

文章编号: 1001-6112(2011)05-0552-07

X 射线荧光录井技术在岩性识别中的应用

——以川东北元坝地区 YB10 井和 22 井为例

王 静¹, 高 林¹, 扶喆一¹, 王津义²

(1. 中国石油化工股份有限公司 勘探南方分公司, 成都 610041;

2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要: 随着川东北元坝地区空气钻、PDC 和孕镶钻头+高速螺杆钻井新工艺的大量运用, 钻时快、岩屑细碎甚至呈粉末状的特点, 给常规录井工艺带来了岩性识别难、地层界线不易判断的问题。X 射线荧光录井技术具有完全不受岩屑颗粒直径限制、分析周期短的特点。通过分析岩样中镁、铝、钾、硅、硫、钙、铁等 14 种元素的含量来判断岩性和识别地层, 弥补了常规录井的不足。其中, YB10 井在井段 702~7 155 m 通过采用 X 射线荧光录井技术, 现场共分析样品 4 115 个, 根据元素含量、曲线变化特征, 结合露头岩性资料, 对陆相砂、泥岩和海相碳酸盐岩进行井下岩性识别, 经与电测资料对比吻合度达 92.60%。

关键词: X 射线荧光录井; 元素含量分析; 岩性识别; 地层划分; 元坝地区; 川东北

中图分类号: TE142

文献标识码: A

Application of X-ray fluorescence logging technique in lithologic identification:

A case study in wells YB10 and YB22, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

Wang Jing¹, Gao Lin¹, Fu Zheyi¹, Wang Jinyi²

(1. Southern Exploration Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: New techniques such as air drilling, PDC and impregnated bit + fast-spiral screw have been practiced widely in Yuanba region of the northeast Sichuan Basin; however, fast drilling and fine or even powdered detritus have made it difficult to identify lithologic characters and formation boundaries for common well-logging. The X-ray fluorescence logging technique is not restricted by small detritus size or short analysis period. It deals with the contents of 14 elements such as Mg, Al, K, Si, S, Ca and Fe in rock samples so as to analyze lithologic features and to identify formation boundaries. The new technique was practiced in well YB10. 4 115 samples collected from 702-7 155 m deep were analyzed. According to element contents and curve changes, combined with outcrop lithologic data, continental sandstone and mudstone as well as marine carbonate rock were distinguished. The results were accordant with electric logging data in 92.60%.

Key words: X-ray fluorescence logging; element content analysis; lithologic identification; formation classification; Yuanba region; northeast Sichuan Basin

1 基本原理与操作流程

1.1 基本原理

X 射线也是一种电磁辐射, 其波长约为 10.3~10 nm, 介于紫外线和 γ 射线之间。当 X 射线用于照射岩屑、岩心样品时, 由于岩样中含有多种元素, 所以会被激发出各种波长和能量的次级 X 射线, 把混合的 X 射线按波长或能量分开后, 分别测量不同的 X 射线

强度, 即可进行元素的定性分析和定量测定。X 射线分析仪主要包括波长色散型和能量色散型, 在川东北元坝地区使用的 X 射线仪器为江苏昆山产 EDX3600B 能量色散型 X 射线分析仪, 工作原理见图 1。目前, 它能够分析钠、镁、铝、硅、磷、硫、氯、钾、钙、钛、钒、铬、锰、铁等 14 种元素含量。

1.2 操作流程

将清洗过的岩屑、岩心样品自然晾干或在不超过

收稿日期: 2011-04-20; 修订日期: 2011-08-24。

作者简介: 王静(1963—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事油气田勘探研究。E-mail: nfgsjingwang@126.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司重点先导项目(P10034)资助。

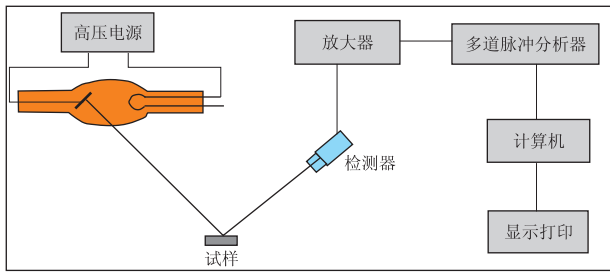


图 1 EDX3600B 能量色散型 X 射线分析仪工作原理

Fig. 1 Working mechanism of X-ray analysis meter of EDX3600B energy dispersion type

过 60 °C 的温度下烘干;用筛子滤去岩屑样品里的掉块及大颗粒,将样品研磨成粉末,研磨量 30 g 左右;用压片机将岩样粉末压制成片状样品,样片厚度要求不低于 3 mm,表面平整无裂纹;分析样品前先抽真空,真空泵负压力应小于 -0.07 MPa;用 X 射线荧光分析仪检测样品中各元素的质量百分含量,分析周期小于 5 min。根据分析出的数据,进行岩性与地层的判断及其它方面的研究。

2 地层岩性与录井现状

2.1 地层岩性

根据钻井及地表露头揭示,川东北元坝地区下古生界地层较完整,仅缺失志留系上统;上古生界缺失泥盆系和部分石炭系,二叠系发育齐全;中生界三叠系、侏罗系保留齐全,下白垩统保留较好,但缺失上白垩统;新生界基本没有沉积。实钻证实,下二叠统栖霞组一中三叠统雷口坡组为开阔台地、局限台地、蒸发台地、台地边缘及斜坡相沉积,岩性以灰色、深灰色灰岩,含泥质灰岩、泥质灰岩,灰黑色硅质灰岩、含硅质灰岩、碳质页岩、泥岩、硅质页岩,浅灰色、灰色鲕粒灰岩、生物灰岩,灰色溶孔白云岩、生屑灰岩,灰色铝土质泥岩及石膏等为主,厚度 3 500~6 800 m。上三叠统须家河组须一段至下白垩统剑门关组为三角洲、滨浅湖、湖泊及河流相沉积,岩性以砂岩、含泥砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩、泥岩为主,夹薄层页岩,厚度 3 000~6 000 m^[1-3]。

2.2 录井现状

2006 年元坝地区钻探井 25 口,随着钻井技术的不断发展,在井深 20~3 420 m 使用空气锤钻进,井深 3 420~7 100 m 除主要目的层下三叠统飞仙关组飞二段及上二叠统长兴组使用牙轮钻头钻进外,其余井段均使用 PDC 钻头加高速铰杆和涡轮+孕镶金刚石钻头钻进,钻时快、返出岩屑呈粉末和灰面状,常规录井技术通过钻时和岩屑录井已无法满足现场岩性鉴定的需要,在一定程度上阻

碍了钻井技术的发展,同时由于现场常规录井对岩性判断不准,延缓了勘探步伐。而采用 X 射线荧光分析仪检测样品中各种元素的质量百分含量,分析周期小于 5 min,这种方法在元坝 10,22 井现场应用效果好,弥补了因岩屑细小给现场鉴定岩性带来的困难^[4-6]。

3 岩性识别

按照沉积岩的地球化学理论及其元素的富集规律,硅元素一般在砂岩中富集,铝、钾、铁在泥岩中富集,镁、钙在白云岩中富集,钙在灰岩中富集,硫、钙在石膏岩中富集,磷、硫在煤层中富集,钠、氯在盐岩中富集,铝、铁、钛在风化壳上富集,硫、铁在黄铁矿中富集。X 射线荧光录井技术在元坝地区的应用中,能根据元素的富集规律,建立起各种岩性元素的计算及解释方法。其中,该地区上部地层如陆相地层,可以利用 X 射线检测到的铁元素代入经验公式计算岩石中的泥质含量,经验公式为:
$$[\omega(\text{Fe}) - \omega(\text{Fe})_{\min}] / [\omega(\text{Fe})_{\max} - \omega(\text{Fe})_{\min}] \times 100\%$$
用 100% 减去泥质和灰质等成分的含量得出砂质含量。而对于碳酸盐岩和石膏岩地层,钙主要分布在灰质岩、云质岩、石膏岩中,镁、硫则分布在云质岩和石膏岩里,铝和硅分布在泥质里。因此,可根据 X 射线检测到的钙、镁、硫、铝和硅等 5 种元素准确计算出岩样中灰质、云质、石膏和泥质的含量,进而实现岩性的识别和准确定名。

对于陆相沉积岩性的定名,除了可以采用上述的计算法得出砂泥岩含量,也可采取硅—钾曲线交会法进行分析判断。方法是对二条曲线选择合适的比例进行交会,硅的曲线在右(即硅大钾小),即为砂岩;硅的曲线在左即为泥岩,并参考钙、铁、铝等元素的变化进行判断^[7-12]。

3.1 砂、泥岩

YB10 井中侏罗统下沙溪庙组(J₂x¹) 3 430~3 480 m 井段岩性为砂泥岩互层,在 3 442~3 462 m 井段 X 衍射分析样品 6 个,钾、铝、铁含量由 2.26%, 8.90%, 3.78% 分别降低到 0.92%, 7.10%, 2.06%, 硅含量由 25.93% 上升到 27.59%, 锰、钙、氯、磷含量变化小且含量较低,说明砂质增多,硅—钾交会为砂岩,综合判断为砂岩^[13],与自然伽马、深、浅侧向电阻率曲线的变化趋势吻合(图 2)。

YB22 井中侏罗统上沙溪庙组(J₂x²) 2 904~2 924 m, X 衍射分析样品 11 个,钾、铝、铁含量升高,硅含量降低,锰、钙、氯、磷含量变化小且含量较低,经过对 YB22 井砂泥岩含量计算,泥质含量达

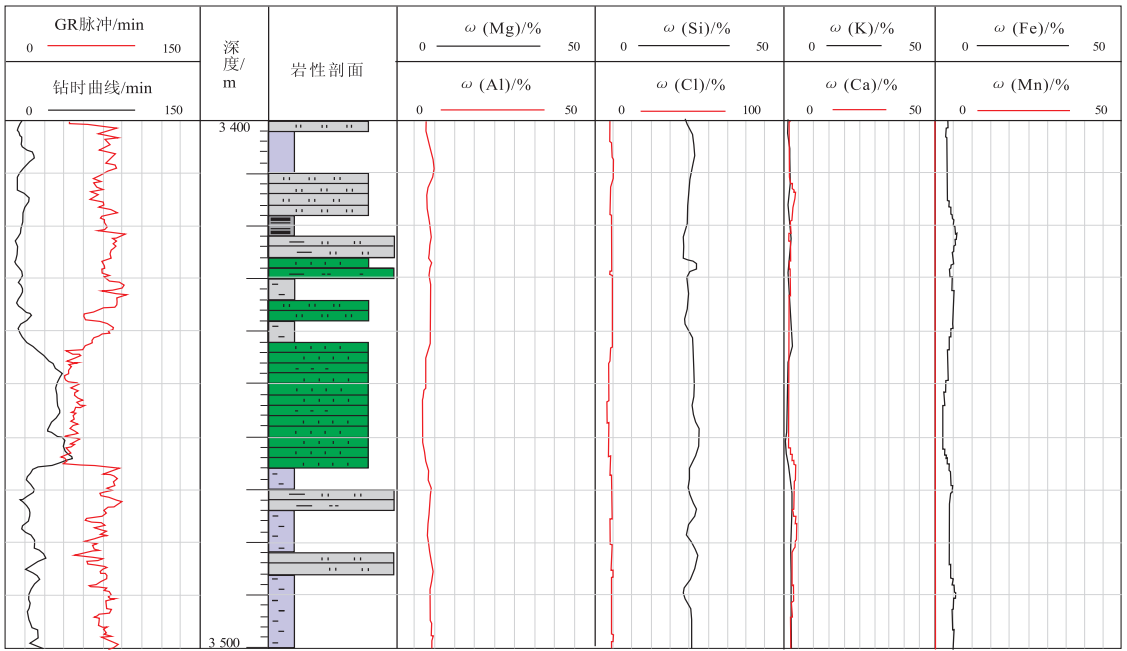


图 2 川东北元坝地区 YB10 井 X 射线荧光录井资料判断 J_2x^1 砂、泥岩

Fig. 2 Identification of J_2x^1 sandstone and mudstone based on X-ray fluorescence logging in well YB10, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

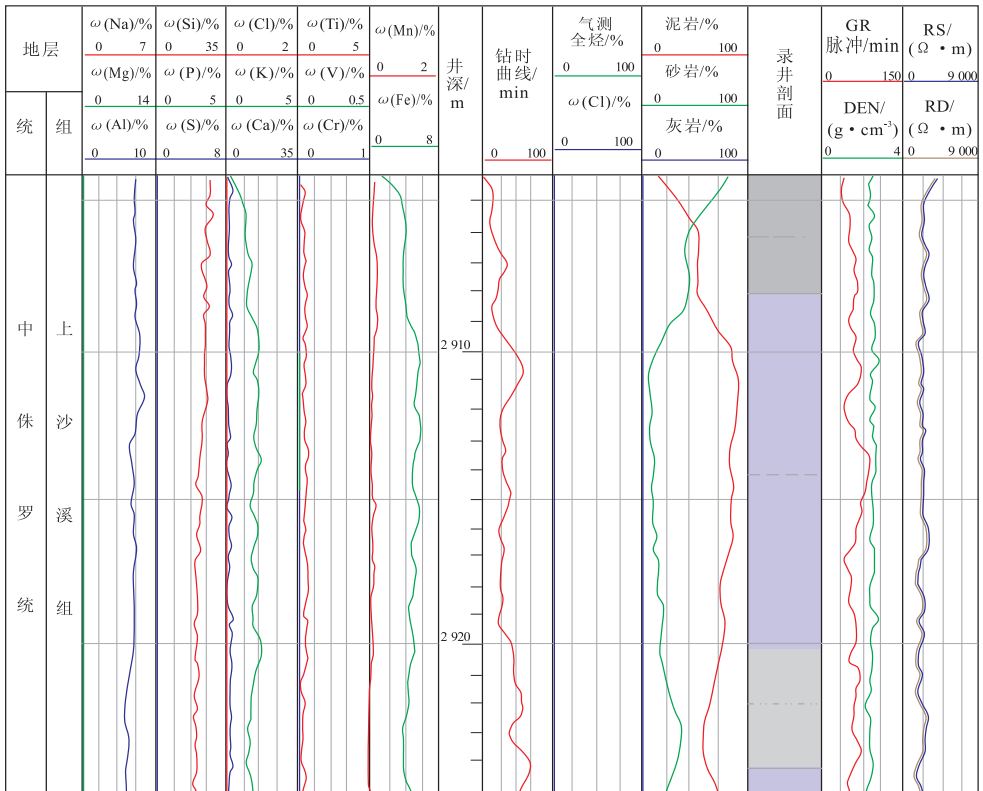


图 3 川东北元坝地区 YB22 井 X 射线荧光录井资料判断 J_2x^2 泥岩

Fig. 3 Identification of J_2x^2 mudstone based on X-ray fluorescence logging in well YB22, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

53.73%~90.34%，平均 76.17%；砂质含量为 9.66%~46.27%，平均 23.83%。综合判断为泥岩，且泥质含量变化与自然伽马曲线的变化趋势基

本一致(图 3)。

3.2 碳质泥岩

上二叠统吴家坪组(P_2w)顶部区域上存在碳

质泥岩,在 YB22 井 6 763~6 767 m 井段分析样品 5 个,数据显示钾、铝与上、下部连接层灰岩相比含量整体升高,镁含量降低(表 1),说明该段岩性泥质增多。综合分析本段主要为碳质泥岩,且与自然伽马、深、浅测向电阻率曲线吻合(图 4)。

3.3 灰岩、泥灰岩

YB10 井下三叠统嘉三段(T_{1j}³)6 006~6 080 m 井段元素分析样品 76 个,数据显示 6 006~6 066 m 井段钙元素含量比上、下部连接层明显升高,由 20.22%↑29.86%和 17.64%↑22.99%,硫元素含量比上、下部连接层明显降低,由 0.82%↓0.52%和

11.43%↓0.49%,判断为灰岩;6 067~6 072 m 井段铝元素由 1.18%↑3.07%和 1.66%↑2.99%,钙元素由 22.99%↓18.35%和 22.30%↓17.81%,判断为泥质灰岩(图 5)。其中,对 6 042~6 064 m 成分含量计算,灰质含量达到 38.91%~83.81%,平均 60.94%;云质含量 4.37%~12.06%,平均 7.82%;泥质含量 8.72%~22.47%,平均 15.85%(表 2),定名为灰岩^[14-15]。且 6 042~6 064 m 井段,测井密度平均值为 2.73 g/cm³,与纯灰岩密度 2.71 g/cm³、纯白云岩密度 2.87 g/cm³、纯石膏岩密度 2.98 g/cm³ 相比,该井段岩性密度与纯灰岩密度基本吻合。同时,相应的

表 1 川东北元坝地区 YB22 井 P_{2w} 碳质泥岩 X 衍射元素分析
Table 1 X-diffraction element analyses of P_{2w} carbonaceous mudstone in well YB22, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

井深/m	ω(Na)	ω(Mg)	ω(Al)	ω(Si)	ω(P)	ω(S)	ω(K)	ω(Ca)	ω(Ba)	ω(Cr)	ω(Mn)	%
6 760	1.26	3.87	0.28	2.15	0.29	0.36	0.00	31.22	0.28	0.05	0.41	
6 761	0.93	3.86	0.18	1.52	0.27	0.34	0.00	31.59	0.21	0.05	0.35	
6 762	0.97	3.85	0.20	1.57	0.29	0.36	0.00	32.11	0.28	0.07	0.34	
6 763	0.78	0.00	2.54	7.55	0.35	0.36	0.66	20.49	0.87	0.05	1.99	
6 764	0.00	0.00	3.41	10.37	0.30	0.71	1.20	18.39	1.16	0.04	3.27	
6 765	0.00	0.00	3.92	11.41	0.27	0.48	1.57	22.35	1.29	0.04	3.79	
6 766	0.00	0.00	3.60	10.75	0.33	0.45	1.59	24.71	1.21	0.05	3.26	
6 767	0.00	0.00	3.95	10.67	0.31	0.64	1.51	11.52	1.26	0.03	2.68	
6 768	0.00	4.60	1.72	5.59	0.54	1.27	0.00	17.99	0.56	0.08	2.59	

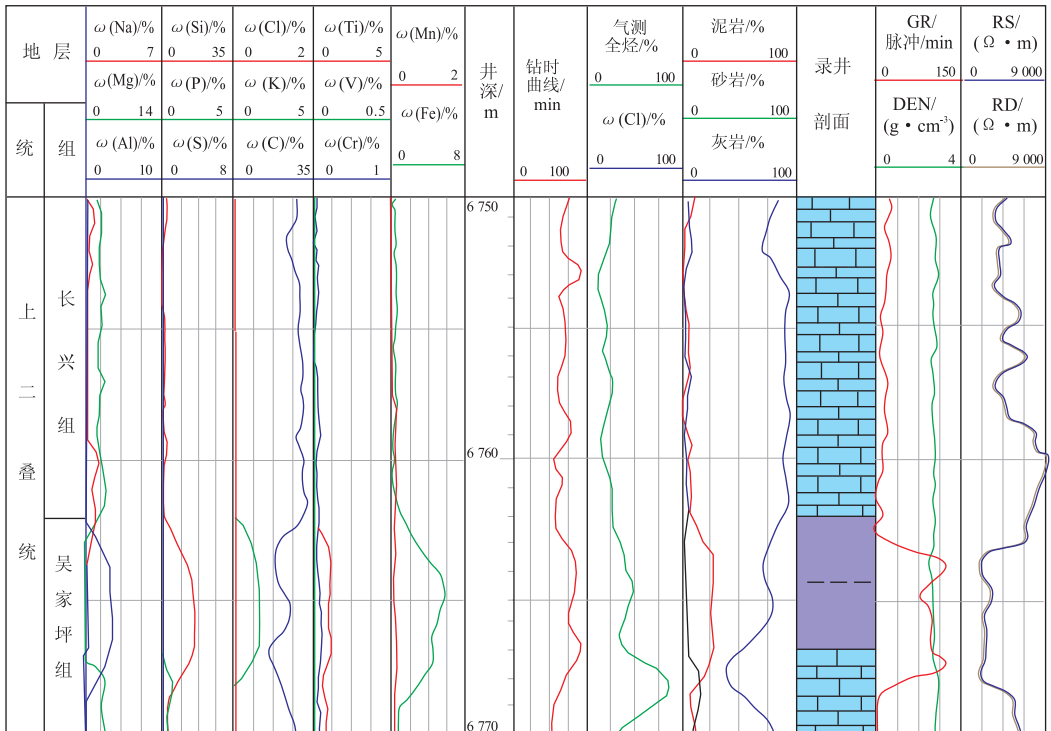


图 4 川东北元坝地区 YB22 井 X 射线荧光录井资料判断 P_{2w} 碳质泥岩

Fig. 4 Identification of P_{2w} carbonaceous mudstone based on X-ray fluorescence logging in well YB22, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

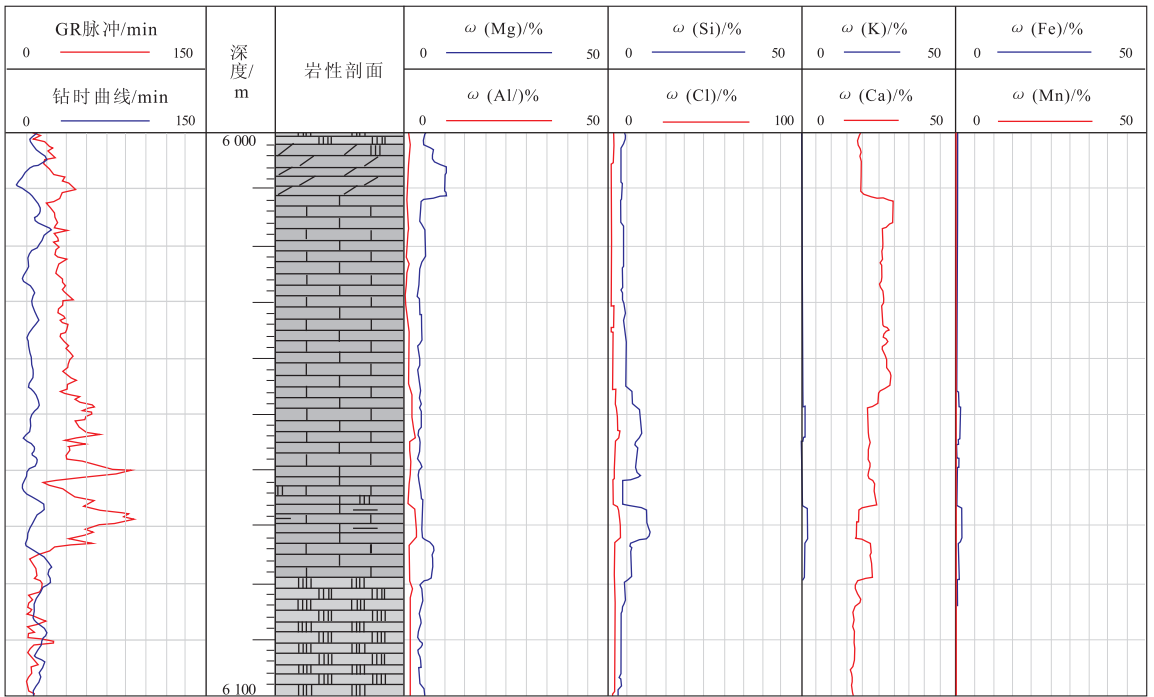


图 5 川东北元坝地区 YB10 井 X 射线荧光录井资料判断 T_1j^3 灰岩
 Fig. 5 Identification of T_1j^3 limestone based on X-ray fluorescence logging in well YB10, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

表 2 川东北元坝地区 YB10 井 T_1j^3 灰岩不同岩性成分含量

Table 2 Contents of different lithologic compounds of T_1j^3 limestone in well YB10, Yuanba region, northeast Sichuan Basin %

井深/m	灰岩	白云岩	石膏岩	泥岩
6 042	82.46	4.43	3.00	10.10
6 044	83.81	4.55	1.81	9.83
6 046	69.88	10.40	2.25	15.53
6 048	70.14	10.15	2.12	15.66
6 050	55.98	9.99	2.00	21.66
6 052	55.34	12.06	1.81	22.14
6 054	60.38	5.12	2.16	22.47
6 056	59.58	5.67	3.05	18.99
6 058	57.85	4.37	3.65	18.49
6 060	57.17	8.52	3.75	17.74
6 062	38.91	8.78	43.46	8.85
6 064	39.80	9.76	41.72	8.72

测井曲线,在 6 060,6 068 m 井段泥质含量上升,自然伽马曲线随之也表现为高值;而 6 062~6 064 m 井段泥质和灰质含量下降,云质和石膏含量上升,电阻率和密度曲线随之上升,自然伽马随泥质的下降而降低。

3.4 白云岩

YB10 井中三叠统雷四段(T_2l^4)5 120~5 200 m 井段元素分析样品 52 个,镁元素含量在 5 120~5 190 m 白云岩段为 5.16%~7.95%,平均 6.62%,钙元素含

量为 8.80%~19.82%,平均 14.38%;而在 5 191~5 200 m 灰岩段镁元素含量开始降低到 4.72%~5.24%,平均 5.09%,钙元素含量上升为 19.05%~22.87%,平均 21.11%(图 6)。元素成分含量计算,在 5 120~5 138 m 云质含量达到 49.54%~64.94%,平均 55.83%,石膏 12.57%~28.05%,平均 17.11%,泥质 8.08%~11.52%,平均 9.69%(表 3),定名为白云岩。电阻率的变化趋势与石膏的变化较一致,5 120~5 138 m 井段密度平均值为 2.84 g/cm³,与该井段岩性为纯白云岩密度相吻合。

3.5 与电测资料对比结果

YB10 井完井电测后,将 X 衍射元素分析数据

表 3 川东北元坝地区 YB10 井 T_2l^4 白云岩不同岩性成分含量

Table 3 Contents of different lithologic compounds of T_2l^4 dolomite in well YB10, Yuanba region, northeast Sichuan Basin %

井深/m	灰岩	白云岩	石膏岩	泥岩
5 120	0.00	49.54	28.05	8.35
5 122	0.00	52.05	19.92	8.08
5 126	0.00	51.89	14.09	11.52
5 128	0.00	61.58	13.22	9.23
5 130	0.00	57.84	15.11	11.15
5 132	0.00	49.76	14.40	9.80
5 135	0.00	64.94	12.57	9.99
5 138	0.00	59.03	19.54	9.36

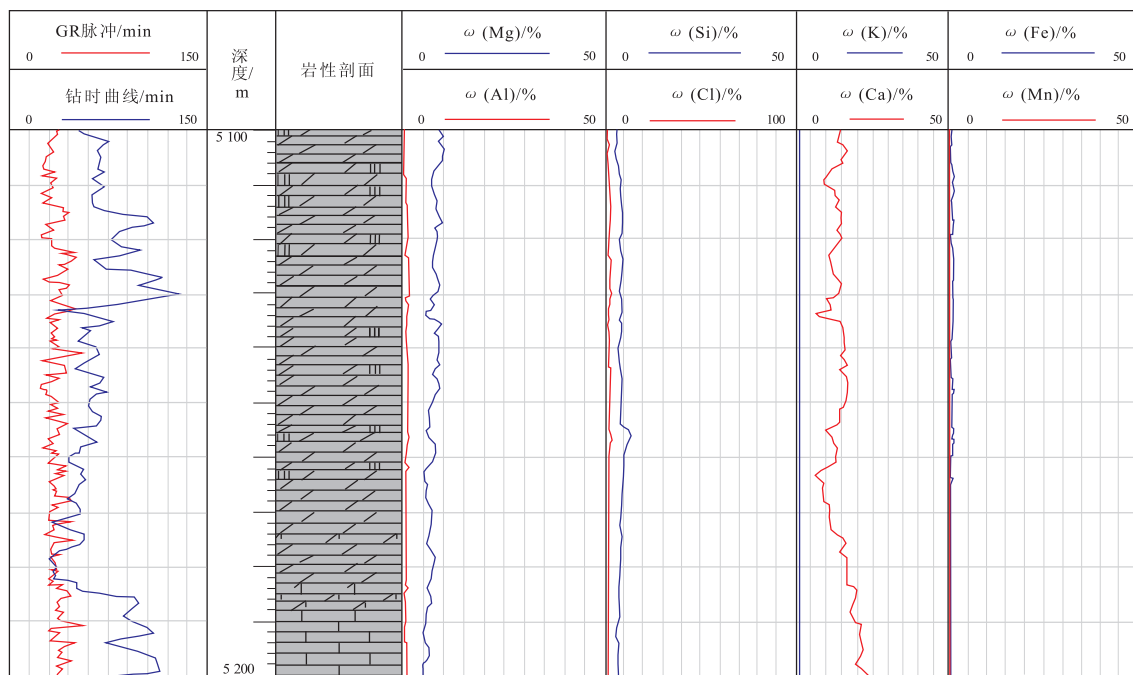


图 6 川东北元坝地区 YB10 井 X 射线荧光录井资料判断 T_2l^4 白云岩

Fig. 6 Identification of T_2l^4 dolomite based on X-ray fluorescence logging in well YB10, Yuanba region, northeast Sichuan Basin

和计算获得的录井岩性剖面与电测剖面进行了对比分析。结果录井与测井剖面符合率为：陆相地层 30~3 203 m 空气钻进段总录井层 290 层，剖面符合率为 85.9%，3 204~5 005 m 井段使用 PDC 钻头+高速螺杆钻进方式，总录井层 456 层，剖面符合率为 92.5%；海相地层 5 005~7 155 m 使用高速螺杆+PDC 钻头钻进方式和涡轮+孕镶金刚石钻头钻进总录井层 365 层，剖面符合率为 95.1%；全井使用 X 衍射录井，总录井层 1 111 层，全井剖面符合率达 92.60%，比牙轮钻进常规录井规范要求剖面符合率 85% 高出 7.6 个百分点。

4 结论

1) X 衍射录井现场分析周期短，缩短了取样、送样及分析的时间，为快速决定中完、取心提供了地质依据。

2) X 衍射录井技术具有不受岩屑大小的限制，解决了空气钻、高速螺杆+PDC 或孕镶钻头钻进在现场岩性定名的难题。

3) 通过采用 X 射线荧光录井技术对 YB10 井 702~7 155 m 井段进行录井。现场共分析样品 4 115 个，根据元素含量、曲线变化特征，结合露头岩性资料，对陆相砂、泥岩和海相碳酸盐岩进行井下岩性识别起到了良好效果，与电测资料吻合度达 92.60%。

参考文献：

- [1] 马永生. 碳酸盐岩微相:分析、解释及应用[M]. 北京:地质出版社,2006.
- [2] 马永生,牟传龙,郭旭升,等. 四川盆地东北部长期沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评,2006,52(1):25-29.
- [3] 陈洪德,庞林,倪新锋,等. 中上扬子地区海相油气勘探前景[J]. 石油实验地质,2007,29(1):13-18.
- [4] 熊有全. 川东地区普光气田深井钻井技术[J]. 当代石油石化,2006,14(8):11-15.
- [5] 刘仲华. 川东北地区钻井施工的几点认识[J]. 钻采工艺,2005,28(3):21-24.
- [6] 孙起昱,张雨生,王爱芳,等. 空气锤在普光气田气体钻井中的应用[J]. 石油钻探技术,2009,37(43):68-72.
- [7] 窦立荣,王一刚. 中国古生界海相碳酸盐岩油气藏的形成与分布[J]. 石油实验地质,2003,25(5):419-425.
- [8] 马永生,郭旭升,凡睿. 川东普光气田飞仙关组鲕滩储集层预测[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):60-64.
- [9] 马永生,傅强,郭彤楼. 川东北地区普光气田长兴一飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质,2005,27(5):455-461.
- [10] 王恕一,蒋小琼,管宏林,等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质,2010,32(4):366-371.
- [11] 王一刚,刘划一,文应初,等. 川东北飞仙关组鲕滩储层分布规律、勘探方法与远景预测[J]. 天然气工业,2002,22(增刊):14-19.
- [12] 李阳,石兴春. 地质监督手册[M]. 北京:中国石化出版社,2008.
- [13] 何莹,黎平,杨宇,等. 通南巴地区上二叠统一下三叠统层序

地层划分[J]. 天然气工业, 2007, 27 (6): 22-26.

[14] 吴萍, 陈光碧, 李成, 等. 川东北地区嘉一段—上二叠统录井分层探讨[J]. 天然气工业, 2007, 27 (11): 12-15.

[15] 刘光祥. 中上扬子北缘中生界海相烃源岩特征[J]. 石油实验地质, 2005, 27 (5): 490-495.

(编辑 徐文明)



(上接第 545 页)

[8] Lockhart R S, Meredith W, Love G D, et al. Release of bound aliphatic biomarkers via hydropyrolysis from type II kerogen at high maturity[J]. Organic Geochemistry, 2008, 8 (39): 1119-1124.

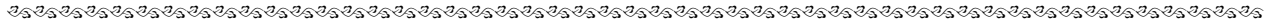
[9] 孙永革, Meredith W, Snape C E, 等. 加氢催化裂解技术用于高演化源岩有机质表征研究[J]. 石油与天然气地质,

2008, 29(2): 276-282.

[10] 周建伟, 李术元, 岳长涛, 等. 催化加氢热解反应催化剂前驱物四硫代钨酸铵的表征[J]. 化学试剂, 2006, 28(2): 86-88.

[11] 周建伟, 李术元, 岳长涛, 等. HYPY/SE 提取固体有机质中生物标志化合物的研究[J]. 化学通报, 2006, 15(5): 337-341.

(编辑 黄娟)



(上接第 551 页)

[11] 高喜龙, 肖贤明, 刘中云, 等. 用开放体系的热解方法对烃源岩生烃动力学研究: 以东营凹陷某生油岩为例[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 487-490.

[12] 韩方, 李荣, 韩敏欣, 等. 生油岩热解气相色谱分析方法及其地质应用[J]. 录井技术, 1999, 10(3): 13-21.

[13] 贾蓉芬, 邵敏, 刘德汉. 在线 py-gc 分析技术在气源岩评价中的应用[J]. 地球化学, 2001, 30(6): 592-598.

[14] Ungger P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins[J]. Nature, 1987, 327: 52-54.

[15] Ungerer P. State of the art of research in kinetic modeling

of oil formation and expulsion [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1-3): 1-25.

[16] Tang Y, Perry J K, Jenden P D, et al. Mathematical modeling of stable carbon isotope ratios in natural gases [J]. Geochem Cosmochim Acta, 2000, 64(15): 2673-2687.

[17] 李术元, 郭绍辉, 徐红喜, 等. 烃源岩热解生烃动力学及其应用[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 138-141.

[18] 王建龙, 王振平, 颜红霞. 用化学动力学法研究滨北地区中浅层源岩生烃规律[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(4): 107-112.

(编辑 韩 或)