

厚层复杂岩性油藏的储层精细表征及对开发的影响 ——以渤海湾石臼坨地区A油田沙一、沙二段油藏为例

胡晓庆,范廷恩,王 晖,赵卫平,张宇焜,牛 涛,肖大坤,张显文

(中海石油 研究总院,北京 100027)

摘要:渤海湾石臼坨地区A油田沙一、沙二段油藏是近年来少见的海上复杂岩性、高产厚层油藏,其储层普遍发育灰质砂岩、鲕粒白云岩、白云质砂岩等6类岩性。针对该油田储层岩性复杂、中-深层储层地震资料品质较差、评价井井距大、扇三角洲储层表征难度大、储层空间分布认识不清等难点,应用元素俘获谱(ECS)测井、岩心、分析化验和地震等资料,采用井-震联合技术路线,建立了厚层复杂岩性油藏的储层精细表征“四步法”技术体系,即:基于岩石相的储层分类评价技术、基于古地貌分析的沉积模式研究技术、精细等时沉积地层格架的构建方法和基于相控约束的储层预测方法。基于该技术体系,将沙一、沙二段储层纵向精细化为5期砂体,并识别出每期砂体的平面分布,同时预测了不同类型储层的空间展布。据此优化了钻探部署,从降低开发风险、提高投资效益考虑,有针对性地暂缓砂体尖灭位置附近的9口开发井钻探,并优选I类储层I-2砂层作为优先开发储层。该技术体系可为类似油田的可动用储量分析、层系划分及井网优化等提供技术支撑。

关键词:厚层;复杂岩性;古地貌;沉积模式;等时格架;储层分类;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Fine characterization of thick reservoirs with complex lithologies and its influence on oil recovery

—A case from reservoirs of the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in A oilfield, Shijiutuo uplift in Bohai Bay Basin

Hu Xiaoqing, Fan Ting'en, Wang Hui, Zhao Weiping, Zhang Yukun, Niu Tao, Xiao Dakun, Zhang Xianwen

(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: The 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in A oilfield in Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, are rare prolific thick reservoirs with complex lithologies. Six lithologies are identified, mainly including limy sandstones, oolitic dolomites, dolomitic sandstones. There are various factors challenging reservoir description of the A oilfield, including complex lithologies, poor quality of seismic data, and sparse appraisal wells, large difficulty of fan delta reservoir description, and poor understanding of reservoir spatial distribution. This paper applied a well-logging and seismic comprehensive method, i. e. ‘four step’ method, using ECS logging, core and seismic data. It consists of reservoir rock typing based on sedimentary facies, sedimentary modeling based on paleo-geomorphology restoration, reservoir framework reconstructing based on fine isochronous stratigraphy and reservoir prediction based on facies constraints. By using this four step method, sandbodies of 5 phases are identified and mapped in the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation. In addition, good-quality reservoirs are predicted by using seismic technique, and 9 new development wells are proposed for emplacement on the I-2 sand body with type I reservoirs. This ‘four step’ method is very useful in estimating producible oil reserves, layer division, and well pattern optimization in similar oilfields.

Key words: thick-layer, complex lithology, paleo-geomorphology, sedimentary model, isochronous stratigraphy, reservoir typing, Bohai Bay Basin

渤海湾盆地石臼坨凸起周边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,为渤海

海域增储上产起到重要作用^[1-3]。但渤海海域古近系油田埋藏较深、地震资料品质低、评价井少,勘探评价

阶段储层预测研究多为宏观的区域性沉积体系及沉积相类型的研究,难以满足开发的需求^[4-6]。目前针对海上古近系砂岩油藏的开发,虽然已形成了储层描述相关技术,但是受构造类型和沉积类型多样化的影响,储层复杂多变,海上中深层油田开发的储层描述仍然是一大难题^[7-9]。

本文以渤海湾石臼坨地区沙河街组一段、二段(沙一、沙二段)A油田为例,以预测优质储层分布,推动边际油田开发为目标,综合运用元素俘获谱(ECS)测井、岩心、分析化验和地震等资料,开展储层岩性识别、沉积模式、等时地层格架和储层预测等研究,以确定A油田沙一、沙二段油藏的储层空间分布和优质储层范围,提出有效的开发建议,为海上油田的高效开发奠定基础。

1 问题的提出

A油田位于渤海湾盆地石臼坨凸起东倾末端北侧断层下降盘的断坡带上,主力含油层位为沙一、沙二段。受古地貌和沉积物源的影响,该油田不同于同一区域范围内的古近系储层,是近年来渤海湾发现的比较少见的高产厚层、复杂岩性油藏^[10-12],其测试产量可达 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。由于地质条件极其复杂,储层存在“杂”、“低”、“厚”、“变”的特点:①岩性复杂,A2井区(A-1井、A-2井和A-6井)为常见的长石岩屑砂岩,A4井区(A-4井和A-5井)包括有灰质砂岩、鲕粒白云岩、白云质砂岩、凝灰质砂砾岩、砂岩和砂砾岩;②物性差,占探明储量66%的A4井区平均渗透率为 $4.5\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$;③油层累加厚度高达200 m,内部隔夹层不发育,单油层厚度达130 m;④横向厚度变化快,砂岩厚度分布为60~330 m。勘探评价阶段,受地震资料品质、研究时间等因素的限制,对储层空间分布认识不清,按照构造层状模式把不同岩性组合段作为同一单元计算储量,单个开发单元规模达到3 000多万方。但在油田开发阶段,若按照构造层状模式采用常规的规则井网开发,势必使得该油田的开发存在较大不确定性,可能造成早期大量的风险投资。因此,为了能够合理开发此类厚层复杂岩性油藏,有必要深入研究,解决储层空间分布问题以及优质储层分布范围。

2 储层精细表征方法的建立

针对A油田的复杂地质特点,形成厚层复杂岩性油藏的储层精细表征研究思路和方法(图1)。该技术体系包括以下4个方面:

1) 基于岩石相的储层分类评价,综合ECS测井、

岩心、薄片、阴极发光、X-衍射等资料,识别复杂岩性,建立基于岩石相的渗透率解释模型,结合微观特征,提出储层分类评价标准,以确定单井纵向上的储层类别。

2) 基于古地貌分析的沉积模式研究,在区域地质背景基础上,通过层拉平和三维可视化,分析古地貌,进一步结合岩心薄片、分析化验、测井和地震等资料,明确各井区的沉积模式。

3) 精细等时沉积地层格架的构建,综合岩性、电性、沉积旋回和地震层序的特征,建立储层精细对比剖面,以“先大后小,分级控制,逐级细化”为原则,剖、平面互动进行精细沉积地层格架构建,解决储层垂向叠置问题。

4) 基于相控约束的储层预测,以精细地层格架为单元,分析地震相,并利用地层切片技术获取依靠地震同相轴难以解释的层位,进而提取多种地震属性,结合沉积演化规律,确定不同期次砂体的平面展布范围。

综合单井纵向储层分类结果和储层垂向、平面的展布,可有效预测出不同类型储层的空间展布,为油田优质储层预测和高效开发奠定基础。

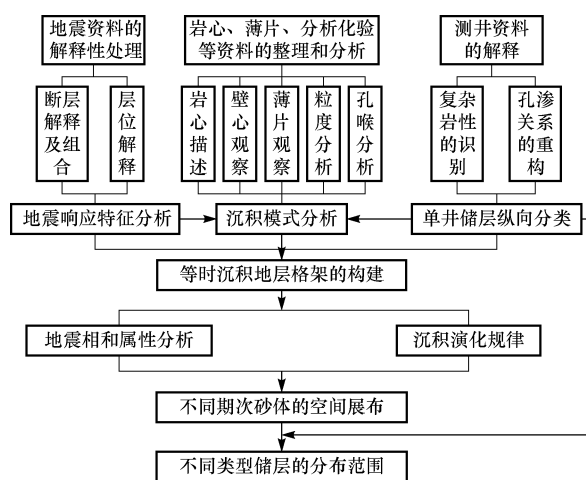


图1 研究思路和技术路线

Fig. 1 Research scheme and technique step chart

3 储层精细表征“四步法”技术体系

3.1 基于岩石相的储层分类评价

A4井区在陆源碎屑沉积和碳酸盐岩沉积多相共存的背景下,陆源碎屑与鲕粒、生物碎屑等不同程度的混合形成了空间上复杂的岩性组合。首先利用元素俘获谱测井(ECS)宏观判断岩性矿物组合,结合丰富的岩心、薄片、阴极发光、扫描电镜资料,微观确定岩石类型,将厚层储层岩性进行垂向细分,包括5个岩性段6

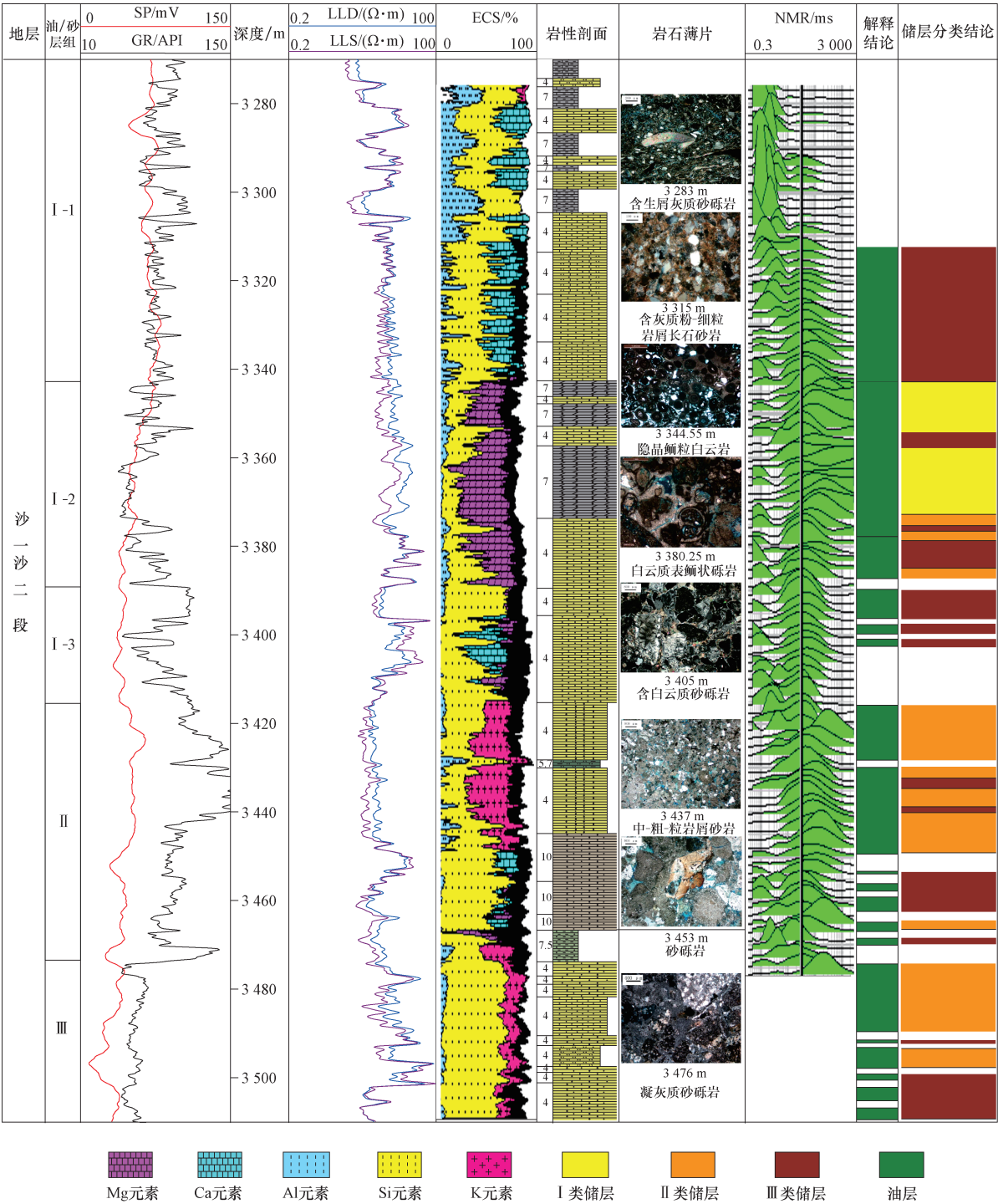


图 2 A 油田 A-5 井单井岩性识别及储层综合评价

Fig. 2 Lithology identification and reservoir prediction of Well A-5 in the A oilfield

大类岩性,灰质砂岩、鲕粒白云岩、白云质砂岩、砂岩、砂砾岩和凝灰质砂砾岩(图 2)。然后在岩性识别的基础上,通过核磁共振测井技术合并同类岩性段,按同类岩性重构孔渗关系,获取较为精确的渗透率。最后,综合岩性、物性和微观特征,提出厚层复杂储层分类评价标准(表 1),共计分为 3 类(Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类)。从而识别出井点纵向上的储层类别。

3.2 基于古地貌分析的沉积模式研究

古近系储层往往受古地貌控制,储层横向变化非

常快,古地貌分析也是沉积模式研究的基础^[13-16]。通过沙一、沙二段沉积前古地貌的恢复,A 油田沉积初期整体具有沟梁相间的特征,其中 A2 井区古冲沟较浅,地势相对平坦,物源主要来自西部的 428 西凸起;东部 A4 井区所处的古冲沟较深,坡度最大,物源主要来自南部的 428 东凸起(图 3)。在古地貌基础上,进一步结合岩心薄片、分析化验、测井和地震等资料,明确 A2 井区为缓坡扇三角洲沉积、A4 井区为陡坡扇三角洲沉积,整体上呈现水进过程。

表 1 A—油田储层分类评价标准
Table 1 Classification standards of reservoirs in the A oilfield

储层类型	岩性特征	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	0.04 ~ 0.7	0.8 ~ 4.2	0.17 ~ 0.92
II 类	含生屑白云质砂岩、 岩屑砂岩、凝灰质砂砾岩	15 ~ 20	1 ~ 10	0.32 ~ 2.4	8.2 ~ 24	0.03 ~ 0.09
III 类	灰质岩屑砂岩	9 ~ 15	≤1	8.5 ~ 13	27 ~ 42	0.02 ~ 0.03

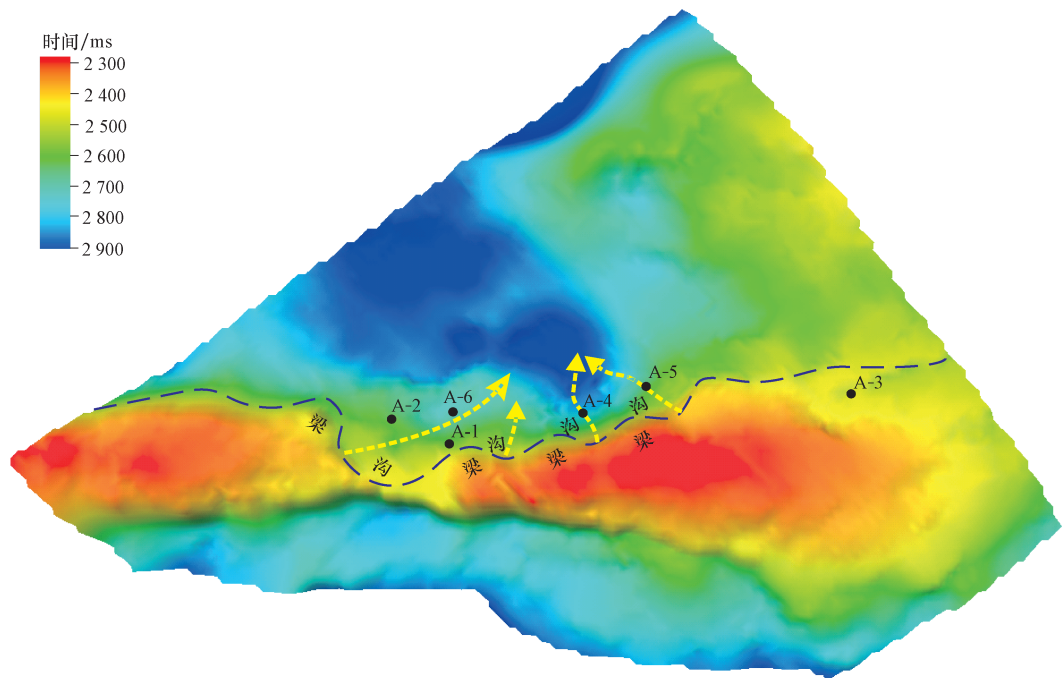


图 3 A 油田沙一、沙二段沉积前古地貌恢复

Fig. 3 Paleo-geomorphic map before the deposition of the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in the A oilfield

3.3 精细等时沉积地层格架的构建

等时沉积地层格架的构建,可为古地貌分析、地震属性提取等提供基础,同时也需要沉积模式的指导。扇三角洲储层横向变化快,其格架的建立存在较大困难,需要井震紧密结合,遵循“先大后小,分级控制,逐级细化”为原则。首先通过旋回对比、岩性、油水关系、地震层序,将沙一、沙二段细分为 I 油组、II 油组和 III 油组, I 油组地层与 II 油组界面呈现明显的上超接触, III 油组底面与下伏地层呈明显不整合接触,为地震易识别的层序界面。然后依据波组特征和岩性组合的差异,将 I 油组细分为 I - 1 砂层组、I - 2 砂层组和 I - 3 砂层组,可识别 I - 2 砂层组和 I - 3 砂层组界面,进而剖、平互动,构建精细沉积地层格架,解决厚层储层垂向叠置复杂难题(图 4)。

3.4 基于相控约束的储层预测

A 油田主力目的层沙一、沙二段,砂岩段集中,主

要发育扇三角洲沉积,对应的地震反射特征为杂乱、不连续反射(图 4),与湖相泥岩的平行反射明显不同。但仅仅根据地震相横向的变化,追踪同相轴确定沉积体系边界比较难实现。而在地震垂向分辨率很低的情况下,地层切片演绎,可弥补垂向分辨率的不足^[17]。因此,在已有的精细地层格架内,采用地层切片演绎技术,获取 III 油组和 I - 1 砂层组的层位。然后在格架的控制下,提取多种地震属性,以沉积演化规律作为控制,优选可以反映地质规律的地震属性,以确定砂体平面分布范围。最后结合单井相、连井相等沉积特征,确定不同期次砂体的沉积相平面展布(图 5)。整体上呈现为水进过程,砂体范围逐渐缩小。其中在 I - 2 砂层组沉积时期,气候温暖潮湿,碳酸盐含量高,砂体在物源供给间歇期受到湖水的不断改造, A - 5 井发育以鲕粒白云岩为主的滩坝沉积, A - 4 井发育以白云质砂岩为主的扇三角洲沉积,鲕粒、生屑和少量陆源碎屑共生,改善了储层的储集性能。

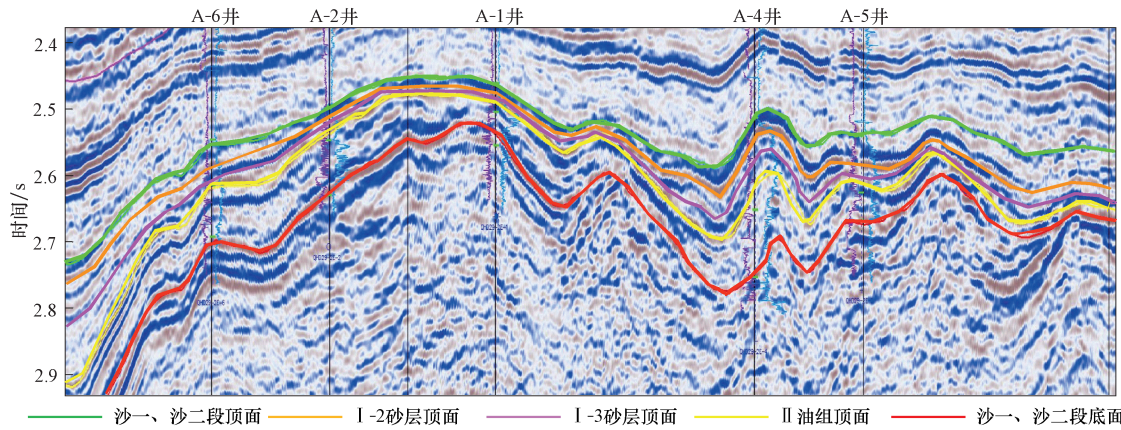


图 4 A 油田沙一、沙二段井-震联合连井剖面

Fig. 4 Well-tie seismic profile of the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in the A oilfield

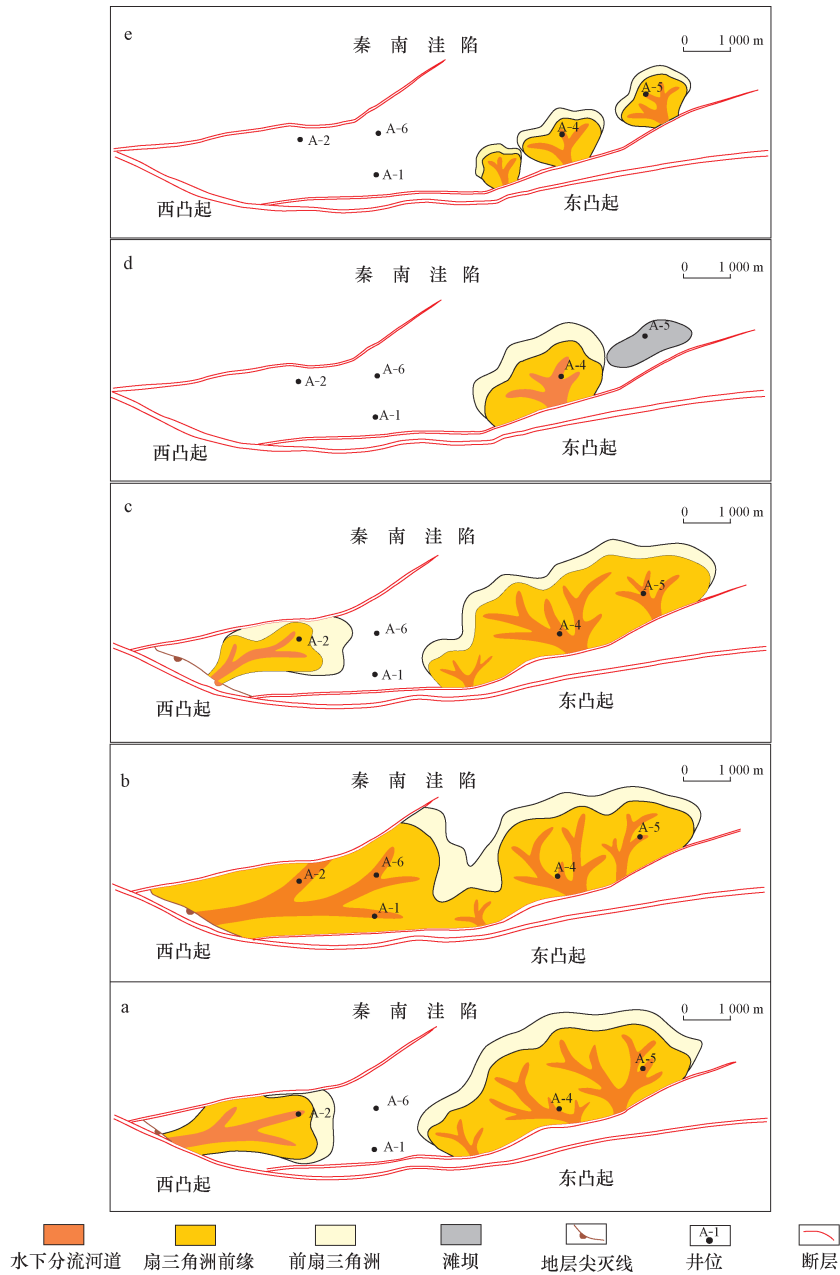


图 5 A 油田沙一、沙二段各砂组沉积相平面展布

Fig. 5 Maps showing sedimentary facies of each sand group in the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in the A oilfield

a. III 油组; b. II 油组; c. I-3 砂层组; d. I-2 砂层组; e. I-1 砂层组

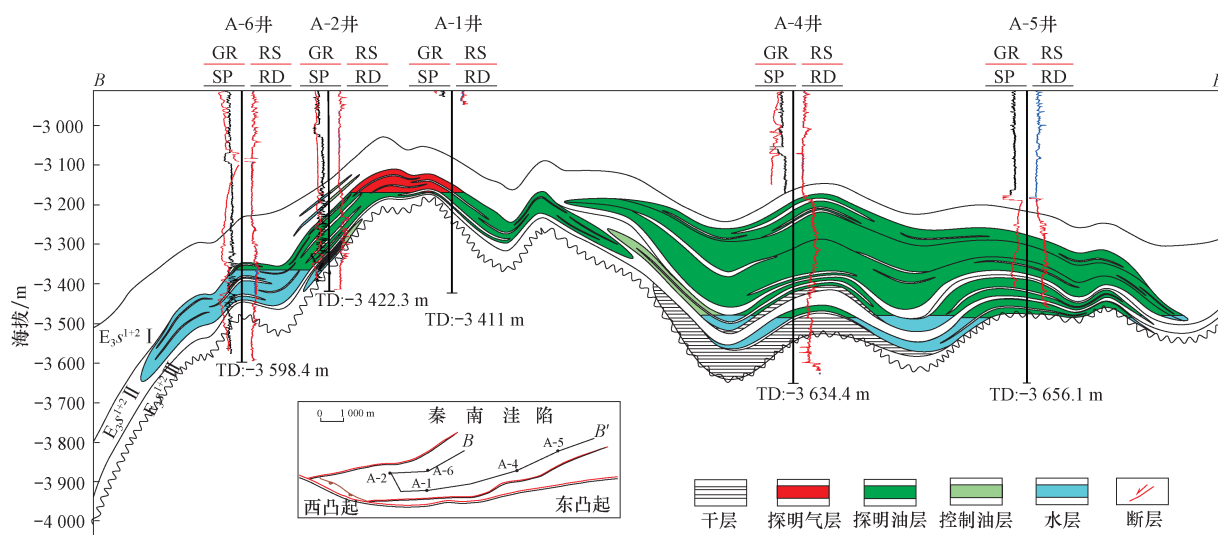


图6 A油田基于储层新认识的沙一、沙二段油藏剖面

Fig. 6 Reservoir section of the 1st and 2nd Members of Shahejie Formation in the A oilfield based on new understanding of the reservoirs

4 开发指导意义

4.1 精细描述储层,降低油田开发风险

勘探评价阶段,A油田A4井区按照构造法计算储量,即直接在构造图上采用油水界面圈定含油范围,认为储层横向分布范围较广。若按照此模式,则会在含油范围内均匀部署井网。但通过精细描述储层后,对沙一、沙二段扇三角洲储层进行了重新认识,综合分析认为A4井区属于构造-岩性油藏(图6),开发方案编制中考虑此风险减少了约20%的动用储量,且A-4井西侧和A-5井东侧存在岩性尖灭,建议暂时取消岩性尖灭线范围外的9口开发井的部署,并部署1~2口兼评价开发井以先期评价储层范围,从而降低储层认识不清带来的开发风险投资。

4.2 预测储层富集区,寻找油田开发甜点

勘探评价阶段,受地震资料品质的限制,纵向上对沙一、沙二段未进行细分,笼统地将不同岩性的组合段作为一个单元计算储量,油田开发难。但通过复杂岩性识别、精细等时地层格架构建、地震属性分析、沉积演化等研究,明确了A-4井区5期砂体垂向上的叠置关系和平面上的展布。认为I-2砂层组时期,砂体受湖水改造作用强,其储集性能得到了改善,是A-4井区的最佳储层。物性分析结果也表明,I-2砂层物性最好,平均孔隙度为17%,平均渗透率 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; II油组、III油组和I-3砂层物性次之,平均孔隙度为14%,平均渗透率 $(4 \sim 9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; I-1砂层物性最差,平均孔隙度为11%,平均渗透率 $0.2 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,建议优先开发I-2砂层,带动其他层的开发,为油田的“储量动用”、“整体部署,分布实施”等策略的制定提供依据。

5 结论

1) 通过复杂岩性识别、储层分类评价、沉积模式分析、等时地层格架构建和相控约束储层预测等深入的研究,有效刻画出A油田沙一、沙二段油藏5期砂体的空间展布,解决了厚层复杂储层描述难的问题,可为同类油气田的储层研究提供一种新思路。

2) 基于精细储层表征成果,认为A油田沙一、沙二段油藏属于构造-岩性油藏模式,提出砂体尖灭位置附近的9口开发井暂缓钻探的建议,在开发过程中应充分考虑储层连通性的风险,制定规避风险的应对措施。

3) 综合单井纵向储层分类结果和不同期次砂体沉积分析,有效预测了优质储层的富集区带,主要集中于I类储层较为发育的I-2砂层组,为厚层油藏的层系划分、井型选择和井网部署提供有利依据。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 万桂梅,周东红,汤良杰. 渤海海域庐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.
- [3] 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): 53–56.
Xu Changgui, Lai Weicheng, Xue Yongan, et al. Palaeo-geomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 53–56.
- [4] 徐长贵, 赖维成. 渤海古近系中深层储层预测技术及其应用[J]. 中国海上油气, 2005, 17(4): 231–236.
Xu Changgui, Lai Weicheng. Prediction technologies of Paleogene mid-deep reservoir and their application in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(4): 231–236.
- [5] 刘延莉, 邱春光, 邓宏文, 等. 冀东南堡凹陷古近系东营组构造对扇三角洲的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 95–101.
Liu Yanli, Qiu Chunguang, Deng Hongwen, et al. Control of the structure of the Paleogene Dongying Formation upon fan-delta deposition in the Nanpu Depression, Jidong oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 95–101.
- [6] 邓宏文, 王洪亮, 王敦则. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 293–303.
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Wang Dunze. Control of paleo-morphology to stratigraphic sequence in continental rift basins [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 293–303.
- [7] 田晓平, 陈国成, 杨庆红, 等. 渤海海域古近系碎屑岩储层展布定量研究[J]. 中国海上油气, 2012, 24(1): 72–76.
Tian Xiaoping, Chen Guocheng, Yang Qinghong, et al. A quantitative study on distribution of Paleogene elastic reservoir in Bohai water [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(1): 72–76.
- [8] 汪利兵, 赵春明, 曹树春, 等. 渤海古近系辫状河三角洲储层描述配套技术[J]. 重庆科技学院学报, 2011, 13(3): 65–69.
Wang Libing, Zhao Chunming, Cao Shuchun, et al. Supporting technology of reservoir description for braided river delta with Bohai Paleogene [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2011, 13(3): 65–69.
- [9] 孙红杰, 黄子俊, 金宝强, 等. 陡坡带三角洲储层精细对比研究及应用[J]. 海洋石油, 2013, 33(3): 29–34.
Sun Hongjie, Huang Zijun, Jin Baoqiang, et al. Finely reservoir correlation and application in delta steep slope belt [J]. Offshore Oil, 2013, 33(3): 29–34.
- [10] 倪军娥, 孙立春, 古莉, 等. 渤海海域石臼坨凸起 Q 油田沙二段储层沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 491–498.
Ni Jun'e, Sun lichun, Gu li, et al. Depositional patterns of the 2nd member of the Shahejie Formation in Q oilfield of the Shijiutuo Uplift, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 491–498.
- [11] 刘志刚, 周心怀, 李建平, 等. 渤海海域石臼坨凸起东段 36–3 构造古近系沙二段储集层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 833–838.
Liu Zhigang, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Paleogene Sha-2 member in 36–3 structure, eastern Shijiutuo uplift, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 833–838.
- [12] 杜文波, 朱红涛, 杨香华, 等. 渤海湾盆地 QHD29–2 区块东营组东三段沉积与构造——古地貌的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 47–54.
Du Wenbo, Zhu Hongtao, Yang Xianghua, et al. Deposition of the ED₃ of the Dongying formation and its response to tectonic-paleogeomorphology in the block QHD29–2 of the Bohai Bay basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(6): 47–54.
- [13] 李桂范, 李建平, 王根照, 等. 渤中坳陷青东凹陷古近系沙三下亚段构造—古地貌对沉积的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 425–430.
Li Guifan, Li Jianping, Wang Genzhao, et al. Control of structure-paleogeomorphology on the deposition of the lower part of the third member of the Paleogene Shahejie Formation in the Qingdong Sag of the Bozhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 425–430.
- [14] 刘晖, 王升兰. 渤海湾盆地东营凹陷胜坨地区沙四上亚段物源方向对储集砂体的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 602–609.
Liu Hui, Wang Shenglan. Provenance systems and their control over sandbodies in the upper Es₄ of the Shengtuo area in the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 602–609.
- [15] 郭涛, 王军, 石文龙, 等. 辽西低凸起中南段古近系东营组层序地层及地层—岩性油气藏勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 248–264.
Guo Tao, Wang Jun, Shi Wenlong, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Dongying Formation and its significance for stratigraphic-lithologic reservoirs exploration in the central-south Liaoxi salient [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 248–264.
- [16] 远光辉, 操应长, 王艳忠. 东营凹陷民丰地区沙河街组四段—三段中亚段沉积相与沉积演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 277–286.
Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Wang Yanzhong. Sedimentary facies and their evolution of the 4th–middle 3rd members of Shahejie Formation in Mingfeng are, Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 277–286.
- [17] 范廷恩, 胡光义, 余连勇, 等. 切片演绎地震相分析方法及其应用[J]. 石油物探, 2012, 51(4): 371–375.
Fan Ting'en, Hu Guangyi, Yu Lianyong, et al. Isochronous slice method for seismic facies analysis and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(4): 371–375.

(编辑 张亚雄)