



基于水平井电阻率测井的井间夹层反演方法及应用

胡松 王敏 田飞 赵磊

Interlayer Inversion Method and Its Application Based on Horizontal Well Resistivity Logging

HU Song, WANG Min, TIAN Fei, ZHAO Lei

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验

Real Time Inversion and Field Test of LWD Azimuthal Electromagnetic Waves Based on Quasi-Newton Method

石油钻探技术. 2020, 48(3): 120–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.20200025>

随钻方位电磁波仪器测量精度对电阻率及界面预测影响分析

Impacts of Accuracy of Azimuthal Electromagnetic Logging-while-Drilling on Resistivity and Interface Prediction

石油钻探技术. 2017, 45(4): 115–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704020>

随钻高分辨率电阻率成像仪器探测特性研究

The Detection Characteristics of a High Resolution Resistivity Imaging Instrument while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(2): 114–119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019005>

高产井地层特征的热流耦合温度反演新方法

A New Thermal Fluid Coupling Temperature Inversion for the Formation Characteristics of High-Yield Wells

石油钻探技术. 2020, 48(4): 118–123 <http://doi.org/10.11911/syztjs.20200062>

基于声波变密度测井信息识别水平井压裂裂缝的方法

Meathod about Improving Accuracy of Fracture Fluid Friction Pressure

石油钻探技术. 2017, 45(5): 113–117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705020>

高精度随钻成像测井关键技术

The Key Technologies of High Precision Imaging Logging while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(3): 148–155 <http://doi.org/10.11911/syztjs.20190060>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 测井录井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021031

引用格式: 胡松, 王敏, 田飞, 等. 基于水平井电阻率测井的井间夹层反演方法及应用 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 151-158.

HU Song, WANG Min, TIAN Fei, et al. Interlayer inversion method and its application based on horizontal well resistivity logging [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 151-158.

基于水平井电阻率测井的井间夹层反演方法及应用

胡 松¹, 王 敏², 田 飞³, 赵 磊¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中石化华北石油工程有限公司测井分公司, 河南郑州 450006)

摘要: 为了掌握夹层的空间分布特征, 揭示剩余油分布规律, 开展了井间夹层识别与预测研究。首先, 根据岩心资料确定了夹层类型, 并结合测井资料建立了夹层识别标准; 然后, 依据电测井原理构建反演算法, 反演得到了水平井井轴外夹层的展布情况。研究发现, 利用密度相对值与自然伽马相对值交会或补偿中子相对值与自然伽马相对值交会, 能够识别研究区 2 类夹层; 反演的钙质夹层厚度绝对误差为 0.018 m, 泥质夹层厚度绝对误差为 0.017 m; 钙质夹层较为发育, 分布广, 厚度变化大; 泥质夹层分布数量相对较少, 以顺物源北东向分布。研究结果表明, 利用水平井电阻率反演井轴外夹层的分布, 结合直井联合控制确定的夹层井间展布, 可以提高夹层井间预测精度, 为研究剩余油分布和挖潜提供依据。

关键词: 夹层识别; 夹层预测; 水平井; 反演; 电阻率测井

中图分类号: P631.8, TE122.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)03-0151-08

Interlayer Inversion Method and Its Application Based on Horizontal Well Resistivity Logging

HU Song¹, WANG Min², TIAN Fei³, ZHAO Lei¹

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing, 102206, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China; 3. Well Logging Company, Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: In order to study the spatial distribution characteristics of interlayers and reveal the distribution pattern of remaining oil, interlayers between wells were predicted and identified. Firstly, the types of interlayers were determined from core analysis, and the identification criteria was established along with logging data. Then, an inversion algorithm was designed on the basis of electric logging for the distribution of interlayers beyond horizontal wellbore. The results demonstrate that the intersection of relative density or relative value of neutron with relative value of gamma can identify two types of interlayers in the target area with absolute errors of 0.018 m and 0.017 m in the inverted thickness of calcareous interlayers and muddy interlayers, respectively. The calcareous interlayers are more developed, with wide distribution and varied change in thickness, while the muddy interlayers are fewer, with a distribution in the northeast orientation. This study, which can provide a reference in studying the distribution and tapping potential of remaining oil, proves that the prediction of interlayer distribution between wells can be more accurate after the interlayer distribution beyond the wellbore is inversed on the basis of horizontal-well resistivity and the inter-well distribution of interlayers determined with the joint control of vertical wells.

Key words: interlayer identify; interlayer prediction; horizontal well; inversion; resistivity logging

分析剩余油的分布是油气田开发中后期的核心工作之一^[1-3]。油藏内部的隔夹层是剩余油分布、流体运动规律的重要影响因素^[4-5]; 隔夹层对流体的

运动起到遮挡和屏蔽作用^[6-7], 准确识别隔夹层、预测其空间分布, 是油藏非均质性研究的重点和难点。

直井隔夹层的定性识别和定量描述技术已较为成

收稿日期: 2020-10-12; 改回日期: 2021-01-27。

作者简介: 胡松 (1985—), 男, 湖北赤壁人, 2008 年毕业于长江大学勘查技术与工程专业, 2014 年获中国石油勘探开发研究院地球探测与信息技术专业博士学位, 副研究员, 主要从事测井新技术研究及地质评价工作。E-mail: husong.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项专题“致密复杂碎屑岩储层测井评价技术”(编号: 2016ZX05002-005-001)、中国石化科技攻关项目“水平井环境声波及电阻率校正方法与应用研究”(编号: PE19012-1) 联合资助。

熟^[8-10],但油藏内部隔夹层的空间发育规律是控制剩余油分布的关键,因此需要准确预测井间隔夹层,通过露头的空间展布或沉积模型综合判断其连续或尖灭^[11];水平井包含了大量地层横向变化信息,因此可利用水平井信息开展井间隔夹层预测。夏竹等人^[11]构建了直井(段)与水平井的隔夹层等时对比格架,探讨了水平井沿轨迹方向的夹层分布;陈海莲^[12]将水平井资料和直井资料结合研究了哈得逊油田井间隔夹层空间分布规律;贺婷婷等人^[13]采用直井和水平井相结合的方法,开展了研究区夹层空间分布规律预测。以上研究对利用水平井资料开展隔夹层预测具有指导和借鉴作用,但由于目前水平井资料处理解释技术相对滞后,利用水平井资料预测隔夹层主要停留在定性解释上,还缺乏定量描述井眼轨迹外夹层的技术。

为此,笔者以塔河油田九区底水砂岩油藏为例,利用岩心和测井资料,建立了单井夹层的定量识别标准,识别出水平井轨迹上过井轴的夹层位置;然后,根据电阻率测井原理构建了反演算法,在确定井眼轨迹与地层精细接触关系的基础上,通过反演确定了井眼轨迹外沿轨迹走向的夹层分布;最后,结合直井与水平井资料对比确定了研究区夹层的平面展布范围,为剩余油分布规律研究和开发方案调整提供了依据。

1 隔夹层类型及识别标准

塔河油田九区位于塔里木盆地东北部,处于沙

雅隆起阿克库勒凸起桑东3号构造;三叠系自下而上为下统柯吐尔组、中统阿克库勒组和上统哈拉哈塘组,其中阿克库勒组自下而上分为4段($T_2a^1-T_2a^4$),阿1段为主力含油层系,是一套北东向物源的辫状河三角洲沉积,包括辫状河三角洲平原和辫状河三角洲前缘,下部岩性较粗,为中—粗砂岩;上部岩性较细,主要为细砂岩和粉砂岩。油藏为具边底水、中孔、中渗—高渗、常温和常压的未饱和油藏,平面和纵向渗透率差异大,储层非均质严重。

1.1 夹层类型

通过观察分析岩心得知,研究区三叠系阿克库勒组存在泥质夹层和钙质夹层。

泥质夹层岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和含砂砾泥岩,这是由水动力能量减弱、细粒悬移质沉积而成,为废弃河道充填物、泛滥平原沉积及河道底部滞留沉积。

钙质夹层岩性主要为钙质或含钙的中砂岩、细砂岩、粉砂岩组成,黏土杂基含量极少,钙质胶结物质量分数超过10%,以孔隙式或孔隙—接触式胶结为主;岩心观察和测井识别发现,钙质夹层主要分布在辫状三角洲前缘水下部分,说明研究区大多数钙质夹层可能为生物有机成因。

1.2 夹层识别标准

由TK9-JI井的岩心观察结果和测井曲线解释结果可知,该井目的层共发育6套夹层(见图1),包括4套钙质夹层和2套泥质夹层。

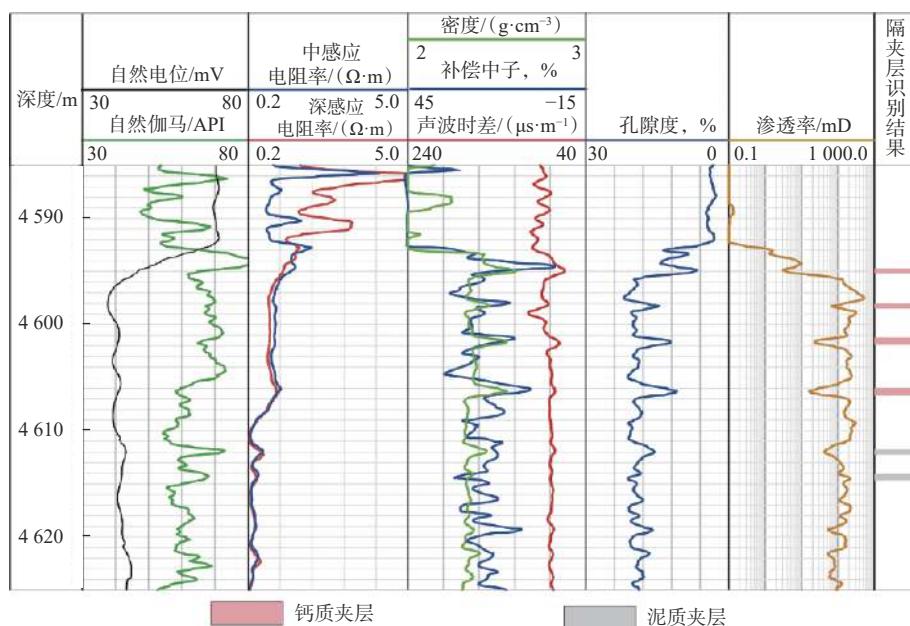


图1 夹层测井响应特征

Fig.1 Logging response of interlayers

从图1可以看出,泥质夹层表现为“三高两低”特征,即高自然伽马、高声波、高中子、低密度和低自然电位负异常,孔隙度和渗透率均减小;钙质夹层表现为“四低一高”特征,即低自然伽马、低自然电位、低声波、低中子和高密度,孔隙度和渗透率均减小。

分析认为,密度曲线可以很好地指示隔夹层的

类型,采取多条曲线相结合的方法,选择分辨率较高、更敏感的密度与自然伽马曲线,发现利用二者相对值的交会图能有效识别2类夹层(见图2(a)),且直井(段)曲线、水平井段曲线都具有这一特征。若待解释井无密度测井曲线,可以利用补偿中子相对值与自然伽马相对值的交会图,并结合其他信息进行识别(见图2(b))。具体识别标准见表1。

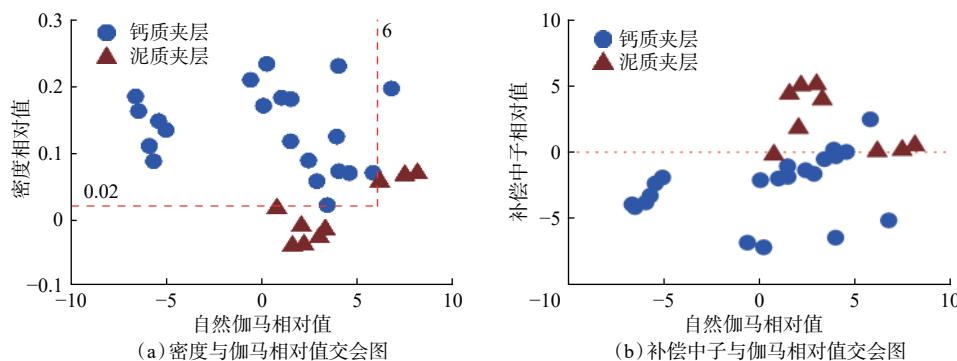


图2 研究区直井夹层识别交会图

Fig.2 Interlayer identification intersection of vertical wells in the target area

表1 直井段夹层测井识别标准

Table 1 Logging criteria for identifying the interlayers in vertical wells

夹层类型	自然伽马/API	自然电位/mV	声波时差/(μs·m⁻¹)	补偿密度/(g·cm⁻³)	补偿中子, %	自然伽马相对值	密度相对值
泥质夹层	>64	负异常很小	增大	减小	增大	≥6	≤0.02
钙质夹层	减小	无变化	减小	增大	减小	<6	>0.02

2 水平井井眼轨迹外夹层预测方法

由于水平井的井眼具有特殊性,很难获取岩心样品,因此无法采用岩心刻度方式识别夹层;且由于水平井井型改变,使测井响应变得复杂^[14-15],测井响应与直井往往相差较大。对比井眼轨迹与地层关系发现,研究区水平井在钻进时主要贴着上部地层界面,水平段主要在油层内部,测井曲线受流体性质的影响基本一致,因此在排除围岩等影响后,储层内部测井的异常响应均是由于存在夹层引起的,其测井响应特征变化趋势与直井类似。因此,识别水平井夹层时,通过对比水平井测井曲线与直井测井曲线的响应特征,采用交互式正反演方法,确定水平井井眼轨迹与地层的精细接触关系;然后根据直井的夹层识别标准,识别出井眼轨迹过井轴的夹层,确定夹层过井轴的厚度;最后利用电阻率曲线,反演出井眼轨迹外夹层的

电阻率和展布情况。

2.1 夹层反演算法构建

根据井眼轨迹与地层的相互接触关系,构建地层模型使之模拟响应与实测值达到最佳匹配。利用梯度最优化方法原理,电阻率测井响应的代价函数 $C(\mathbf{x})$ 可表示为^[16]:

$$C(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left\{ \|S(\mathbf{x}) - d\|^2 + \lambda \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}\|^2 \right\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为 N 个地层的待反演参数矢量,在本例中 $\mathbf{x} = (R_{\text{int}}, H_{\text{int}})^T$,其中 R_{int} 为地层电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; H_{int} 为地层厚度, m ; \mathbf{x}_{ref} 为已知参考模型矢量; $S(\mathbf{x})$ 为电阻率正演响应, $\Omega \cdot \text{m}$; d 为实测电阻率(即深感应和中感应), $\Omega \cdot \text{m}$; λ 为正则化参数; 代价函数的第一项表示实测电测井曲线 d 与正演响应 $S(\mathbf{x})$ 的L2范数,第二项的作用是压制测量噪声,同时减小非线性反演出现的病态问题。

对式(1)进行Taylor展开,且令泛函对 \mathbf{x} 的导数为0。在第 k 次迭代中,有:

$$\begin{aligned} \bar{\bar{\mathbf{J}}}^T(\mathbf{x}^k) \cdot (\mathbf{S}(\mathbf{x}^k) - \mathbf{d}) + \lambda(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_{\text{ref}}) = \\ [\bar{\bar{\mathbf{J}}}^T(\mathbf{x}^k) \cdot \bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}^k) + \lambda I] \Delta \mathbf{x}_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中: I 为单位矩阵; $\Delta \mathbf{x}_k$ 为下降长度; $\bar{\bar{\mathbf{J}}}$ 为雅克比矩阵。
 $\bar{\bar{\mathbf{J}}}$ 可表示为:

$$\bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_1} & \dots & \frac{\partial S_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_j} & \dots & \frac{\partial S_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_A} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial S_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_1} & \dots & \frac{\partial S_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_j} & \dots & \frac{\partial S_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_A} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial S_B(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_1} & \dots & \frac{\partial S_B(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_j} & \dots & \frac{\partial S_B(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_A} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $A = 3N$, $B = 5N$ 。

式(2)中模拟响应的偏导数无法通过解析解获得, 可采用差分方式进行计算:

$$\bar{\bar{\mathbf{J}}}_{ij} = \frac{\partial d_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_j} \approx \frac{d_i(\mathbf{x} + \delta \mathbf{x}_j) - d_i(\mathbf{x})}{\|\delta \mathbf{x}_j\|} \quad (4)$$

为提高雅克比矩阵 $\bar{\bar{\mathbf{J}}}$ 的求解速度, 采用一阶 Broden 近似方法进行更新^[17]。每次迭代时, 对 $\bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}^k)$ 添加一个附加项, 得到新的雅克比矩阵 $\bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}^{k+1})$, 即:

$$\bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}^{k+1}) = \bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}^k) + \frac{S(\mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}_k) - S(\mathbf{x}^k) - J(\mathbf{x}^k) \cdot \Delta \mathbf{x}_k}{(\Delta \mathbf{x}_k)^T \cdot \Delta \mathbf{x}_k} \cdot (\Delta \mathbf{x}_k)^T \quad (5)$$

一阶 Broden 近似方法不需额外的正演过程, 因此极大地提高了反演速度。然而, 需要注意的是, 反演速度提升是在牺牲迭代收敛速度的条件下获得的。为了平衡反演的速度和精度, 迭代初始阶段采用差分方式求取雅克比矩阵; 然后, 间断性地采用差分方式求取雅克比矩阵, 其余雅克比矩阵则基于等效方式进行更新; 随着迭代次数增多, 等效方式的频率也随之增大。

每次迭代时, 要对正则化参数 λ 进行更新^[18]:

$$\lambda = 0.1 \times \frac{\|(S(\mathbf{x}) - \mathbf{d}) + \bar{\bar{\mathbf{J}}}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}\|} \quad (6)$$

为验证反演算法反演夹层的可靠程度, 根据研究区特点建立地层模型; 假设地层无限厚, 其电阻率 R_T 为 $5.0 \Omega \cdot \text{m}$, 夹层电阻率 R_c 分别为 $1.0 \Omega \cdot \text{m}$ (见图 3(a), 代表钙质夹层) 和 $0.5 \Omega \cdot \text{m}$ (见图 3(b), 代表泥质夹层); 采用常规双感应测井仪, 测井仪从夹层正中穿过, 夹层厚度从 0.20 m 变为 2.00 m , 井眼直径为 215.9 mm , 钻井液电阻率为 $0.3 \Omega \cdot \text{m}$, 首先根据

模型正演出不同条件对应的深、中感应视电阻率, 然后反演每种情况的夹层厚度, 模型参数和反演结果见表 2。

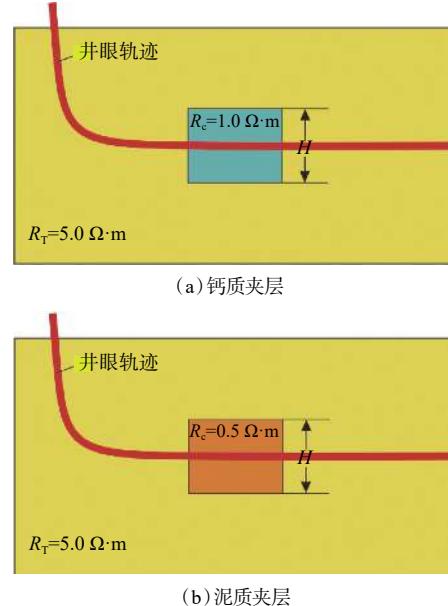


图 3 夹层厚度反演模型示意
Fig.3 Inversion model of interlayer thickness

表 2 隔夹层反演模型及反演结果

Table 2 Inversion model and result of interlayers

夹层类型	夹层厚度/ m	深感应电阻率/ (Ω·m)	中感应电阻率/ (Ω·m)	反演夹层 厚度/m
钙质夹层	0.20	3.58	3.29	0.20
	0.30	3.11	2.76	0.29
	0.50	2.47	2.05	0.51
	1.00	1.61	1.26	1.04
	2.00	1.24	1.05	1.97
泥质夹层	0.20	2.61	2.29	0.20
	0.30	2.10	1.76	0.29
	0.50	1.51	1.18	0.49
	1.00	0.87	0.65	1.03
	2.00	0.64	0.53	2.04

从表 2 可以看出, 钙质夹层和泥质夹层的厚度小于 0.50 m 时, 反演的夹层厚度与模型厚度基本一致; 夹层厚度大于 1.00 m 时, 由于其电阻率相对储层较低, 受电流分流的影响, 使探测深度降低, 导致反演结果的绝对误差增大, 但整体而言, 反演厚度与模型厚度的相对误差较小, 表明反演算法可以用于实际资料处理。

2.2 水平井井眼轨迹外夹层预测步骤

解释水平井夹层时,通常用直井资料进行刻度和标定。相对于直井而言,水平井除了测量方式特殊外,横向也会遇到同一套地层岩性和岩相剧烈变化,解释难度非常大。识别水平井沿井眼轨迹方向的夹层时,首先要确定井眼轨迹和地层的精细关系;然后结合直井夹层响应特征,识别出过井轴夹层;最后利用上述反演方法,确定井间夹层沿井眼轨迹方向的展布。具体可分为以下步骤:

- 1)水平井大斜度段进行垂直深度校正,确定水平井段钻遇的目的层。

- 2)导眼井或邻井建模,主要根据导眼井测井曲线特征,采用活化函数法,将目的层段一定范围内(根据仪器探测深度来确定)的地层进行细分,确定各细分层界面位置;然后反演出各细分层的地层电阻率(见图4,图中第5道红色曲线为反演后的地层

电阻率;第6道为反演初始地层模型,颜色深浅表示地层电阻率大小)。

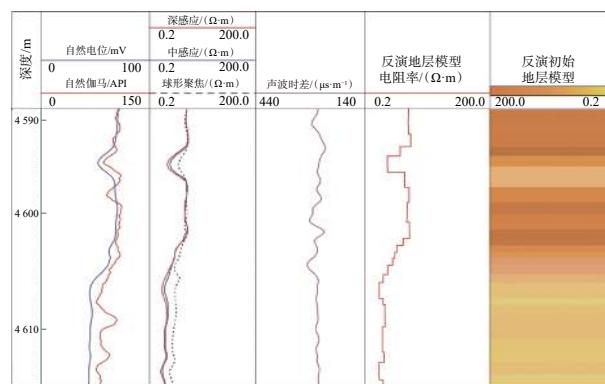


图4 导眼井目的层段电阻率反演

Fig.4 Resistivity inversion of target layers in a pilot well

- 3)在井眼轨迹上识别出夹层过井轴位置(见图5中的地层模型a),确定过井轴夹层厚度。

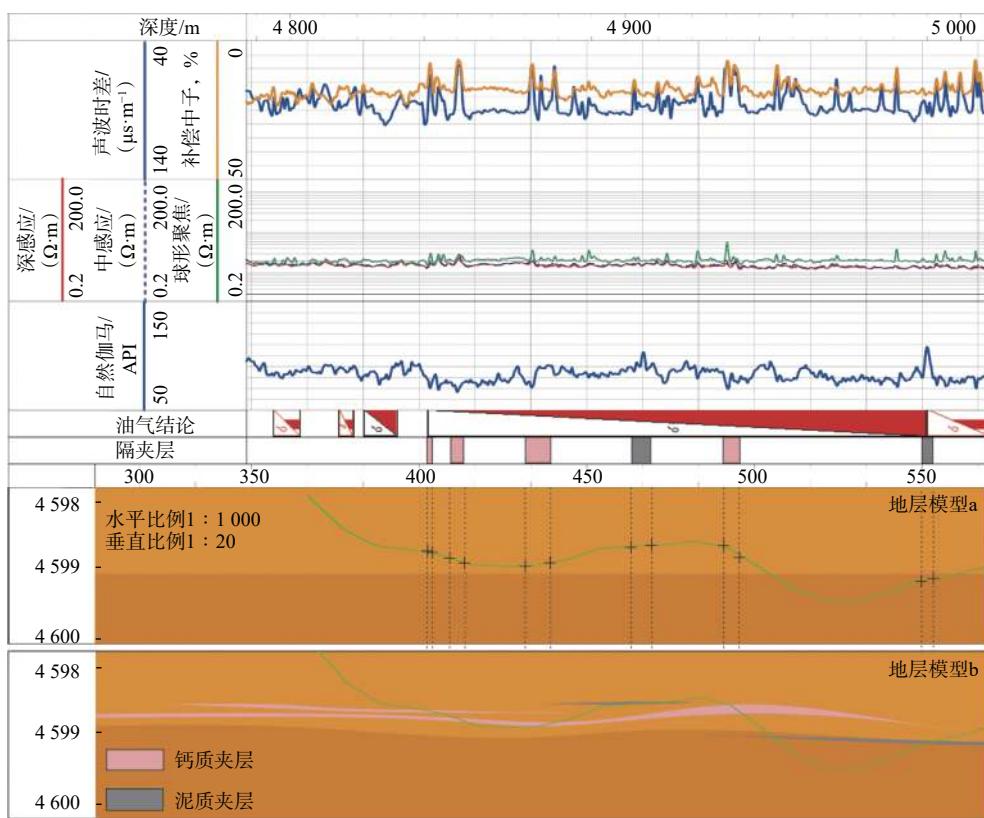


图5 水平井井眼轨迹外夹层识别成果

Fig.5 Identification result of interlayers beyond the horizontal wellbore

- 4)根据地震剖面确定砂体的大体倾角,然后根据步骤3)所确定的夹层厚度,结合直井夹层的电性特征,设置夹层初始电阻率,采用交互式正反演方法,调节地层模型与水平井井眼轨迹的相互接触关系;根据地层倾角、各细分层电阻率、各细分层厚

度、夹层厚度、夹层电阻率及仪器参数,正演得到视双感应电阻率,并对比视电阻率与实测电阻率的大小,通过不断调整直到二者误差足够小,确定井眼轨迹与地层的接触关系和夹层电阻率。

- 5)根据步骤4)所确定的关系,利用反演算法,

反演夹层沿井眼轨迹的走向(见图 5 中的地层模型 b);反演时需要考虑仪器的探测范围和夹层的厚度(隔夹层上下界面),当超出探测范围时,需要结合地质规律和地层展布情况确定夹层的展布情况。

3 夹层平面展布特征

采用上述方法完成研究区直井、斜井和导眼井的夹层识别后,采取直井、水平井联合控制的方法,确定了夹层纵向和平面的分布特征。

3.1 夹层井间对比

根据层位近似水平、邻井岩性相似的对比原则,采用单井(点)-剖面(线)-水平井(面)联合控制

的方法,分析夹层的展布情况。先从剖面上分析夹层与其周围直井、导眼井中夹层的对比情况,然后结合其周围水平井夹层反演解释成果,分析该夹层与其周围水平井中夹层的对比情况。连井剖面显示,TK9-JI 井和 TK924Hd 井在 T_{2a}¹-12 小层顶部均发育一套钙质夹层,测井曲线响应特征基本一致,自然伽马值和声波时差减小,密度增大,且在空间位置上均位于该小层的顶部,在厚度上也比较相似,因此判断这 2 口井在该小层发育同一套钙质夹层,而 TK9-JI 井周围其他井在该小层钙质夹层不发育。同法判断出水平井 TK924Hd 井、TK925Hd 井和 TK938H 井在 T_{2a}¹-12 小层均发育一套钙质夹层,且与 TK9-JI 井的钙质夹层为同一套夹层(见图 6)。

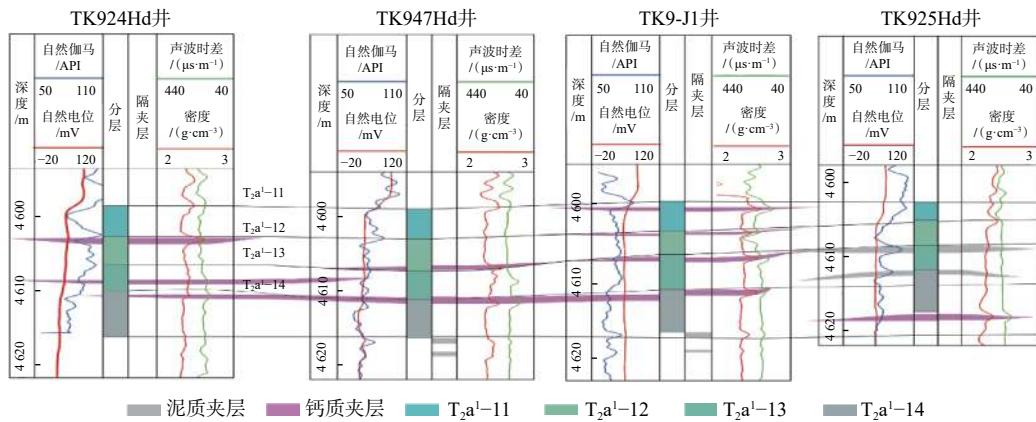


图 6 TK9-JI 井与其周围邻井夹层对比剖面

Fig.6 Comparison between interlayers of Well TK9-JI and its adjacent wells

采用以上对比原则和方法,在夹层单井识别的基础上,对研究区目的层段顺物源方向和垂直物源方向的连井剖面进行了对比分析。对比发现:夹层在顺物源方向的横向连续性较好;在垂直物源方向比较分散,连续性差。

3.2 夹层纵向及平面特征

采用上述直井和水平井联合控制的方法,完成研究区所有井夹层对比,绘制各小层夹层厚度平面分布图(见图 7),可以确定夹层的平面展布特征。从图 7 可以看出,研究区夹层大小不一,分布较为零散,连续性差,呈薄厚不等的透镜状;其中钙质夹层较泥质夹层发育、分布广、厚度变化大,而泥质夹层分布数量相对较少,以顺物源北东向分布为主。

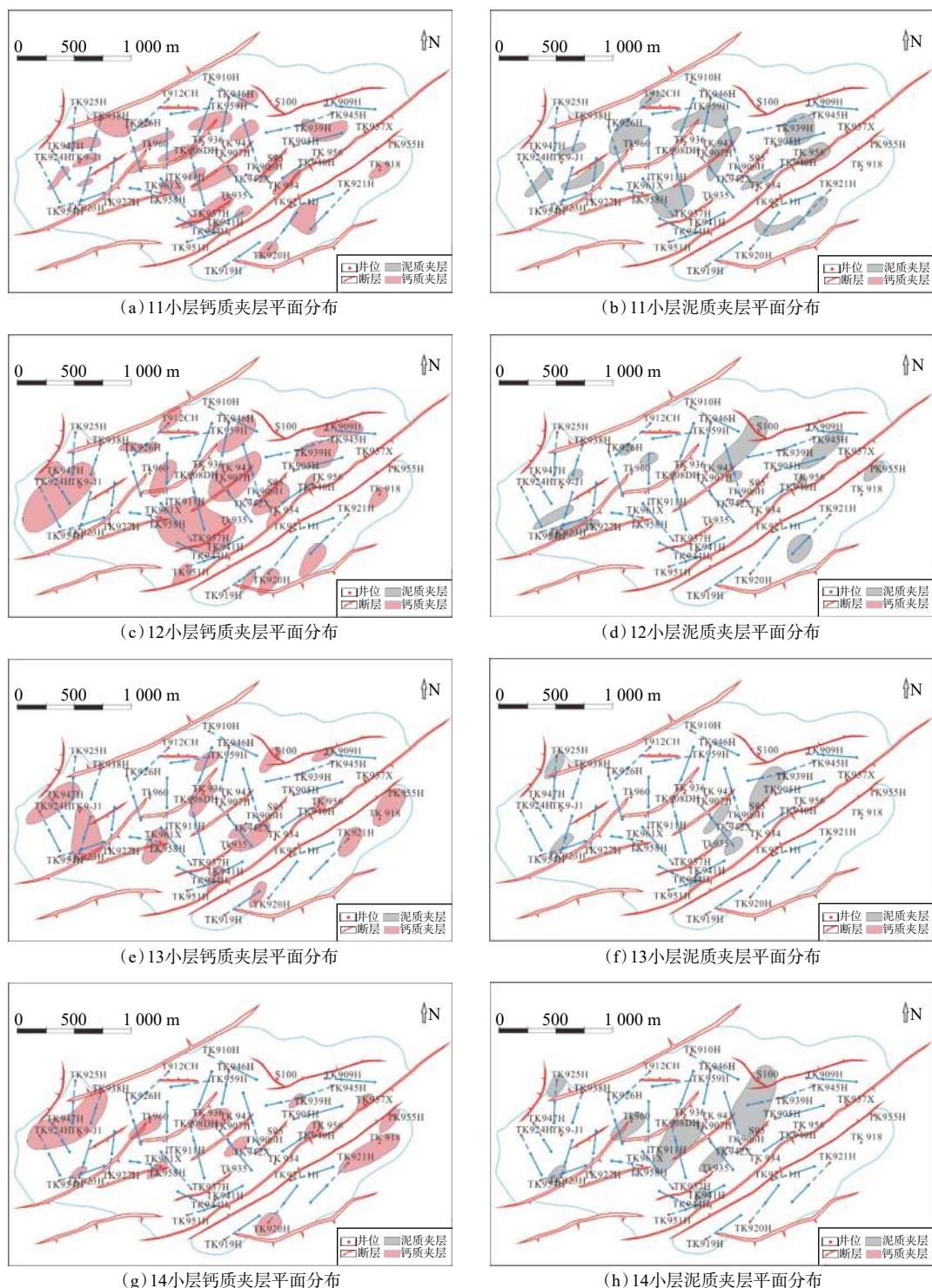
研究区内阿 1 段夹层单层厚度较薄、垂向上差异大、横向变化复杂,特别是平面延伸范围不确定,仅利用直井信息无法准确反映井间夹层分布情况;鉴于工区水平井较多,利用水平井进行反演,可提

高井间夹层解释和分布的合理性及精度。例如,TK925Hd 井导眼段在 T_{2a}¹-12 小层顶部未见钙质夹层发育(见图 6),但水平井段在 T_{2a}¹-12 小层顶部可以见到钙质夹层,仅利用直井进行反演,会造成井间夹层预测不符合实际情况;利用水平井反演夹层分布,可以提高夹层平面分布预测的可靠性。

4 结论与建议

1) 塔河油田九区三叠系阿克库勒组 1 段主要发育泥质和钙质 2 类夹层,泥质夹层测井曲线表现为“三高两低”特征,钙质隔夹层测井曲线表现为“四低一高”特征。可以利用密度相对值和伽马相对值交会图识别不同类型夹层,没有密度测井资料的井可以利用中子相对值和伽马相对值识别夹层。

2) 利用最优梯度反演方法,可反演出井眼轨迹

图 7 T_{2a}^1 各小层夹层平面分布特征Fig.7 Interlayer distribution characteristics of the sublayers of T_{2a}^1

外夹层沿井眼轨迹的展布情况;采用直井-水平井联合控制法,能够精确确定夹层井间分布规律。

3)提出了利用水平井开展井间夹层精细描述的思路和流程,提高了水平井信息的利用率。但影响油藏开发效果的因素比较复杂,因此要紧密结合生产动态信息来分析水平井夹层解释成果。

参 考 文 献

References

- [1] 孙恩慧,郭敬民,谭捷,等.含隔夹层底水油藏的注水开发影响因素分析[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2020,22(4):30-34.
 SUN Enhui, GUO Jingmin, TAN Jie, et al. Analysis of factors influencing water-flooding development of bottom water reservoir with

- interlayer[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 22(4): 30–34.
- [2] 谷建伟, 任燕龙, 王依科, 等. 基于机器学习的平面剩余油分布预测方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 39–46. GU Jianwei, REN Yanlong, WANG Yike, et al. Prediction methods of remaining oil plane distribution based on machine learning[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2020, 44(4): 39–46.
- [3] 杨敏, 李小波, 谭涛, 等. 古暗河油藏剩余油分布规律及挖潜对策研究: 以塔河油田 TK440 井区为例 [J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 43–48. YANG Min, LI Xiaobo, TAN Tao, et al. Remaining oil distribution and potential tapping measures for palaeo-subterranean river reservoirs: a case study of TK440 well area in Tahe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 43–48.
- [4] 张吉磊, 龙明, 何逸凡, 等. 渤海 Q 油田隔夹层发育底水稠油油藏精细注采技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 75–80. ZHANG Jilei, LONG Ming, HE Yifan, et al. Fine injection-production technology for bottom-water viscous oil reservoirs with interlayers in Bohai Q Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 75–80.
- [5] 郭春涛, 倪玲梅, 陈继福. 塔中地区含砾砂岩段隔夹层特征及分布规律 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2625–2633. GUO Chuntao, NI Lingmei, CHEN Jifu. Characteristics and distribution of interlayer in gravel-bearing sandstone segment in Tazhong Area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2625–2633.
- [6] 巩强, 李胜利, 刘圣, 等. 远源水下扇内部夹层识别与展布规律研究 [J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 55–61. GONG Qiang, LI Shengli, LIU Sheng, et al. Identification and distribution of internal interlayers in distal underwater fan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 55–61.
- [7] 王超, 杨宏楠, 乐平, 等. 隔夹层成因及其对剩余油分布的影响: 以哈得油田东河砂岩油藏为例 [J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(4): 15–20. WANG Chao, YANG Hongnan, LE Ping, et al. Rigin of interbeds and the influence on distribution of remaining oil: taking command of the Hudson Donghe sandstone oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(4): 15–20.
- [8] 朱建敏, 达丽亚, 高红立, 等. 海上稀井条件下砂质辫状河储层隔夹层识别: 以渤海 LD2X 油田为例 [J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 739–744. ZHU Jianmin, DA Liya, GAO Hongli, et al. Identification of interlayers in sandy braided river reservoirs under less well conditions: a case study of LD2X Oilfield, Bohai, China[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(6): 739–744.
- [9] 李红英, 陈善斌, 杨志成, 等. 巨厚油层隔夹层特征及其对剩余油分布的影响: 以渤海湾盆地 L 油田为例 [J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 709–714. LI Hongying, CHEN Shanbin, YANG Zhicheng, et al. Characteristics of interbeds in thick oil layer and its effect on remaining oil distribution: a case study of L Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(6): 709–714.
- [10] 徐丽强, 李胜利, 于兴河, 等. 辫状河三角洲前缘储层隔夹层表征及剩余油预测: 以彩南油田彩 9 井区三工河组为例 [J]. 东北石油大学学报, 2016, 40(4): 10–18. XU Liqiang, LI Shengli, YU Xinghe, et al. Characterization of barrier-intercalation and remaining oil prediction in the braided river delta front reservoirs: an example from the Sangonhe Formation in Block Cai 9 of Cainan Oilfield[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(4): 10–18.
- [11] 夏竹, 张婷婷, 张胜, 等. 水平井参与下的油藏隔夹层描述技术及应用 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1293–1304. XIA Zhu, ZHANG Tingting, ZHANG Sheng, et al. Technique for describing baffles and barriers in oil reservoir with horizontal well data integrated and its application[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1293–1304.
- [12] 陈海莲. 哈得逊油田东河砂岩井间隔夹层测井预测方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. CHEN Hailian. Research on the prediction method of interwell interlayer in Donghe sandstone of Hudson Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [13] 贺婷婷, 段大忠, 赵磊, 等. 塔河油田九区三叠纪下油组夹层识别及分布规律 [J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(6): 26–35. HE Tingting, DUAN Taizhong, ZHAO Lei, et al. Interlayer identification and distribution of Triassic lower oil group in Block 9 of Tahe Oilfield[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(6): 26–35.
- [14] 倪小威, 徐思慧, 别康, 等. 不同井眼偏心距下水平井阵列侧向测井围岩校正研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 121–126. NI Xiaowei, XU Sihui, BIE Kang, et al. Surrounding rock influence correction for array laterolog responses with borehole eccentricities in horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 121–126.
- [15] 胡松, 周灿灿, 王昌学, 等. 水平井各向异性地层双感应测井响应数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(11): 10–13, 26. HU Song, ZHOU Cancan, WANG Changxue, et al. Dual induction logging numerical simulation of anisotropic formation in horizontal wells[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(11): 10–13, 26.
- [16] LI Hu, WANG Lei. Fast modeling and practical inversion of laterolog-type downhole resistivity measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 57(1): 1–8.
- [17] 王磊, 范宜仁, 袁超, 等. 随钻方位电磁波测井反演模型选取及适用性 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 914–922. WANG Lei, FAN Yiren, YUAN Chao, et al. Selection criteria and feasibility of the inversion model for azimuthal electromagnetic logging while drilling (LWD)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 914–922.
- [18] PARDO D, TORRES-VERDIN C. Fast 1D inversion of logging-while-drilling resistivity measurements for improved estimation of formation in high-angle and horizontal wells[J]. Geophysics, 2015, 80(2): E111–E124.