

文章编号: 1000-0747(2008)06-0680-05

南堡凹陷低电阻率油气层综合识别方法

周凤鸣^{1,2}, 司兆伟², 马越蛟², 徐风², 彭银辉², 贺忠文²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所; 2. 中国石油冀东油田公司)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司“渤海湾盆地滩海勘探井综合配套技术”项目

摘要: 渤海湾盆地南堡凹陷发育了大量低电阻率油气层, 岩性、物性、地层水性质的剧烈变化以及盐水钻井液深侵入是导致储集层电阻率大幅降低、油水层电性特征差异减小的两大主要因素。以南堡凹陷中浅层油气藏测井资料为基础, 充分利用自然伽马、自然电位等有效测井信息和MDT测井技术信息, 提出了以岩性识别为核心、以多参数交会图技术为手段、同时有效参考MDT非电阻率测井信息和气测录井等非测井信息的低电阻率油气层综合识别方法, $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$, $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$, $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)-C_3$ 含量交会图版的油水层解释符合率均达到96%以上。对南堡凹陷 $\times\times 3$ 井、 $\times\times 4$ 井、 $\times\times 5$ 井进行了油水层识别, 识别结论与试油试采结果一致, 证实了低电阻率油气层综合识别方法与评价结果的正确性。图10参10

关键词: 南堡凹陷; 低电阻率油气层; 常规测井信息; MDT测井; 气测录井; 综合识别方法

中图分类号: TE631.3

文献标识码: A

Integrated identification method for low-resistivity hydrocarbon layers in Nanpu Sag

ZHOU Feng-ming^{1,2}, SI Zhao-wei², MA Yue-jiao², XU Feng², PENG Yin-hui², HE Zhong-wen²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China)

Abstract: Plenty of low-resistivity oil/gas layers exist in Nanpu sag in Bohai Bay Basin. The intense variation of lithology, physical property and water property and the deep invasion of brine mud are two key factors for sharp decrease of resistivity and reducing differences of electric characteristics of oil and water layers. Based on the logging data of mid-shallow reservoir in Nanpu sag and using the effective logging information including natural gamma and SP logging and MDT technology, this paper proposes the integrated identification method for low-resistivity reservoirs which focuses on lithology identification and uses the multi-parameter crossplot and non-logging information such as MDT and gas logging. The correspondence rate for oil and water layer interpretation by $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$, $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$, $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)-C_3$ crossplot is over 96%. The oil/gas layer identification is made in wells $\times\times 3$, $\times\times 4$ and $\times\times 5$ in Nanpu sag, providing the same conclusions as the formation and production test and proving the accuracy of integrated identification and assessment for low-resistivity oil/gas layers.

Key words: Nanpu sag; low-resistivity hydrocarbon reservoir; normal logging information; MDT logging; gas logging; integrated identification method

1 问题的提出

本文描述的低电阻率油气层是指那些与典型高电阻率油气层有显著区别、测井曲线特征不明显、难以简单定性的油气层。南堡凹陷发育了大量此类低电阻率油气层, 其典型特征是电阻率低并与高电阻率油气层间互发育(见图1)。研究表明, 导致南堡凹陷部分油气层具有低电阻率特性的原因主要有两方面: 一是该区发育河流、扇三角洲、三角洲和水下扇等多种沉积体系, 河道摆动频繁, 多种沉积相带互相叠置, 储集层岩

性、物性变化都很大; 二是滩海勘探区域存在盐水钻井液严重污染。南堡凹陷岩层薄且层间变化大, 再加之盐水钻井液深侵入导致储集层电阻率大幅降低, 油水层电性特征差异减小, 因此, 简单的电阻率-孔隙度测井识别体系在该区具有很大的局限性。

本文在大量实例研究的基础上, 通过反复实践与总结, 充分应用自然伽马、自然电位等常规测井信息和MDT测井技术信息, 并参考气测录井等非测井信息, 利用多参数交会图尝试识别低电阻率油气层, 以期提高低电阻率油气层的识别能力和可信度。

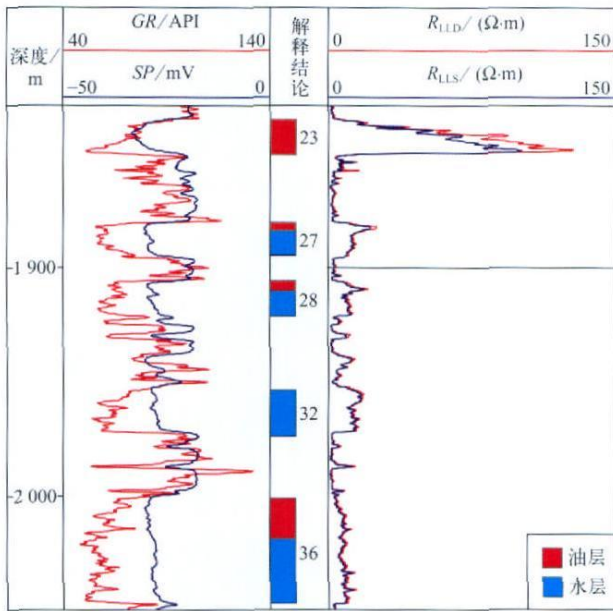


图1 南堡凹陷X×1井油、水层测井曲线

2 低电阻率油气层综合识别方法

根据南堡凹陷低电阻率油气层的成因机制,本文从岩性、地层水性质以及盐水钻井液侵入对电阻率的影响入手,通过对测井资料中含油信息的精细研究和定量提取,应用多参数交会图技术,实现储集层含油特征的显性化。同时,加大MDT测井新技术应用,并引入气测录井资料,提高低电阻率油气层识别和评价能力。

2.1 测井多参数交会图版识别技术

2.1.1 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版

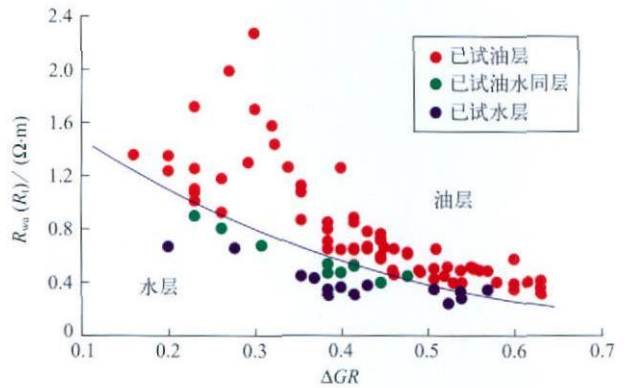
在储集层岩性与地层水性质相对稳定的情况下,尽管低电阻率油气层电阻率及电阻增大率较低,但只要在剖面上适当细化解释单元,在 $R_t-\Delta t$ 交会图上仍能较清楚地揭示低电阻率油气层。但南堡凹陷绝大部分区块岩性、物性变化剧烈,油气层电阻率分布范围较大,利用 $R_t-\Delta t$ 交会图版不能有效地区分油、水层。基于储集层岩性越细,油气层电阻率就越低^[1]的认识,本文采用 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版,利用自然伽马测井判别储集层岩石粒度的层间变化,充分利用电阻率测井值 R_t 计算视地层水电阻率 $R_{wa}(R_t)$,解决了油层和水层的电性差异区分问题,从而解决了岩性变化剧烈地区的油气层识别难题。其中:

$$R_{wa}(R_t) = R_t \phi^n \quad (1)$$

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (2)$$

图2为南堡凹陷某区块 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版。由图可知,在储集层 ΔGR 值变化不大情况下,油

层 $R_{wa}(R_t)$ 明显高于水层,且随着 ΔGR 增大,油、水层的 $R_{wa}(R_t)$ 值逐渐降低。该图版的油、水层解释符合率达96.8%,较好地解决了将不同岩性油、水层进行对比分析而导致的油、水层误判问题,适用于淡水钻井液条件下储集层岩性、物性变化较大而地层水性质相对稳定的储集层含油性识别。

图2 南堡凹陷某区块 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版

2.1.2 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图版

在盐水钻井液条件下,钻井液滤液矿化度升高以及浸泡时间增长都会使油气层电阻率大幅度降低,油、水层电性差异显著减小,甚至消失。在这种情况下, $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 图版上部分油气层电阻率大幅度降低而与水层特征重叠,不能有效区别油、水层,需增加新的信息提高图版的识别能力。

岩石物理实验表明,流体性质对泥质砂岩薄膜电位具有显著影响,随含油饱和度的增加薄膜电位数值也会相应变大^[2],这为自然电位测井资料的应用提供了理论基础。但必须注意的是,自然电位负异常指示泥质砂岩储集层含油性具有明显的局限性^[3-5],其异常幅度大小不能唯一地指示地层含水性和含油性的变化。幸运的是南堡凹陷地层水矿化度较低,在盐水钻井液测井环境下,自然电位呈正异常。虽然含油饱和度增大及地层水矿化度升高均会使自然电位正异常幅度降低,但利用视地层水电阻率却可以将其区分开来。大量试油和测井资料的对比说明,在自然电位正异常幅度较低的情况下,较高的视地层水电阻率可以指示含油储集层。因此,本文在 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版基础上引入自然电位资料,形成了 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图版,利用自然电位计算的视地层水电阻率 $R_{wa}(SP)$ 指示地层水性质及含油性变化^[6-8],其中:

$$R_{wa}(SP) = 10^{SP/k} R_{mf} \quad (3)$$

图3为南堡凹陷某区块东营组盐水钻井液条件下

$R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 与 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图版的对比。由图 3a 可知,在盐水钻井液条件下 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 图版对部分油气层和水层几乎没有分辨能力,但通过合理应用自然电位测井信息,具有 $R_{wa}(SP)$ 信息的图 3b 有效解决了储集层视电阻率受盐水钻井液严重影响情况下的

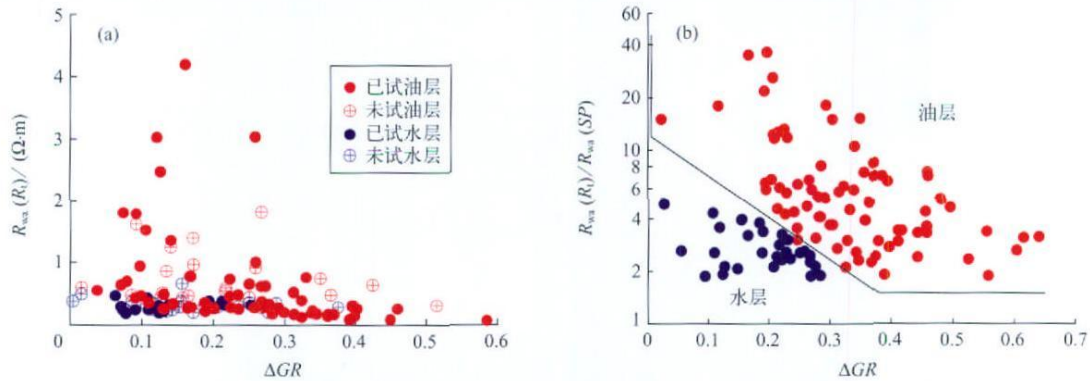


图 3 南堡凹陷某区东营组 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 与 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图版对比

2.2 MDT 测井快速、直观识别技术^[9,10]

MDT 测井采用点测、泵出、光谱分析、取样等技术研究储集层及流体性质,是一项非电阻率测井技术,为低电阻率油气层提供了直接、快捷、准确的识别手段。光谱分析(OFA)是 MDT 测井关键模块之一,成果图主要包括泵出时间道、含气指示道、流体

低电阻率油气层识别难题,该图版解释符合率为 98.7%。不仅如此,根据 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图版的工作原理,通过合理设计钻井液电阻率,该识别图版同样适用于南堡凹陷浅层(明化镇组、馆陶组)地层水矿化度层间变化较大情况下储集层含油性判别。

分析道、流体电阻率道及色谱分析道。含气指示道中红色越深表示气油比越高;流体分析道中绿色所占面积越大说明含油饱和度越高,蓝色面积越大则说明含水饱和度越高。图 4 为基于南堡凹陷测井、测试等资料总结的 MDT 测井 OFA 分析典型油气层、油层、油水同层、水层图谱。

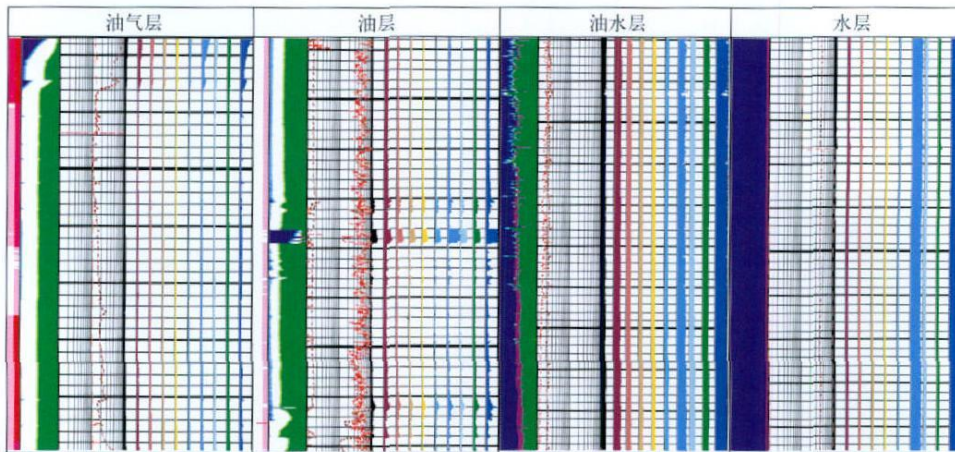


图 4 南堡凹陷 MDT 测井 OFA 分析典型图谱

2.3 综合识别评价技术^[10]

实时钻井过程中的岩屑、气测录井等非测井手段从不同角度揭示了储集层的含油气特征,对于油气发现和评价具有重要参考价值,尤其是对非典型低电阻率油气层的识别具有重要的参考价值。将储集层测井响应特征与气测录井油气显示结合,可增强低电阻率油气层识别的可信度。

测井资料与气测录井资料有机结合的关键是明确相应的油气敏感指标。针对南堡凹陷的盐水钻井液环

境,根据上文所述的 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)-\Delta GR$ 交会图,可以确定 $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)$ 作为油气层测井敏感指标。同时通过大量统计分析,认为针对该区中深层特定的油品性质,气测录井的 C_3 、 iC_4 、 nC_4 全脱组分指标能够较准确地反映储集层的含油性。因此,本文利用 $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)$ 与 C_3 、 iC_4 、 nC_4 含量交会图版将测井信息与气测录井信息结合起来。图 5 为南堡凹陷某区东营组盐水钻井液条件下 $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)$ 与气测录井 C_3 组分

含量交会图版, 图版解释符合率达 97.3%。

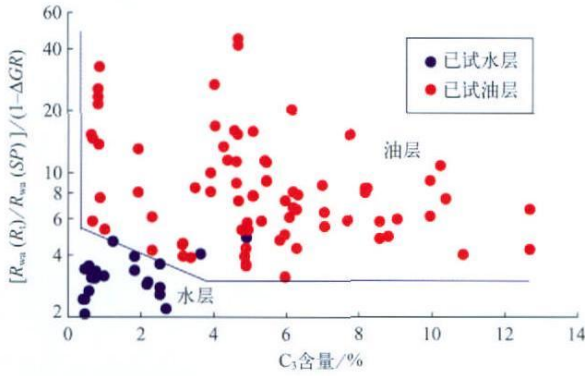


图5 南堡凹陷某区块 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)/(1-\Delta GR)-C_3$ 交会图版

3 应用实例

图6为南堡凹陷2005年浅层开发井××3井(淡水钻井液)测井曲线。33号、39号层厚度较薄,但孔隙度基本相当,电阻率均为 $10 \Omega \cdot m$ 左右,简单的定性解释极易误判。经分析后认为:33号层岩性更细,束缚水含量高,依据 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版解释为油层,39号层为水层(见图7)。试油结果揭示,39号层日产水 $33.8 m^3$,无油;而33号层日产油 $12.7 t$,水 $0.3 m^3$,说明了以岩性评价为核心的油气层识别思路的正确性。

图8为南堡凹陷2005年重点探井××4井(盐水钻井液)测井综合成果图。由图可见,38号、42号层电阻率仅为 $5 \sim 6 \Omega \cdot m$,而邻近的40号油层电阻率为 $50 \Omega \cdot m$ 。若仅按电阻率特征分析,38号、42号层极易解

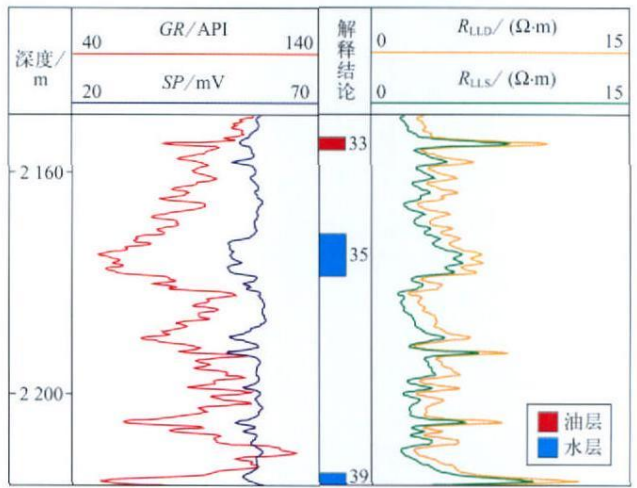


图6 南堡凹陷××3井测井曲线

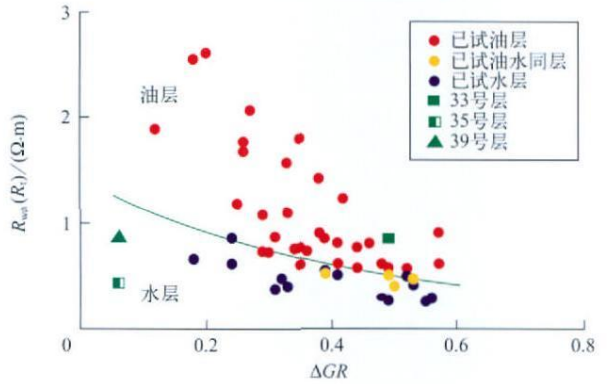


图7 南堡凹陷××3井 $R_{wa}(R_t)-\Delta GR$ 交会图版解释结果

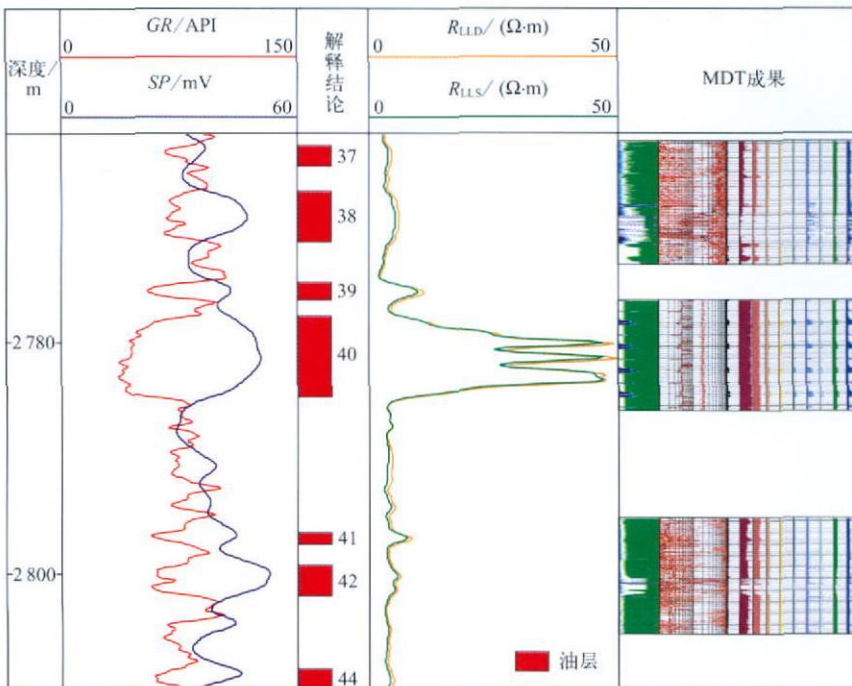


图8 南堡凹陷××4井 MDT 测井综合成果

释为水层,但MDT光谱分析结果显示:38号、42号层与邻近的40号层具有同样的含油性,MDT取样进一步证实了38号、42号层的含油性。

图9为2006年南堡凹陷重点探井××5井(盐水钻井液)测井曲线。由于该井东营组岩性细、地层水矿化度略高以及盐水钻井液影响,油气层电阻率为5~7 $\Omega\cdot\text{m}$,电阻增大率为1.2左右,仅依据电阻率、孔隙度组合对储集层含油性识别难度非常大。但充分应用自然伽马、自然电位测井信息后,依据 $R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)$ - ΔGR 交会图版(见图10a),将24-28号层定性为

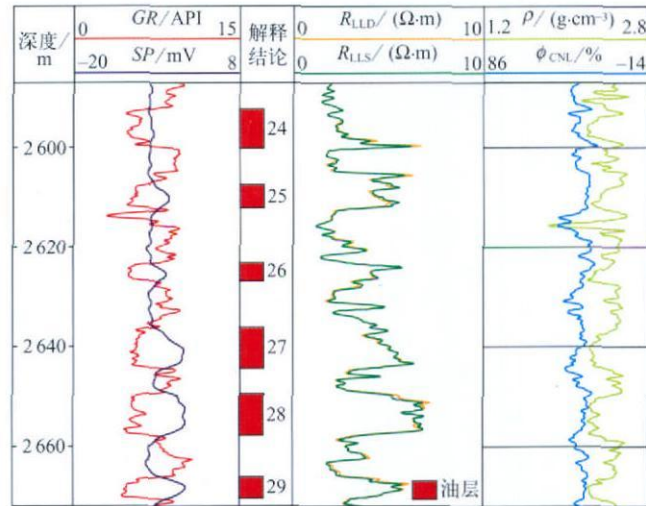


图9 南堡凹陷××5井油层解释成果

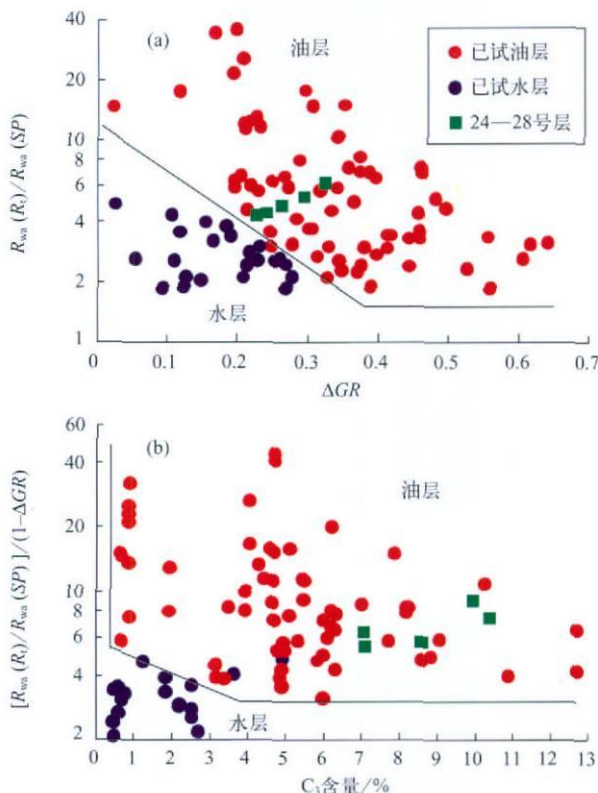


图10 南堡凹陷××5井交会图版解释结果

油层;在 $[R_{wa}(R_t)/R_{wa}(SP)]/(1-\Delta GR)$ - C_3 含量解释图版(见图10b)上,24-28号层也位于典型油层区域,气测录井信息的应用更增加了油气层评价的可信度。24-28号层合试日产油84.5 t,无水,证实了该井油气层综合识别与评价结果的正确性。

4 结论

在南堡凹陷特定的低矿化度地层水环境下,油气层电阻率随着岩石粒度的减小而降低,盐水钻井液钻井使油、水层电性特征差异进一步减小。基于自然伽马测井资料的粒度变化评价是南堡凹陷低电阻率油气层识别的基础,而自然电位测井信息的合理应用是盐水钻井液钻井油气层识别的关键。此外,非电阻率测井技术及综合气测录井信息的应用可以大大增强低电阻率油气层的识别能力,提高评价的可信度。

符号注释:

R_{wa} ——视地层水电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; R_t ——地层电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; GR ——自然伽马,API; Δt ——声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; ϕ ——孔隙度,%; m ——胶结系数; f ; GR_{\min} ——自然伽马最小值,API; GR_{\max} ——自然伽马最大值,API; SP ——自然电位,mV; k ——扩散-吸附电位系数,mV; R_{mf} ——泥浆滤液电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; R_{LLD} ——深侧向电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; R_{LLS} ——浅侧向电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; ϕ_{CNL} ——补偿中子孔隙度,%; ρ ——岩石密度, g/cm^3 。

参考文献:

- [1] 周海民,周凤鸣.冀东油田复杂砂岩储层测井评价对策与实践[J].石油学报,2006,27(3):138-142.
- [2] 周凤鸣,程相志,周灿灿.泥质砂岩薄膜电位与含油性的关系及其在测井中的应用[J].测井技术,2005,29(4):302-304.
- [3] 李薇,田中元,闫伟林,等.Y油田低电阻率油层形成机理及RRSR识别方法[J].石油勘探与开发,2005,32(1):60-62.
- [4] 谢关宝,范宜仁.储层泥浆侵入深度预测方法研究[J].测井技术,2006,30(3):240-241.
- [5] 毛志强,龚富华,刘昌玉,等.塔里木盆地油气层低阻成因实验研究[J].测井技术,1999,23(4):243-245.
- [6] 孙建孟,陈钢花,杨玉征,等.低阻油气层评价方法[J].石油学报,1998,19(3):83-88.
- [7] 张龙海,代大经,周明顺,等.成像测井资料在湖盆沉积研究中的应用[J].石油勘探与开发,2006,33(1):67-71.
- [8] 康俊佐,邢光龙,杨善德.多传播电阻率测井的探测能力与资料处理方法[J].石油勘探与开发,2006,33(3):345-350.
- [9] 张龙海,周灿灿,刘国强,等.孔隙结构对低孔低渗储集层电性及测井解释评价的影响[J].石油勘探与开发,2006,33(6):671-676.
- [10] 李长喜,李潮流,周灿灿,等.淡水钻井液侵入对双感应和双侧向测井响应的影响[J].石油勘探与开发,2007,34(5):603-608.

第一作者简介:周凤鸣(1966-),男,河北徐水人,中国石油冀东油田公司高级工程师,现为中国科学院广州地球化学研究所在读博士研究生,主要从事测井解释评价方法和应用方面的研究。地址:河北省唐山市新华西道,中国石油冀东油田公司勘探开发研究院,邮政编码:063004。E-mail:zfm@petrochina.com.cn

收稿日期:2008-03-19 修回日期:2008-08-11

(编辑 黄昌武 绘图 李秀贤)