

致密砂岩气藏水平井测井评价

——以鄂尔多斯盆地大牛地气田X井区为例

魏修平¹,胡向阳¹,李浩¹,赵冀²,赵连水³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石化集团公司生产经营管理部,北京 100729;

3. 中国石油大港油田滩海开发公司,天津 300280)

摘要:致密气藏中有相当一部分水平井测井系列少、评价难度大,如何利用有限的测井资料有效开展水平井测井评价,对气藏高效开发具有重要意义。以鄂尔多斯盆地大牛地气田X井区为例,结合地质和生产动态等资料,利用水平井仅有的随钻伽马测井和气测录井资料开展测井评价研究,形成了基于伽马峰值和全烃有效指示因子的双参数水平井产能评价方法,有效提高了水平井产能评价精度,为同类气藏水平井测井评价提供了借鉴。研究认为,基于随钻伽马峰值分析能够有效对储层进行评价,大牛地X井区山西组和下石盒子组高产井目的层段随钻伽马值的分布均表现出了明显的单峰特征,而低产井则表现为双峰或不具有明显的峰值特征,主要与水平井钻遇砂体的稳定性有关。利用X井区气测录井资料,构建了基于全烃有效指示因子用于评价单井产能,并建立了山西组和下石盒子组水平井经济产能的气测录井指标。综合上述两种方法,形成双参数水平井产能评价方法,准确评价了X井区水平井单井产能。

关键词:水平井;全烃值;随钻伽马;测井评价;致密砂岩气藏;山西组;下石盒子组;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P631.8

文献标识码:A

An evaluation on logging data of horizontal wells in tight sand gas reservoir

—A case study of drilling sector X in Daniudi gas field, Ordos Basin

Wei Xiuping¹, Hu Xiangyang¹, Li Hao¹, Zhao Ji², Zhao Lianshui³

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Department of Production, Operation & Management, SINOPEC Group, Beijing 100729, China;

3. Neritic Development Company of Dagang Oilfield Branch Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: There are quite a few horizontal wells featuring insufficient logging suite, and thus are difficult to evaluate. However, the way to effective evaluation on horizontal wells with limited logging data is of great significance to successful development of gas reservoirs. We propose a productivity evaluation method based on two parameters, which are the peak value of Gamma ray logging and the effective total hydrocarbon indicator, because for many horizontal wells in the drill sector X of Daniudi gas field in Ordos Basin, only Gamma LWD and gas logging data are available. In addition, the method proposed also employs some of the dynamic geological and production data. It effectively improves the accuracy of productivity evaluation on horizontal wells, and may be applied to logging evaluation on horizontal wells in gas reservoirs of similar type. The study shows that the Gamma peak value is an effective indicator of reservoir quality: for the reservoirs in Shanxi and Lower Shihezi Formations of the Daniudi drilling sector X, the LWD Gamma data of high production wells are characteristic of single peak statistical distribution, while that of low production wells shows double peaks or no obvious peak, which is largely related to the stability of sand bodies encountered in drilling wells. Furthermore, using the gas logging data in the drilling sector X, we evaluated the single-well productivity based on the effective total hydrocarbon indicator, and propose a gas logging indicator for commercial productivity of horizontal wells in the Shanxi and Lower Shihezi Formations. By integrating these two indicators, we established the dual-parameter evaluation method for horizontal well

收稿日期:2018-10-17;修订日期:2019-05-30。

第一作者简介:魏修平(1987—),女,工程师,储层测井解释与评价。E-mail:weixp.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05048003-004)。

productivity, and made an accurate prediction on the single-well productivity of the horizontal wells in the drilling sector X.

Key words: horizontal well, total hydrocarbon value, Gamma logging while drilling, well logging evaluation, tight sand gas reservoir, Shanxi Formation, Xiashihezi Formation, Daniudi gas field, Ordos Basin

致密砂岩气简称致密气,是指赋存在孔隙度小于10%、渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中且含气饱和度和低于60%的非常规油气资源^[1-3],一般要经过大规模压裂或特殊采气工艺技术才具有开采价值^[4-5]。中国致密气资源较为丰富,截至2016年底,中国致密气地质资源量 $22.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中技术可采资源量 $11.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,广泛分布在鄂尔多斯、四川、松辽、渤海湾等多个盆地,其中约有90%分布在鄂尔多斯盆地和四川盆地^[6-9]。在国内外致密气开发过程中,水平井开发技术作为提高单井产量和油气采收率的有效手段之一,得到了广泛的应用^[10-13],尤其是水平井测井解释及评价技术,在储层识别、产能评价等方面发挥了重要作用^[14-15]。然而,受储层地质条件、环境以及人为因素等影响,部分地区相当一部分水平井测得的测井系列很少,致使较少的测井信息很难对地下储层复杂的地质情况做到准确评价,严重影响了测井评价应用效果^[16]。为此,本文以鄂尔多斯盆地大牛地气田X井区为例,通过大部分水平井仅测得的随钻伽马和气测录井两种系列,充分结合地质资料,挖掘地质信息与测井响应之间的关系,在此基础上开展测井评价研究,成果对指导致密气藏水平井开发具有重要意义。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地构造上位于华北地台西部,是一个长期稳定发育的多旋回大型克拉通叠合盆地,其下部是古生代一早、中三叠世地层,在其上部不整合地覆盖有晚三叠世一早白垩世沉积(图1)^[17-19]。盆地可分为伊盟北部隆起、伊-陕斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带、天环坳陷及西缘冲断带等6个一级构造单元^[20-21]。大牛地气田位于鄂尔多斯盆地一级构造单元伊陕斜坡的东北部,主要目的层段为二叠系山西组和下石盒子组,对应一套三角洲-辫状河沉积体系^[22-24]。山西组储层岩性主要为中-粗岩屑砂岩,少量中-粗岩屑石英砂岩,平均孔隙度5.6%,平均渗透率 $0.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;下石盒子组储层岩性主要为中-粗岩屑砂岩,其次为石英砂岩和长石岩屑砂岩,平均孔隙度9.5%,平均渗透率 $0.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,均为典型的致密储层^[25-27]。

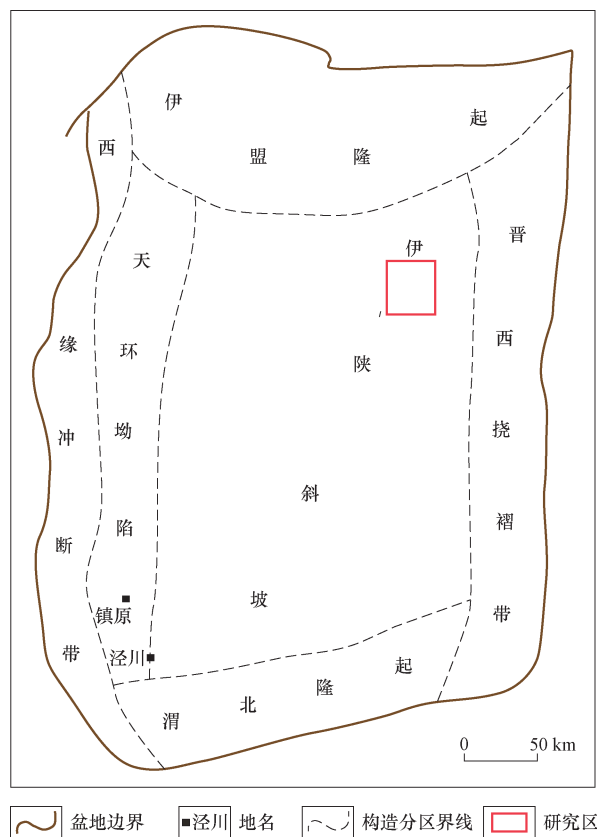


图1 鄂尔多斯盆地构造划分及研究区位置

Fig. 1 The structural units of Ordos Basin and the location of the study area

大牛地气田自2005年开始规模开发,勘探方面具有单层面积大、丰度低、自然产能低等特点。近年来随着水平井技术的应用,部分未动用储量达到经济开发规模,开发方式转变为以水平井为主,但水平井钻探风险依然很大。如X井区,以单井无阻流量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为水平井开发的经济界限,2013年之前已钻的252口水平井中仅有138口达到或超过该界限,成功率仅为54.8%。为了提高开发效果,利用仅有的随钻伽马测井及全烃气测曲线开展测井评价研究以指导水平井开发显得极为必要。研究表明,影响该区水平井测井评价的主要因素包括:一是水平段钻遇的储层岩性及岩石类型复杂,影响储层识别精度;二是通过水平段随钻伽马曲线可对储层岩性进行分析,但难以支持对储层物性和电性的判断,进而影响储层含气性的解释;三是受储层含油气性、压力、孔隙度以及厚度等因素影响,利用全烃气测曲线识别气层存在难度。针对致密气藏水平井测井系列少进而影响测井评价的

难题,亟需一种利用有限的曲线判断水平井是否具备经济产量的测井分析及评价方法。

2 随钻伽马测井储层评价

结合气井生产动态及储层分析测试资料,对水平段伽马数据进行统计分析,就可以建立储层岩性、物性及气井产量之间的对应关系,进而为储层评价提供依据。水平井钻遇目的层的岩性及物性一般相对较好且较为稳定,但在局部井段岩性和物性会存在一定变化,干扰目的层段储层的整体评价结果。在这种情况下,通过统计目的层段随钻伽马测井值的分布,就可以分析目的层段伽马值的整体分布特征,通过与其他资料进行对比分析剔除伽马值异常部分,可得到储层段伽马值分布。

根据参与大牛地气田方案编制的气藏工程和经济评价研究人员给出的经济界限,以水平井无阻流量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为高产井和低产井的分界线,对 X 井区高产井和低产井目的层段随钻伽马值进行统计分析并绘制伽马值分布频率图可知,高产井(无阻流量大于

$6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)如 A1 井(目的层段下石盒子组,测试无阻流量 $13.582 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、A2 井(目的层段山西组,测试无阻流量 $23.273 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、A3 井(目的层段山西组,测试无阻流量 $55.693 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)伽马值分布均表现为明显的单峰分布特征,伽马峰值分别为 46 API、30 API 和 42 API(图 2a—c)。从 A2 井水平段伽马曲线与实钻岩性剖面(图 3a)中可以看出,目的层段主要发育稳定的中砂岩,自然伽马曲线较平稳,数值集中度高。低产井(无阻流量小于 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)如 A4 井(目的层段山西组,测试无阻流量 $0.063 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、A5 井(目的层段山西组,测试无阻流量 $3.125 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、A6 井(目的层段山西组,测试无阻流量 $3.971 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)伽马值分布均表现为具有双峰或不具有明显的峰值特征,其中 A4 井伽马值表现为明显的双峰特征,峰值为 26 API 和 86 API;A5 井伽马值为相对较弱的双峰特征,最大峰值为 90 API;A6 井则不具有明显的峰值特征(图 2d—f)。A6 井目的层段实钻岩性剖面显示发育中砂岩和泥质粉砂岩,自然伽马曲线上下跳跃明显,在砂岩段非常不稳定,岩性具有较强的非均质性(图 3b)。

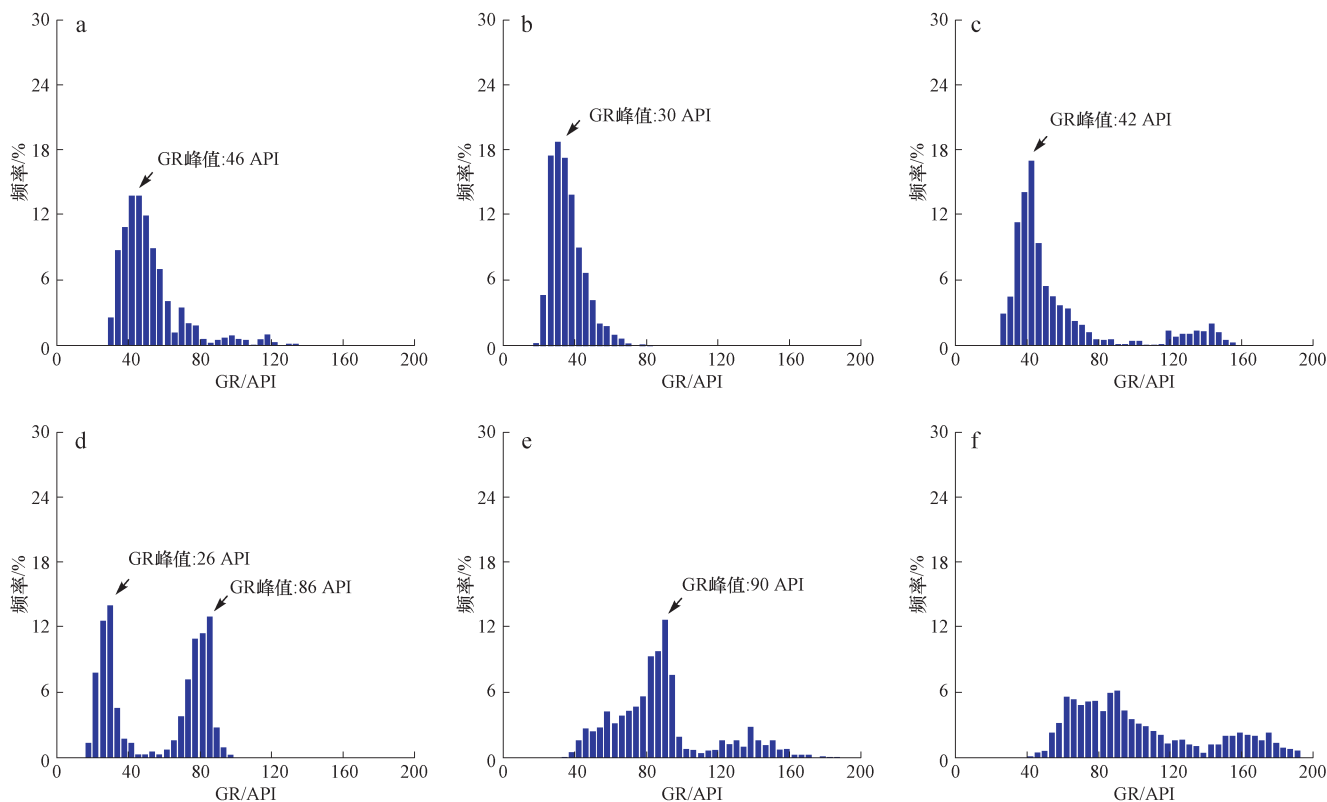


图2 大牛地气田 X 井区不同井随钻伽马值分布频率

Fig. 2 The frequency distribution of LWD Gamma data in different wells of the drilling sector X in the Daniudi gas field

a. A1 井,单峰特征,峰值为 46 API;b. A2 井,单峰特征,峰值为 30 API;c. A3 井,单峰特征,峰值为 42 API;d. A4 井,双峰特征,峰值分别为 26 API 和 86 API;e. A5 井,单峰特征,峰值为 90 API;f. A6 井,没有明显的峰值特征

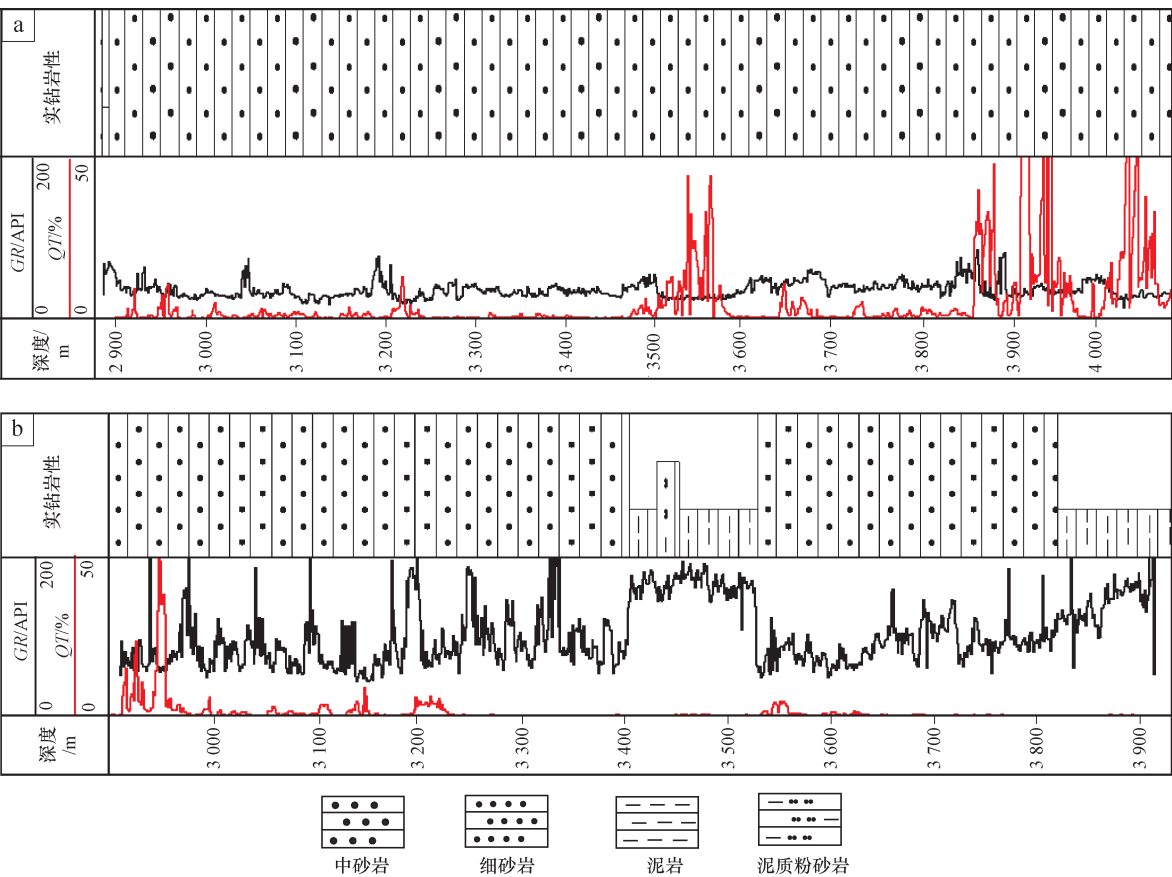


图 3 大牛地气田 X 井区 A2 井(a)和 A6 井(b)水平段测井剖面

Fig. 3 The logging correlation of the horizontal sections in Wells A2(a) and A6(b) in the drilling sector X in the Daniudi gas field

通过对 X 井区 30 余口井下石盒子组和山西组水平段随钻伽马值分别进行统计可知,高产井均表现出了明显的单峰分布特征,且单峰值分布在一定范围之内,而低产井则表现为具有双峰或不具有明显峰值的特征。分析表明,高产井和低产井随钻伽马值的分布表现为各不相同的特征的原因主要为:高产井水平井段钻遇的砂体大多较为稳定连续,储层物性较好,测井值对于岩石骨架及流体的响应清楚,因此测井数据较为收敛;低产井钻遇的目的层段砂体分布较为复杂,稳定性较差,岩性和物性分布变化较大,随钻伽马值响应特征也较为复杂,稳定连续。统计结果显示,高产井和低产井目的层段在下石盒子组和山西组时,其伽马峰值分布范围略有差别(表 1),其中高产井水平段分布在下石盒子组时伽马峰值分布在 40 ~ 78 API(图 4),在山西组时为 30 ~ 78 API,为该区域储层段对应伽马测井值的主要分布范围;低产井水平段分布在下石盒子组伽马峰值分布在小于 40 API 和大于 78 API 的范围内,在山西组时为小于 30 API 和大于 78 API 的范围内,为非储层段对应的伽马测井值分布范围。

表 1 大牛地气田 X 井区高、低产井储层段伽马峰值分布特征

Table 1 Distribution characteristics of Gamma peak values in reservoirs of high and low production wells in the drilling sector X in the Daniudi gas field

井别	层位	峰值形态	GR 峰值/API
高产井	下石盒子组	单峰	40 ~ 78
	山西组	单峰	30 ~ 78
低产井	下石盒子组	双峰或没有明确峰值	< 40 或 > 78
	山西组	双峰或没有明确峰值	< 30 或 > 78

既然不同井 GR 值的分布特征及峰值大小与水平井产能的高低有关,那么 GR 峰值的分布受什么因素控制呢? 依据高、低产井岩心与测井相互标定,并结合镜下分析资料可知,伽马值对储层成岩相具有一定的指示性,进而可以反应储层质量。以研究区下石盒子组为例,储层主要为岩屑石英砂岩和石英砂岩,伽马值对储层中硅质胶结物、钾长石溶蚀作用和岩屑含量等响应明显^[28-29]。研究表明,当 GR < 40 API 时,反映储层岩石成分中石英含量较多,岩屑含量较少,硅质胶结物主要以石英次生加大边的形

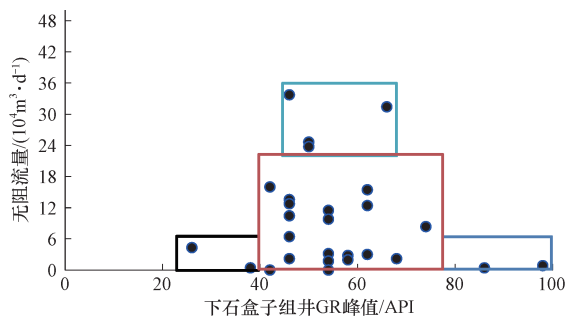


图4 大牛地气田X井区下石盒子组各井无阻流量与伽马峰值交会图

Fig. 4 The cross correlation showing the open flow capacity and Gamma peak value of the Lower Shihezi Formation in the drilling sector X in the Daniudi gas field

式存在,它是导致砂岩致密化的重要成岩因素,指示储层质量较差,产能低;当 $40 < GR/API < 78$ 时,储层岩性主要为岩屑石英砂岩,原生孔隙和次生孔隙均较发育,决定了储层储集能力较好,本区大量的岩相学证据和物性特征表明,次生孔隙主要是长石(尤其是钾长石)的溶蚀造成的,钾长石大规模溶蚀会造成钾含量的减少,导致 GR 值相对降低;当 $GR > 78$ API 时,储层岩性主要为岩屑砂岩,岩屑含量高,成分复杂,既包括沉积岩岩屑(主要为黏土岩),也包括变质

岩(以石英岩为主)和火成岩岩屑(以中酸性喷出岩为主),岩屑大大降低了储层的有效孔隙度,储层整体物性条件偏差。

通过资料较全的直井生产井也可以对上述认识进行验证。从盒1段4口直井自然伽马与岩心分析孔隙度(Φ)、渗透率(K)交会图中可以看出(图5a, b),盒1段储层孔隙度和渗透率在 GR 值为 40 API 附近和接近 78 API 时相对较低,GR 值在 45 ~ 75 API 时相对较高,尤其当 GR 值在 50 API 左右时,孔隙度和渗透率值最高,物性最好。从山2段6口直井自然伽马与岩心分析孔隙度、渗透率交会图中可看出(图5c, d),山2段储层孔隙度渗透率在 GR 值大于 70 API 时相对较低,当 GR 值在 40 ~ 70 API 时相对较高,尤其是当 GR 值在 40 API 左右时,孔渗值最高,物性最好。该区直井 X1 井,下石盒子组测试层段 2 658 ~ 2 666 m 深度储层岩性主要为(含砾)粗砂岩、中砂岩,该储层段 GR 值分布在 43.385 ~ 73.811 API,平均值为 55.317 API,镜下观察长石溶蚀严重,测井解释储层孔隙度分布在 6.62% ~ 12.38%,平均为 8.82%,渗透率分布在 $(0.347 \sim 5.45) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,测试该井无阻流量为 $7.4978 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为高产井(图6)。

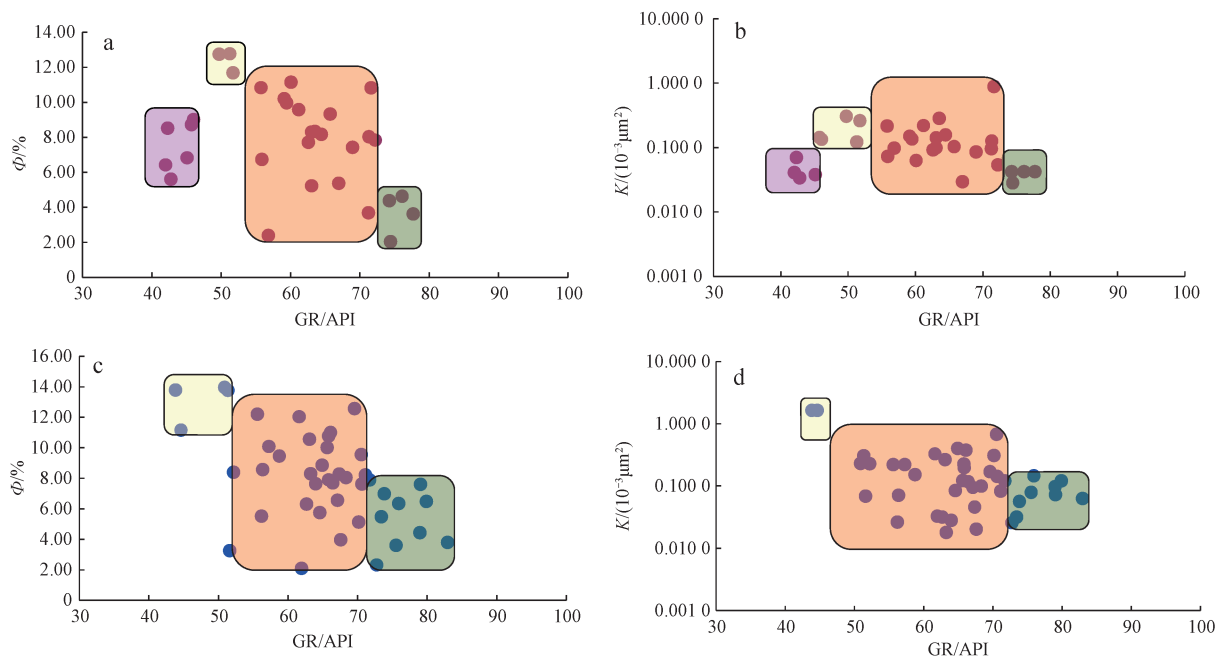


图5 大牛地气田X井区盒1段和山2段 GR 值与孔隙度(Φ)和渗透率(K)交会图

Fig. 5 The cross correlation of GR, and porosity(Φ) and permeability(K) in the 1st and 2nd members of the Lower Shihezi Formation in the drilling sector X in the Daniudi gas field

- a. 盒1段 GR 值与岩心分析孔隙度交会图; b. 盒1段 GR 值与岩心分析渗透率交会图; c. 山2段 GR 值与岩心分析孔隙度交会图; d. 山2段 GR 值与岩心分析渗透率交会图

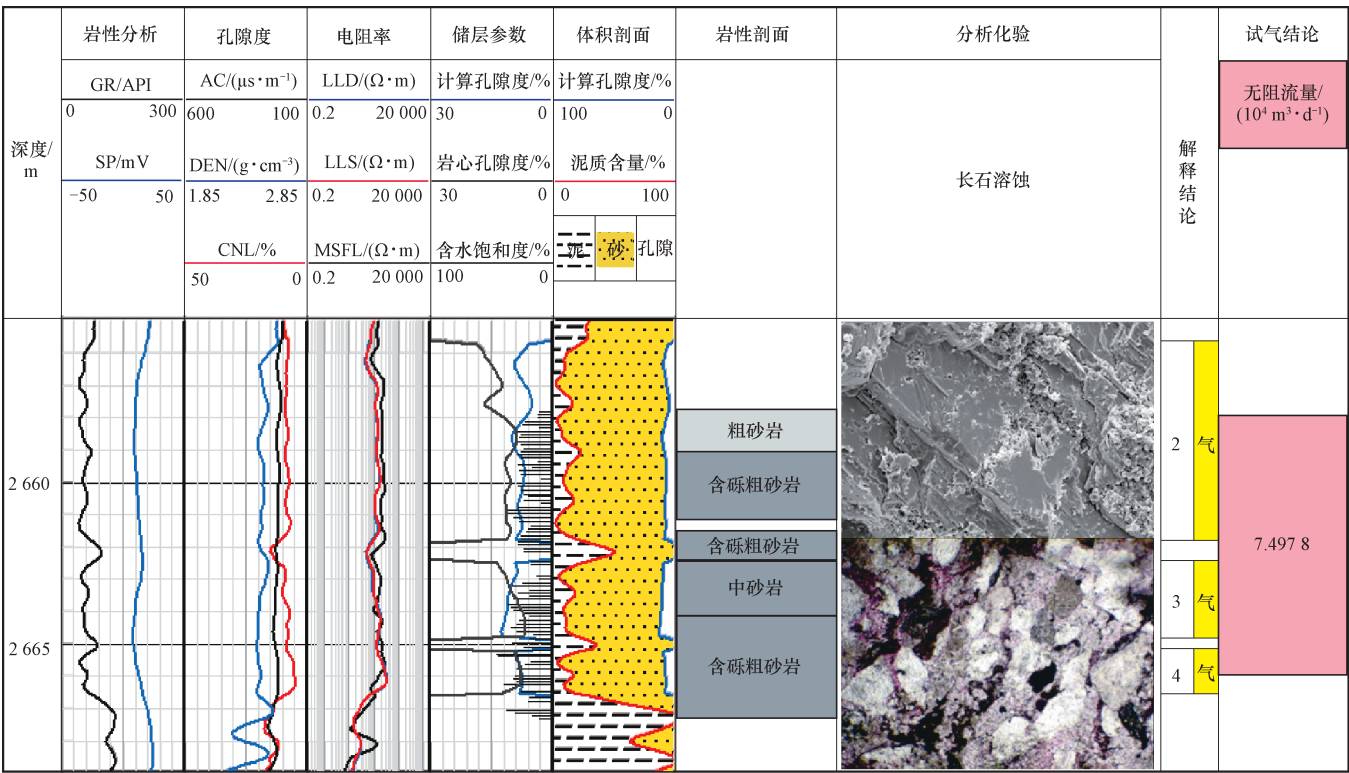


图 6 大牛地气田 X 井区直井 X1 井下石盒子组单井地层综合图

Fig. 6 The single-well stratigraphic composite diagram of vertical Well X1 in the Lower Shihezi Formation in the drilling sector X in the Daniudi gas field

3 气测录井产能评价

气测录井是一种直接显示气含量高低的测井方法。它通过在地面检测返出泥浆的烃含量及其各组分的含量,能够对地下天然气中的各种成分和含量进行准确测量,因此可以用全烃含量定性判断气层。该技术对发现和评价地下储层中的油气资源具有非常重要的作用^[30]。一般情况下,气测录井全烃值越高,储层含气性越好,但在地质、工程及钻井液等因素的影响下,会存在某些层段气测结果与生产测试结果相矛盾的现象,如局部层段测量的全烃值较高,但测试结果较差,可能原因一是由于该储层段流体以水为主,但溶解一定量的天然气所导致,二是由于钻头钻进过程中如果井眼过大会引起储层局部破碎较为严重,泄气量增加,导致进入钻井液的含气量增多,引起气测全烃值增加^[31]。为了消除气测录井局部井段测井数据失真对水平井单井产能评价结果的影响,本文尝试从统计学角度出发,提出了基于全烃有效指示因子的单井产能评价方法。

第一步,统计并绘制水平井目的层全井段的气测录井全烃值的频率直方图,分析单井产气量与气测录

井全烃值分布之间的关系。如图 7 所示,横坐标为气测录井全烃值($QT, \%$),纵坐标为频率值($Fre, \%$)。在气测录井曲线中,全烃值 QT 以每米一个数据点进行等距检测,因此在 QT 频率直方图中,某一 QT 值所对应的频率值反映的是目的层段中拥有该 QT 值储层厚度所占的比例;当频率值大于 0 所对应的 QT 值分布范围越宽,则说明该井含气性较好的储层所占的比例越大,单井产量就越高。如 A7 井 QT 值主要分布在 $0 \sim 16\%$ 之间,而 A8 井 QT 值主要分布在 $0 \sim 56\%$ 之间,后者的 QT 值分布范围远远大于前者,后者测试无阻流量也远远高于前者,说明气测录井全烃值分布范围与单井产气量之间具有密切的关系。

第二步,在第一步所取得的认识基础上,参考该区具有经济界限的生产井生产数据,建立全烃有效指示因子,将其作为评价单井是否具有经济产能的指示因子。从第一步中可以知道,直方图中频率大于 0 的部分所对应的 QT 值分布范围越宽,单井产能就越高,但由于频率值较大的部分所对应的 QT 值一般均较低,所以对气井高产贡献最大的部分应该是高 QT 值的部分,而这部分高 QT 值所对应的频率往往却较低。统计全区 30 余口井的数据发现,某些井 QT 值分布范围虽然较宽,但却依然为低产井,主要原因就是高 QT

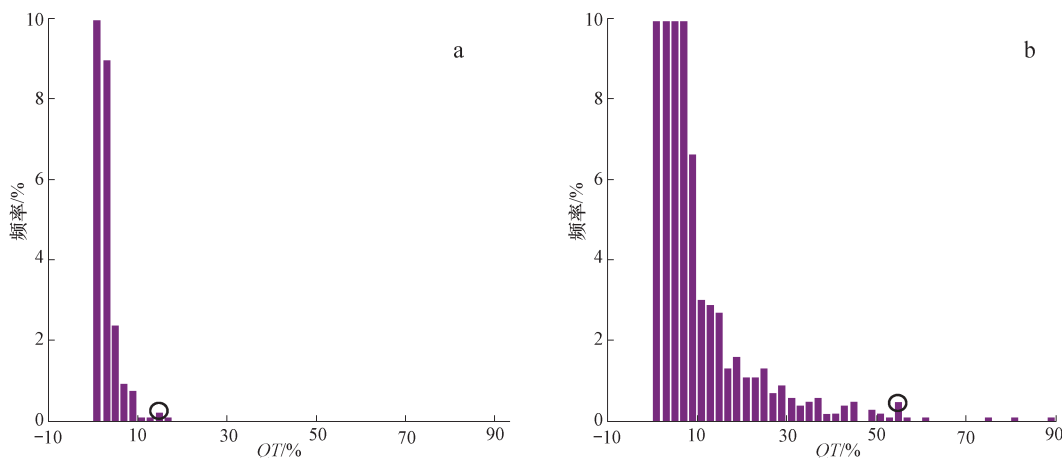


图7 大牛地气田X井区A7井和A8井全烃值分布频率

Fig. 7 A map showing the frequency distribution of total hydrocarbon values in Wells A7 and A8 in the drilling sector X in the Daniudi gas field

- a. A7井全烃频率直方图,黑色圆圈内数值表示为:频率为0.25%, QT 为15.941%,测试无阻流量为 $0.436 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;
b. A8井全烃频率直方图,黑色圆圈内数值表示为:频率为0.506%, QT 为55.842%,测试无阻流量为 $13.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

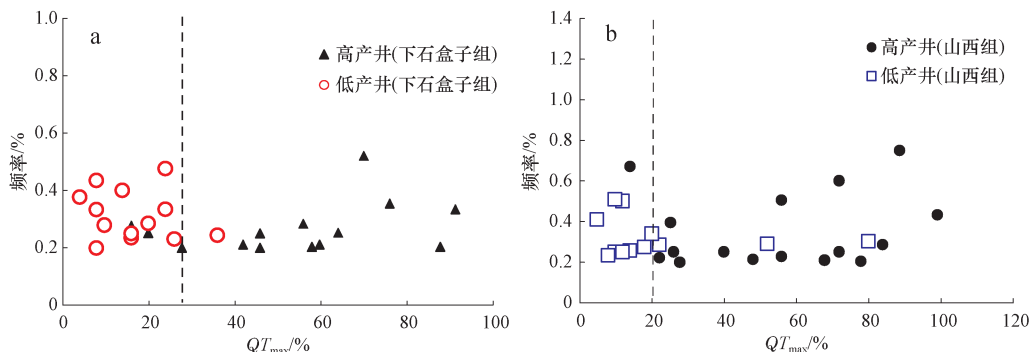


图8 大牛地气田X井区下石盒子组与山西组水平井 $QT_{\max}$ 分布直方图

Fig. 8 A histogram showing the $QT_{\max}$ distribution of horizontal wells in the Lower Shihezi and Shanxi Formations of the drilling sector X in the Daniudi gas field

- a. 下石盒子组水平井 $QT_{\max}$ 分布直方图,虚线分界线 $QT_{\max}$ 为24%;b. 山西组水平井 $QT_{\max}$ 分布直方图,虚线分界线 $QT_{\max}$ 为20%

值部分所对应的频率过低,即含气性较好的储层所占的比例过低所致。那么,什么情况下 QT 值对高产井具有指示意义呢?通过对比全区50余口具有测试资料的高产井和低产井发现,直方图中并非频率大于0的部分所对应的 QT 值越大井越高产,只有当频率大于一定值时所对应的 QT 值越大,井才越高产,统计发现当频率大于0.2时所对应的 QT 最大值对井是否高产具有指示意义,为此,将其作为全烃有效指示因子,即:

$$QT_{\max} = \text{MAX}[Fre(QT) > 0.2] \quad (1)$$

式中: $Fre(QT)$ 为求气测录井全烃值的频率函数; MAX 为求最大值函数; $QT_{\max}$ 为全烃有效指示因子,%。

依据公式1计算A7井 $QT_{\max}$ 为15.941%,A8井 $QT_{\max}$ 为55.842%,测试显示后者为高产井。

第三步,利用全烃指示因子计算全区生产井的

$QT_{\max}$,以无阻流量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 为经济界限,划分高产井与低产井界限。根据第二步中可以知道, $QT_{\max}$ 值对井是否高产具有指示意义,下面分析当 $QT_{\max}$ 值为多少时可以作为评价高产井与低产井的界限。分别计算下石盒子组和山西组各水平井 $QT_{\max}$,并分别绘制各组储层所有井 $QT_{\max}$ 分布频率图(图8)。以无阻流量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 为经济界限可知:对于下石盒子组,当 $QT_{\max}$ 大于24%时,80%的水平井测试产量达到经济界限;对于山西组,当 $QT_{\max}$ 大于20%时,80%的水平井测试产量达到经济界限。因此,可将 $QT_{\max} = 24\%$ 和 $QT_{\max} = 20\%$ 分别作为评价下石盒子组和山西组水平井高产井与低产井的界限。

4 双参数判别水平井产能

通过伽马峰值分析可以对水平井储层进行评价,

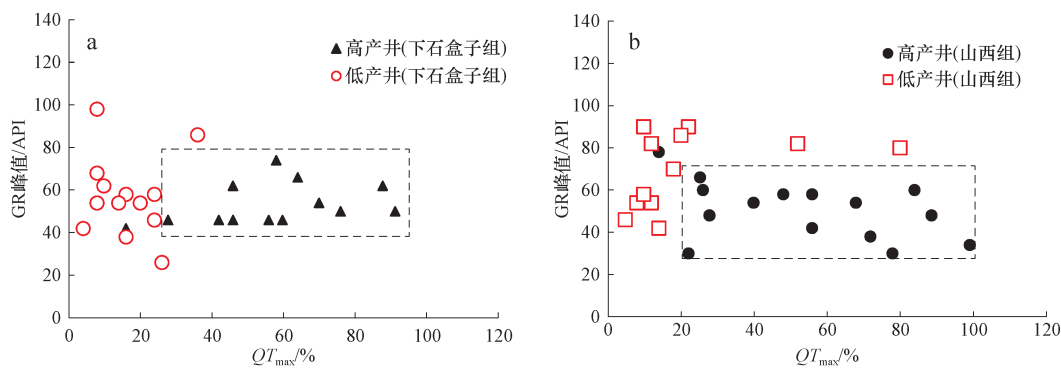


图 9 大牛地气田 X 井区基于水平井双参数的产能判别图版

Fig. 9 The productivity discrimination plot of the drilling sector X based on dual parameters of horizontal wells in the Daniudi gas field
a. 下石盒子组基于水平井双参数产能判别图版,虚线框内为高产井分布区域;b. 山西组基于水平井双参数产能判别图版,虚线框内为高产井分布区域

表 2 大牛地气田 X 井区水平井双参数判别标准
Table 2 Discrimination criteria of dual parameters for horizontal wells in the drilling sector X in the Daniudi gas field

井类别	层位	GR 峰值/API	$Q_{T_{max}}/\%$
高产井	下石盒子组	40 ~ 78	> 24
	山西组	30 ~ 78	> 20
低产井	下石盒子组	—	≤ 24
		< 40 或 > 78	> 24
	山西组	—	≤ 20
		< 30 或 > 78	> 20

但并不能够可靠的评价单井产能,如图 4 所示,下石盒子组高产水平井伽马峰值分布在 40 ~ 78 API,但在该区间内也存在一定数量产量未达到 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产井,这需要结合气测录井资料进一步加以评价。而基于全烃有效指示因子的单井产能评价方法能够有效的对气井产能进行评价,但也存在一定误差,如下石盒子组少数高产井的 $Q_{T_{max}}$ 值小于 24% (图 8),这可能是由于该井储层质量较好所致。为进一步提高水平井产能评价精度,综合本文第 2、3 节中方法,形成基于伽马峰值和全烃有效指示因子的双参数水平井产能判别方法,可有效弥补伽马峰值和全烃有效指示因子分别在单井产能评价中的不足,提高水平井产能评价精度。

在第 2、3 节工作的基础上,分别建立了下石盒子和山西组水平井双参数产能判别图版(图 9)。横坐标为全烃有效指示因子 $Q_{T_{max}}$,纵坐标为 GR 峰值。从图版中可以看出,即使有些井 $Q_{T_{max}}$ 较高,但 GR 峰值大于 80 API,水平井依然低产。同样以 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为高产井与低产井的经济界限,建立了水平井双参数判别标准如表 2 所示。利用该标准对工区水平井产能

进行了评价:下石盒子组共有低产井 13 口,高产井 13 口,其中有 25 口水平井符合双参数判别标准;山西组共有低产井数 12 口,高产井数 15 口,其中 26 口水平井符合双参数判别标准。用双参数产能判别方法判断水平井是否具备经济产能的准确率达 90% 以上,评价精度得到明显提高。

5 实例应用

A9 井下石盒子组及 A10 井山西组随钻伽马测井及全烃曲线如图 10 所示,绘制了 GR 频率直方图及全烃频率直方图如图 11 所示。其中 A9 井 GR 值分布有峰值,为 62 API,仅从 GR 曲线分析该井储层较好,为高产井的可能性较大,进一步分析该井 $Q_{T_{max}}$ 值仅为 9.109%,远没有达到下石盒子高产井的下限,综合双参数判别产能方法认为,该井为低产井,后期测试显示该井无阻流量为 $2.99 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,测试结论与分析结果吻合。A10 井 $Q_{T_{max}}$ 值高达 79.901%,仅以此判断应为高产井,但其 GR 峰值为 78 API,依据双参数判别标准综合分析该井为低产井,后期测试其无阻流量为 $1.736 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,测试结果与分析结论吻合。

6 结论

1) 针对鄂尔多斯盆地大牛地气田 X 井区大部分水平井仅测得随钻伽马和气测录井两种测井系列的问题,为了有效开展水平井测井评价及应用,本文结合地质资料,挖掘测井信息与地质因素和产能之间的关系,形成了一种利用有限的测井信息判断水平井是否具备经济产能的测井分析及评价方法。

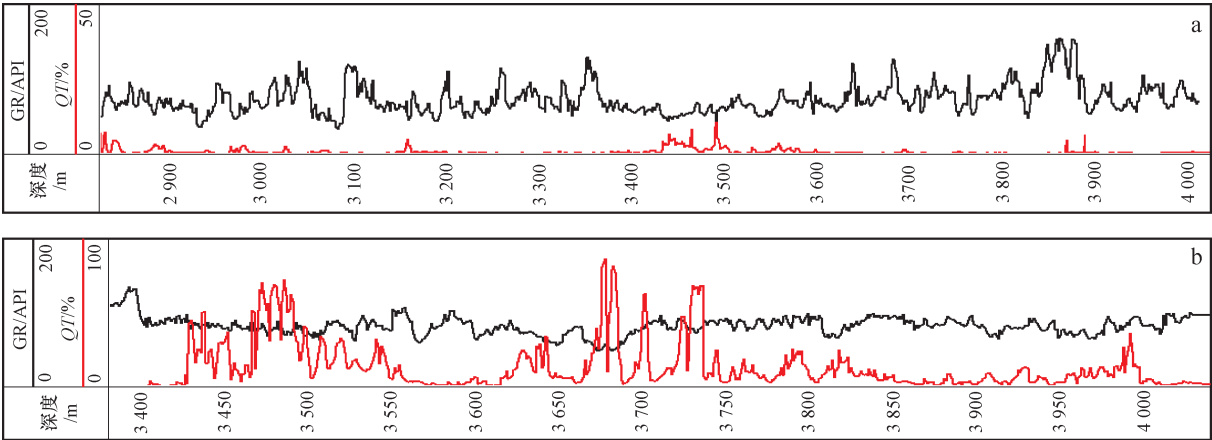


图 10 大牛地气田 X 井区 A9 及 A10 井水平段测井曲线

Fig. 10 The well logging curve of the horizontal sections in Wells A9 and A10 in the drilling sector X in the Daniudi gas field

a. A9 井水平段测井曲线,其中黑色曲线为随钻伽马曲线,红色曲线为气测全烃曲线;b. A10 井水平段测井曲线,其中黑色曲线为随钻伽马曲线,红色曲线为气测全烃曲线

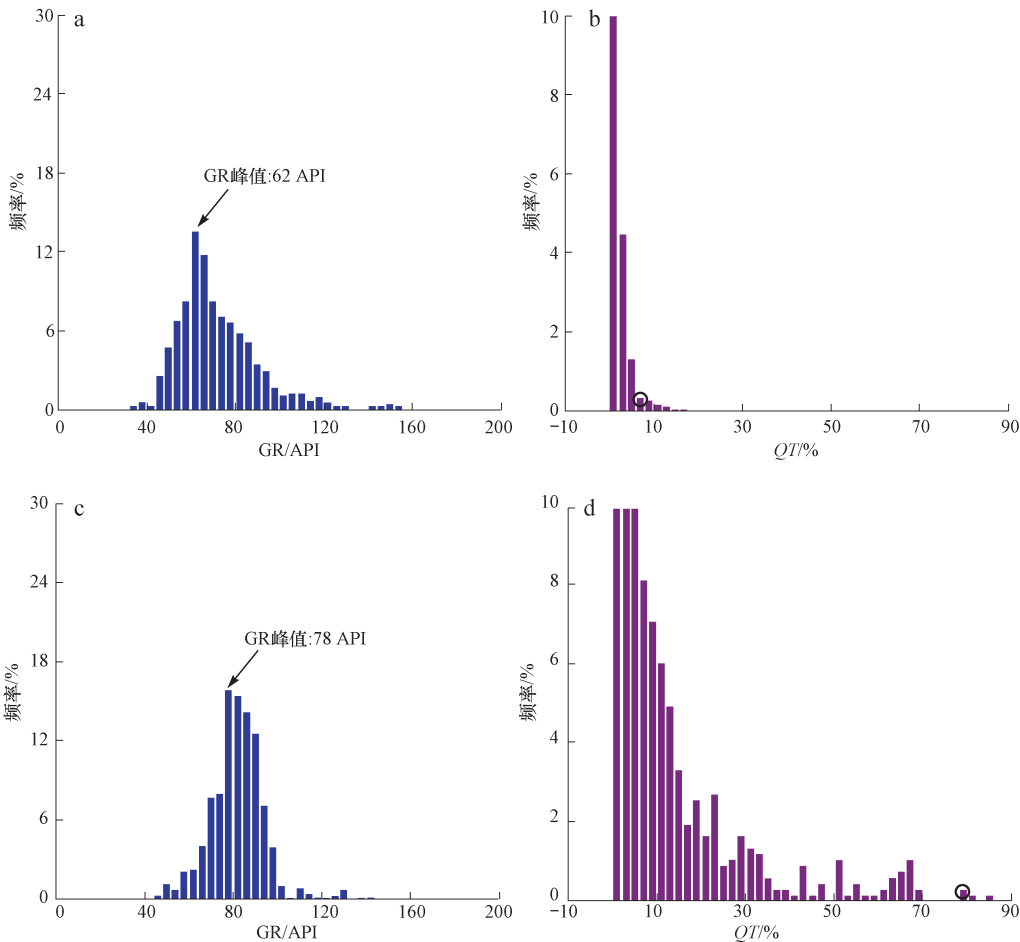


图 11 大牛地气田 X 井区 A9 及 A10 井伽马与全烃值分布频率

Fig. 11 The frequency distribution of GR and total hydrocarbon values in Wells A9 and A10 in the drilling sector X in the Daniudi gas field

a. A9 井,单峰特征,峰值为 62 API;b. A9 井,黑色圆圈内数值表示为:频率为 0.279%, $QT_{\max}$ 为 9.109%;
c. A10 井,单峰特征,峰值为 78 API;d. A10 井,黑色圆圈内数值表示为:频率为 0.25%, $QT_{\max}$ 为 79.901%

2) 结合气井生产动态及储层分析测试资料,对水平井目的层段伽马值分布进行统计分析,建立储层岩性、物性及气井产量之间的对应关系,进而为储层评价提供依据。从统计学角度出发,提出了基于全烃有效指示因子的单井产能评价方法,探讨了单井产能与气测全烃值分布之间的关系。将上述两种方法结合,形成了双参数判别水平井产能方法,可进一步提高水平井产能评价精度。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [3] 王国亭,贾爱林,闫海军,等. 苏里格致密砂岩气田潜力储层特征及可动用性评价[J]. 石油与天然气地质,2017,38(5):896-904.
Wang Guoting, Jia Ailin, Yan Haijun, et al. Characteristics and recoverability evaluation on the potential reservoir in Sulige tight sandstone gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 896-904.
- [4] 王亚娟,马旭,张矿生,等. 美国非常规天然气开发的政策效益及启示[J]. 天然气工业,2013,33(3):113-118.
Wang Yajuan, Ma Xu, Zhang Kuangsheng, et al. Policies benefit analysis of the development of unconventional natural gas in the United States[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3): 113-118.
- [5] Baihly J D, Malpani R, Jian Xu, et al. A comprehensive completion study study of recent cotton valley sand well production to optimize future designs[J]. SPE 144412, 2011.
- [6] 马新华,贾爱林,谭健,等. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践[J]. 石油勘探与开发,2012,39(5):572-579.
Ma Xinhua, Jia Ailin, Tan Jian, et al. Tight sand gas development technologies and practices in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 572-579.
- [7] 邱中建,邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位[J]. 天然气工业,2012,32(1):1-5.
Qiu Zhongjian, Deng Songtao. Strategic position of unconventional natural gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 1-5.
- [8] 李建忠,郑民,张国生,等. 中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报,2012,33(S1):89-98.
Li Jianzhong, Zheng Min, Zhang Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 89-98.
- [9] 杨涛,张国生,梁坤,等. 全球致密气勘探开发进展及中国发展趋势预测[J]. 中国工程科学,2012,14(6):64-68.
Yang Tao, Zhang Guosheng, Liang Kun, et al. The exploration of global tight sandstone gas and forecast of the development tendency in China[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 64-68.
- [10] 刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地致密砂岩气田水平井开发气藏工程优化技术[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):261-266.
Liu Zhongqun. Engineering optimization technique of horizontal well development for Daniudi tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 261-266.
- [11] 李波,贾爱林,何东博,等. 苏里格气田强非均质性致密气藏水平井产能评价[J]. 天然气地球科学,2015,26(3):539-549.
Li Bo, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Productivity evaluation of horizontal wells in Sulige tight gas reservoir with strong heterogeneity[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 539-549.
- [12] Baihly J D, Grant D, Fan L, et al. Horizontal wells in tight gas sands—A method for risk management to maximize success[J]. SPE Production & Operations, 2009, 24(2):277-292.
- [13] 吴建彪,刘绪钢,白小霞,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田丛式水平井组开发效果评价[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):256-260.
Wu Jianbiao, Liu Xugang, Bai Xiaoxia, et al. Evaluation of development effects of cluster horizontal wells in Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 256-260.
- [14] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):118-128.
Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 118-128.
- [15] 李谦,李庆合,马建英,等. 水平井测井评价技术在大港油田的应用[J]. 测井技术,2008,32(5):455-459.
Li Qian, Li Qinghe, Ma Jianying, et al. Horizontal well logging evaluation technology applied in Dagang Oil field[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 455-459.
- [16] 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 geological interpretation of horizontal well logging data[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(3): 70-72.
- [17] 李德生. 重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学[J]. 石油勘探与开发,2004,31(6):1-7.
Li Desheng. Return to petroleum geology of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 1-7.
- [18] 杨遂正,金文化,李振宏. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地形成与演化[J]. 天然气地球科学,2006,17(4):494-498.
Yang Suizheng, Jin Wenhua, Li Zhenhong. Multicycle superimposed basin form and evolution of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 494-498.
- [19] 郝蜀民,李良,张威,等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系—二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):149-154.
Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin

- [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149–154.
- [20] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用—以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62–71.
Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 62–71.
- [21] 孙晓, 李良, 丁超. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不整合结构类型及运移特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 165–172.
Sun Xiao, Li Liang, Ding Chao. Unconformity structure types and hydrocarbon migration characteristics in Hangjinqi area of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 165–172.
- [22] 刘伟新, 王延斌, 张文涛, 等. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用与产能关系研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 557–563.
Liu Weixin, Wang Yanbin, Zhang Wentao, et al. The relationship between the diagenesis of upper palaeozoic reservoir sandstones and the production capacity in Daniudi gas field, the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 557–563.
- [23] 张广权, 陈舒薇, 郭书元. 鄂尔多斯地区东北部大牛地气田山西组沉积相[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 388–396.
Zhang Guangquan, Chen Shuwei, Guo Shuyuan. Sedimentary facies of the Shanxi Formation in Daniudi gas field, northeastern Ordos area[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 388–396.
- [24] 郭智, 贾爱林, 何东博, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田辫状河体系带特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 197–204.
Guo Zhi, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Characteristics of braided river sedimentary system zones in Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 197–204.
- [25] 罗月明, 刘伟新, 谭学群, 等. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用评价[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 384–390.
Luo Yueming, Liu Weixin, Tan Xuequn, et al. Diagenesis and reservoir evaluation on the Upper Paleozoic reservoir sandstones in Daniudi gas field, the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4): 384–390.
- [26] 王永建, 王延斌. 大牛地气田上古生界低渗储层综合评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 57–64.
Wang Yongjian, Wang Yanbin. Comprehensive evaluation of lower porosity and permeability reservoir in Upper Paleozoic of Daniudi Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(5): 57–64.
- [27] 张威, 李良, 贾会冲. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区十里加汗区带下石盒子组1段岩性圈闭成藏动力及气水分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 189–196.
Zhang Wei, Li Liang, Jia Huichong. Reservoir-forming dynamics and gas-water distribution characteristics of lithologic traps in the 1st Member of Xiashihezi Formation in the Shilijiahan zone, Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 189–196.
- [28] 赵国泉, 李凯明, 赵海玲, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 53–55.
Zhao Guoquan, Li Kaiming, Zhao Hailing, et al. Feldspar corrosion and secondary pore formation in the Upper Paleozoic gas reservoir, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 53–55.
- [29] 张海涛, 时卓, 石玉江, 等. 低渗透致密砂岩储层成岩相类型及测井识别方法—以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组8段为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 256–264.
Zhang Haitao, Shi Zhuo, Shi Yujiang, et al. Diagenetic facies types and logging identification methods for low-permeability tight sandstone reservoirs: a case study on the 8th member of Xiashihezi Formation in Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 256–264.
- [30] 杨思通, 孙建孟, 马建海, 等. 低孔低渗储层测录井资料油气识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 407–412.
Yang Sitong, Sun Jianmeng, Ma Jianhai et al. Identification of hydrocarbons in low-porosity and low-permeability reservoirs by integration of surface log data with wire log information[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(3): 407–412.
- [31] 杜阳阳, 王燕, 李亚峰, 等. 低孔低渗储层流体性质测录井综合识别方法研究现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 571–580.
Du Yangyang, Wang Yan, Li Yafeng et al. Research status and outlook of the mud logging and well logging data comprehensive recognition for the low porosity and permeability of the reservoir fluid properties[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 571–580.

(编辑 张亚雄)