

# 水平井参与下的油藏隔夹层描述技术及应用

夏竹,张婷婷,张胜,胡少华,王贵重,别静,贺川航,李凯

(中国石油东方地球物理公司研究院地质研究中心,河北涿州 072751)

**摘要:**油田开发中后期井间隔夹层分布预测成为油藏精细描述中不可或缺的研究内容,由于隔夹层导致的渗透差异成为影响剩余油分布的重要因素。针对复杂的、非均质性很强的油藏类型,仅依靠露头地质资料、有限的直井信息、地质经验难以精准、合理地表征复杂油藏中的薄隔夹层。本文充分利用水平井开发区丰富的水平井信息,提出一种新的直井与水平井联合的隔夹层描述新思路与新流程,引入了隔夹层敏感测井曲线的变化幅度参数值交会分析新技术,利用直井(段)的隔夹层识别、划分标准和地震构造面约束下的地层产状水平井曲线预测技术,构建出直井(段)与水平井的隔夹层等时对比格架、直井与水平井隔夹层测井响应关系,确定了水平井单井隔夹层类型和定量解释标准;探讨了水平井沿轨迹方向的隔夹层分布;综合多种信息和地质模型指导完成了水平井参与下的油藏隔夹层剖面对比分析、隔夹层平面展布规律的研究,验证和修正了前人基于直井(段)隔夹层解释结果、明显地提高了隔夹层预测精度,最后结合动态开发资料综合分析了在隔夹层控制下的油水运动过程以及剩余油分布富集特征,为后续油田开发方案的调整以及新井部署提供了有力的依据。

**关键词:**直井;水平井;隔夹层描述;油水分布;剩余油气;油藏开发

中图分类号:TE1321

文献标识码:A

## Technique for describing baffles and barriers in oil reservoir with horizontal well data integrated and its application

Xia Zhu, Zhang Tingting, Zhang Sheng, Hu Shaohua, Wang Guizhong, Bie Jing, He Chuanhang, Li Kai

(Geological Research Center of Geophysics Prospecting Inc., PetroChina, Zhuozhou, Hebei 072751, China)

**Abstract:** The prediction for the distribution of baffles and barriers is an indispensable part for the fine description of oil reservoirs in the middle-late stages of oilfield development, because the differential permeability caused by these layers has become an important factor affecting the distribution of remaining oil. As for complex and highly heterogeneous reservoirs, it is difficult to accurately and reasonably characterize their thin baffles and barriers simply by using the geological data of outcrop, limited vertical well data and geological experiences. As there are abundant horizontal well data available, we proposed a new idea and technical process to describe baffles and barriers by the combination of vertical and horizontal well data. The cross-plotting analysis technique of change amplitude parameter values of logging curves being sensitive to baffles and barriers was introduced into the technical process. The identification criteria of baffles and barriers and the method of predicting their occurrences with horizontal well logs under the constraint of seismic structural surfaces were used to establish the isochronous correlation framework and the relationship of logging responses of baffles and barriers between vertical wells (segments) and laterals, and to determine the types and quantitative interpretation standards of baffles and barriers in single laterals. Then the distribution of baffles and barriers along the trajectory of horizontal wells was discussed, and multiple data and geologic models were integrated to guide the correlation of baffles and barriers on profiles and the study of their planar distribution, and to verify and correct the previous interpretation results obtained based solely on vertical well data. Finally, the oil-water movement process and residual oil distribution and enrichment characteristics under the control of the baffles and barriers were comprehensively analyzed in combination with the dynamic development data. This study provides a powerful basis for the adjustment of subsequent oilfield development plans and the emplacement of new wells.

收稿日期:2018-01-02;修订日期:2018-08-28。

第一作者简介:夏竹(1964—),博士、教授级高级工程师,油气藏勘探、评价与开发、油气藏精细表征。E-mail: Xiazhu@cnpc.com.cn。

基金项目:东方地球物理公司科研攻关课题(03-05-2015)。



典型剖面刻度测井响应关系(图 2),分析发现孔隙度和电阻率曲线可以良好地指示隔夹层的类型,倾角电导率曲线能准确地识别隔夹层顶底界面。但考虑到研究区实测的倾角电导率曲线很少、水平井密度曲线缺失的实际情况,最终采取综合多条曲线的方法,重点选择分辨率较高、更敏感的自然伽马与密度曲线的隔夹层响应值,特别是经过本次研究发现,利用这两种曲线的变化幅度值( $\Delta DEN/\Delta GR$ )进行交会能更有效地定量识别和划分各种隔夹层(图 3a),且直井(段)曲线、水平井段曲线都具有这一共性特征。

以密度曲线为例,测井曲线的变化幅度值( $\Delta DEN$ )是指由于隔夹层的存在,导致测井曲线变化

的最大值( $DEN_{\max}$ ) 偏离测井曲线原始趋势值( $DEN$ )的高低。其相对值计算公式为:

$$\Delta DEN = \frac{DEN - DEN_{\min}}{DEN_{\max} - DEN_{\min}} \tag{1}$$

若无密度曲线,可以利用本区对隔夹层较敏感的电导率曲线( $\Delta RXO$ )与自然伽马曲线( $\Delta GR$ )交会也能够识别出泥质夹层、部分钙质夹层与钙泥质夹层,但图 3b 的红框投点区域不能区分钙泥质夹层与钙质夹层,需要综合其它信息进行进一步甄别。

综上,研究区钙质夹层、泥质夹层和钙泥质夹层<sup>[14]</sup> 3 种类型的测井响应特征与测井识别标准(表 1)及地质特点综合描述如下。

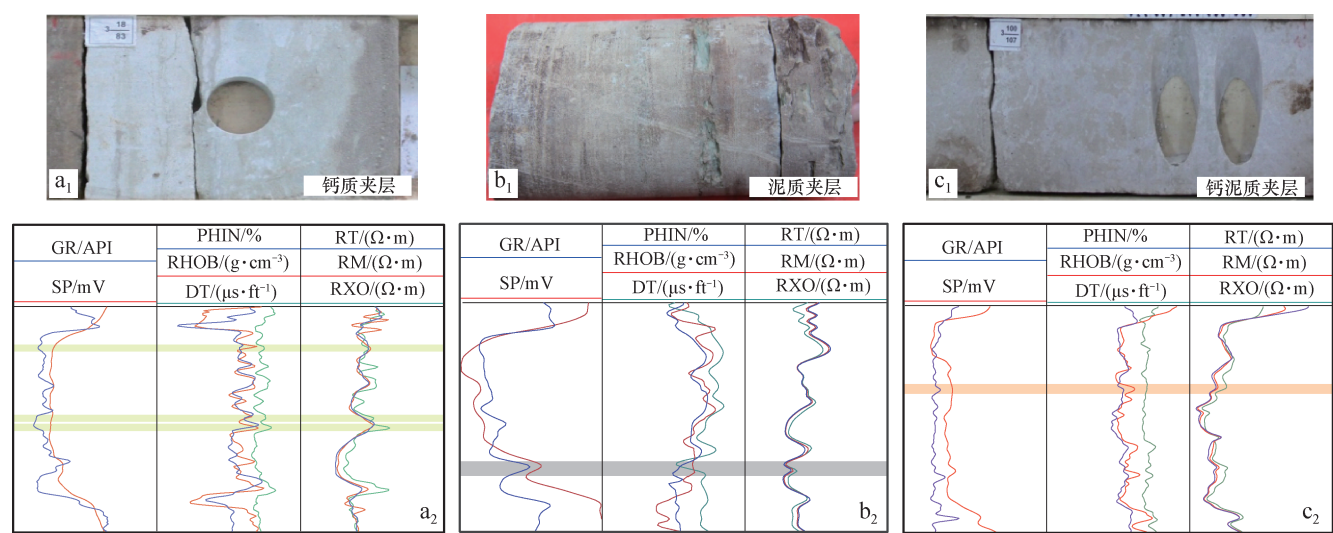


图 2 不同类型隔夹层岩心照片及测井曲线响应

Fig. 2 Core images and log responses of various types of baffles and barriers

$a_1, a_2$ . 钙质夹层岩心照片及其在测井曲线上的响应,矩形框内为钙质夹层; $b_1, b_2$ . 泥质夹层岩心照片及其在曲线上的响应,矩形框内为泥质夹层; $c_1, c_2$ . 钙泥质夹层岩心照片及其曲线上的响应,矩形框内为钙泥质夹层

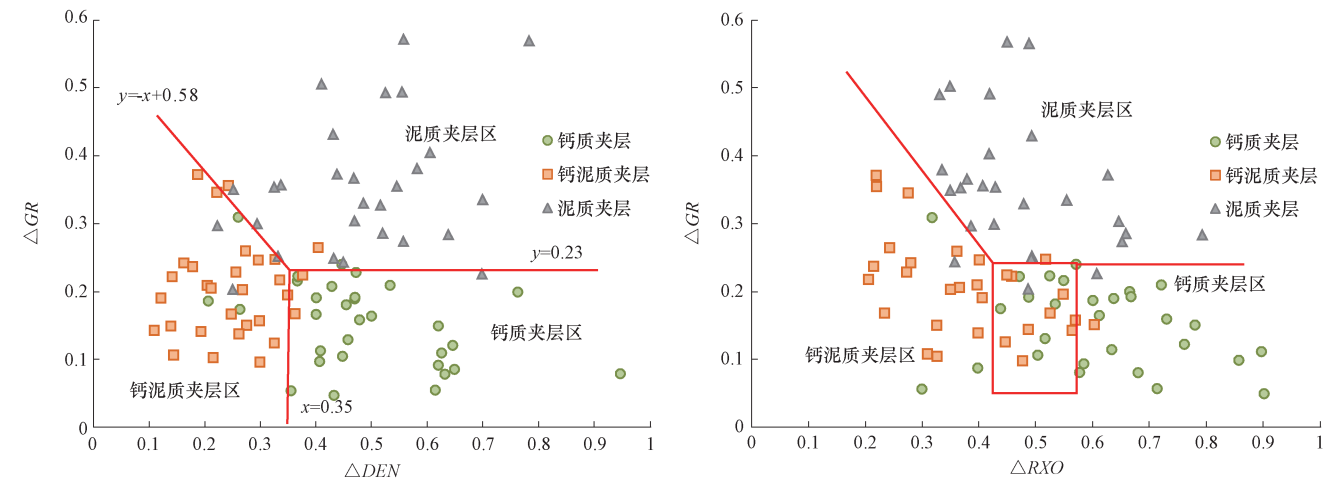


图 3 直井(段)东河砂岩段内部隔夹层交会图

Fig. 3 Cross plot showing the baffles and barriers within the Donghe sandstone in vertical wells (segments)

a.  $\Delta DEN$  与  $\Delta GR$  交会图;b.  $\Delta RXO$  与  $\Delta GR$  交会图(红框为混合区域)

表 1 直井(段)东河砂岩段内部隔夹层测井判别标准

Table 1 Logging criteria for identifying the baffles and barriers within the Donghe sandstone in vertical wells (segments)

| 夹层类型      | CAI/in | DEN/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | GR/<br>API | DT/<br>(μs·ft <sup>-1</sup> ) | RT/<br>(Ω·m)   | RXO/<br>(Ω·m)  | PHIN/%  | ΔRXO    | ΔDEN           | ΔGR                  |
|-----------|--------|-------------------------------|------------|-------------------------------|----------------|----------------|---------|---------|----------------|----------------------|
| 钙质夹层      | ≤BS    | >2.44                         | <38        | 低值                            | 高值,0.5~10      | 高值,1~10        | 低值<12   | 0.4~0.9 | >0.35          | <0.23                |
| 钙泥质<br>夹层 | ≥BS    | <2.44                         | 28~45      | 低值                            | 相对高值,<br>0.5~3 | 相对高值,<br>0.8~3 | 低值,8~18 | 0.2~0.6 | <0.35          | <-ΔDEN+0.58          |
| 泥质夹层      | ≥BS    | 2.4~2.6                       | >40        | 相对<br>低值                      | 相对高值,<br>0.6~2 | 相对高值,<br>0.6~5 | 低值,8~18 | >0.35   | >0.35<br><0.35 | >0.23<br>>-ΔDEN-0.58 |

3 种隔夹层总体沿平行海岸线方向呈平面上带状、剖面上透镜形、底平顶凸形、低凹顶平形等分布,多发育于临滨、前滨及后滨等亚相,夹层中钙质来自海水或早期碳酸盐岩胶结物的溶解<sup>[15]</sup>。

1) 钙质夹层

钙质夹层岩性致密、密度大,碳酸盐岩充填孔隙,导致钙质夹层的导电性差,渗透率低,岩性从粉砂岩到细砂岩均有出现(图 2a),厚度变化范围在 0.3~1.5 m,是东河砂岩主要的隔夹层类型,在临滨及前滨亚相内容易连片分布。其在测井曲线上表现为低伽马值、高密度值、相对泥质夹层高中子值、低声波时差值以及高电阻率值。

2) 泥质夹层

东河砂岩段内部质地很纯的泥岩层不太发育,泥质夹层多以泥质粉砂岩和粉砂质泥岩(图 2b)为主,波纹层理发育,条带状分布,发育位置不定,层间泥夹层分布较远,但层内泥夹层分布范围有限,厚度变化在 0.3~2 m。泥质夹层在测井曲线上主要反映为泥岩特征,较砂岩储层更高的自然伽马值、补偿密度高值、声波相对低值以及相对高的电阻率值。

3) 钙泥质夹层

此类隔夹层主要以钙质泥岩、胶结致密的钙质粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩(图 2c)为主,相对于前两种隔夹层具有一定的低渗透性,分布范围局限,不及钙质夹层和泥质夹层发育,厚度变化在 0.2~1 m。钙泥质夹层测井响应特征介于泥质与钙质隔夹层特征之间。

1.3 水平井沿轨迹方向隔夹层识别与分布

水平井隔夹层解释通常需要直井(段)资料作为刻度和标定的。相对于直井(段)而言,除了水平井测量方式的特殊性外,水平井段的水平方向延伸距离通常也只有几百米、穿越的层系厚度不大,但横向上也会遇到同一套地层的岩性和岩相的剧烈变化,解释难度

非常大。水平井沿井轨迹方向的隔夹层识别、划分及分布研究可分为两个重要步骤。

1) 建立水平井单井隔夹层定量的识别和划分标准。

第一步,水平井控制井筛选与隔夹层解释。先甄选出研究区内经井眼、各向异性等环境校正后、平面上均匀分布、对应的直井段有取心记录的水平井关键井,利用公式 2.1 逐点计算出它们水平井段 RXO 和 GR 曲线的变化幅值 ΔRXO 与 ΔGR 曲线并进行必要的校正,参照直井段的隔夹层识别模式与标准(图 2,图 3;表 1),获得区内具有区域控制意义的关键井沿水平井轨迹方向的单井各类隔夹层识别、认识结论(图 4)。

第二步,确定全区水平井单井隔夹层定量识别和划分标准。与以往不同的是,在第一步基础上,分别统计出各关键井的水平井段目的层段各类隔夹层的曲线变化幅度参数值(ΔRXO,ΔGR 或 ΔDEN),投点绘制 ΔRXO 与 ΔGR 交会图(图 5)。该图能够更清晰地识别出水平井段的泥质夹层,区分大部分的钙泥质夹层与钙质夹层。对落在叠合区域(图 5 红框区)的钙质夹层与钙泥质夹层做进一步分析发现,钙质夹层其冲洗带电阻率 RXO 原始测量值要高于钙质夹层,两者可以配合甄别,并以此为基准建立适合全区水平井隔夹层定量解释标准(表 2)。

2) 建立全区水平井直井段和水平井段地层(隔夹层)等时响应关系。

确保水平井直井段和水平井段之间及水平井沿轨迹方向地层单元空间上的沉积等时性,为全区直井、水平井直井段和水平井隔夹层等时对比研究打下坚实的基础。

第一步,建立水平井直井段与水平井沿轨迹方向局域宏观构造等时格架。先根据水平井对应的直井段以及沿水平井井轨迹方向的周边邻井分层信息,紧密结合研究区东河砂岩段的顶/底构造图,确定水平井段的段一级地层单元构造界面解释模型(图 6),获得水

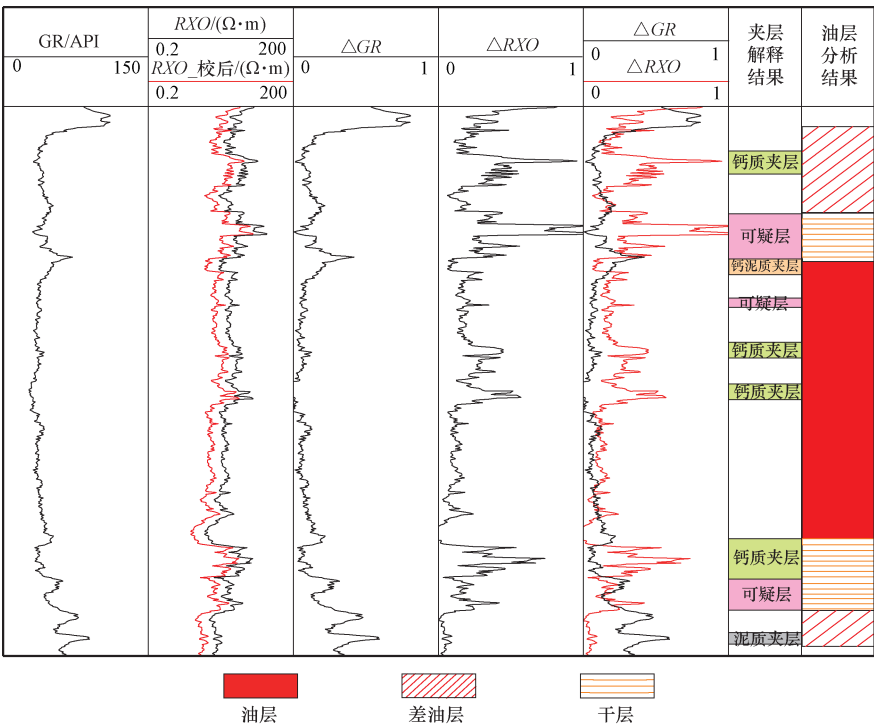


图 4 基于直井(段)解释标准的代表性水平井 X445H 隔夹层解释结果(垂向放置)

Fig. 4 Interpretation of baffles and barriers in the representative horizontal Well X445H based on the criteria of vertical wells(segments)

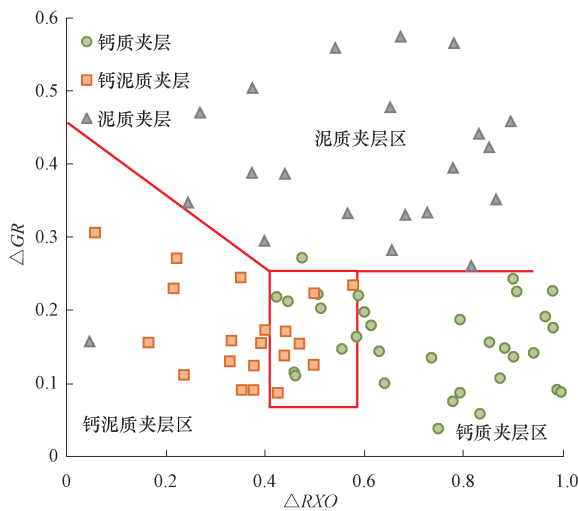


图 5 水平井段东河砂岩段内部隔夹层交会图

Fig. 5 Cross plot showing the baffles and barriers within the Donghe sandstone in the laterals

平井直井段与水平井沿轨迹方向的东河砂岩段 13 小层宏观控制格架(图 6a 左侧为水平井对应的直井段,图 6a 右侧为水平井段轨迹),大体建立起直井段分层与水平井段对应地层之间的等时关系,并以直井段隔夹层解释结论对水平井段的隔夹层性质、顶底界面进行初步确认与修正。

第二步,构建水平井沿轨迹方向精细的等时地层对比格架。采用基于直井(段)地层模型约束的地层

表 2 水平井段东河砂岩段内部隔夹层测井判别标准

Table 2 Logging criteria for identifying baffles and barriers within the Donghe sandstone in laterals

| 夹层类型      | GR/<br>API | RT/<br>(Ω·m) | ΔRXO    | ΔGR          | RXO/<br>(Ω·m) |
|-----------|------------|--------------|---------|--------------|---------------|
| 泥质夹层      | >40        | 2.5~10       | >0.4    | >0.25        |               |
|           |            |              | <0.4    | >-2ΔRXO+0.45 |               |
| 钙泥质<br>夹层 | 28~48      | 3~10         | <0.4    | >-2ΔRXO+0.45 | >6            |
| 钙质夹层      | <45        | 3.5~30       | 0.4~0.6 | <0.25        | <6            |
|           |            |              | >0.6    | <0.25        |               |

产状水平井曲线预测新技术,其原理是主要依据测井仪器特点,考虑水平井井眼轨迹与地层关系对测井响应的影响,以水平井段导眼井测井曲线为基准,模拟水平井段的曲线,通过调整地层产状使得模拟曲线与实测曲线一致,从而获得更准确地预测沿井轨迹方向的目标小单元地层产状分布信息。以图 6 中 X445H 井为例,相对井口位置,井底地层海拔升高,各小层厚度基本不变;但井底处是东河砂岩段 10 小层,在 X445H 直井段上表现为超覆尖灭特点,在确保地层沉积等时的基础上,对沿水平井轨迹方向的隔夹层对比、产状起到了调整、修正与指导作用,获得更合理的水平井沿轨迹方向的隔夹层分布图(图 6b)。

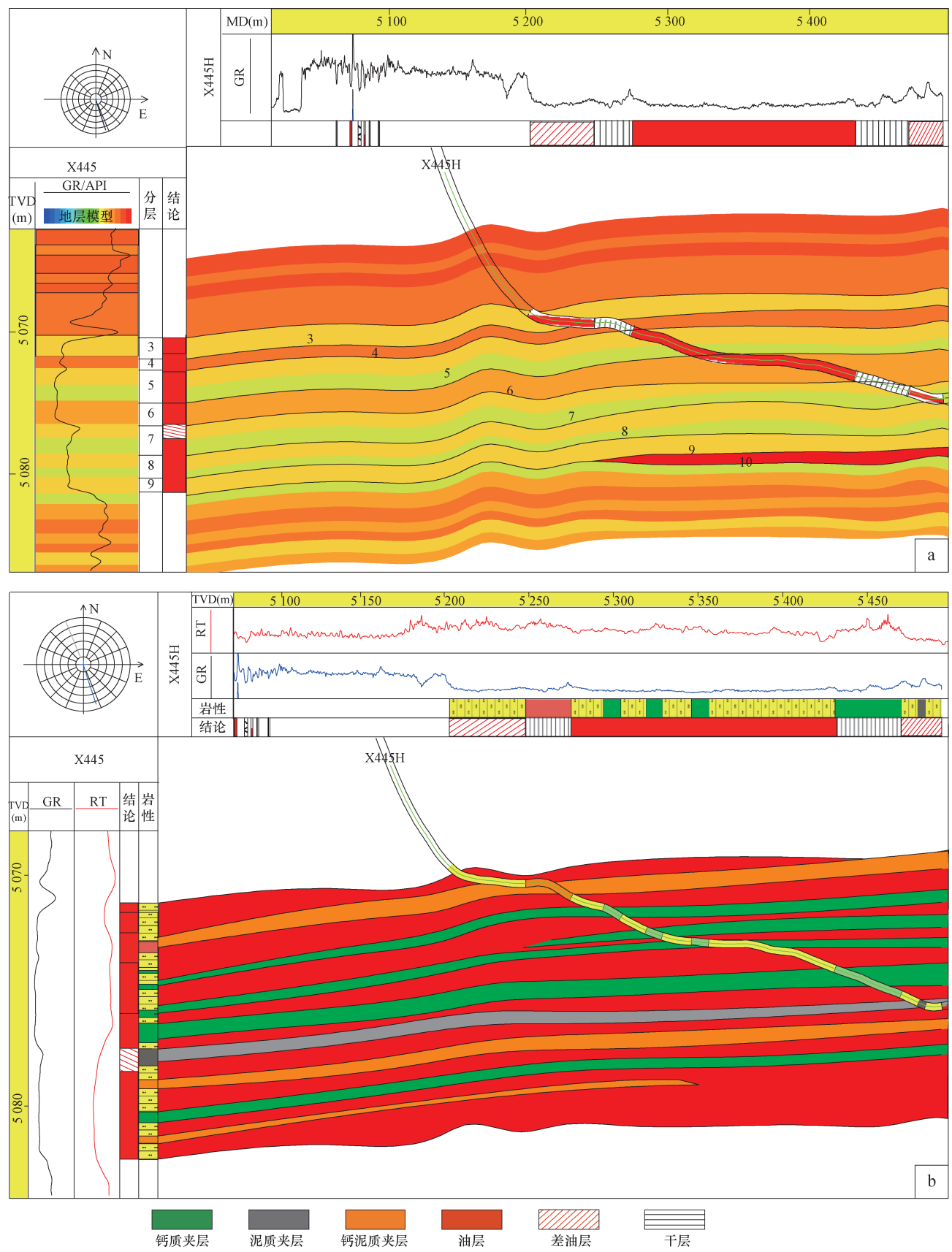


图 6 沿 X445H 水平井轨迹方向地层界面(a)与隔夹层分布(b)

Fig. 6 Distribution of interfaces (a) and baffles and barriers (b) along the trajectory of horizontal Well X445H

## 2 水平井参与下隔夹层剖面对比

研究区钻井、单井(直井、水平井直井段、水平井)隔夹层类型识别与厚度解释仅仅是基础,最重要的是要确定直井间储层内隔夹层的分布特征。通常连井对比剖面中,隔夹层是否连片或中断或尖灭,都是借助露头区夹层的空间展布形态,以及沉积概念模型给出的古海岸海侵、海退的方向进行综合判断的,但本区井间隔夹层分布的复杂性和不确定性、井网控制程度不高降低了井间隔夹层分布预测的精度。虽然研究区水平井横向延伸距离不远,但水平井信息量非常丰富,直井与水平井联合开展隔夹层连井剖面对比会提高空间上隔夹层描述的地质合理性与有效性。

1) 利用露头、沉积概念模型指导空间上隔夹层成因、类型以及分布规律的解释。

图7是基于地质露头、取心分析、测井和区域地质资料获得的研究区沉积概念模型。研究区典型的、分布相对较广的一种泥质夹层多发育于海侵超覆时期、水动力条件减弱的临滨亚相内,主要呈顺层状-楔状尖灭式分布于东河砂岩储层顶、底位置。另一种泥质岩夹层多位于临滨槽内的单砂体之间,分布相对局限。钙质夹层的成因复杂,成岩作用期与成岩后生期均可形成,前者多见于高水位的后滨、前滨亚相带内(图7),成层性好,连续分布;后者主要有两种,一种是形成于浅埋藏时期,多呈薄层状分布于临滨滩中,另一种是深埋藏时期的蚀变与溶解作用,多呈团块状,分布不具有明显规律性。钙泥质夹层是原生沉积与次生成岩共同作用的结果,由于埋深大,温度和压力上升,泥质沉积物中饱和碳酸盐的孔隙水进入渗透率砂质沉积中,形成钙质泥质混合沉积,多见于韵律层的顶部或底部,在临滨亚相内相对更为发育。

2) 直井(段)与水平井联合开展隔夹层连井剖面对比解释、验证与修正。

紧密结合区域沉积相类型、隔夹层发育规律及构造位置,发挥研究区水平井资料丰富的特点,利用新增的多口水平井沿轨迹方向隔夹层解释成果对原有的、仅利用直井(段)隔夹层对比剖面进行验证与修改。以平行于海岸线方向的连井线图为例(图8),X460井与X461井之间在3小层和4小层内均发育一套连续的钙质夹层,但从X460H井与X461H井的水平井隔夹层分布解释结果来看,3小层的钙质夹层在X460H井上并不存在,表明这套钙质夹层在井间中断或尖灭了,X460井与X461井在3小层内解释的钙质夹层应

是两套不同的钙质夹层。X460H井在4小层内解释了两套钙质夹层,但X460井直井段只能识别出一套钙质夹层,说明X460井与X461井之间还存在一套钙质夹层,但延伸范围有限,在井间尖灭,直井上不能识别。从夹层的厚度以及夹层在小层的相对位置,结合水平井上隔夹层的分布,认为在4小层内存在3套钙质夹层。通过所有资料综合分析,最终获得水平井参与下的隔夹层对比剖面图(图8b),水平井信息的加入明显提高了横向上隔夹层解释及分布的合理性和精度。

## 3 水平井参与下隔夹层平面展布

东河砂岩段内部隔夹层单层厚度薄、垂向上分布频率高、横向分布复杂、平面延伸范围不定、直井(段)信息有限,使得隔夹层平面表征与预测难度增加。加入水平井信息后,可以对隔夹层平面展布进行验证与修正、提高预测精度。图9显示:四口水平井沿轨迹隔夹层解释成果(图9b)与原有的隔夹层平面预测图(图9a)局部存在着矛盾。以X469H为例,井间多出一套厚度相对较薄的钙泥质夹层,但该套隔夹层在井间尖灭,并不能够在直井上被解释出来,说明在X467井与X430井处的钙泥质夹层沿海岸线的分布范围相对较大,延伸到了X469H水平井处。进一步结合剖面隔夹层预测结果、研究区东河砂岩段隔夹层统计数据,对原始的各小层井点隔夹层平面分布图进行了修改与完善,明显地提高了其平面分布预测的可靠性。

## 4 水平井参与下的隔夹层应用

东河砂岩油藏整体上已进入中、高含水阶段,研究区隔夹层的发育和展布规律不但导致东河砂岩段内部小层砂体纵横向不连通或遮挡效应,特别是各个不同开发区块由于隔夹层的存在使得油层的水淹情况不断加剧,油水运动随着开发进程的深入而更加复杂化。利用水平井参与下的隔夹层最新描述成果有效、合理地分析油水运动过程,跟踪油层水淹状况,为油田后期注水开发、加密井调整和剩余油重新富集分布区的准确预测提供有效的技术支撑。

图10a为X460H和X444H两口水平井参与下对1号钙质夹层、2号钙质夹层分布范围及厚度重新修正后的隔夹层剖面对比图。X444H、X445H井先后投产,且一直保持了较好的产油量。X460H井与X445H井同期投产,但累产油持续下降,含水则持续上升,是4口井中最先水淹的井,目前已经高含水关井。最后投

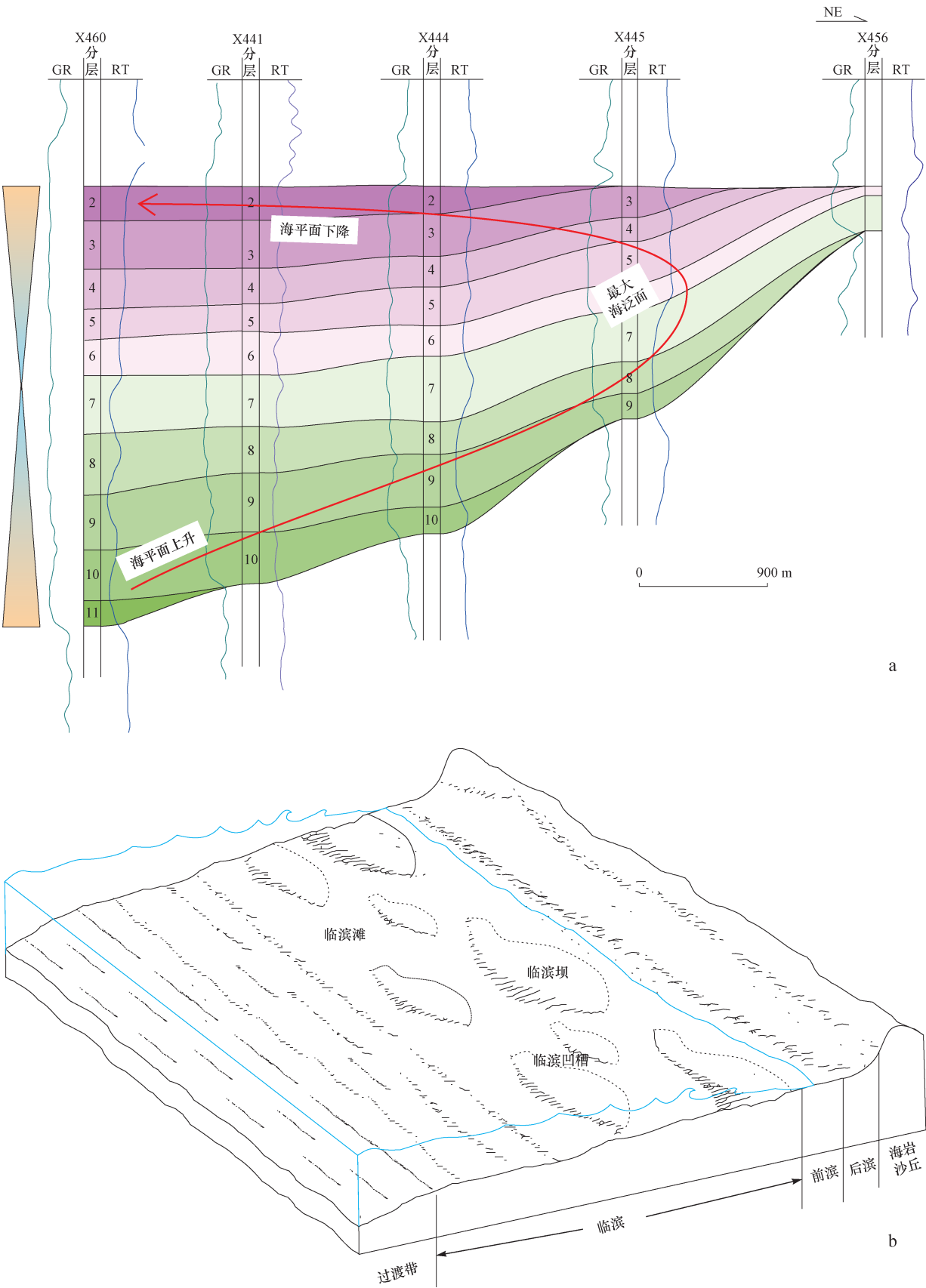


图 7 研究区无障壁滨岸沉积序列和沉积微相分布模式

Fig. 7 Barrier-free shoreline sedimentary sequences and distribution of sedimentary microfacies in the study area

a. 由海平面上升超覆与海平面下降退覆剥蚀形成的研究区沉积序列;b. 研究区无障壁滨岸沉积相分布模式

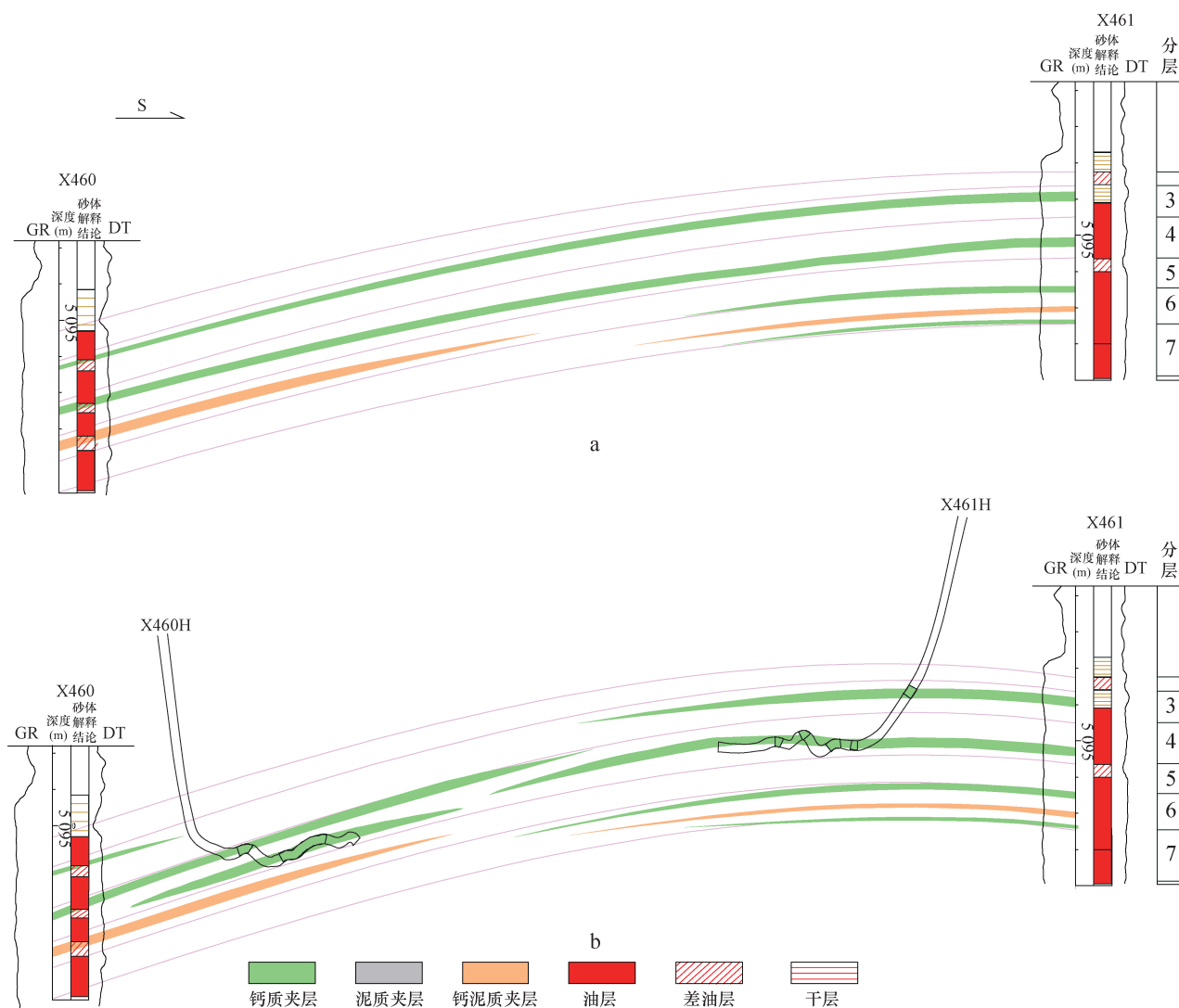


图8 水平井参与前(a)后(b)隔夹层分布剖面对比

Fig. 8 Comparison of the distribution profiles of baffles and barriers interpreted with (a) and without (b) horizontal well data integrated

产的 X4441H 井投产后含水上升较快。

从原始油水分布图上看(图 10a),相对构造低部位的 X460 井和 X4441 井的油水界面也要高一些,这是由于下部连片分布隔夹层导致的油水界面变化。由于 X460 井储层物性好,厚度大,且油水界面附近的夹层密度低、厚度薄,在剖面方向上延伸较短,在夹层尖灭的地方,上下砂体连通,未能有效的遮挡住底水,成为底水窜流的高发区,边底水沿着顶部的钙泥质夹层向水平井 X460H 突进,导致 X460H 开始见水。但另一方面,边底水越过夹层后,相邻夹层的下部,由于注入水无法波及,动用程度低,从而形成了剩余油的滞留富集区(图 10b)。对于 X4441 井与 X444 井而言,东河砂岩段底部夹层分布频率高,且以钙泥质夹层与泥质夹层为主,渗透性差不易突破,边水沿着底部连片分布的泥质夹层与钙泥质夹层(3 号夹层)向 X444H 井方向推进,同样类似的是 X4441H 井投产时的 4 号夹层

的存在(图 10c)。因此,隔夹层发育的地带可以阻挡油藏边底水由下而上的突破,约束注入水沿着隔夹层下部沿层流动,从而改善开发效果。

随着注入水驱替的不断推进,夹层下部被圈闭的油层绕过夹层,在夹层上部形成油水混合带,导致 X460H 井完全水淹。但对于构造高部位的 X444 井与 X445 井在东河砂岩段上部由于隔夹层分布频率高、储层物性差,实现了对边底水的有效遮挡,因此, X444H 与 X445H 井水淹程度较低,隔夹层分布密集的地段仍然是井间剩余油重新富集区(图 10d)。

通过分析隔夹层对油层水淹的影响与控制作用,像研究区这样水平井开发的边底水型油藏,大面积分布的隔夹层能够有效的遮挡底水或抑制底水的推进,使得生产井具有较长的无水或低含水采油期,这些夹层之上和隔夹层分布频率高的未被水淹的剩余油区是今后调整挖潜的重点有利区带。

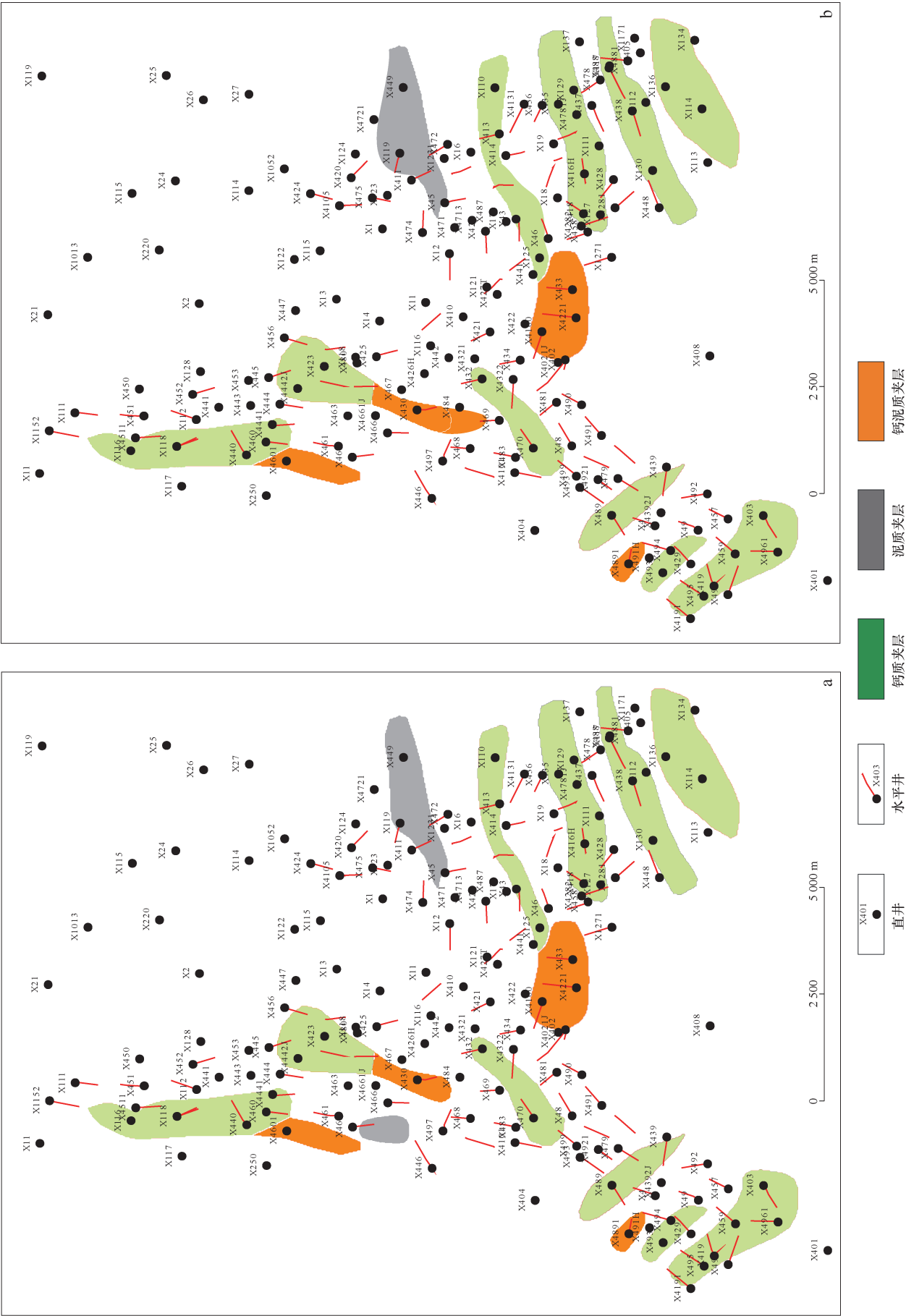


图9 水平井参与前 (a) 后 (b) 隔夹层平面分布与修正图

Fig. 9 Planar distributions of baffles and barriers interpreted with (a) and without (b) horizontal well data integrated and its modified distributions

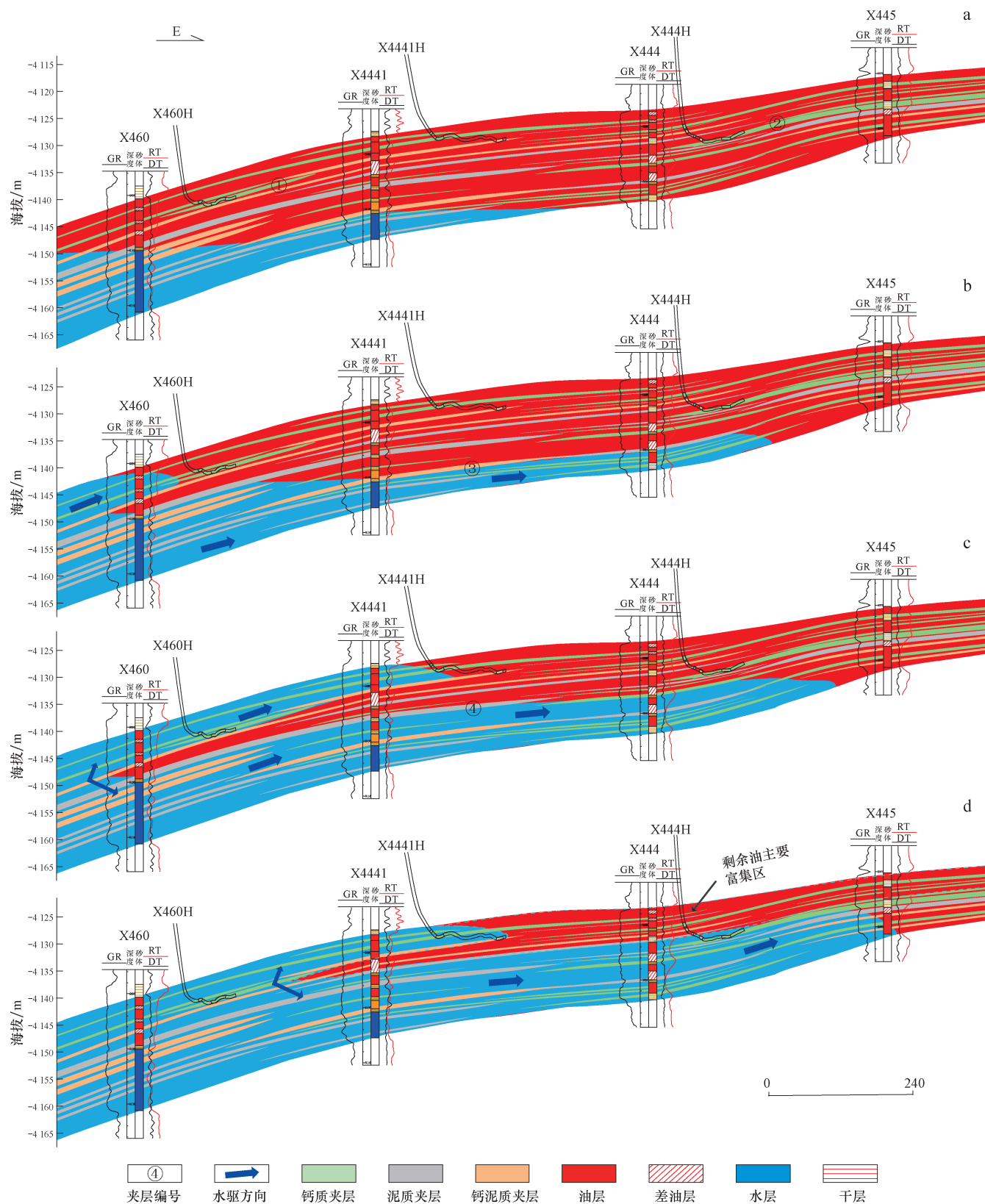


图 10 不同时期油水分布情况、运动趋势与剩余油富集带预测

Fig. 10 Prediction of oil-water contact and trend of movement, and residual oil enrichment zone in different stages of oilfield development

a. 剖面上原始油水分布状态; b. X460H 井开始见水时剖面上的油水分布状态; c. X441H 井投产时剖面上的油水分布状态; d. 现今的油水分布状态

## 5 结论

1) 本文给出了水平井参与下的油藏隔夹层精细描述新思路和新流程,提取隔夹层敏感测井曲线的变化幅值作为一种新的交会图分析参数,引入了地层产状水平井曲线预测技术,获得了较合理有效的直井、水平井单井隔夹层类型定量的判别、解释标准,探讨了利用直井、水平井信息联合开展剖面、平面上隔夹层描述的实施步骤与内容,显著地提高了水平井信息的利用率和全区储层薄夹层描述的合理性与可靠性。

2) 在油田水平井开发区,影响油藏开发效果的因素多而杂。因此,水平井参与下的隔夹层描述成果还要紧密结合开发动态信息、综合多学科资料,深入地分析隔夹层对油水运动的积极和负面的影响以及对剩余油气分布的控制作用,并合理地预测出剩余油气二次聚集、富集区带,正确指导后续剩余油挖潜、开发方案的设计与调整。

## 参 考 文 献

- [1] 吴胜和,蔡正旗,施尚明等. 油矿地质学[M]. 北京:石油工业出版社,2011:161-180.  
Wu Shenghe, Cai Zhengqi, Shi Shangming, et al. Oil deposit geology [M]. Petroleum Industry Press, 2011, 161-180.
- [2] Geehan G W. Geologic prediction of shale continuity prudhoe bay field: reservoir characterization [J]. Academic Press Inc, 1986, 19(9):162-168.
- [3] 吕晓光,马福士,田东辉. 隔层岩性、物性及分布特征研究[J]. 石油勘探与开发,1994,21(5):80-87.  
Lv Xiaoguang, Ma Fushi, Tian Donghui. A study of lithology, petrophysical of barriers and their distribution properties[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(5):80-87.
- [4] 张吉,张烈辉,胡书勇等. 陆相碎屑岩储层隔夹层成因、特征及其识别[J]. 测井技术,2003,27(3):221-224.  
Zhang Ji, Zhang Liehui, Hu Shuyong, et al. The genesis and characteristics and identification of intercalations in non-marine reservoir with clastic rock[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3):221-224.
- [5] 朱东亚,胡文瑛,曹学伟等. 临南油田隔层类型划分及其分布规律研究[J]. 地球科学,2004,29(2):211-218.  
Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Cao Xuewei, et al. Classification and distribution of insulating layers in Linnan Oilfield[J]. Earth Science, 2004, 29(2):211-218.
- [6] 顾家裕,张兴阳,郭彬程等. 塔里木盆地东河砂岩沉积和储层特征及综合分析[J]. 古地理学报,2006,8(3):285-294.  
Gu Jiayu, Zhang Xingyang, Guo Bincheng, et al. Characteristics of sedimentation and reservoir of the Donghe Sandstone in Tarim Basin and their synthetic analysis[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3):285-294.
- [7] 周灿灿,王昌学. 水平井测井解释技术综述[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):152-160.  
Zhou Cancan, Wang Changxue. Technology review on the log interpretation of horizontal well [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1):152-160.
- [8] 李鹏翔. 水平井测井解释研究的发展[J]. 江汉石油学院学报,1999,21(2):23-26.  
Li Pengxiang. Development of the log interpretation of horizontal well [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1999, 21(2):23-26.
- [9] 汪中浩,易觉非,赵乾富等. 水平井测井资料地质解释应用[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(3):70-72.  
Wang Zhonghao, Yi Juefei, Zhao Qianfu, et al. Application of geologic interpretation of horizontal well logging data[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(3):70-72.
- [10] 申银民,贾进华,齐英敏等. 塔里木盆地上泥盆统-下石炭统东河砂岩沉积相与哈得逊油田的发现[J]. 古地理学报,2011,13(3):279-286.  
Shen Yinmin, Jia Jinhua, Qi Yingmin, et al. Sedimentary facies of donghe sandstone in the upper devonian-lower carboniferous and discovery of hadexun oilfield in Tarim basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(3):279-286.
- [11] 朱筱敏,赵澄林,钟大康. 塔里木盆地东河砂岩沉积储层特征[M]. 北京:石油工业出版社,2006:93-108.  
Zhu Xiaomin, Zhao Chenglin, Zhong Dakang. Characteristics of sedimentation and reservoir of the donghe sandstone in Tarim basin[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2006:93-108.
- [12] 焦翠华,王海更,牛玉杰等. 塔里木盆地哈得4油田东河砂岩层序地层界面类型及测井识别方法[J]. 石油与天然气地质,2007,28(1):69-76.  
Jiao Cuihua, Wang Haigeng, Niu Yujie, et al. Sequence boundary types and logging identification of donghe sandstone in HD4 oilfield, Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(1):69-76.
- [13] 李国永,徐怀民,牛玉杰. 哈得逊地区东河砂岩沉积微相特征及其对流动单元的控制作用[J]. 油气地质与采收率,2008,15(5):35-37.  
Li Guoyong, Xu Huamin, Niu Yujie. Microfacies characteristic of donghe sandstone and their control on flow units in Hudson area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5):35-37.
- [14] 何香香. 哈得逊地区东河砂岩测井资料隔夹层识别[J]. 海洋石油,2012,32(4):70-74.  
He Xiangxiang. Identification on interbedded layers among donghe sandstones in Hadexun district with well logging data[J]. Offshore Oil, 2012, 32(4):70-74.
- [15] 王洋,刘婧,汪建国等. 塔里木盆地东河1油藏东河砂岩隔夹层形成的主控因素及流体来源[J]. 石油学报,2015,36(2):74-181.  
Wang Yang, Liu Jing, Wang Jianguo, et al. Major controlling factors for the formation of inter-layer of donghe sandstone of Donghe1 reservoir in Tarim basin and its fluid source[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2):174-181.

(编辑 张玉银)