

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019135

# 基于 X 射线荧光元素录井的深层页岩气 精准地质导向技术

唐 诚<sup>1</sup>, 王志战<sup>2</sup>, 陈 明<sup>3</sup>, 王崇敬<sup>1</sup>, 梁 波<sup>1</sup>, 施 强<sup>1</sup>

(1. 中石化西南石油工程有限公司地质录井分公司, 四川绵阳 621000; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 中国石化西南油气分公司油气勘探管理部, 四川成都 610041)

**摘 要:** 川南威荣页岩气田深层页岩气水平井钻井过程中, 准确卡取标志层、识别钻头位置和判断钻头穿行状态的难度很大。为此, 利用 X 射线荧光 (XRF) 元素录井数据建立了三端元图版、元素交会图版和元素三维显示图版, 以及岩石密度、含气量等评价参数的定量计算模型。根据三端元图版卡取入窗前的重要标志层, 利用元素交会图版指导水平井准确入窗, 通过元素三维显示图版判别水平段钻头穿行状态, 利用岩石密度、含气量等评价参数指导水平井井眼轨道优化, 形成了基于 X 射线荧光元素录井的精准判识目的层及钻头穿行状态的地质导向技术。该技术在威荣页岩气田 18 口页岩气水平井进行了应用, 靶体平均钻遇率达到 98.06%。研究表明, 基于 X 射线荧光元素录井的精准地质导向技术能够准确卡取标志层、识别钻头位置和判断钻头穿行状态, 提高优质储层的钻遇率。

**关键词:** 深层页岩气; XRF 元素录井; 解释图版; 数学模型; 地质导向; 威荣页岩气田

中图分类号: TE243<sup>+.1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)06-0103-08

## Accurate Geosteering Technology for Deep Shale Gas Based on XRF Element Mud Logging

TANG Cheng<sup>1</sup>, WANG Zhizhan<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>3</sup>, WANG Chongjing<sup>1</sup>, LIANG Bo<sup>1</sup>, SHI Qiang<sup>1</sup>

(1. Geological Logging Branch, Sinopec Xinan Oilfield Service Corporation, Mianyang, Sichuan, 621000, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. Oil and Gas Exploration Management Department, Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China)

**Abstract:** During drilling the deep shale gas horizontal wells in the Weirong Shale Gas Field in southern Sichuan, it is very difficult to accurately identify the marker bed, determine the bit position and judge the penetrating state of bit. To solve this problem, the X-ray fluorescence (XRF) element mud logging data was used to establish a three-terminal chart, an element intersection chart and a three-dimensional element display chart, as well as a quantitative calculation model of evaluation parameters such as rock density and gas content. The Geosteering Technology has been formed by such principle, including that fact that a three-terminal chart was used to identify the key marker beds before window-entering, the element intersection chart was used to guide the accurate window-entering of horizontal well, the three-dimensional element display chart was used to determine the penetration of the bit in a horizontal section, and the shale density and gas content etc., were used to guide the optimization of horizontal wellbore trajectory. This technology has been applied in 18 horizontal shale gas wells in the Weirong Shale Gas Field, with the average drilling rate of the target up to 98.06%. Research results showed that the technology could improve the rate of encountering high-quality reservoirs by accurately identifying the marker bed, determining the bit position and judging the penetrating state of the bit.

**Key words:** deep shale gas; XRF element mud logging; interpretation chart; mathematical model; geosteering; Weirong Shale Gas Field

四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩气资源潜力巨大, 是国内海相页岩气的主要勘探开发区域, 近年来部署了大量水平井进行勘探开发<sup>[1-5]</sup>。页岩气水平井钻井过程中普遍采用随钻测井工具进行地质导向, 利用随钻测井自然伽马曲线指导水平段钻进<sup>[6-8]</sup>。但是, 入窗前页岩的自然伽马变化不明显, 主要目的层自然伽马曲线尖峰多, 不同峰的幅值差

异小, 且使用的随钻测井工具多不相同, 并大量采

收稿日期: 2019-05-08; 改回日期: 2019-10-10。

作者简介: 唐诚 (1979—), 男, 四川安岳人, 2000年毕业于重庆石油高等专科学校石油与天然气地质勘查专业, 2012年获西南石油大学地质工程专业工程硕士学位, 高级工程师, 主要从事录井技术研究工作。E-mail: xnltjtangcheng@163.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“基于 XRF 的页岩地层多参数实时求取方法及应用” (编号: P17014-9) 部分研究内容。

用远端随钻测井工具,无法提供方位伽马数据,且不同测井工具的测量结果差异大,仅依靠随钻自然伽马测井曲线难以满足页岩气井地质导向的需求。为此,笔者采用X射线荧光(XRF)元素录井数据建立基于岩石成分的三端元图版、不同层位的元素交会图版、元素三维显示图版,在钻进过程中利用其判断钻头位置及钻头穿行状态,并建立岩石密度、含气量等关键评价参数的定量计算模型,为页岩气水平井地质导向提供了新的思路和方法。

## 1 地层特征

川南地区五峰组—龙马溪组沉积环境为低能还

原环境,构造活动不明显,整体为陆棚相。威荣页岩气田主体处于威远构造南缘白马镇向斜,龙马溪组底部埋深3 600.00~3 800.00 m,属于深层页岩气。水平井的主要目的层为五峰组—龙马溪组一段,自下而上划分为9个小层<sup>[9-13]</sup>,纵向上页岩颜色差异不大,通过肉眼观察难以区分;电性特征有一定的差异,主要差异集中在①—④小层。揭开④小层后自然伽马测井曲线出现小幅度的尖峰,③小层底部有2个相对稳定的高自然伽马尖峰,自上而下命名为I峰和II峰,②小层为极高自然伽马峰,称为III峰,水平井的主要靶体是II峰和III峰所在的地层(见图1)。<sup>①</sup>小层为五峰组地层,自然伽马值明显低于上覆层段。

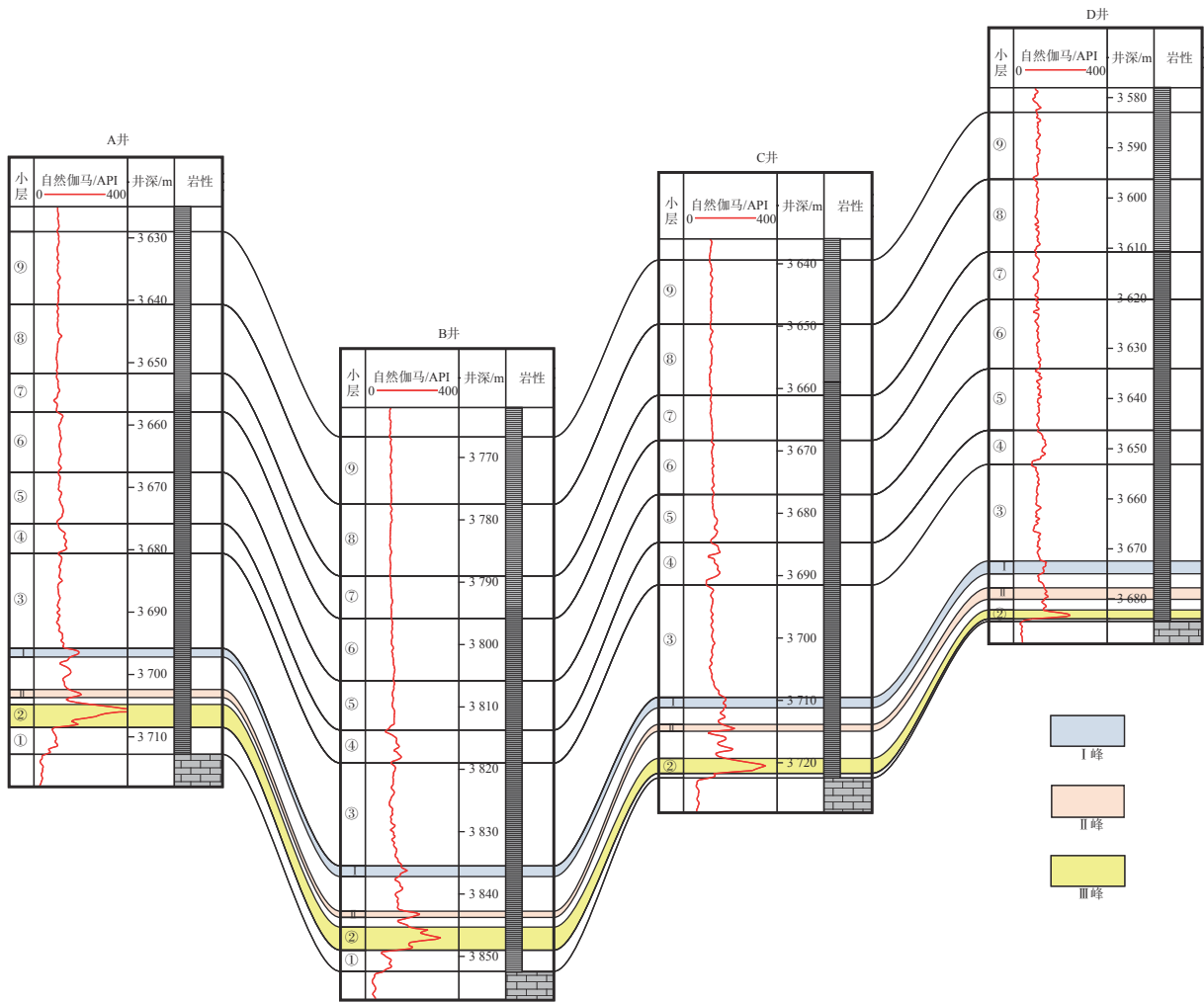


图1 川南五峰组—龙马溪组一段地层厚度特征对比

Fig.1 Comparison of the stratigraphic thickness characteristics of the Wufeng Formation-the 1st member of Longmaxi Formation in southern Sichuan

## 2 地质导向技术难点

深层页岩气水平井的钻井技术难点主要集中在

入窗和水平段2个阶段。造斜与入窗阶段的重点是准确识别标志层,确保顺利着陆;水平段的关键是明确钻头的穿行状态,通过调整井眼轨迹,确保在优质储层段穿行。因此,落实关键控制点、判别钻头

穿行状态,是深层页岩气水平井钻井的重点与难点。

1)标志层特征不明显,难以准确入窗。龙马溪组中上部没有明显的标志层,主要根据物探等资料获得的宏观构造特征来指导定向钻进。龙马溪组一段④小层是造斜与入窗的关键控制点,随钻自然伽马测井仪器容易受到钻井液成分与性能的影响,导致自然伽马值波动大,难以准确识别出标志层,且④小层距离靶点垂向距离仅为 18.00~41.00 m,井眼轨迹调整余地较小,定向钻进过程中缺乏控制井眼轨迹的依据。

2)靶体上下自然伽马特征相近,难以判断钻头

走向。③小层Ⅱ峰与①小层顶部为水平井靶窗的上下界面,在有方位伽马测井数据的情况下,容易判别出钻头的穿行状态,但威荣页岩气田广泛使用远钻头随钻测井工具,与钻头的距离约 14.00~17.00 m,仅能提供随钻综合伽马测井数据,当随钻测量的自然伽马值由高向低变化时,根据常规测井资料不能区分出钻头的穿行状态。如图 2 所示,A9 平台靶心为Ⅲ峰峰尖所在位置,如果钻头偏离峰尖位置,Ⅲ峰上下半幅的常规测井、录井特征几乎完全一致,难以判断钻头是处于Ⅲ峰上半幅还是下半幅,只能在钻穿靶体上下界面后再调整井眼轨迹。

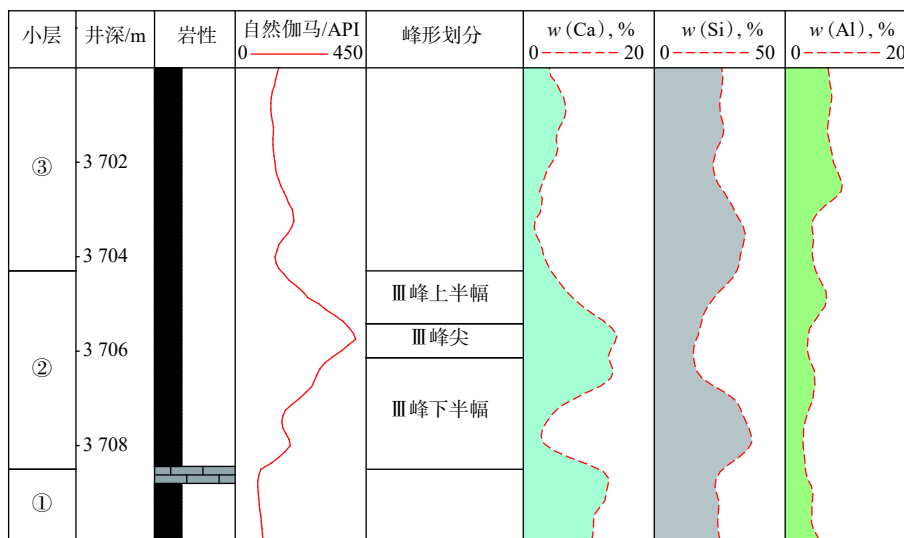


图 2 A9 平台导眼井靶窗测录井特征

Fig.2 Logging/mud logging characteristics of target window in the pilot hole of Platform A9

### 3 精准地质导向技术

元素录井数据携带了丰富的地层信息,为地层识别以及评价参数计算提供了数据基础。利用元素录井数据识别控制点、目的层、钻头穿行状态和评价页岩参数,可为页岩气水平井地质导向提供依据。

#### 3.1 理论基础与时效性分析

##### 3.1.1 精准地质导向理论基础

页岩地层通常具有高自然伽马的特征,但自然伽马是岩石中多种成分的叠加响应,具有较强的多解性<sup>[14-17]</sup>。实钻发现,页岩气储层附近存在高放射性的磷灰石、硅质岩和碳质页岩,即优质页岩一般都具有高自然伽马特征,但具有高自然伽马特征的岩石不一定是优质页岩。自然伽马特征的多解性,

导致在自然伽马特征相似的井段难以准确判断钻头的位置。XRF 元素录井技术可为岩性精细定名、沉积相划分和甜点评价等提供有力的手段<sup>[13,17]</sup>,因为该技术能够实时测量岩屑中常见的 20 余种元素及其含量,构成地层的响应指纹,能够准确反映含气性、岩石密度等信息,从而有效弥补自然伽马的多解性,为准确判断钻头在小层中的穿行位置奠定了理论基础。

##### 3.1.2 时效性对比分析

地质导向钻井对时效性要求较高。旋转导向钻井或近钻头测量工具具有较强的时效性,而远钻头随钻测井工具的时效性相对较差。威荣页岩气田 5 口井应用了远钻头随钻测井工具,迟到时间为 50~70 min,平均钻时为 5.50~18.10 min/m。XRF 元素录井分析周期按 30.00 min 计算(包括捞取岩屑、烘烤样品、制样、分析),当钻时在 6.00~7.00 min/m

时,获得元素分析数据的时间与获得远钻头随钻测井数据的时间基本一致,当钻时大于 7.00 min/m 时,先获得元素分析数据。5 口井中首先获得元素分析数据的井段有 12 段,元素分析数据与远钻头随钻测井数据基本同时获得的井段有 2 段,首先获得远钻头随钻测井数据的井段有 2 段。可见,在绝大部分情况下 XRF 元素录井的时效性优于远钻头随钻测井工具,能够为地质导向钻井提供时效保证。

### 3.2 关键控制点识别方法

威荣页岩气田五峰组—龙马溪组一段的 9 个小层均为深水陆棚相,但可细分为黏土深水陆棚、含钙黏土深水陆棚、钙质黏土深水陆棚、生物硅质深水陆棚等多个不同的沉积微相<sup>[13]</sup>。不同沉积微相的元素富集情况不同,因此纵向上小层不同,元素含量也不同。根据岩石的矿物成分,可将岩相划分为黏土质、钙质和硅质等 3 类。通过建立 XRF 元素录井数据与岩石矿物成分之间的计算模型,采用三端元图版,将岩相划分为黏土质、硅质、钙质、混合质<sup>[13, 17]</sup>,通过区分不同的岩相识别关键控制点。图 3 所示为威荣页岩气田 Y3 井的三端元图版。从图 3 可以看出:Y3 井钻遇的③—⑨小层为黏土质,主要为黏土深水陆棚相条件下的页岩,进入⑦小层后为混合质,是从黏土深水陆棚向含钙黏土深水陆棚过渡,进入③小层后,逐渐变化为硅质,与生物硅质深水陆棚微相对应。由此可见,应用 XRF 元素录井的三端元图版能有效区分各个小层,识别出关键控制点。

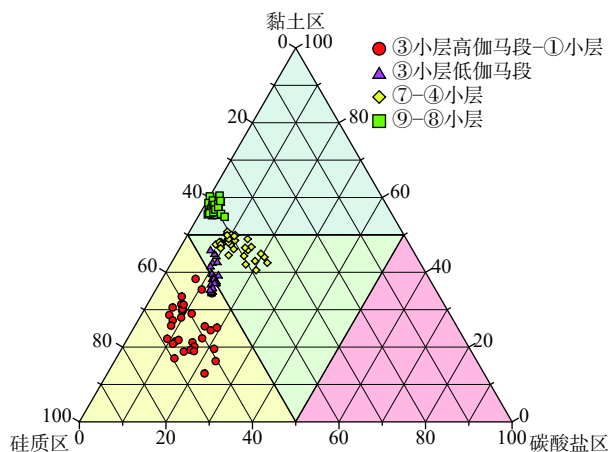


图 3 Y3 井元素三端元图版  
Fig. 3 Three-terminal chart of Well Y3

### 3.3 目的层识别方法

I 峰、II 峰和 III 峰 3 个高自然伽马井段的沉积

微相一致或相似,用三端元图版难以区分,同时 I 峰与 II 峰的自然伽马幅值相近,多数井的 III 峰存在副峰,导致各个峰形之间区分难度大。借鉴曲线重叠与曲线交会等测井解释方法<sup>[14]</sup>,优选出目的层段的主要元素,研究元素含量以及元素含量比值的交会。根据已钻井的元素数据统计分析 Mg, Al, Si, S, Ca 和 Fe 等含量占比较高的元素并优选图版。图 4 为不同元素含量及不同元素含量比值的交会图版。从图 4 可以看出,Al-Si 元素含量交会图版、Al-Ca 元素含量交会图版、Ca 与 Mg 含量比值-Si 与 Al 含量比值交会图版在区分 I 峰、II 峰和 III 峰方面均有一定的效果,其中 Al-Si 元素含量交会图版的效果最好。

### 3.4 钻头穿行状态识别方法

常规方法不能区分出 III 峰的不同部位,需要采用更高维度的图版来提高 III 峰峰尖及上、下半幅位置的辨识度。根据主成分分析结果,页岩中 Ca, Si 和 Al 元素的含量在一定程度上能反映岩相的变化<sup>[13, 17-18]</sup>,适合用来开展三维显示图版的研究与应用。根据自然伽马曲线的特征,将整个 III 峰自上而下划分为 III 峰上半幅、峰尖、下半幅 A 段、下半幅 B 段等 4 个不同的部位(见图 5(a)):上部为 III 峰上半幅,中部为 III 峰峰尖;由于下半幅较长,将其分为 A, B 两段,中下部为 III 峰下半幅 A 段,底部为 III 峰下半幅 B 段。由于 III 峰峰尖依靠自然伽马值容易识别,因此将其余 3 段的主要特征元素绘制为三维显示图版, x, y 和 z 轴分别为 Al, Ca 和 Si 元素的含量。图 5(b)所示为 A6 井 III 峰 Al, Ca 和 Si 元素的三维显示图版,蓝色代表 III 峰上半幅,红色为 III 峰下半幅 A 段,黑色为 III 峰下半幅 B 段。从图 5(b)可以看出,III 峰上半幅与下半幅 B 段有重叠,但 III 峰上半幅与下半幅 A 段具有较好的区分度。因此,当钻头偏离峰尖位置时,采用元素三维显示图版能够区分钻头进入了 III 峰上半幅还是下半幅 A 段所在的位置,进而判断出钻头的穿行状态。

### 3.5 关键评价参数定量计算方法

将通过分析 XRF 元素录井资料获得的岩石成分信息、测井及试验分析的结果进行比对,根据各项参数的基本响应机理,针对需要转换的参数优选出敏感元素及元素组合,进行数学拟合分析,建立元素或元素组合与评价参数之间的数学模型,采用逐步回归方法优选数学模型,确定最佳模型,并建



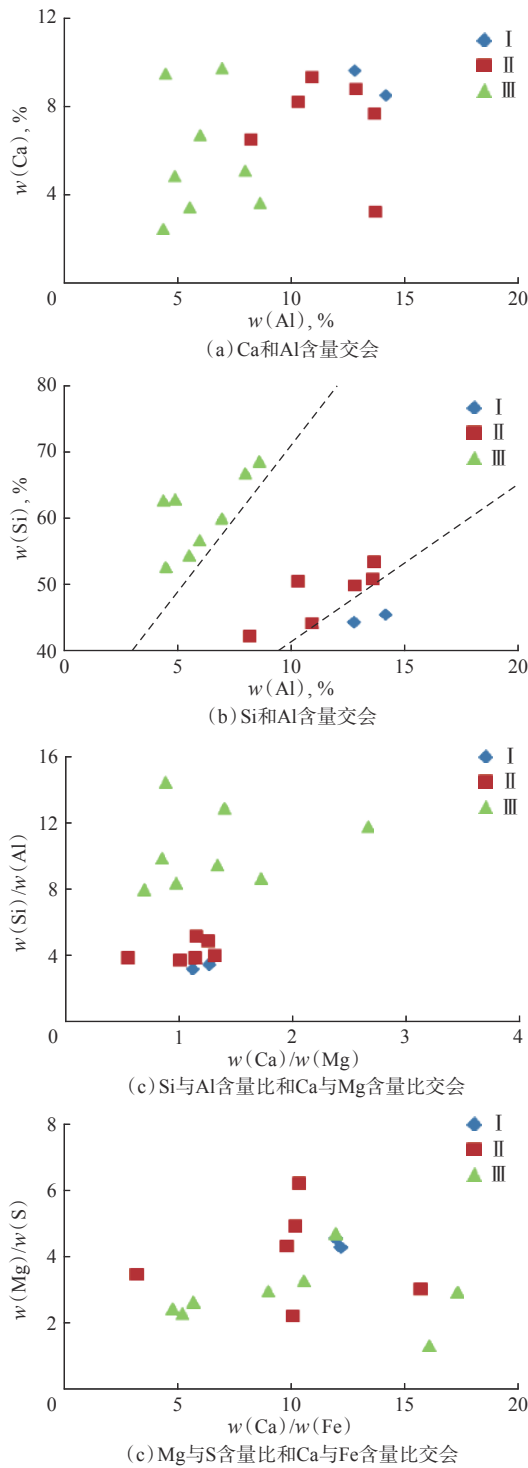
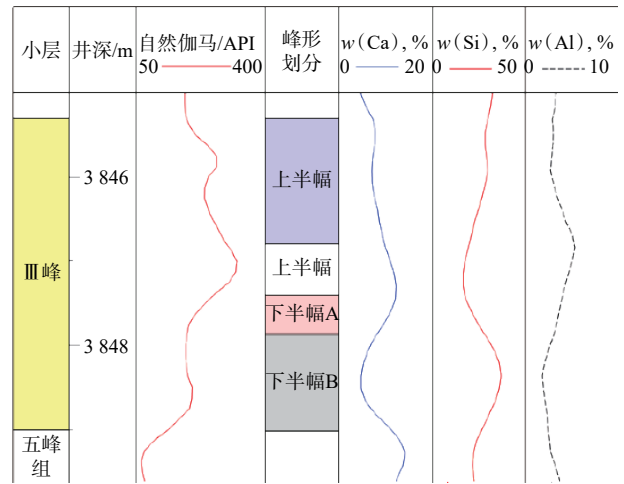


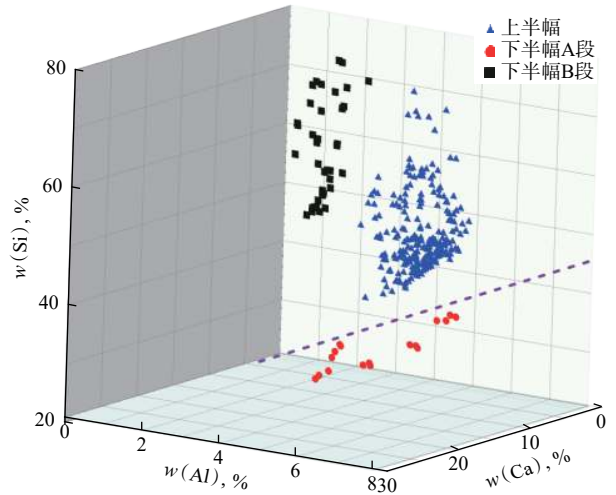
图 4 元素交会图版

Fig. 4 Effect of element intersection chart

立了威荣气田岩石硅质含量、钙质含量、泥质含量、岩石密度和含气量等 5 个参数的随钻定量计算模型 (见表 1)。应用表明, 利用 XRF 元素录井数据计算出的页岩评价参数与 ECS 测井、常规测井等其他手段的评价结果较为吻合, 除钙质含量外, 其余参数的相关系数均大于 0.70<sup>[13, 17]</sup>。



(a) III 峰峰形划分



(b) 元素三维显示图版

图 5 A6 井 III 峰元素三维显示图版

Fig. 5 III peak element three-dimensional display chart of Well A6

表 1 页岩评价参数随钻计算模型

Table 1 Calculation model of shale evaluation parameters while drilling

评价参数	计算模型	相关系数
含气量	$y=f(\varphi(\text{Fe}), \varphi(\text{S}), \varphi(\text{K}))$	0.83
岩石密度	$y=f(\varphi(\text{Fe}), \varphi(\text{S}), \varphi(\text{K}))$	0.80
钙质含量	$y=f(\varphi(\text{Ca}), \varphi(\text{Mg}))$	0.63
泥质含量	$y=f(\varphi(\text{Ca}), \varphi(\text{Fe}), \varphi(\text{K}))$	0.72
硅质含量	$y=f(\varphi(\text{Si}), \varphi(\text{Al}), \varphi(\text{Ca}), \varphi(\text{K}))$	0.71

## 4 现场应用

基于 X 射线荧光元素录井的深层页岩气精准地

质导向技术在威荣页岩气田进行了应用, 进入龙一段地层之后, 首先应用元素三维图版识别出④小层与③小层, 为入窗提供指导; 随钻自然伽马与元素交会图版结合区分 I 峰、II 峰和 III 峰, 确保准确入窗; 进入水平段后, 采用三维显示图版判断钻头穿行状态, 并利用随钻测井资料定量计算关键评价参数, 指导水平段钻进。2018 年以来, 该技术在威荣页岩气田应用了 18 口井, 多数井的实钻 A 靶点垂深较设计垂深加深 4.22~36.49 m, 每口井都准确入窗, 14 口井水平段靶体钻遇率 100%, 4 口井准确判断出了地层与钻头穿行状态, 但因定向工具的轨迹调整能力不足, 导致部分井段钻出靶体, 18 口井的

靶体平均钻遇率达到了 98.06%。

### 4.1 入窗

T1HF 井入窗井段的随钻自然伽马曲线特征与导眼段有明显差异, 导眼段⑥、⑤、④小层底部的自然伽马曲线均有明显的台阶, 易于识别; 斜井段随钻自然伽马曲线基本无变化, 根据自然伽马特征难以判断层位(见 图 6), 但根据该井段的元素三端元图版实现了准确区分(见 图 7(a)), 及时采取了增斜措施。应用 Al-Si 元素交会图版及时区分目的层 I 峰、II 峰和 III 峰(见 图 7(b)), 为准确入窗准确提供了依据。

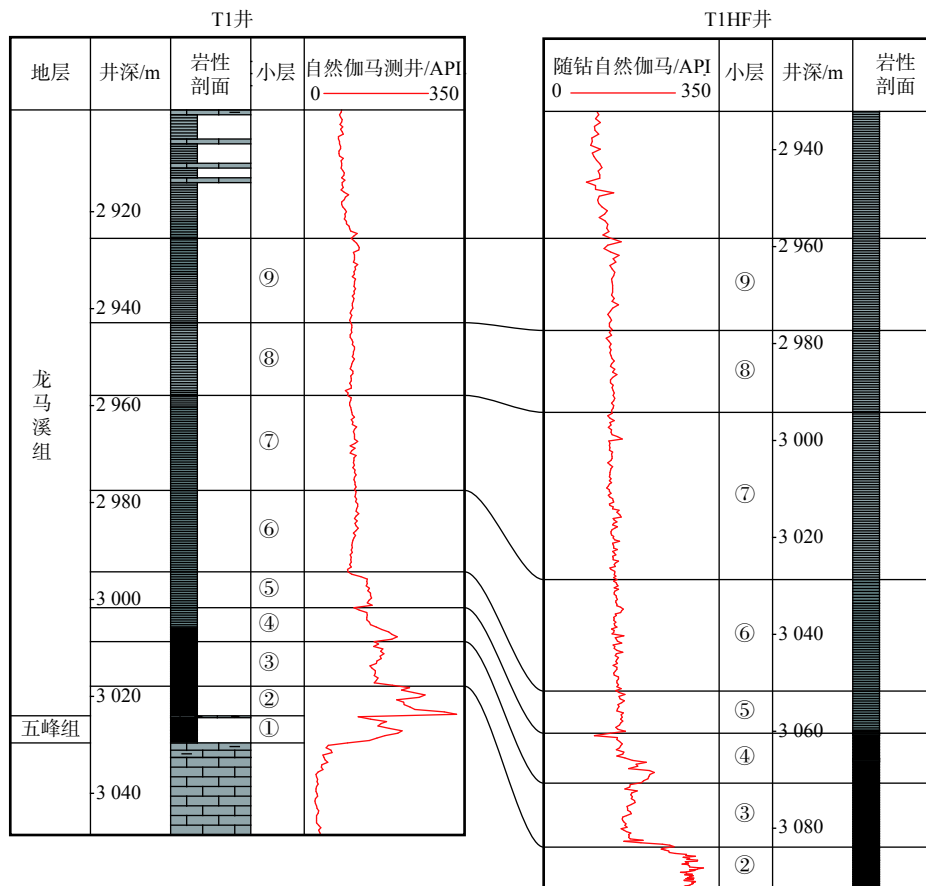


图 6 T1HF 井导眼段与斜井段自然伽马特征对比

Fig.6 Comparison of natural gamma characteristics between pilot section and deviated section in Well T1HF

### 4.2 水平段

A3 井入窗进入水平段以后采用远钻头随钻测井工具进行地质导向, 5 130.00~5 160.00 m 井段钻头位于 III 峰峰尖位置, 随后随钻自然伽马曲线出现了起伏, 随钻自然伽马值降低, 钻头偏离了 III 峰峰尖位置(见 图 8)。由于没有方位伽马数据, 难以判

断钻头的穿行状态, 因此采用元素三维显示图版判断钻头穿行状态。从 A3 井水平段元素三维显示图版(见 图 9)可以看出, 钻头偏离峰尖位置以后, 没有进入 III 峰下半幅 A 段的范围(绿色为待判断的 5 160.00~5 180.00 m 井段元素数据)。参数定量计算结果(见 图 8)表明, 该井段含气量由 9.50 m<sup>3</sup>/t 降至 6.40~7.10 m<sup>3</sup>/t, 岩石密度由 2.38 g/cm<sup>3</sup> 升至 2.43 g/cm<sup>3</sup>,

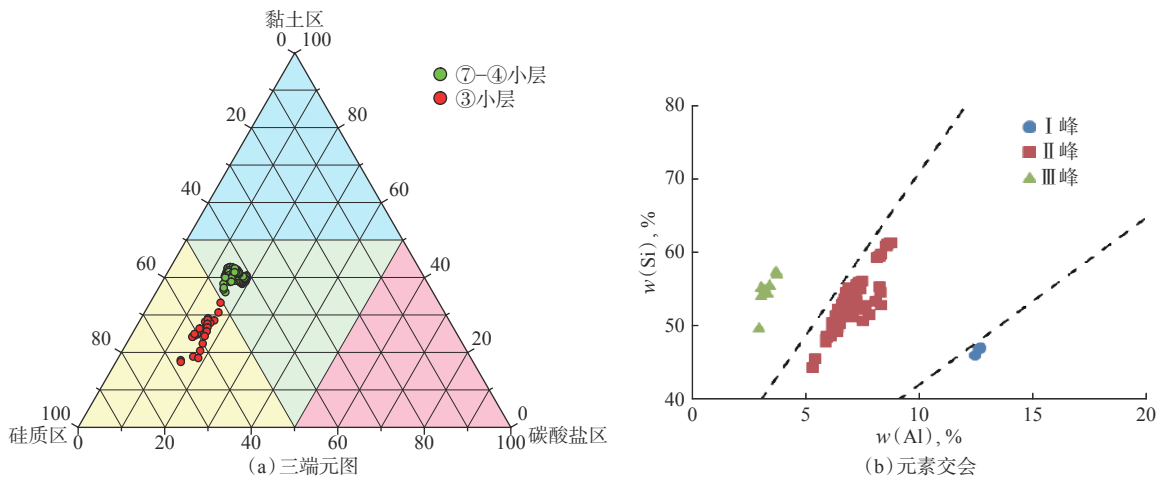


图 7 T1HF 井三端元图版和元素交会图版

Fig.7 Application of three terminal element and element intersection chart in Well T1HF

表明储层的含气性正在变差。综合分析三维显示图版和参数定量计算结果,认为该井段钻头在Ⅲ峰上半幅的位置并有逐渐偏离靶窗的趋势,于是采取降斜措施,然后重新回到Ⅲ峰所在的位置,含气量由 3.60 m<sup>3</sup>/t 升至 5.20 m<sup>3</sup>/t,岩石密度由 2.53 g/cm<sup>3</sup> 降至 2.49 g/cm<sup>3</sup>,说明钻头回到了优质储层段,达到了轨迹优化调整的目的。

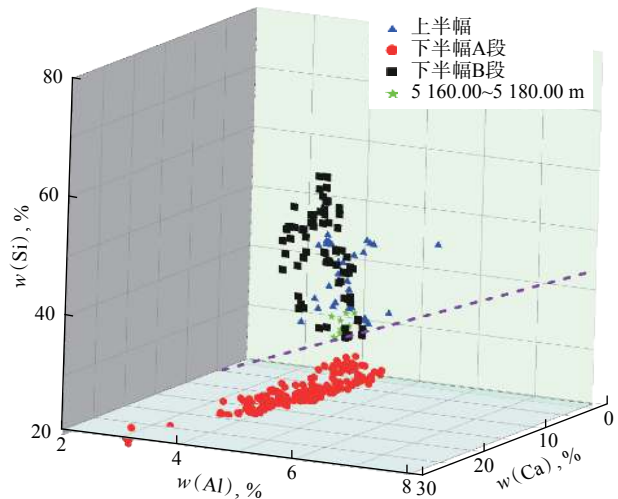


图 9 A3 井水平段元素三维显示图版

Fig.9 Element 3D display chart of horizontal section in Well A3

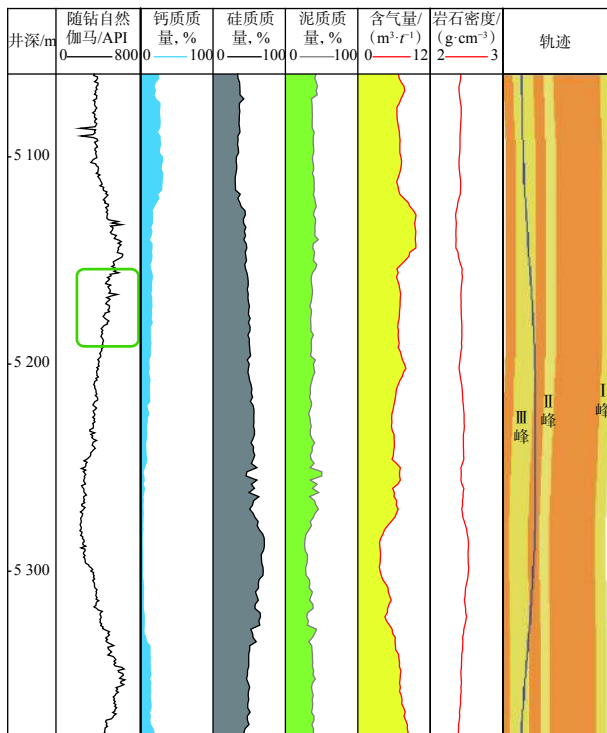


图 8 A3 井水平段参数定量计算结果与轨迹穿行情况

Fig.8 Quantitative calculation results of parameters in horizontal section of Well A3 and track crossing

### 5 结论与建议

1) X 射线荧光元素录井能提供丰富的地质信息,在深层页岩气井地质导向钻进中能够弥补自然伽马的多解性问题,且与远钻头随钻测井工具相比时效性更好,为精准地质导向钻进提供了依据。

2) 基于元素录井建立的三端元图版、Si-Al 交会图版、Si-Al-Ca 三维显示图版以及关键评价参数定量计算模型,能够准确识别小层,判断钻头在小层中的穿行方向。在威荣页岩气田应用表明,其具有较好的现场应用效果,可提高深层页岩气水平井水平段优质储层的钻遇率。

3)随着深层页岩气勘探开发的深入,新钻探区块的钻井地质条件更趋复杂,在复杂构造条件下优质储层的随钻识别与评价将面临新的挑战,应积极探索微幅构造、隐蔽断层的随钻定量评价方法,不断提高复杂区域深层页岩气勘探开发的技术水平。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317-326.  
GUO Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317-326.
- [2] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律: 四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.  
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China: understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [3] 臧艳彬. 川东南地区深层页岩气钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 7-12.  
ZANG Yanbin. Key drilling technology for deep shale gas reservoirs in the Southeastern Sichuan Region[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 7-12.
- [4] 乐守群, 王进杰, 苏前荣, 等. 涪陵页岩气田水平井井身结构优化设计[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 17-20.  
YUE Shouqun, WANG Jinjie, SU Qianrong, et al. The optimization of casing programs for horizontal wells in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(1): 17-20.
- [5] 林永学, 甄剑武. 威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 21-27.  
LIN Yongxue, ZHEN Jianwu. Water based drilling fluid technology for deep shale gas horizontal wells in Block Weiyuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 21-27.
- [6] 刘旭礼. 页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 69-73.  
LIU Xuli. Geosteering technology in the drilling of shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(5): 69-73.
- [7] 张德军. 页岩气水平井地质导向钻井技术及其应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 7-10.  
ZHANG Dejun. Geo-steering drilling technology and its application in shale gas horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(4): 7-10.
- [8] 罗鑫, 张树东, 王云刚, 等. 昭通页岩气示范区复杂地质条件下的地质导向技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 29-32.  
LUO Xin, ZHANG Shudong, WANG Yungang, et al. Geosteering technology for complex geological conditions at Zhaotong shale gas development demonstration ration[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 29-32.
- [9] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 572-586.  
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 572-586.
- [10] 冉波, 刘树根, 孙玮, 等. 四川盆地及周缘下古生界五峰组-龙马溪组页岩岩相分类[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 96-107.  
RAN Bo, LIU Shugen, SUN Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 96-107.
- [11] 王同, 杨克明, 熊亮, 等. 川南地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及其对储层的控制[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 915-925.  
WANG Tong, YANG Keming, XIONG Liang, et al. Shale sequence stratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan and their control on reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 915-925.
- [12] 武恒志, 熊亮, 葛忠伟, 等. 四川盆地威远地区页岩气优质储层精细刻画与靶窗优选[J]. 天然气工业, 2019, 39(03): 11-20.  
WU Hengzhi, XIONG Liang, GE Zhongwei, et al. Fine characterization and target window optimization of high-quality shale gas reservoirs in the Weiyuan Area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(03): 11-20.
- [13] 唐诚, 顾炎午, 李瑞嵩, 等. Y地区龙马溪组一段-五峰组页岩元素分类方法研究与应用[J]. 录井工程, 2018, 29(2): 42-46.  
TANG Cheng, GU Yanwu, LI Ruisong, et al. Study and application of element classification method for shale in the first member of Longmaxi Formation-Wufeng Formation of Y area[J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(2): 42-46.
- [14] 王濡岳, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩气储层地球物理测井评价研究现状[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 228-241.  
WANG Ruyue, DING Wenlong, WANG Zhe, et al. Progress of geophysical well logging in shale gas reservoir evaluation[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 228-241.
- [15] 黄锐, 张新华, 秦黎明, 等. 页岩矿物成分并场快速评价研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 774-777.  
HUANG Rui, ZHANG Xinhua, QIN Liming, et al. Rapid in situ evaluation of mineral compositions in shale wells[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(6): 774-777.
- [16] 庞江平, 杨扬, 谢伟, 等. 自然伽马能谱录井技术在页岩气开发中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 54-59.  
PANG Jiangping, YANG Yang, XIE Wei, et al. Application of natural gamma-ray spectral logging in shale gas development[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 54-59.
- [17] 顾炎午, 唐诚, 王崇敬, 等. XRF元素录井用于随钻开展页岩评价参数计算的方法[J]. 录井工程, 2018, 29(1): 47-52.  
GU Yanwu, TANG Cheng, WANG Chongjin, et al. XRF element logging on calculating shale evaluation parameters while drilling[J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(1): 47-52.
- [18] HERRON M M, HERRON S L. Geological applications of geochemical well logging[J]. Geological Society London Special Publications, 1990, 48(1): 165-175.