

# 多信息耦合的水平井井间隔夹层预测方法

余义常<sup>1,2</sup>, 徐怀民<sup>2</sup>, 江同文<sup>3</sup>, 高兴军<sup>1</sup>, 徐朝晖<sup>2</sup>, 阳建平<sup>3</sup>, 宁超众<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;  
3. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:**综合利用岩心、常规测井、倾角测井、水平井测井和生产动态等资料,对塔里木盆地哈得逊油田东河砂岩隔夹层的静态地质特征、产状拾取、水平井测井响应特征、动态生产特征等进行系统研究。通过“静态模式指导、多测井系列解释、产状指向、水平井标定、导眼井与水平井匹配、动态预测及验证”的流程,建立有创新性和针对性的多信息耦合的水平井井间隔夹层预测方法。结果表明:研究区存在泥质、钙质和钙泥质隔夹层,从级次上分为层间、砂体间及单砂体内隔夹层;优选0.2 m窗长、0.02 m步长、30°探索角拾取隔夹层的产状,并进行产状转换;通过水平井段测井响应异常及深交电阻率差异识别隔夹层的类型及位置;将研究区射孔及见效情况、含水率及日产液曲线进行分类,确立连续、半连续、不连续3类隔夹层展布范围及平行、倾斜两种隔夹层展布产状对应的注水区、边水区、底水区的单井生产动态特征。

**关键词:**隔夹层井间预测; 静态地质特征; 产状拾取; 水平井标定; 动态特征; 多信息耦合

**中图分类号:**TE 121.3 **文献标志码:**A

**引用格式:**余义常,徐怀民,江同文,等. 多信息耦合的水平井井间隔夹层预测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018,42(5):35-46.

YU Yichang, XU Huaimin, JIANG Tongwen, et al. Prediction method of interlayer distribution between horizontal wells by coupled multi-information [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(5):35-46.

## Prediction method of interlayer distribution between horizontal wells by coupled multi-information

YU Yichang<sup>1,2</sup>, XU Huaimin<sup>2</sup>, JIANG Tongwen<sup>3</sup>, GAO Xingjun<sup>1</sup>  
XU Zhaohui<sup>2</sup>, YANG Jianping<sup>3</sup>, NING Chaozhong<sup>1</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;  
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
3. Tarim Oilfield Corporation, PetroChina, Korla 841000, China)

**Abstract:**Based on a multi-disciplinary analysis that combines core data, conventional logging, inclination logging, horizontal well logging and production records, this study targets the static geologic characteristics, acquisitions of inclination and dip angles, response characteristics of horizontal well logging and dynamic response characteristics of the interlayers in Donghe sandstone of Hadeson Oilfield in Tarim Basin. Through the process of "guidance of static geological pattern, multi-series well logging interpretation, acquisitions of inclination and dip angle, horizontal well interpretation, matching of guide well and horizontal well, prediction and verification of dynamic characteristics", an innovative and practical prediction method of interlayer distribution between horizontal wells by a coupled multi-information system was put forward. The interlayers in the study area included argillaceous, calcareous and calcareous-argillaceous interlayers, which can be divided into interbedded interlayers, interlayers between and bodies and interlayers in single-sand body. Processing parameters were preferred with

收稿日期:2017-10-05

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05030-001);中国石油集团公司重大科技专项(2017D-4406)

作者简介:余义常(1991-),男,博士研究生,研究方向为油田开发地质。E-mail:yuyichang@petrochina.com.cn。

通信作者:徐怀民(1962-),男,教授,研究方向为油藏地质评价、油田开发地质。E-mail:xuhm@cup.edu.cn。

0.2m in window length, 0.02m in step length, and 30 in probe angle to pick up the inclination and dip angles of the interlayer, which is then transformed to the horizontal well. The position of the interlayers could be qualitatively identified by the abnormal logging response of the horizontal section and the relative change between the resistivity of the interlayers and the reservoirs. The correspondence model of perforation and injection, the curves of water cut and liquid production in the study area were divided into different types. The dynamic production characteristics of a well in water injection area, border water area and bottom water area were established in correspondence with three kinds of distribution patterns of interlayers, i. e. continuous, semi-continuous and discontinuous; and with two forms of interlayers, i. e. parallel and inclined.

**Keywords:** interlayer interval prediction; static geological features; acquisitions of inclination and dip angle; horizontal well interpretation; dynamic characteristics; multi-information coupled

隔夹层的分布增强了储集层的非均质性,是影响油水在储集层内流动的关键因素<sup>[1]</sup>。目前,国内外对碎屑岩隔夹层的研究主要集中在陆相及海陆过渡环境中<sup>[2-3]</sup>,并多用单井测井识别结合地质模式及井间相控地质建模的方法表征隔夹层的分布规律,前者具有一定的主观性,定量关系效果较差<sup>[4-5]</sup>;后者则更多地依托于算法,具有多实现的特点<sup>[6-7]</sup>。目前对于海相碎屑岩隔夹层的分布规律研究较少,对水平井隔夹层识别及井间预测的研究则更为缺乏。哈得逊油田主力产层是滨岸相东河砂岩,以水平井为主进行高效开发,其内部发育不同类型、级次的隔夹层,控制了剩余油的分布。前人对于哈得逊油田的研究多集中在

成藏模式、层序界面识别、隔夹层成因及单井识别上<sup>[8-10]</sup>,缺少对于隔夹层井间分布的相关研究。笔者利用沉积模式、岩心、常规测井、倾角测井、水平井测井和生产动态等资料,对研究区隔夹层的类型、特征、级次、产状、水平井解释及生产曲线特征进行系统研究,通过多信息耦合的方法进行水平井井间隔夹层的预测,为研究区剩余油挖潜提供地质依据。

## 1 地质概况

哈得逊油田位于塔里木盆地满加尔凹陷北部的哈得逊构造带上(图1),其顶面构造形态总体表现为一向北西倾没的大型鼻状构造<sup>[11]</sup>。

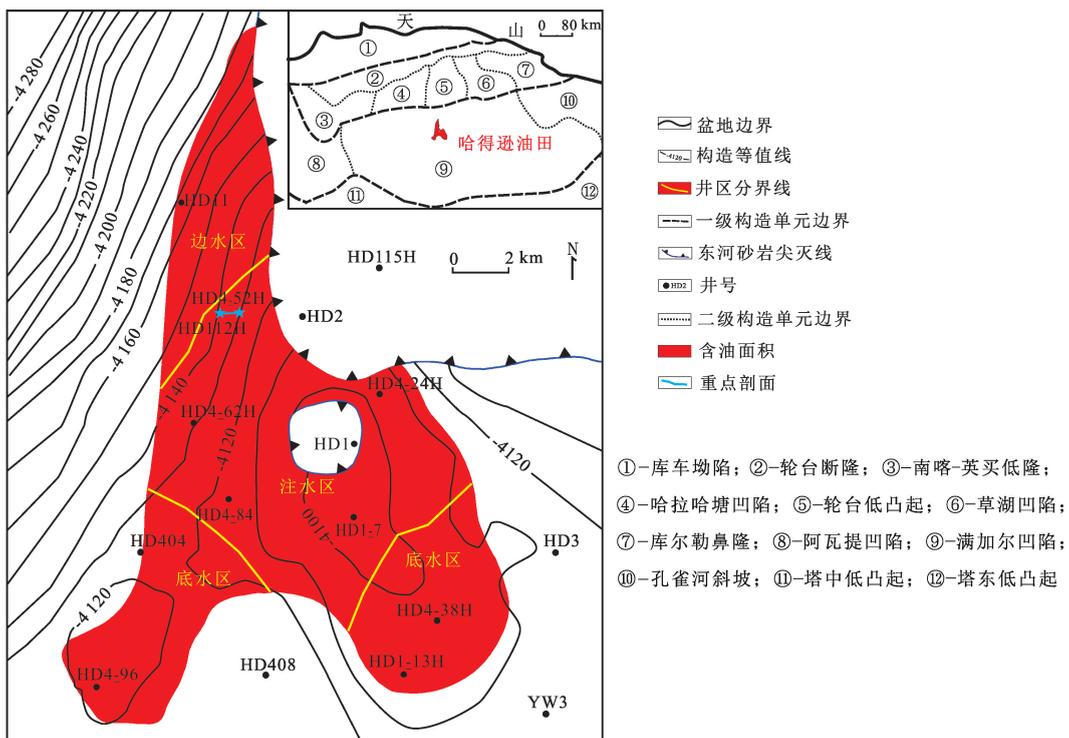


图1 研究区构造位置

Fig.1 Tectonic location of study area

东河砂岩顶底均为不整合面,其上为深红色角砾岩,其下为志留系致密砂岩。东河砂岩下段为海进型上超滨岸沉积,砂体呈席状不断叠置于早期的

层状砂体之上,沉积界面近于平行;上段为海退型顶超滨岸沉积,沉积砂体呈透镜状不断向海进积。东河砂岩为典型的无障壁浪控砂质滨岸沉积<sup>[12]</sup>,具有

滨岸相典型的较高的成分和结构成熟度<sup>[13]</sup>,其岩性为一套厚—巨厚层状灰色、灰白色细粒石英砂岩,自南西向北东厚度减薄尖灭。在沉积旋回及沉积环境演化的控制下,不同类型及级次的隔夹层赋存其中,成为了小层间、单砂体间及单砂体内部的渗流屏障。

## 2 隔夹层静态地质特征

隔层是指分隔垂向上不同砂体的非渗透层。夹

层是指单砂体之间及内部的、横向不稳定的相对低渗透层或非渗透层。隔、夹层差异较明显,但均可被视为不同级次沉积单元界面处的渗流屏障,起阻隔或迟滞油水运动的作用,且研究区内隔、夹层分布规模复杂,因此本文中两者统称为隔夹层。

### 2.1 隔夹层类型及特征

根据岩心及镜下薄片资料,将东河砂岩隔夹层类型划分为泥质、钙质及钙泥质3种(图2)。

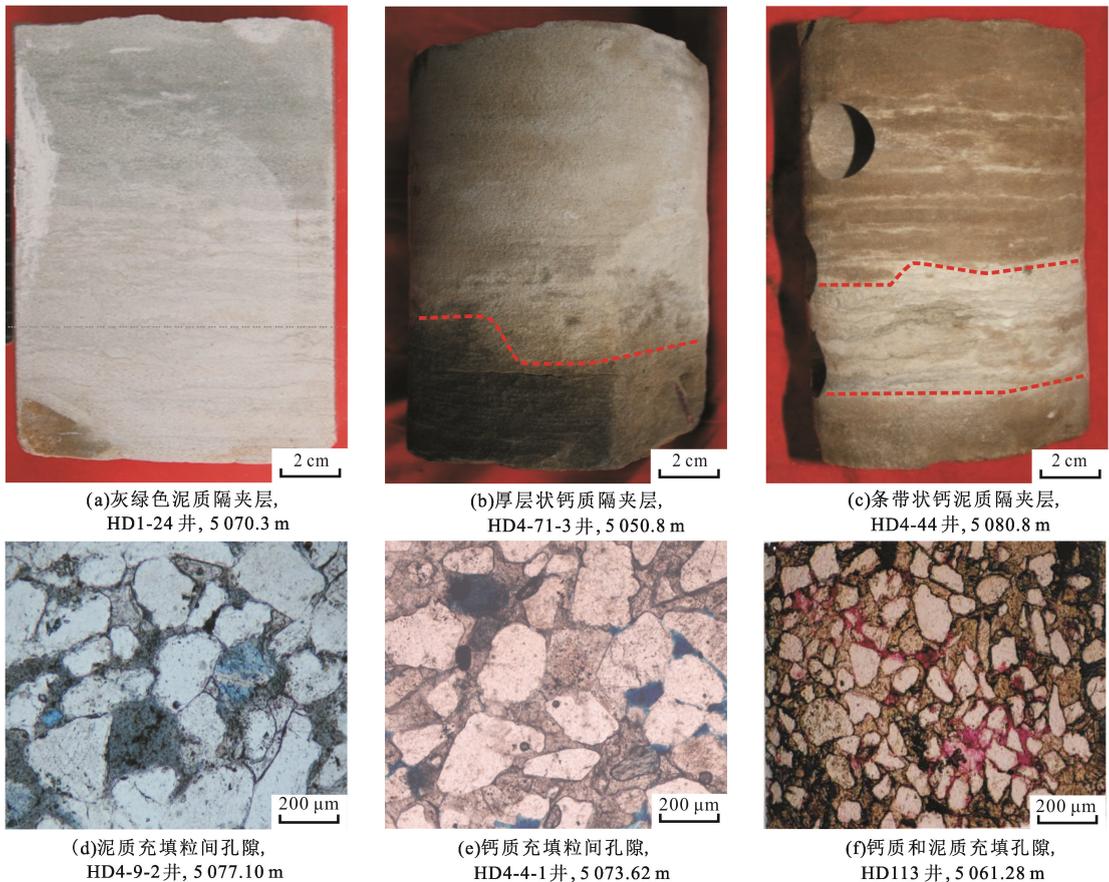


图2 研究区隔夹层岩心及铸体薄片

Fig. 2 Cores and casting thin slices of interlayers in study area

泥质隔夹层岩性为灰绿色泥岩、泥质粉砂岩、泥质细砂岩。在薄片下表现为较高的泥质含量,岩石颗粒之间充填大量泥质。泥质隔夹层为沉积成因,由于水动力减弱,细的悬移物质沉积,若后期改造作用不强烈,泥质沉积最终演化为泥质隔夹层,厚度一般大于0.5 m,具有一定的孔渗性,呈现自然伽马较高、密度较高、电阻率相对较高的特征,倾角测井曲线呈现小幅度“低值高阻”特征或接近低平台值。

钙质隔夹层岩性为灰白色钙质粉砂岩、钙质细砂岩,其钙质含量高,部分滴盐酸反应剧烈。通过薄片观察,常见方解石、白云石作为胶结物,一般胶结致密,孔喉连通性较差。钙质隔夹层为成岩成因,包

括出露区强烈蒸发作用导致地表孔隙水中钙质饱和沉淀、浅埋藏淡水环境大量钙质饱和地层水搬运成因、深埋藏还原环境钙质胶结先溶解后沉淀等3类成因<sup>[14]</sup>,其厚度较小,为0.05~0.9 m,孔渗性最差,呈现自然伽马较低、密度高、电阻率高的特征,倾角测井曲线为典型的“低值高阻”特征,多呈现“尖峰状、锯齿状及箱型”。

钙泥质隔夹层岩性为受钙质胶结的泥岩、含泥粉砂岩和细砂岩。在薄片下表现为岩石排列致密、粒径较小,局部发育孔隙。钙泥质隔夹层为沉积+成岩成因,泥质沉积之后在蒸发环境中钙质胶结形成,或富含钙质的地层水沿着富含泥质的沉积界面

胶结形成,厚度及物性介于以上两类隔夹层之间,呈现自然伽马较低、密度较高、电阻率较高的特征,倾

角测井曲线为小幅度“低值高阻”特征,呈现“指状或锯齿状”(表1)。

表1 研究区隔夹层类型及特征

Table 1 Type and characteristics of interlayers in study area

隔夹层类型	岩性	成因	厚度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	自然伽马/API	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	深电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	倾角曲线特征
泥质隔夹层	泥岩、泥质粉砂岩、泥质细砂岩	沉积成因	0.3~1.5	2~12	0.4~11	>38	2.38~2.58	>0.6	小幅度“低值高阻”特征或接近低平台值
钙质隔夹层	钙质粉砂岩、钙质细砂岩	成岩成因	0.05~0.9	1~9	0.04~7	<38	>2.48	>0.9	典型的“低值高阻”特征,曲线多呈现“尖峰状、锯齿状及箱型”等
钙泥质隔夹层	钙质泥岩、钙泥质粉砂岩	沉积+成岩成因	0.1~1.1	2~10	0.2~9	<38	<2.48	>0.7	小幅度“低值高阻”特征,曲线呈现“指状、锯齿状”等

常规测井曲线对不同类型隔夹层响应特征明显,但无法准确判断隔夹层上、下界面;倾角测井曲线纵向分辨率可达1 cm,对界面反映明显,但是难以判断隔夹层的类型。在研究区采用“常规测井曲线定类型、倾角测井曲线定界面”的多测井系列解释思路,可有效识别隔夹层的类型及位置。

### 2.2 隔夹层静态分布模式

隔夹层静态分布模式主要通过隔夹层的级次来

表征。研究区的隔夹层受沉积旋回及沉积环境演化的控制,分布于沉积单元界面上,包括小层间界面,单砂体间界面以及单砂体内界面(图3)。隔夹层可对应划分为层间隔夹层、层内砂体间隔夹层及单砂体内隔夹层,级次依次降低。

层间隔夹层大多呈厚层状,产状近平行,分布连续,垂向上表现为油水不易在隔夹层连续处突破,横向上表现为受层间隔夹层的限制,油水在层内流动。

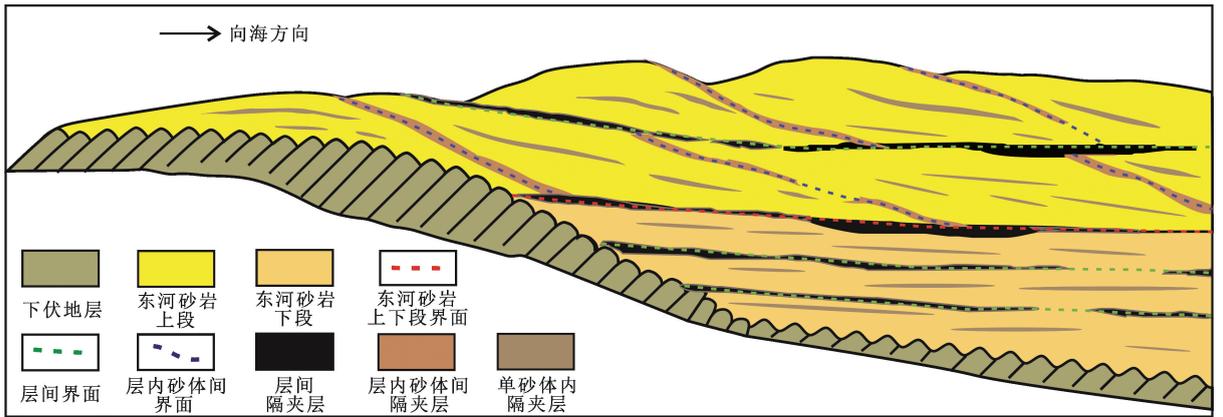


图3 研究区沉积模式及隔夹层分布示意图

Fig. 3 Depositional model and distribution of interlayers in study area

层内砂体间隔夹层具有一定厚度,具有向海前积的倾斜产状,呈现半连续—连续的特征,由于其横向遮挡作用,可使相邻砂体中的油水分隔,在注水开发中邻近井射孔层位对应,但注采不受效。

单砂体内隔夹层厚度一般较小,产状倾斜,连续性较差,局限在单砂体内,对油水的控制能力较弱,起到迟滞油水运动的作用。

### 3 隔夹层倾角测井及水平井测井特征

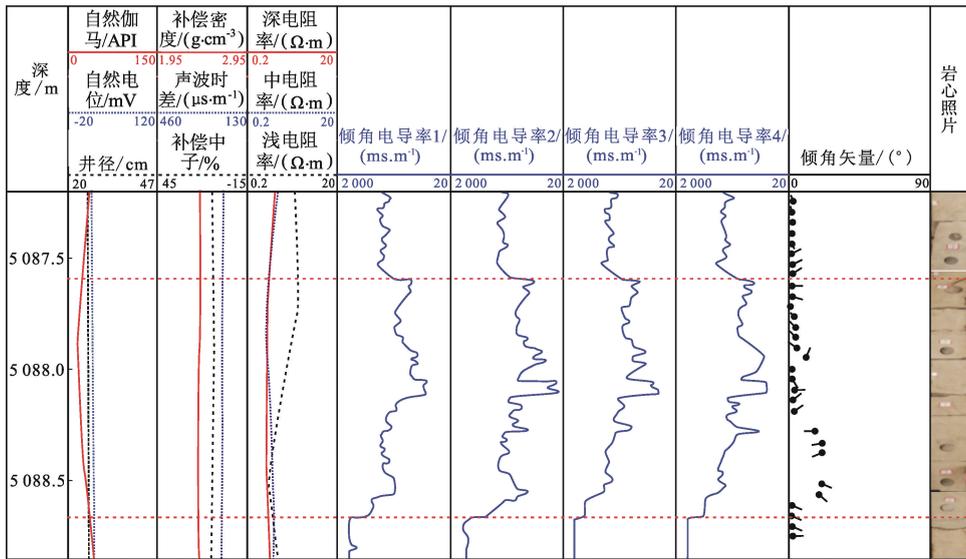
#### 3.1 隔夹层产状拾取及转换

倾角测井曲线经过处理可以得到地层倾角矢量图,能够很好地反映地下地层及隔夹层产状信

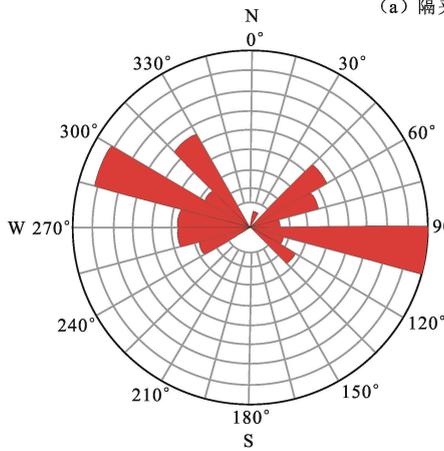
息<sup>[15]</sup>,由于隔夹层的产状往往在小的深度范围内就存在较大变化,采用短窗长相关对比法。通过不断调整窗长、步长、探索角,使得倾角测井的处理结果与同一深度的岩心隔夹层产状对应最好,最终优选的解释处理参数为0.2 m窗长、0.02 m步长、30°探索角。处理后可得到隔夹层的方位频率图及施密特矢量图,取其主峰所在方向作为倾向,施密特图中的角度主峰值作为隔夹层的倾角。

在HD4井的5087.6~5088.65 m处有一个厚约1.05 m的钙泥质隔夹层,在该段隔夹层的顶、底界面处(红色虚线代表了隔夹层在测井曲线和岩心的顶、底界面),电导率曲线上存在明显的拐点,通

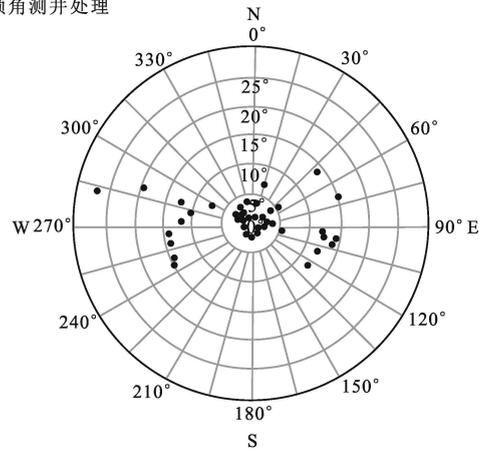
过处理得到该井段的倾角矢量图,利用主峰确定该段隔夹层倾向为 110°,倾角为 0.6°(图 4)。



(a) 隔夹层倾角测井处理



(b) 隔夹层方位频率图



(c) 隔夹层倾向和倾角施密特图

图 4 HD4 井隔夹层倾角测井解释成果

Fig. 4 Inclination logging interpretation results of interlayer in well HD4

隔夹层的产状在不同方向上是不一致的,倾角测井拾取的是隔夹层真实倾向和倾角,为了实现导眼井与水平井相结合预测井间隔夹层的分布,需要将导眼井隔夹层产状转换到水平井轨迹所在剖面上,进行导眼井与水平井隔夹层的匹配,转换公式为

$$\tan \alpha = \cos \omega \cdot \tan \theta . \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为视倾角;  $\omega$  为视倾向与真倾向之间的夹角(若大于 90° 则取  $180^\circ - \omega$ );  $\theta$  为真倾角。

### 3.2 水平井隔夹层解释

哈得逊油田东河砂岩水平井均采用电缆测井,测井系列主要包括自然伽马、自然电位、声波时差及电阻率,其中电阻率主要是双感应-八侧向系列,这些测井方法都是径向平均探测类型,使得水平井与直井在隔夹层处具有相似的测井响应特征。

水平井钻井时并不只在储集层中穿行,会出现某些井段钻遇隔夹层的情况,因此隔夹层的解释在水平井中至关重要<sup>[16]</sup>。哈得逊油田东河砂岩为滨岸相沉积,岩性、物性较为均一,且水平井段位于地层上部的纯油层内,测井曲线受储集层油水性质的影响是相似的,而隔夹层的存在导致了水平井段测井响应异常。

泥质隔夹层特征为自然伽马曲线数值明显增大、声波时差曲线数值较低;钙质隔夹层则反映为自然伽马曲线数值明显降低、声波时差曲线数值低;钙泥质隔夹层反映为自然伽马介于泥质隔夹层和钙质隔夹层之间、声波时差曲线数值较高,由此可以根据水平段测井响应异常来拾取隔夹层在水平井段的范围和类型。但是,与直井隔夹层解释不同,水平井还需要判断隔夹层距离井眼的远近。

隔夹层在水平井井眼不同位置对感应测井深、浅电阻率的响应不同,将电阻率曲线的探测范围放到井轨迹之上,可以辅助判断隔夹层与井眼的位置关系。具体来说,当深、浅电阻率相对于油层均有较大幅度的增大且数值相近时,隔夹层在井眼处发育;

当深、浅电阻率相对油层增大幅度较小时,隔夹层在井眼较近处发育;当深电阻率相对油层电阻率幅度增大,但是浅电阻率相对油层基本不变时,隔夹层在井眼较远处发育(图5,其中RT为深电阻率,RXO为浅电阻率)。

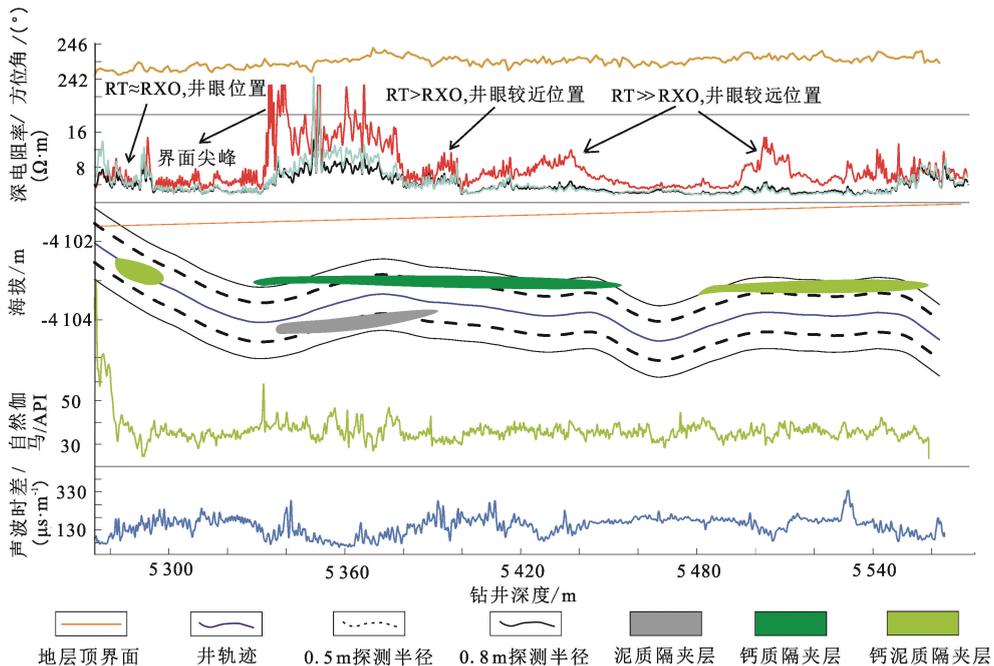


图5 HD4-37H水平井隔夹层解释图

Fig. 5 Interpretation of interlayers in horizontal well HD4-37H

## 4 隔夹层动态生产特征

静态地质模式提供了不同类型、级次隔夹层的空间分布规律,而实际的开发动态数据则提供了最直接的证据<sup>[17-19]</sup>。研究区存在注水区、边水区、底水区3种开发区块(图1),其中注入水与边水主要是顺层推进,底水主要是自下而上脊进或绕流,各自的动态生产特征不一。

### 4.1 射孔对应与注水见效分析

由于哈得逊油田油层较薄,水平井一般打在油层的上部,需要与导眼井相结合判断其射开的层位,分析注水井与采油井射孔层位的对应关系。以示踪剂的结果为依据研究注采见效状况,再根据见效时间与井距计算见效速度,以此分析注水井与采油井的连通情况及隔夹层的展布。将研究区射孔对应与注水见效情况分为射孔对应、注水见效,射孔对应、注水未见效,射孔不对应、注水见效,射孔不对应、注水未见效4类,并建立了每一类的生产特征及对应的隔夹层发育情况(表2)。

### 4.2 动态曲线分析

油田生产过程中积累了很多开采曲线,优选含

水率、日产液2个参数,进行生产曲线的分类,在示踪剂测试对隔夹层展布有了判断之后,总结生产曲线变化与隔夹层展布的关系。边水区的情况与注水区类似,而底水区的情况则不一致。

#### 4.2.1 含水率

含水率是研究隔夹层展布的首要参数,主要分为“S型”、“凸型”、“J型”3种曲线形态。

“S型”曲线有一定的无水采油期,见水后含水率上升较慢,后期达到一定值后稳定。在注水区与边水区代表隔夹层不连续,油水在多层间运动,迟滞了油水运动速度(图6(a));在底水区代表井底隔夹层连续分布,有效阻止了底水脊进,使得底水发生远距离的绕流。

“凸型”曲线无水采油期较短,见水后含水率上升较慢,到达较高含水率开始稳定。在注水区与边水区代表隔夹层半连续,导致注入水、边水推进较慢(图6(c));在底水区代表隔夹层在井间半连续—连续展布,抑制了底水脊进,底水发生绕流(图6(b))。

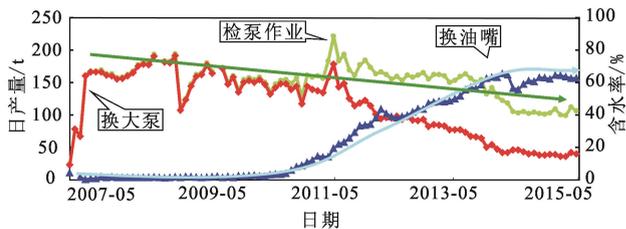
“J型”曲线的典型特征是见水后含水率上升很快,在短时间内达到高含水。在注水区与边水区代表隔夹层稳定连续,导致注入水和边水顺层突进;在

底水区代表隔夹层不连续,储层连通性好,发生底水脊进(图 6(d))。

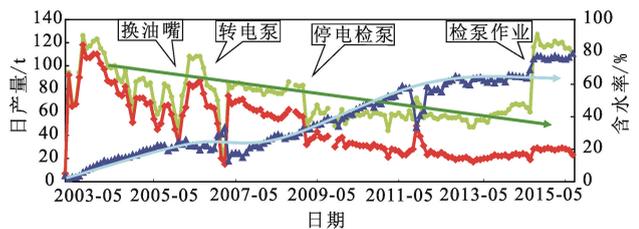
表 2 研究区射孔对应与注水见效模式

Table 2 Correspondence patterns of perforation and injection in study area

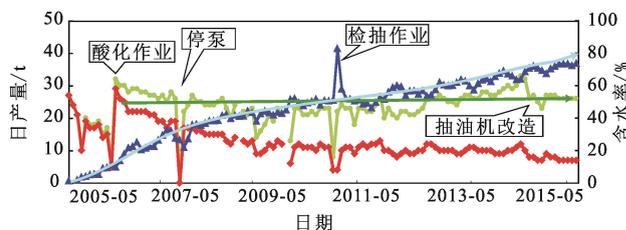
射孔及见效类型	示意图	生产特征	隔夹层解释
射孔对应,注水见效		见示踪剂显示,且见效速度较快,含水率快速上升,日产液增加	注水层下部有连片的层间隔夹层发育
射孔对应,注水未见效		未见示踪剂显示,且见效速度较慢,含水率较慢上升,日产液下降	注水井和采油井之间隔夹层半连续或不连续
射孔不对应,注水见效		见示踪剂显示,有一定的无水采油期,见水后含水率较快上升,日产液缓慢上升或稳定	注水井和采油井之间层间隔夹层半连续或不连续,砂体叠置连通
射孔不对应,注水未见效		未见示踪剂显示,有较长的无水采油期,日产液逐渐下降	注水井和采油井两个层位之间有连片分布的隔夹层,砂体不连通



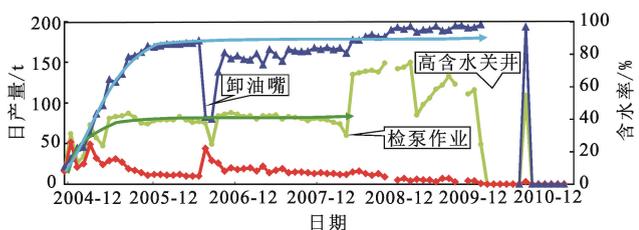
(a) HD4-H74井日产量及含水率曲线



(b) HD4-29H井日产量及含水率曲线



(c) HD4-51H井日产量及含水率曲线



(d) HD4-38H井日产量及含水率曲线



图 6 水平井生产动态特征

Fig. 6 Characteristics of production curves of horizontal wells

4.2.2 日产液

日产液是研究隔夹层展布的辅助参数,主要存在“L型”、“—型”、“凸型”3种曲线形态。

“L型”曲线,即日产液逐渐下降,地层能量供给不足。在注水区与边水区代表受连续的倾斜隔夹层控制,出现注入水、边水的不见效,或者受不连续隔夹层控制,出现油水在多层间运动(图 6(a));在底水区代表受连续隔夹层控制,出现底水远距离的绕流(图 6(b))。

“—型”曲线,即日产液稳定,地层能量得到

一定补充。在注水区与边水区代表受半连续隔夹层控制,注入水、边水较为缓慢地推进(图 6(c));在底水区代表受半连续隔夹层的控制,底水有一定的绕流。

“凸型”曲线,即日产液逐步上升,地层能量供给充足。在注水区与边水区代表受连续隔夹层控制,出现注入水、边水顺层突进;在底水区代表受不连续隔夹层控制,出现底水脊进(图 6(d))。

4.3 隔夹层分布动态响应模式

不同隔夹层展布范围及产状对采油井生产状况

影响不同,通过射孔对应与注水见效分析、生产曲线特征研究,总结了连续、半连续、不连续3类隔夹层展布范围及平行、倾斜两种隔夹层展布产状对应的

注水区、边水区、底水区的单井生产动态响应特征,由此建立隔夹层展布控制下的流体运动规律及其动态响应模式(图7)。

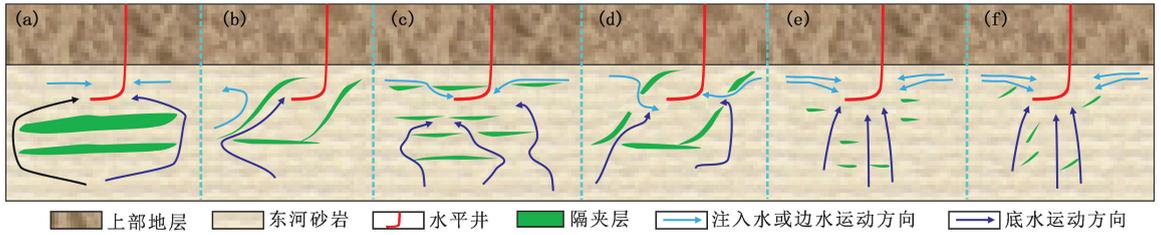


图7 隔夹层控制下流体运动规律

Fig.7 Law of fluid movement under the control of interlayers

#### 4.3.1 隔夹层连续-储层不连通型

对于平行产状的隔夹层(图7(a)),在注水区,射孔对应时注水见效,注入水能够很快突进到采油井中,这种情况下示踪剂的见效速度也较快;同时,当射孔不对应时注水未见效。在边水区,边水能够很快突进到采油井中,采油井呈现“J型”含水率、“凸型”日产液的特征。在底水区,底水发生远距离的绕流,地层能量得不到补充,采油井呈现“S型”含水率、“L型”日产液的特征。

下运动,使得边水在多层间流动,采油井呈现“S型”含水率、“L型”日产液的特征。在底水区,由于没有隔夹层的阻挡,底水快速达到采油井,呈现典型的底水脊进现象,采油井呈现“J型”含水率、“凸型”日产液的特征。

对于倾斜产状的隔夹层(图7(b)),在注水区,射孔对应时注水未见效,注入水受连续倾斜隔夹层阻挡,不能到达采油井。在边水区,边水难以推进到采油井,地层能量得不到补充,采油井呈现“S型”含水率、“L型”日产液的特征。在底水区,底水上升受到抑制,发生较远距离的绕流,采油井呈现“S型”含水率、“L型”或“—型”日产液的特征。

### 5 多信息耦合的井间隔夹层预测方法

利用多信息有机耦合完成隔夹层分布预测,形成了以下方法:在静态地质模式的指导下,首先,通过多测井系列进行直井隔夹层解释,并完成产状转换;其次,拾取水平井隔夹层类型及位置,将导眼井及水平井的产状相匹配;最后,利用单井动态数据来预测隔夹层的展布,由多井生产曲线进行验证(图8)。

#### 4.3.2 隔夹层半连续-储集层部分连通型

此时产状对于生产的影响较小(图7(c)、(d)),在注水区,由于隔夹层起不到阻隔油水运动的作用,无论射孔对应与否,示踪剂测试上均会呈现注水见效且见效速度较慢的特征。在边水区,边水发生一定的绕流,在油层中的速度得到抑制,驱油效果较好,采油井呈现“凸型”含水率、“—型”日产液的特征。在底水区,半连续的隔夹层对底水上升起一定的阻挡作用,底水在半连续的隔夹层处绕流,采油井呈现“凸型”含水率、“—型”日产液的特征。

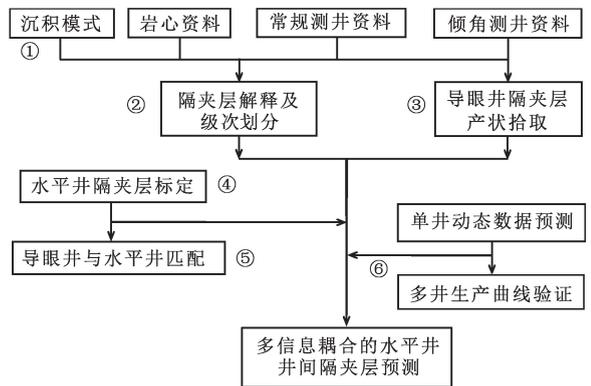


图8 多信息耦合的水平井井间隔夹层预测方法流程

Fig.8 Flowchart of prediction method of interlayer distribution between horizontal wells by coupled multi-information

#### 4.3.3 隔夹层不连续-储集层全连通型

当隔夹层不连续时(图7(e)、(f)),产状对于生产基本无影响,在注水区,较为典型的情况是示踪剂测试上射孔不对应时注水见效,但见效速度慢。在边水区,隔夹层对油水流动不起阻挡作用也不起托举作用,由于储集层物性较好,水受重力作用控制向

基于多信息耦合的方法,对 HD112—HD112H—HD4—52(导眼井—水平井—导眼井)间的隔夹层展布进行预测,其中 HD112H 为注水井,HD4—52 是采油井(图1)。

HD112 与 HD4—52 隔夹层的类型主要是泥质

及钙质隔夹层,层间的隔夹层厚度较大而倾角较小,而层内砂体间及单砂体内部的隔夹层厚度较小而倾角较大(表 3)。

利用水平井段的测井响应在 HD112H 5 260 ~ 5 385 m 处拾取一个距离井眼 0.5 m 范围内的泥质隔夹层,5 275 ~ 5 310 m 处拾取一个距离井眼约 0.5 m 的钙质隔夹层,5 385 ~ 5 615 m 拾取一个距离井眼 0.5 m 范围外的钙质隔夹层,与 5 260 ~ 5 385 m 的泥

质隔夹层相连,在 5 440 ~ 5 615 m 处识别出一个距离井眼 0.5 m 范围外的泥质隔夹层(图 9)。此外,加入地层结构进行导眼井和水平井匹配。第 1 个泥质层间隔夹层和 HD112H 井段 5 440 ~ 5 615 m 的泥质隔夹层相连,第 2 个泥质层内砂体间隔夹层和 HD112H 井段 5 260 ~ 5 385 m 的泥质隔夹层相连,第 3 个钙质层间隔夹层和 HD112H 井段 5 275 ~ 5 310 m 的钙质隔夹层相连(图 10)。

表 3 HD112 与 HD4-52 井隔夹层解释成果

Table 3 Interlayer interpretation results of well HD112 and HD4-52

井名	顶深/ m	底深/ m	厚度/ m	类型	级次	真倾向/ (°)	真倾角 $\theta$ /(°)	方位角/ (°)	与视倾向的 夹角 $\omega$ /(°)	视倾向/ (°)	视倾角 $\alpha$ /(°)
HD112	5 089.55	5 090.13	0.58	泥质	层间	322	1.0	22	60	22	0.50
	5 092.12	5 092.77	0.65	泥质	砂体间	305	1.5	22	77	22	0.34
	5 093.84	5 094.55	0.71	钙质	层间	311	0.8	22	71	22	0.26
	5 098.14	5 098.83	0.69	钙质	层间	310	1.2	22	72	22	0.37
	5 102.56	5 103.08	0.52	泥质	层间	305	1.6	22	77	22	0.36
	5 104.62	5 105.08	0.46	泥质	层内	298	2.1	22	84	22	0.22
HD4-52	5 082.37	5 083.32	0.95	钙质	层间	312	1.2	163	31	163	1.03
	5 084.12	5 084.57	0.45	钙质	砂体间	302	1.5	163	41	163	1.13
	5 084.73	5 085.03	0.30	钙质	砂体内	299	3.6	163	44	163	2.59
	5 085.79	5 086.14	0.35	钙质	砂体内	304	4.0	163	39	163	3.11
	5 086.59	5 087.23	0.64	泥质	层间	314	1.8	163	29	163	1.57
	5 088.34	5 088.88	0.54	钙质	层内	290	2.7	163	53	163	1.63
	5 089.10	5 090.04	0.94	泥质	层间	287	2.5	163	56	163	1.40

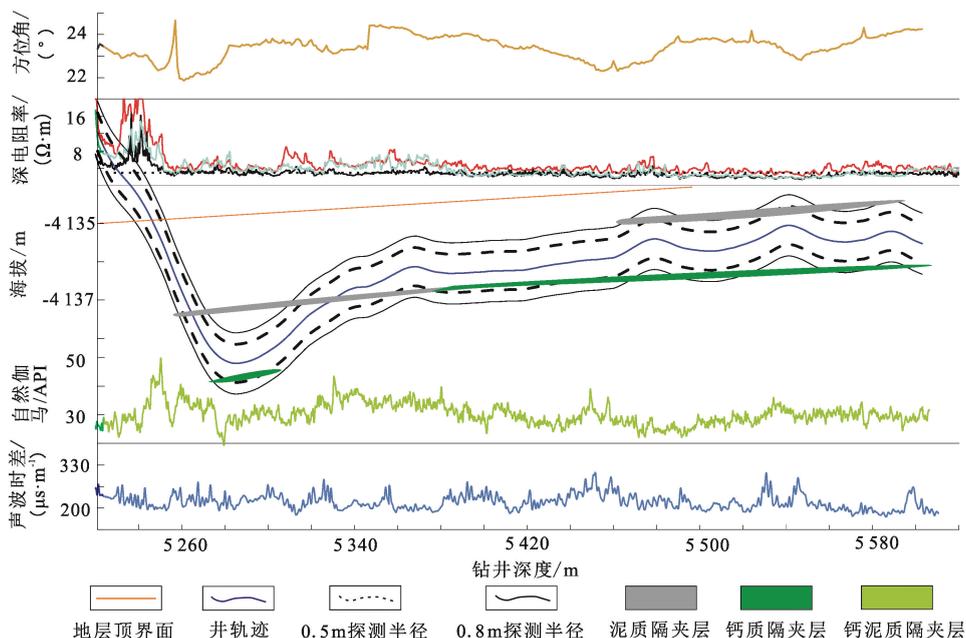


图 9 HD112H 井水平段隔夹层解释

Fig. 9 Interlayer interpretation of horizontal well of HD112H

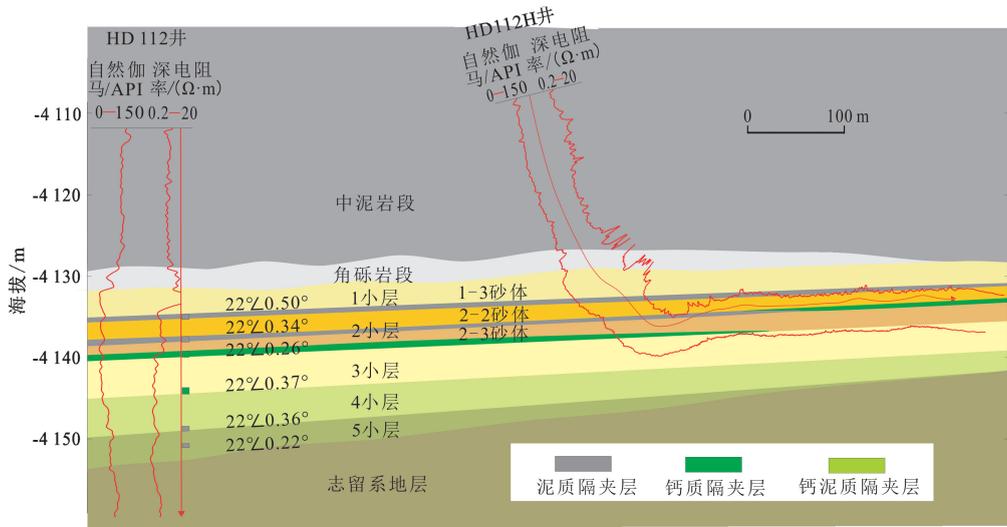


图 10 HD112H 导眼井与水平井井间隔夹层分布

Fig. 10 Interlayer distribution between pilot well and horizontal well of HD112H

生产动态上,HD112H 射开 2 小层的 2-2 和 2-3 砂体,后转注成为注水井,HD4-52H 射开 2 小层的 2-2 和 2-3 砂体,两口井开采相同的两个砂体,注水位置低于采油位置,呈现“低注高采”的特征。其中,HD112H 投放示踪剂后,HD4-52H 见效且速度较快,示踪剂在地层中流动的平均速度达 3.84 m/d,生产曲线上也呈现“J 型”含水率(4 个月内从 27.9% 上升至 55%)、“凸型”日产液的特征(图

11),说明注入水沿层突进,层间及砂体间隔夹层连续性好、延伸范围大,能够有效托住注入水,使其不在重力作用下向下流动,同时单砂体内隔夹层连续性差,对油水的迟滞作用弱(图 12)。进一步利用多井生产曲线来验证结果。HD112H 井的注水量变化与 HD4-52H 井的含水率变化较一致,两井响应间隔与示踪剂见效时间一致,说明油水在单层内顺畅流动且没有发生窜流。

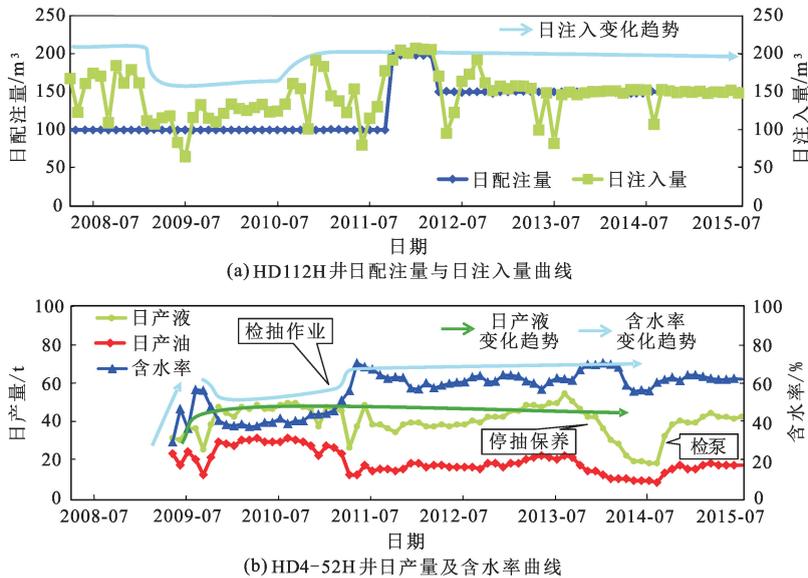


图 11 HD112H 井注水曲线及 HD4-52H 井生产曲线

Fig. 11 Water injection curve of well HD112H and production curve of well HD4-52H

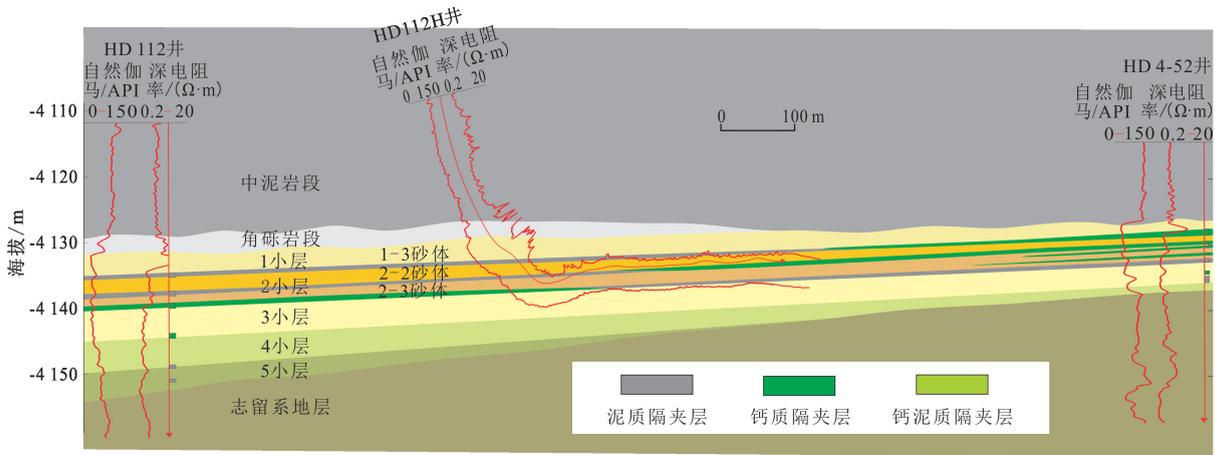


图12 HD112—HD112H—HD4-52井隔夹层分布

Fig. 12 Interlayer distribution of well HD112—HD112H—HD4-52

## 6 结论

(1) 研究区隔夹层存在泥质、钙质和钙泥质3种类型,包括层间、砂体间及单砂体内3个级次;优选了0.2 m窗长、0.02 m步长、30°探索角的参数处理倾向测井曲线,拾取直井隔夹层的产状;使用自然伽马与声波时差测井响应值确定水平井隔夹层的类型和分布范围,并利用深浅电阻率的相对变化量识别水平井隔夹层的位置。根据研究区射孔及见效情况、含水率与日产液曲线与隔夹层展布的关系,确立了隔夹层展布对应的流体运动规律及单井动态响应特征。

(2) 不同资料能够从不同角度对隔夹层的分布进行表征,多信息耦合预测方法强调的是各类资料的有机结合,通过“静态模式指导、多测井系列解释、产状指向、水平井标定、导眼井与水平井匹配、动态预测及验证”的流程,充分利用研究区的各种地质、测井及生产动态信息,逐步减少隔夹层分布预测的人为主观性和不确定性,使得预测结果更加客观及合理,为研究区下一步的剩余油挖潜提供依据。

## 参考文献:

- [1] 束青林. 孤岛油田馆陶组河流相储集层隔、夹层成因研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 100-103.  
SHU Qinglin. Interlayer characterization of fluvial reservoir in Guantao Formation of Gudao Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 100-103.
- [2] LYND S R, HAJEK E. Conceptual model for predicting mud stone dimensions in sandy braided-river reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(8): 1273-1288.
- [3] 袁新涛, 吴向红, 张新征, 等. 苏丹 Fula 油田辫状河储层内夹层沉积成因及井间预测[J]. 中国石油大学学

报(自然科学版), 2013, 37(1): 8-12.

YUAN Xintao, WU Xianghong, ZHANG Xinzhen, et al. Sedimentary origin and interwell prediction of interbeds in braided river reservoir, Fula Oilfield in Sudan [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(1): 8-12.

- [4] 国景星, 张勇. 梁11断块沙河街组二段河口坝砂岩体夹层特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 7-11.

GUO Jingxing, ZHANG Yong. Interlayer characteristics of estuary dam reservoir of the 2nd member of Shahejie Formation in L11 fault block [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 7-11.

- [5] 王越, 陈世悦, 李天宝, 等. 扒楼沟剖面二叠系辫状河砂体构型与非均质性特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 1-8.

WANG Yue, CHEN Shiyue, LI Tianbao, et al. Braided river sand body architecture and heterogeneity of Permian in Palougou outcrop [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 1-8.

- [6] 张国一, 侯加根, 吴小斌. 厚油层内部隔、夹层预测建模: 以 Velasquez 油田为例[J]. 科技导报, 2010, 28(23): 56-59.

ZHANG Guoyi, HOU Jiagen, WU Xiaobin. Modeling of inner interlayer prediction in thick oil layer: with Velasquez Oilfield as an example [J]. Science and Technology Review, 2010, 28(23): 56-59.

- [7] 赵永军, 舒晓, 胡勇, 等. 一种复杂曲流带储层三维构型建模新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 1-7.

ZHAO Yongjun, SHU Xiao, HU Yong, et al. A new 3D architecture modeling method of complex meander belt

- reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum( Edition of Natural Science), 2015,39(1):1-7.
- [8] 孙龙德,江同文,徐汉林,等.塔里木盆地哈得逊油田非稳态油藏[J].石油勘探与开发,2009,36(1):62-67. SUN Longde, JIANG Tongwen, XU Hanlin, et al. Unsteady reservoir in Hadson Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(1):62-67.
- [9] 李国永,徐怀民,刘太勋,等.地层倾角测井沉积构造与层序界面识别[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(6):62-66,207-208. LI Guoyong, XU Huaimin, LIU Taixun, et al. Sedimentary structure and sequence boundary identification based on formation diplog[J]. Journal of Southwest Petroleum University ( Science & Technology Edition), 2008, 30(6):62-66,207-208.
- [10] 赵洪,罗晓容,肖中尧,等.塔里木盆地哈得逊油田东河砂岩隔夹层特征及其石油地质意义[J].天然气地球科学,2014,25(6):824-833. ZHAO Hong, LUO Xiaorong, XIAO Zhongyao, et al. Interlayer features and petroleum geology meaning of Donghe sandstones in the Hadeson Oilfield[J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(6):824-833.
- [11] 陶小晚,李明,贾进华,等.塔里木盆地哈得逊油田东河砂岩油藏天然气地球化学特征及油藏类型研究[J].天然气地球科学,2014,25(1):70-78,123. TAO Xiaowan, LI Ming, JIA Jinhua, et al. Geochemical characteristics of natural gases and type study of Donghe sandstone Reservoir, Hadexun Oilfield in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(1):70-78,123.
- [12] 申银民,贾进华,齐英敏,等.塔里木盆地上泥盆统一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.
- [13] CATTANEO A, STEEL R J. Transgressive deposits: a review of their variability[J]. Earth-Science Reviews, 2003,62(3/4):187-228.
- [14] 韩如冰,刘强,江同文,等.钙质隔夹层特征、成因及分布:以塔里木盆地哈得油田东河砂岩为例[J].石油勘探与开发,2014,36(3):428-437. HAN Rubing, LIU Qiang, JIANG Tongwen, et al. Feature, origin and distribution of calcareous interlayers: a case of Donghe sandstone in Hade Oil Field, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 36(3):428-437.
- [15] 刘太勋,徐怀民,焦翠华,等.地层倾角测井资料在储集层构型研究中的应用[J].石油勘探与开发,2009,36(4):469-474. LIU Taixun, XU Huaimin, JIAO Cuihua, et al. Application of dip log data in sandstone reservoir architecture [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(4):469-474.
- [16] GUO Haimin, LIU Junfeng, DAI Jiakai, et al. Interpretation models and charts of production profiles in horizontal wells[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,52(1):159-164.
- [17] 徐寅,徐怀民,郭春涛,等.隔夹层成因、特征及其对油田开发的影响:以塔中地区海相砂岩储集层为例[J].科技导报,2012,30(15):17-21. XU Yin, XU Huaimin, GUO Chuntao, et al. Origin, characteristics and effects on oilfield development of interlayer of shore sandstone reservoir in Tazhong area [J]. Science & Technology Review, 2012,30(15):17-21.
- [18] 李维禄,徐怀民,王超,等.基于动、静模式约束的隔、夹层空间分布综合预测:以塔里木盆地东河塘油田井区为例[J].西北大学学报(自然科学版),2016,46(6):877-886. LI Weilu, XU Huaimin, WANG Chao, et al. Spatial distribution prediction of interlayers based on dynamic evaluation: a case of Donghe sandstone in Donghetang Oil Field, Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University ( Natural Science Edition), 2016,46(6):877-886.
- [19] 余义常,徐怀民,王超,等.动静结合的底水油藏隔夹层分布预测:以哈得逊油田东南井区为例[J].地质论评,2017,63(增1):109-110. YU Yichang, XU Huaimin, WANG Chao, et al. Dynamic-static integrated prediction method of interlayer distribution in bottom water reservoir: a case study of southeast region in Hadeson Oilfield[J]. Geological Review, 2017,63(sup1):109-110.

(编辑 修荣荣)