

[引著格式] 虞兵, 柳先远, 侯秋元, 等. 氧活化测井在塔里木油田的应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (11+12): 18~25.

# 氧活化测井在塔里木油田的应用

虞兵 (中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 陕西 西安 710000)

柳先远 (中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

侯秋元 (中国石油集团测井有限公司国际事业部, 北京 102206)

王谦, 廖茂杰, 姚亚彬 (中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 陕西 西安 710000)

[摘要] 塔里木油田早期注入剖面测井系列主要为五参数以及放射性同位素测井, 五参数测井在分层配注中无法计算各小层的注入量, 放射性同位素测井在大孔道以及长期注水沾污严重的井中效果差, 因此引进氧活化测井。从氧活化测井原理、解释方法以及应用效果进行研究, 结果证明氧活化测井适用于各种管柱结构, 计算精度高, 在长期注水沾污严重的井中可以准确识别吸水层位。

[关键词] 氧活化测井; 塔里木油田; 函数拟合

[中图分类号] P631.84

[文献标志码] A

[文章编号] 1000-9752 (2015) 11+12-0018-08

## 1 氧活化测井原理

氧活化测井主要是通过高能脉冲中子来活化氧原子, 使活化后的氧原子放射出特征伽马射线。在水流动方向上设置多个伽马射线探测器, 当活化水流经某探测器时, 该探测器  $\gamma$  计数率增大, 通过测量活化时间谱, 能计算出水流从中子源流到探测器的时间 (渡越时间)。根据源距和活化水通过探测器的时间计算出水流速度。在已知流动截面的情况下, 通过水流速度可计算出水流量<sup>[1~3]</sup>。

氧活化的物理基础: 用能量大于 10MeV 的快中子照射流体, 流体中的活化氧产生氧的放射性同位素  $^{16}\text{N}$ ,  $^{16}\text{N}$  不稳定放射  $\beta^-$  射线后衰变, 半衰期为 7.13s。衰变过程中放出高能  $\gamma$  射线,  $^{16}\text{N}$  衰变过程放射出  $\gamma$  射线能量为 6.13MeV (图 1)。

由于氧原子核活化后放出的伽马射线的能量较高, 且能穿透几英寸井筒材料, 因此可以通过对伽马射线时间谱的测量来反映油管内、环型空间、套管外含氧物质, 特别是水的流动状况。氧活化测井仪具有单发多收功能, 一次下井可同时测上、下水流量, 仪器的结构图如图 2 所示。

氧活化测井具有以下技术特点: ①可同时测量管内、管外的水流速度, 进而计算各层的吸水量; ②可准确测量窜槽及流失层位; ③一次下井可完成双向水流的测量; ④不受注入液体的影响; ⑤不受吸水层孔道的影响; ⑥不受管柱中油污的影响; ⑦不使用任何放射性示踪剂, 对井筒和地层不造成沾污、沉降、污染等问题, 是新一代环保型测井仪器; ⑧能完成磁定位、井温、压力、自然伽马等多参数测量, 便于综合解释<sup>[3]</sup>。

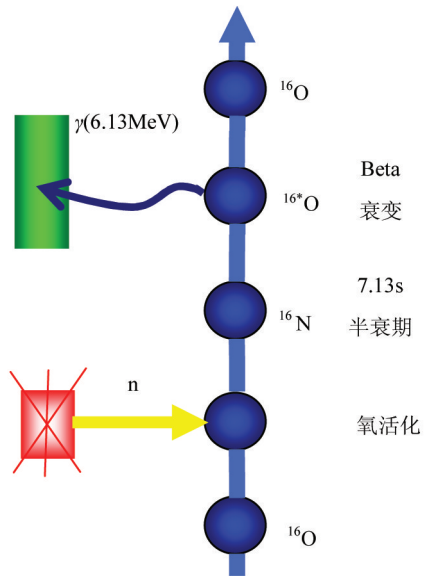
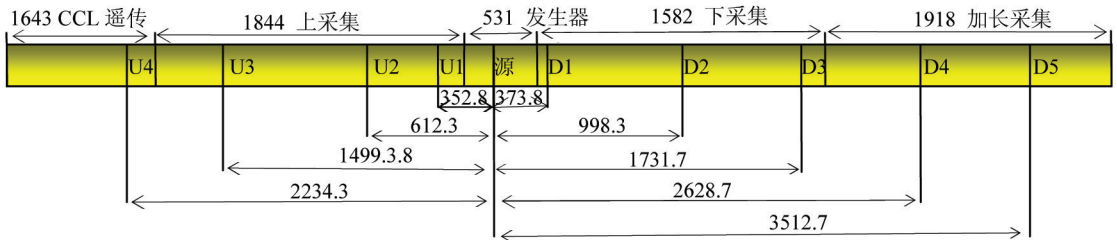


图 1 氧活化的物理基础示意图



注：U1、U2、U3、U4为测上水流的探头；D1、D2、D3、D4、D5为测下水流的探头。

图 2 氧活化测井仪器结构图 (图中数字单位为 mm)

## 2 氧活化测井解释方法

图 3 为氧活化测井的解释流程图，基础数据预处理主要是以裸眼井自然伽马曲线为基准进行深度校正；氧活化点测数据一般以文本文件记录，数据加载就是将文本数据加载到解释软件中以时间谱峰图格式显示 (见图 4)；参数设置主要是油管、套管的尺寸设置以及测井仪器系列的选择，测井仪器外径的选择 (塔里木油田氧活化测井仪器主要是西部瑞普公司的仪器，该公司氧活化测井仪器的测量上限和下限如表 1 所示)；氧活化测井解释最关键的一步是渡越时间的计算，根据源距和渡越时间可计算出水流速度，从而得到流量。

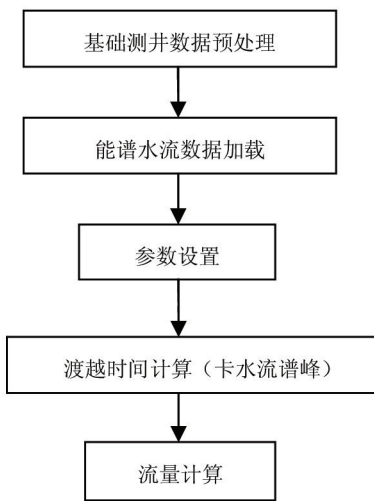


图 3 氧活化测井解释流程图

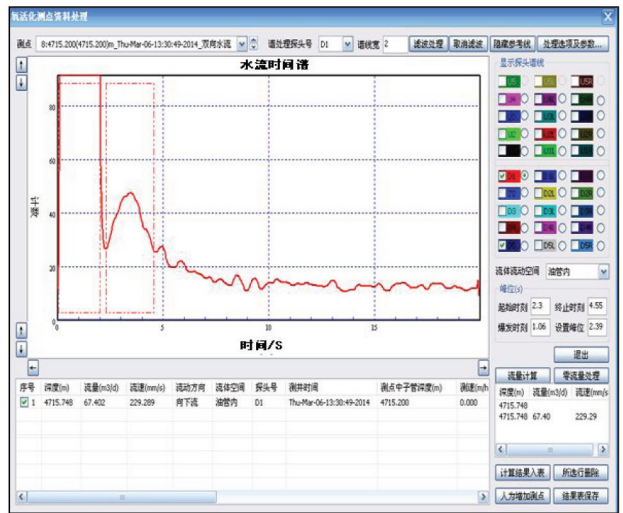


图 4 氧活化测井时间谱峰图

表 1 西部瑞普公司氧活化测井水流流量范围表

管柱	内径 /mm	外径 /mm	下水流				上水流			
			最小源距 /m	最大源距 /m	最小流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	最大流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	最小源距 /m	最大源距 /m	最小流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	最大流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
油管	62	38 (仪器)	0.37	3.513	4.26	336.38	0.35	2.226	4.03	213.14
	62	43 (仪器)			3.54	279.61			3.35	177.18
	76	38 (仪器)			7.69	607.16			7.27	384.72
	76	43 (仪器)			6.97	550.39			6.59	348.76
套管	121.36	38 (仪器)			23.57	1861.87			22.30	1179.77
	121.36	43 (仪器)			22.85	1805.11			21.62	1143.80
	157.08	38 (仪器)			41.21	3255.85			39.00	2063.06
	157.08	43 (仪器)			40.49	3199.09			38.32	2027.09
环空	121.36	73 (油管)			19.31	1525.50			18.27	966.63
	121.36	89 (油管)			15.88	1254.71			15.03	795.05
	157.08	73 (油管)			36.95	2919.47			34.97	1849.91
	157.08	89 (油管)			33.53	2648.69			31.73	1678.33

目前渡越时间的计算有2种方法——加权平均法与函数拟合法，下面分别予以讨论。

### 2.1 加权平均法

加权平均法即在时间谱上计数最大的位置附近取一时间区间，然后采用这段时间区间内计数对时间求取平均的方法实现。由于实际测量中时间谱上各道伽马射线计数存在统计涨落，加权平均法受统计涨落的影响，误差较大，并且在非对称峰中计算的峰位易发生明显偏移（如图5）。

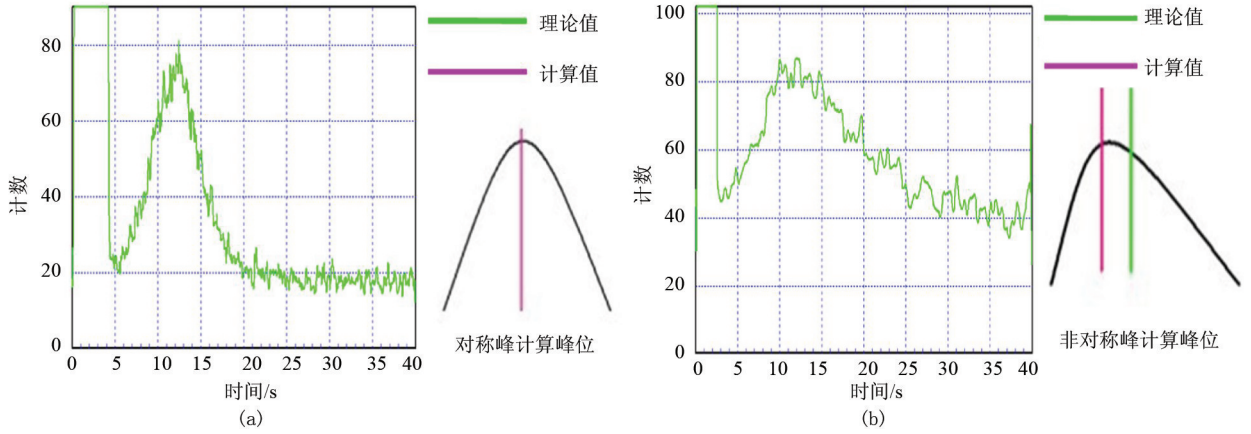


图5 对称峰 (a) 与非对称峰 (b) 峰位计算图

### 2.2 函数拟合法

氧活化谱峰计数率遵循一定的统计分布规律，因此可以利用一个解析函数近似代表谱峰数据，利用数学方法得到该函数的各个参数，从而达到寻找峰位目的。该次研究利用普通高斯函数与双高斯函数分别对非对称峰进行拟合，通过拟合结果（图6、7）可以看出，双高斯函数效果明显好于普通高斯函数。双高斯函数以期望值  $T$  为界，把一个普通高斯函数变为分段函数的形式，在  $T$  两边唯一不同是峰宽  $\sigma$ ，当原始数据对称性较差时，峰位两侧的  $\sigma$  会做相应的调整以适应整体时间谱的形状。利用双高斯函数拟合曲线可以有效消除统计涨落的误差，并且在非对称峰中也可以准确找到峰位<sup>[4~6]</sup>。

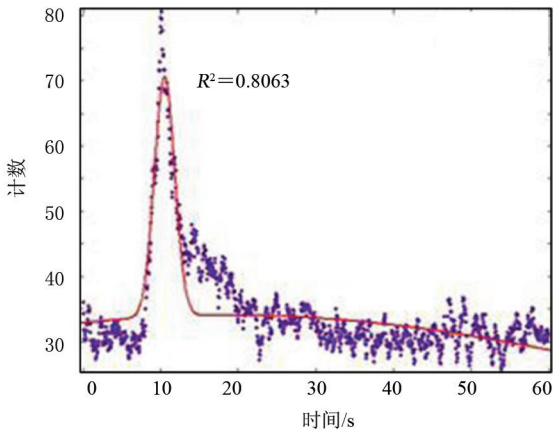


图6 普通高斯函数拟合曲线图

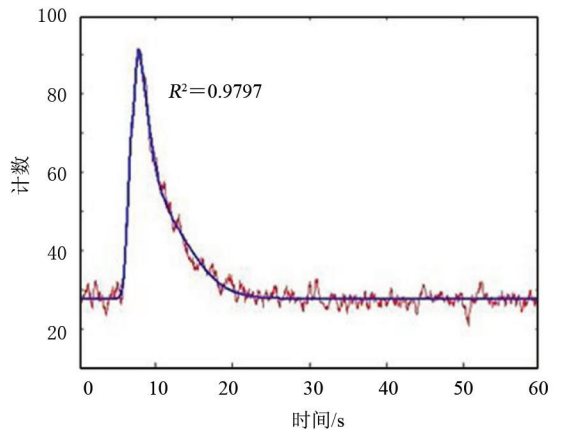


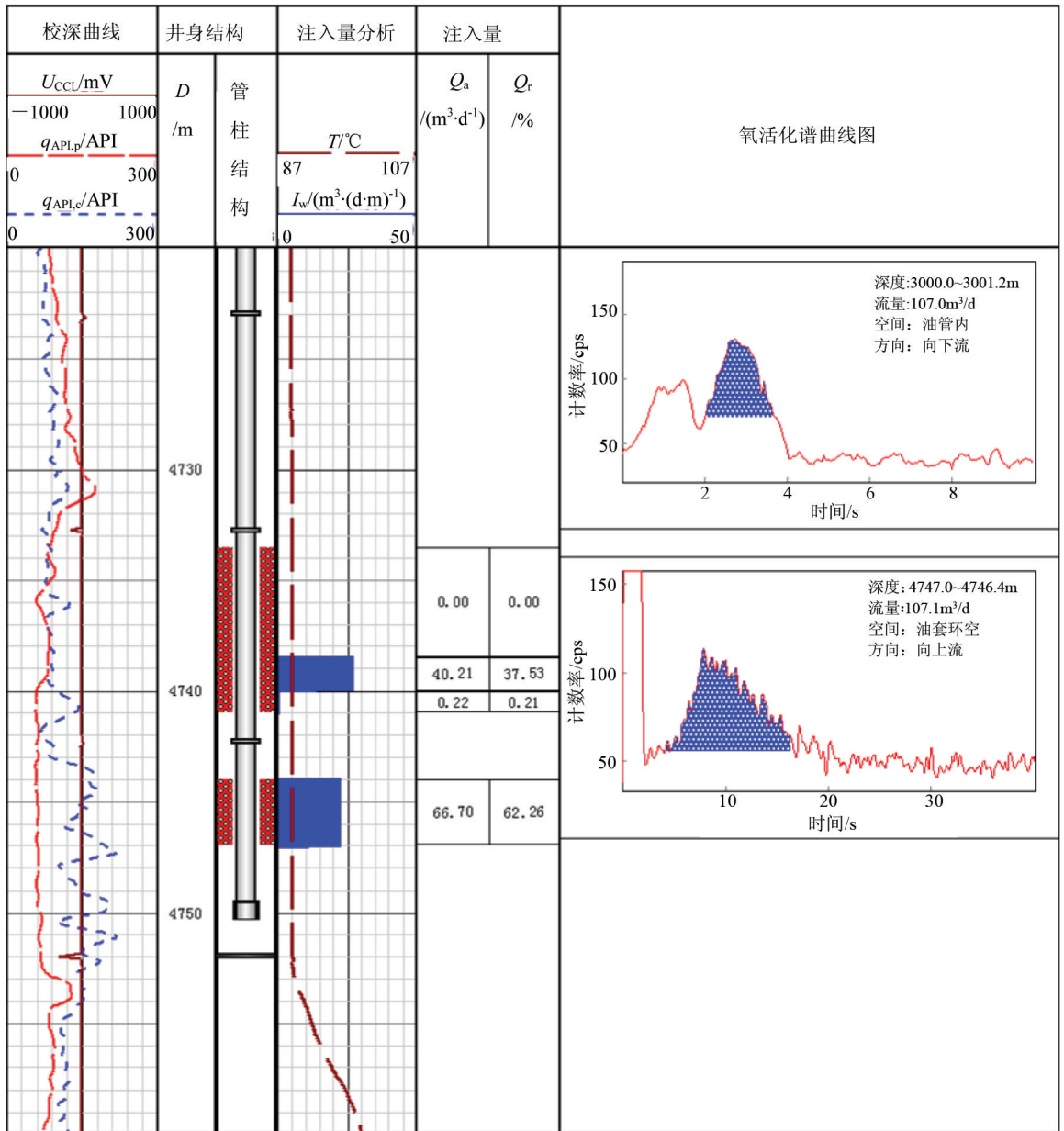
图7 双高斯函数拟合曲线图

## 3 氧活化测井的应用

### 3.1 实例分析

LN-X井是注水井，注入量为  $106\text{m}^3/\text{d}$ 。从LN-X井氧活化测井解释成果图（图8）上可以看到，4731.2m处油管中下水流谱峰很明显，其中第1谱峰为 neutron burst peak，第2谱峰为水流峰，计算出油管中

下水流为 107m<sup>3</sup>/d；在 4746.4m 处，油套环空中上水流谱峰明显，计算出油套环空中上水流为 107.1m<sup>3</sup>/d。从该井实例可以看出，氧活化测井计算精度高，可以同时完成上、下水流的测量。



注： $U_{CCL}$  为磁定位； $q_{API,c}$  为完井伽马； $q_{API,p}$  为生产伽马； $D$  为井深； $T$  为流体温度； $I_w$  为注入强度； $Q_a$  为绝对注入量； $Q_r$  为相对注入量。下同。

图 8 LN-X 井氧活化解释成果图

LN-Y 井是分层配注井，需监测 4762~4771m、4773~4777m 等 2 个射孔层的吸入量。五参数涡轮流量测井在油套环空无法测量，因此无法使用涡轮流量测井；在 2 个射孔层的位置存在油管结箍，结箍处容易形成同位素沾污，同位素沾污严重影响同位素示踪测井解释精度，因此同位素示踪测井不适用。该井采用氧活化测井，从 LN-Y 井氧活化测井解释成果图（图 9）可以看出，在 4771.2m 处能谱水流谱峰为明显的双峰显示，其中第 1 个峰为油管中下水流峰，第 2 个峰为油套环空中下水流峰，说明氧活化测井能监测油管内以及油套环空的水流流动状况，从而计算出各个射孔层的注入量。



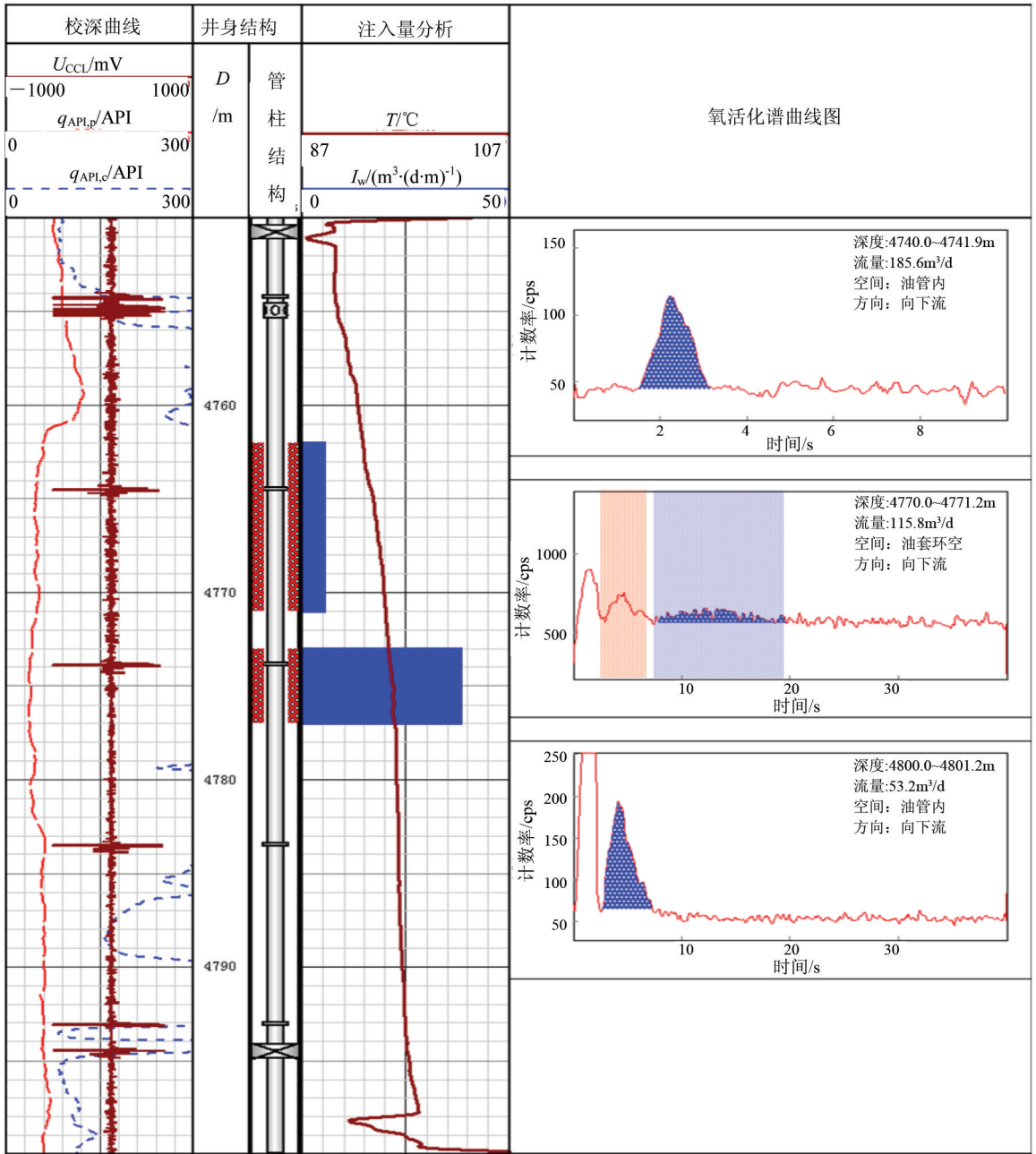
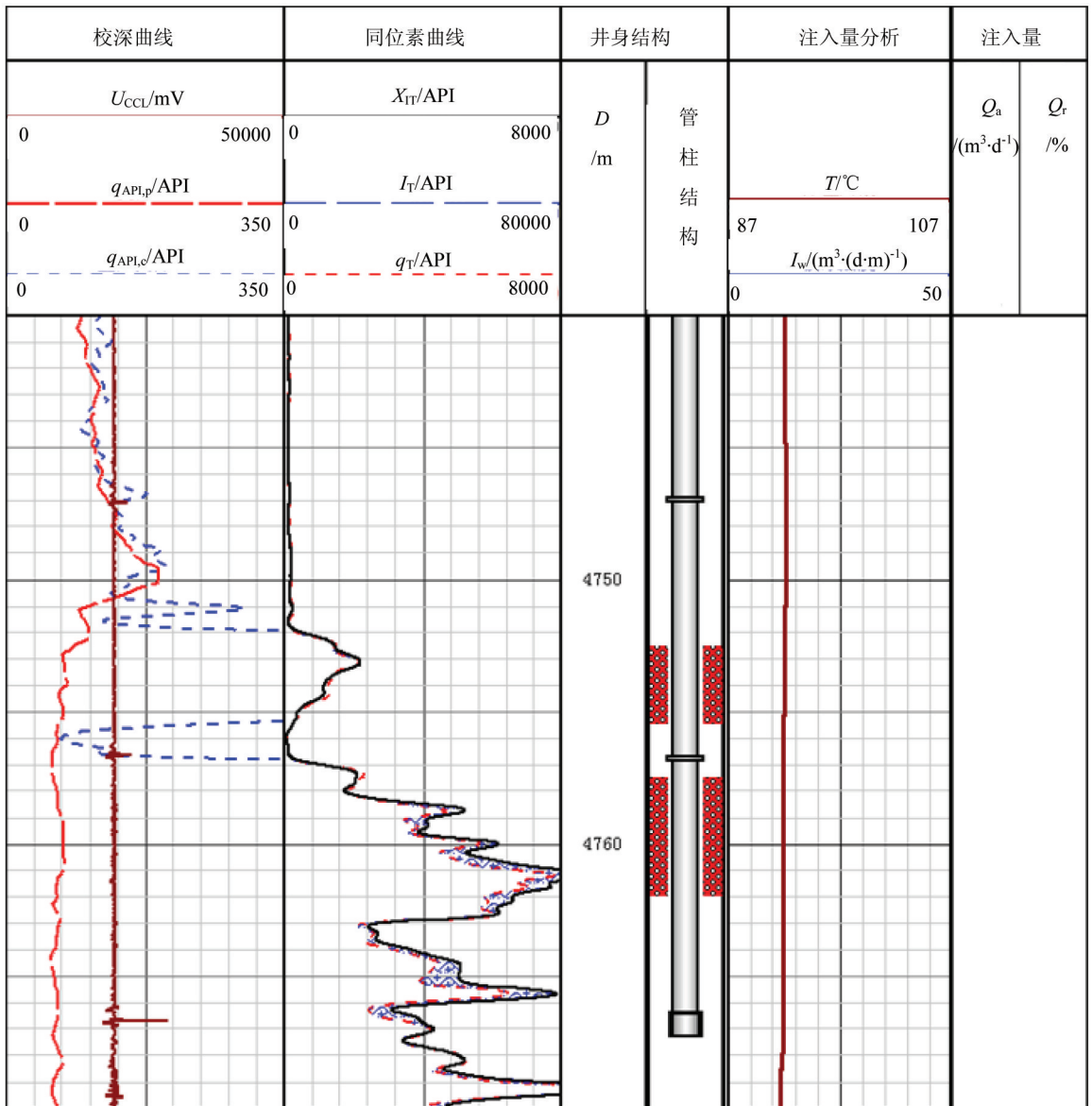


图9 LN-Y井氧活化解释成果图

图10为LN-Z井的放射性同位素测井解释成果图，可以看出，底部射孔层伽马基线很高，与同位素曲线差别不明显，说明沾污严重，放射性同位素测井不适用。图11为LN-Z井氧活化测井解释成果图，可以看出，在4763.6m和4760.1m等2处有明显的油套环空上水流峰，在4758.7m处已经探测不到油套环空上水流峰，说明4758.7m以下为吸水层段。

氧活化测井在低流量情况下特征峰信号非常弱，定量解释困难。图12为套管内径121.3mm、油管外径为73mm情况下油套环空流量分别为61.8、41.3、23.9m<sup>3</sup>/d时的氧活化谱峰图，可以看出，流量为61.8m<sup>3</sup>/d时，水流谱峰非常明显；当水流下降到23.9m<sup>3</sup>/d时，水流谱峰信号非常弱，几乎探测不到，定量解释困难。



注： $X_{IT}$ 为归位曲线； $I_T$ 为同位素曲线； $q_T$ 为伽马基线。下同。

图 10 LN-Z 井的放射性同位素测井成果图

## 4 结论

1) 氧活化测井相对涡轮流量测井以及放射性同位素测井具有明显优势，可同时完成双向水流的测量，并且可以监测油管以及油套环空的水流流动状况，计算各小层的注入量。

2) 利用双高斯函数拟合谱峰曲线，可以有效消除统计涨落误差，并且在非对称峰中也可以准确找到峰位。

3) 在小流量的情况下，氧活化测井水流谱峰信号弱，定量解释困难，需要进一步加强测量仪器的改进。

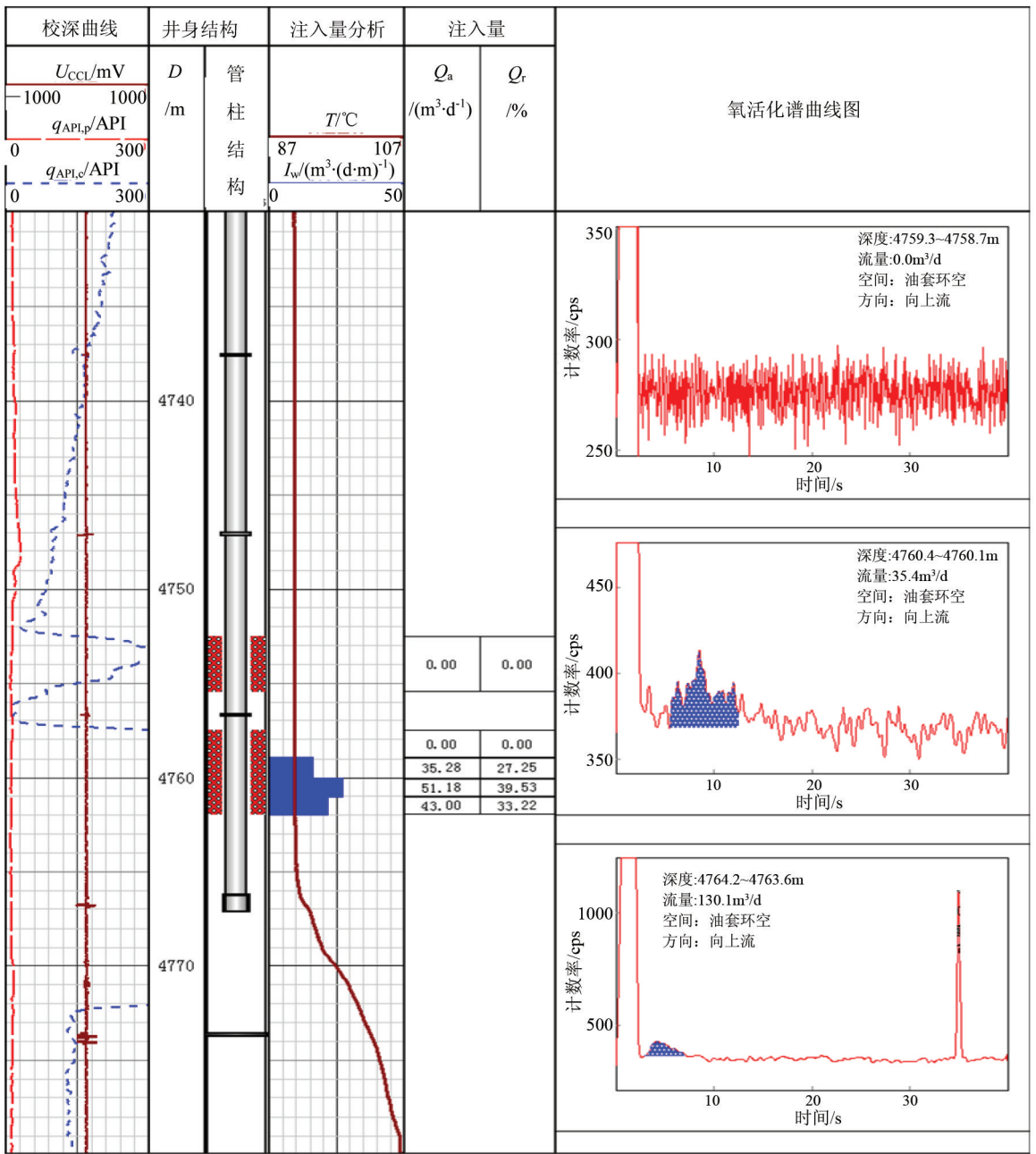


图 11 LN-Z 井氧化活化测井解释成果图

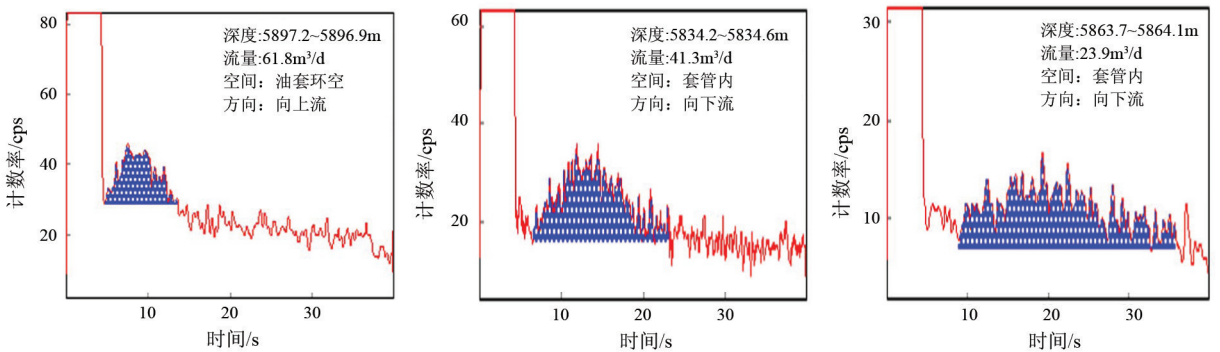


图 12 不同流量氧化活化谱峰图

## [参考文献]

- [1] 郭海敏, 杜武军, 戴家才, 等. 氧活化测井解释方法研究 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2007, 29 (4): 94~96.
- [2] 郭海敏, 张金海, 罗璇, 等. 能谱水流测井技术及其在塔里木油田的应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2013, 35 (10): 87~92.
- [3] 任晓荣, 鲁保平, 黄剑雄. 脉冲氧活化测井技术 [J]. 测井技术, 1999, 23 (5): 385~388.
- [4] 刘国良, 刘宪伟. 脉冲氧活化测井水流速度计算方法研究 [J]. 测井技术, 2006, 30 (6): 548~550.
- [5] 姜亦忠, 徐琳, 王建国, 等. 脉冲中子氧活化测井时间谱的模拟计算 [J]. 石油仪器, 2011, 25 (6): 5~6.
- [6] 李新城, 郭海敏, 董勇. 氧活化测井单峰数据拟合研究 [J]. 国外测井技术, 2011, (4): 18~21.

[编辑] 龚丹

(上接第 12 页)

## 4 结论

1) 苏 48 区 Psh<sub>8</sub><sup>u</sup> 主要发育发育辫状河三角洲沉积体系, 进一步可细分为辫状河三角洲平原和前缘 2 种亚相, 分流河道、废弃河道、越岸沉积、水下分流河道、支流间湾、远砂坝及席状砂等 7 种微相类型。

2) 研究区水动力条件强, 多期河道叠置, 冲刷面河道砂发育, 主要为辫状河三角洲平原沉积, 靠近湖盆的西南向, 局部发育辫状河三角洲前缘沉积。随湖平面上升, 湖岸线向北推进, 呈现砂体退积的沉积样式。

## [参考文献]

- [1] 琚惠姣, 孙卫. 苏里格气田苏 48 区盒<sub>8</sub>-山<sub>1</sub>段砂岩储层物性主控因素研究 [J]. 甘肃地质, 2011, 20 (4): 54~59.
- [2] 沈玉林, 郭英海, 李壮福. 鄂尔多斯盆地苏里格庙地区二叠系山西组及下石盒子组盒八段沉积相 [J]. 古地理学报, 2006, 8 (1): 53~62.
- [3] 何顺利, 兰朝利, 门成全. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式 [J]. 石油学报, 2005, 26 (6): 25~29.
- [4] Li Y J, Zhao Y. Detailed sedimentary facies of a sandstone reservoir in the eastern zone of Sulige Gas Field, Ordos Basin [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20 (6): 891~897.
- [5] Zhao J Z, Zhang W Z. Genesis of tight sand gas in the Ordos Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2014, 7 (4): 76~84.
- [6] 何幼斌, 王文广. 沉积岩与沉积相 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [7] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化 [J]. 沉积学报, 1998, 16 (3): 44~51.
- [8] 王长江, 令狐松, 王敬农, 等. 苏里格庙地区盒<sub>8</sub>段和山<sub>1</sub>段沉积微相特征 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2005, 7 (3): 1~5.

[编辑] 邓磊