凸起A油田沙一、沙二段东西向渗透率模型过井剖面

Fig. 5 East-west well-tied profile of the permeability model for the 1st and 2nd Member of Shahejie Formation in A oilfield, Shijiutuo Uplift

2) 依托岩心分析、测井和地震新技术的结合应用,通过确定性与随机性相结合的建模方法,多级约束建立目标油田的地质模型。该方法在确保了地质模型等时性的同时,对储层非均质性进行了定量表征,提升了储层物性分布的地质概念,有效降低了少井条件下地质模型的不确定性。

3) 通过该模型的应用,细化了垂向地层格架,确定了平面上各期扇体的岩性边界,精细表征了各层系中不同岩相内的地质储量规模和物性分布特征,识别低渗储层中的“甜点”。依托模型开展层间属性对比分析确立了油田的优势层位,同时,也为开发层系划分,井网、井型部署,以及钻井顺序优化和评价井的部署提供了地质依据。

参 考 文 献

- [1] 任殿星,李凡华,李保柱. 多条件约束油藏地质建模技术[J]. 石油勘探与开发,2008,35(2):205-214.
Ren Dianxing, Li Fanhua, Li Baozhu. Geomodeling technology under multifactor control [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 205-214.
- [2] 慕小水,何锋,顾勤,等. 渤海湾盆地东濮凹陷濮卫洼陷带复杂岩性油气藏形成条件与成藏规律[J]. 石油实验地质,2009,31(5):472-484.
Mu Xiaoshui, He Feng, Gu Qin, et al. Complex lithologic reservoir formation condition and law in Puwei Sub-depression, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5): 472-484.
- [3] 洪忠,苏明军,刘化清,等. 复杂岩性地区岩性识别与储层预测

- [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 38–46.
- Hong Zhong, Su Mingjun, Liu Huaqing, et al. Lithologies recognition and reservoir prediction in complex lithologies area[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2012, 34(6): 38–46.
- [4] 张树林, 费琪, 叶加仁. 渤海湾盆地边缘凹陷的构造意义[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 409–413.
- Zhang Shulin, Fei Qi, Ye Jiaren. Structural Significance of Brink Sags in the Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(5): 409–413.
- [5] 朱筱敏, 吴冬, 张昕, 等. 东营凹陷沙河街组近岸水下扇低渗透层成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 646–653.
- Zhu Xiaomin, Wu Dong, Zhang Xin, et al. Genesis of low permeability reservoirs of nearshore subaqueous fan in Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 646–653.
- [6] 万桂梅, 周东红, 汤良杰. 渤海海域郑庐断裂带对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 450–454.
- Wan Guimei, Zhou Donghong, Tang Liangjie. Control of the Tan-Lu fault zone on hydrocarbon accumulation in the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 450–454.
- [7] 徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 53–563.
- Xu Changgui, Lai Weicheng, Xue Yong'an, et al. Palaeo-geomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 53–563.
- [8] 吴胜和, 武军昌, 李恕军, 等. 安塞油田坪桥水平井区沉积微相三维建模研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 266–271.
- Wu Shenghe, Wu Junchang, Li Shujun et al. 3D microfacies modeling of Pingqiao horizontal well region of Ansai Oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 266–271.
- [9] 文健, 裴怿楠, 王军. 埕岛油田馆陶组上段储集层随机模型[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 69–72.
- Wen Jian, Qiu Yinan, Wang Jun. Stochastic reservoir architecture models of Upper Guantao Formation of Chengdao Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(1): 69–72.
- [10] 李宁, 乔德新, 李庆峰, 等. 火山岩测井解释理论与应用[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 683–692.
- Li Ning, Qiao Dexin, Li Qingfeng, et al. Theory on logging interpretation of igneous rocks and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 683–692.
- [11] 韩琳, 张建民, 邢艳娟, 等. 元素俘获谱测井(ECS)结合 QAPF 法识别火成岩岩性[J]. 测井技术, 2010, 34(1): 47–50.
- Han Lin, Zhang Jianmin, Xing Yanjuan, et al. Identification of igneous rock lithology using ECS logging and QAPF[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(1): 47–50.
- [12] 张亚雄, 董艳蕾, 成克男, 等. 黄骅坳陷沙河街组一段碎屑岩沉积特征及构造对沉积的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 975–984.
- Zhang Yaxiong, Dong Yanlei, Cheng Kenan, et al. Depositional characteristics and tectonic control on sedimentation of the 1st Member of Shahejie Formation in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 975–984.
- [13] 王江, 张宏, 杨微, 等. 地层切片技术在复杂勘探区储层预测与地质体识别中的应用[J]. 海相油气地质, 2011, 16(1): 74–78.
- Wang Jiang, Zhang Hong, Yang Wei, et al. Application of stratal slicing in reservoir prediction and geological body identification in complicated exploration area[J]. Marine Petroleum Geology, 2011, 16(1): 74–78.
- [14] 董建华, 范廷恩, 高云峰, 等. 真地层切片的拾取及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 150–153.
- Dong Jianhua, Fan Ting'en, Gao Yufeng, et al. Pickup and application of the true stratal slice[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 150–153.
- [15] 曹鉴华, 王四成, 赖生华, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷中南部沙三下亚段致密泥灰岩储层分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 480–485.
- Cao Jianhua, Wang Sicheng, Lai Shenghua, et al. Distribution prediction for tight marlstone reservoirs in lower 3rd Member of the Shahejie Formation in central and southern Shulu sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 480–485.
- [16] 郑应钊, 刘国利, 马彩琴, 等. 多条件约束地质建模技术在青西油田裂缝性油藏中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 77–80.
- Zheng Yingzhao, Liu Guoli, Ma Caiqing, et al. The application of multiple constraints geo-modeling technology in Qingxi fractured reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 77–80.
- [17] 吴胜和, 张一伟, 李恕军, 等. 提高储层随机建模精度的地质约束原则[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 55–58.
- Wu Shenghe, Zhang Yiwei, Li Shujun, et al. Geological constraints principles in reservoir stochastic modeling[J]. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25(1): 55–58.

(编辑 张亚雄)