

X射线荧光分析在岩屑录井中的应用

李一超¹, 李春山², 何国贤³

(1. 中国石油化工集团公司 油田管理部, 北京 100029; 2. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061;
3. 中国石油化工集团公司 华北石油局, 河南 郑州 450042)

摘要: 通过典型岩石化学的理论计算分析了部分沉积岩的成分特征和差别, 为 X 射线荧光(XRF)录井分析鉴别岩性奠定了理论基础。地层在岩性组合与厚度上的差别是 XRF 录井技术鉴定地层的基本前提。根据沉积岩薄层岩层的厚度, 提出以分米作为 XRF 录井取样的最低分辨率的标准。并以实例论述了在石油钻井的随钻过程中, 采用 XRF 录井新技术进行岩性分析和地层对比的步骤; 评价和展望了 XRF 录井新技术的特点与应用远景; 指出建立不同岩性主要元素理论数据库和地区性地层岩性变化元素理论剖面的重要性; 提出进一步改进 XRF 录井技术的方向。

关键词: 岩石化学分析; XRF 录井; 岩性识别; 层位判断; 统计分析; Fe/Si 比

中图分类号: O657.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)01-0058-11

The application of XRF analysis to logging

LI Yi-chao¹, LI Chun-shan² and HE Guo-xian³

(1. Department of Oilfield Management, Sinopec, Beijing 100029, China; 2. School of Petroleum Engineering, UPC, Dongying 257061, China; 3. North China Bureau of Sinopec, Zhengzhou 450042, China)

Abstract: The authors analyzed chemical characteristics and differences between sedimentary rocks, and the results obtained have established the application basis for X-ray fluorescence (XRF) analysis in logging, which is a new logging technique called XRF-logging. The differences in lithologic characters and thicknesses of strata provide a prerequisite for the stratigraphic analysis with the XRF-Logging technique. It is proposed in this paper that the decimeter should be used as the criterion of the lower sampling limit for the XRF-logging technique. A practical procedure for identifying lithologic character and judging horizons using the XRF-logging technique is illustrated in this paper, and a prediction of the application vista of the XRF-logging technique is also given. It is pointed out that the main element database of sedimentary rocks and stratigraphic profiles should be established for further application of the XRF-logging technique.

Key words: petrochemical analysis; XRF-logging technique; recognition of lithologic character; horizontal judgment; statistical analysis; Fe-Si ratio

石油钻井过程中的岩屑录井无论对油气勘探开发还是钻井工程都是极为关键的技术,但在漫长的钻井地质技术发展过程中却是唯一没有重大突破的技术。岩屑录井所获取的实物信息是目前任何其他地质方法都难以取代的,不仅应用了 20 多年的综合录井如此,先进的随钻测井技术也难以代替岩屑实

物对岩性及流体的识别和地层层位及储集条件的判断。随着石油钻井新工艺技术的飞速发展,如 PDC 钻头的应用(李功权等,2006)以及气体钻井(张汉林等,2007)、大位移井(王小利等,2007)、水平井(尹国栋等,2006)等和油气勘探开发等难度的加大,由井底返出的岩屑已经十分细碎,甚至呈粉尘状,使得

岩屑录井对地层岩性难以识别,层位难以判断。因此,在探井施工中,特别是在目的层段,往往要限制这些钻井新技术的使用,以方便岩屑录井识别、判断岩性和层位。否则,将可能导致分层卡层失准、套管下错、取心漏失等地质事故发生。细微岩屑难以辨认还将使得大位移井、水平井的钻井失去了地质导向的参照,在随钻跟踪过程中,储层的快速地质评价受到严重影响等等。总之,岩屑录井已经成为石油工程中最受困扰的瓶颈。

多年来石油地质工作者都在孜孜不倦地探索新的录井方法,石油录井行业对于粉尘状岩屑的分析做了很多尝试,其中包括岩屑的自然 γ 分析、电子探针分析、扫描电镜分析、X射线衍射分析等(郑浚茂,1989)。但这些分析方法大多不适合石油钻井的野外随钻作业,难以跟踪判断和评价油气储集层。直至近来在地质录井中采用X射线荧光随钻岩屑分析技术(XRF),才使录井技术呈现出转机(北京奥能瑞科石油技术有限公司重庆分公司,2007)。XRF录井的创新之处在于,在以沉积岩地层为主体的细粉状岩屑样品中,实现了随钻岩性快速识别和地层层位的判断。它的现场实验预示在探井钻探过程中,钻井新工艺的应用不再受到限制,从而解放钻井生产力,提高钻探速度,在整体上提高勘探开发效益。

本文针对XRF录井技术,补充了XRF进行岩性分析鉴定的理论基础,并结合沉积岩的厚度划分标准分析讨论了XRF录井技术鉴别地层时的关键问题——取样分辨率的标准,从而使得XRF录井技术

成为有理论基础和实用价值的地质录井方法。

1 理论基础

地下的岩石被钻头破碎后,随钻井液被带到地面,这些岩石碎块就叫岩屑。地质人员按照一定的取样时间和迟到时间在井口连续收集岩屑样品,通过肉眼观察岩屑颜色、产状、结构、含有物等描述岩性,恢复地下地质剖面的过程称为岩屑录井。岩屑录井是在井筒的纵向上认识地层的层序关系以及岩石性质的变化,进而通过岩屑的物性变化分析储集层的方法。它是石油勘探开发技术——随钻地质录井的基础工作和基本任务。

在钻井随钻过程中,三大岩类都会遇到。不同岩类岩石的不同的化学成分特点构成了XRF录井进行岩性乃至地层分析的基础。火成岩按照 SiO_2 的含量可分为超基性($< 45\%$)、基性($45\% \sim 52\%$)、中性($52\% \sim 65\%$)和酸性($> 65\%$)岩;沉积岩主要可分为碳酸盐岩和碎屑岩两大类;而变质岩则可分为正负变质岩,其化学成分特点分别与火成岩(正变质岩)和沉积岩(负变质岩)相当。表1为由标准矿物组成进行理论计算(徐登科,1979)的典型岩石的主要化学成分数据。由表1可看出,不同的岩石具有不同的化学成分。由橄榄岩到石英岩 SiO_2 含量由34%增加到100%, MgO 含量由23%降低到0, FeO 含量由42%降低到0;由石英砂岩到页岩 SiO_2 含量由100%降低到45%,而 Al_2O_3 的含量

表1 计算的典型岩石的氧化物含量

$w_B/\%$

Table 1 Calculated chemical composition of typical rocks

	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	FeO	Al_2O_3	SiO_2	挥发分
纯橄榄岩/苦橄岩	0	0	0	23.4	41.7	0	34.9	0
辉长岩/玄武岩	0.9	0	4.6	11.7	20.9	9.8	52.1	0
闪长岩/安山岩	3.8	0.8	8.1	6.8	8.8 ^a	14.4	56.3	1.0 ^b
花岗岩/流纹岩	3.5	5.4	0.8	2.7	2.4	13.1	71.4	0.6 ^b
石英岩/石英砂岩	0	0	0	0	0	0	100.0	0
长石石英砂岩	0.9	1.7	0.2	0	0	3.8	93.4	0
长石砂岩	1.9	3.4	0.4	0	0	7.6	86.7	0
杂砂岩	0.9	2.6	0.6	4.1	0.6	10.6	76.7	3.8 ^b
页岩	0.7	3.3	0.1	9.8	1.6	25.3	48.0	11.3 ^b
纯石灰岩	0	0	56.0	0	0	0	0	44.0 ^c
纯白云岩	0	0	30.4	21.9	0	0	0	47.7 ^c

注:数据引自徐登科(1979),a包括2,3价铁之和,b代表 H_2O ,c代表 CO_2 。

由0增加到25%；碳酸盐岩富含CaO。这些变化和
各种岩石的化学成分特征为XRF的岩性分析奠定了
基础。将XRF测试的数据与这些数据进行比较,就
可以得出测试样品(深度)的岩性,并进一步分析其
地层层位。

2 取样方法、测试仪器和操作步骤

2.1 取样方法

按照随钻地质岩屑录井要求,依据迟到时间,在
钻井液或压缩气体出口处取样。迟到时间采用理论
计算法或实测法均可。

2.2 测试仪器

采用端窗型X光管激发样品,自动选择激发条
件。要求采用进口电致冷半导体探测器,真空环境测
量,谱线自动识别,2048谱道检测与显示,多元素一次
性分析,粉末样品检测。主要分析元素为Mg、Al、Si、
P、S、Ca、Fe、Mn、Pb、Zn、Cu、Sn、Sb等,探测器分辨率优

于180 eV(55Fe),分析范围 $1 \sim 99.9 \times 10^4$ mg/kg,能
量范围 $1 \sim 30$ keV,测量时间 < 300 s,重复性 $< 0.1\%$,
稳定性 $< 0.01\%$,辐射剂量 $< 25 \mu\text{Sv/h}$ 。

2.3 操作步骤

取 ≥ 8 g的岩屑置于磨样机,研磨成粒度为100
目以上的岩粉;将岩粉放入XRF分析的专用压模中,
用液压千斤加压至10 MPa,卸压后岩粉已压制成样
片;将样片放入分析仓,启动仪器进入分析程序。最
后将分析结果的数据和图谱,按井深序号依次存入
相应的数据库和图谱库中。

3 XRF录井实例

3.1 XRF录井对岩性变化的记录

图1是四川海相沉积的碳酸盐岩地层中一口井
的XRF录井图。即便在正常录井过程中,大段二叠
系的灰岩也难以区分其微小的岩性差异,在层位划
分上也要等待测井资料出来后(在钻井成眼以后)才

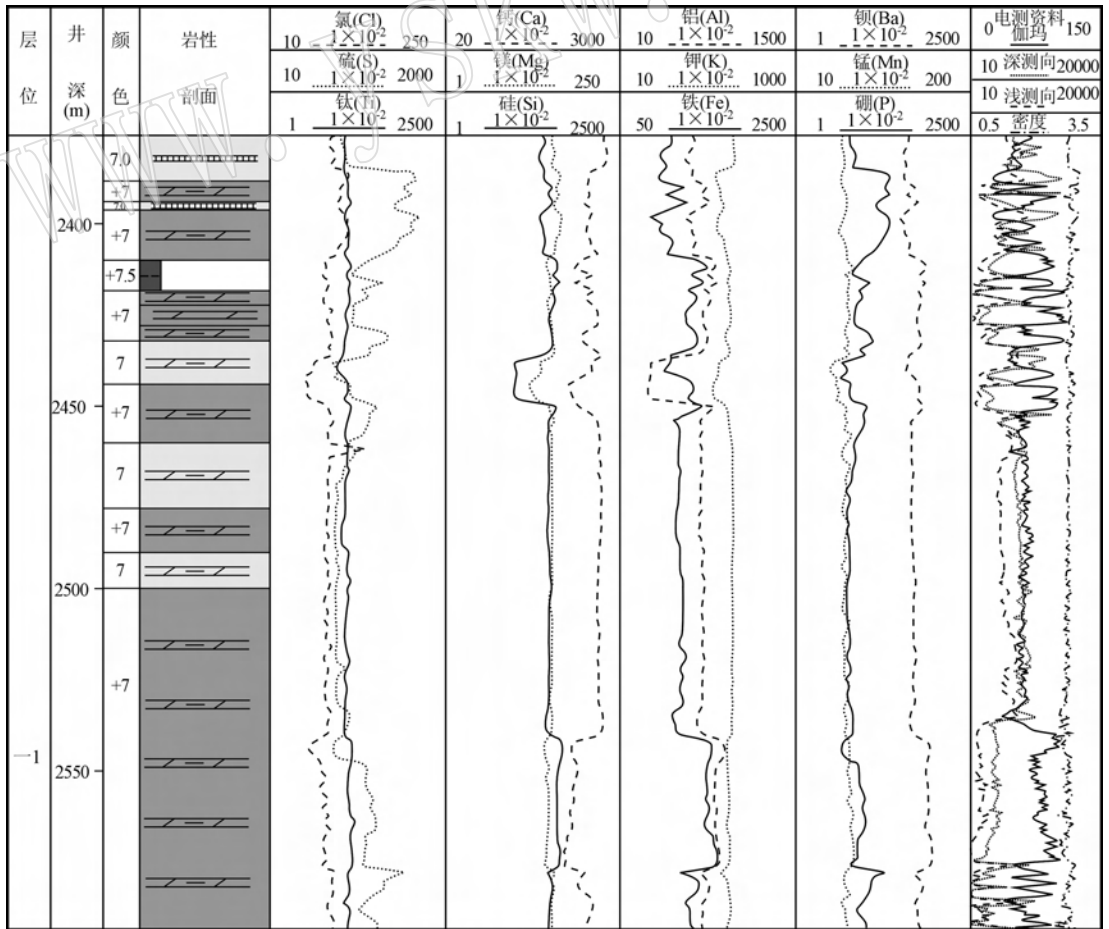


图1 四川碳酸盐岩地层XRF录井图

Fig. 1 XRF-logging diagram of Sichuan carbonate strata

能最后确定。而在随钻过程中,通过 XRF 分析可以明显地看出其主要元素的组合特征,最终与测井资料(自然伽玛、深浅测向、密度)表现出极好的对应关系。在这段白云质灰岩中,不仅将其中所夹的膏盐层、泥岩层反映的十分清晰,就连白云岩体内部的岩性差异也表现的十分清楚。

3.2 XRF 录井对地层层序变化的记录

图 2 是鄂尔多斯河道砂体一口井的 XRF 录井图。在测井曲线(自然电位、自然伽玛、深浅测向、声波、补偿中子、微球聚焦等)出来后,与 XRF 元素曲线有极好的对应关系。纵向比较,其层序特征十分明显。此外,在 Si 质含量较高的较粗砂体(井深 2 053 ~ 2 061 m 和 2 086 ~ 2 092 m)中见有良好的气显示。

同样,在鄂尔多斯的另外一口井上,用 Si、Fe 元素曲线的交汇法可以明显地划分出砂岩段与泥岩段,并且找到与气相色谱曲线的对应关系,甚至可以划分储层(图 3)。此外,岩石元素的组合关系在地层的可钻性上也有明显反映。图 4 和图 5 是华北两

口碎屑岩地层的钻井 XRF 录井图。可以明显地看到钻时(每 1 m 所钻的时间)曲线与元素也有很好的对应关系,这说明 XRF 录井图对地层的物性也有较好的反应。

上述各例绝不是特殊现象,在课题组已经完成的 30 多口井的试验中,每一口井都不仅能够找到与测井曲线极好的相关性,而且与录井的其他数据(如气测、钻时)也能找到相关性。

4 XRF 录井的对比分析

沉积岩在成岩过程中,风化、搬运、沉积及沉积后作用都可以使不同元素发生一些有规律的迁移、聚集(姜在兴,2003)。而各种地质体中化学元素丰度是地球化学的一种基本参数(邱家骥,1991)。单靠实验室有限的样本量,这些规律的确很难发现。但如果用于我国已钻或在钻的数以万计的石油钻井中随钻岩屑录井配套进行,有序而巨大的数据量将

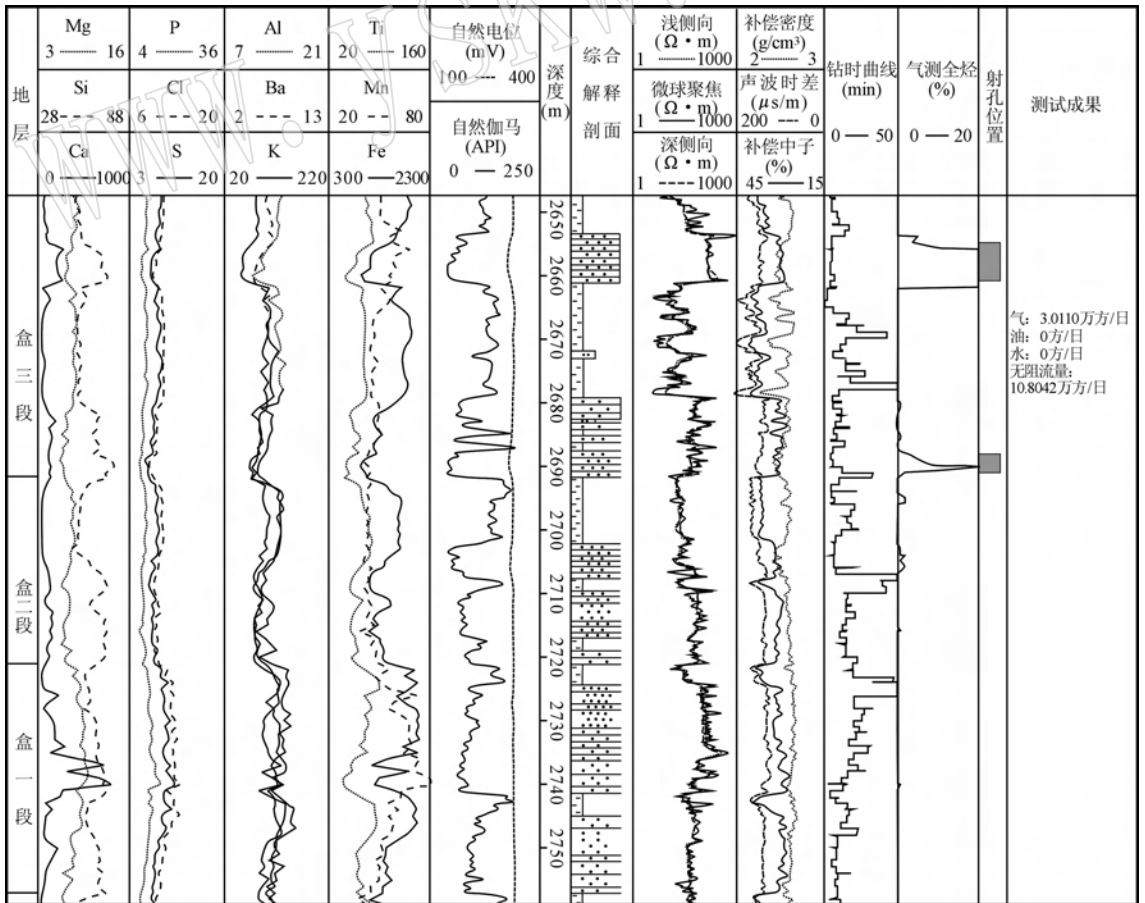


图 2 鄂尔多斯河道砂体一口井的 XRF 录井图
Fig. 2 XRF-logging diagram of a sandy bed well in Ordos

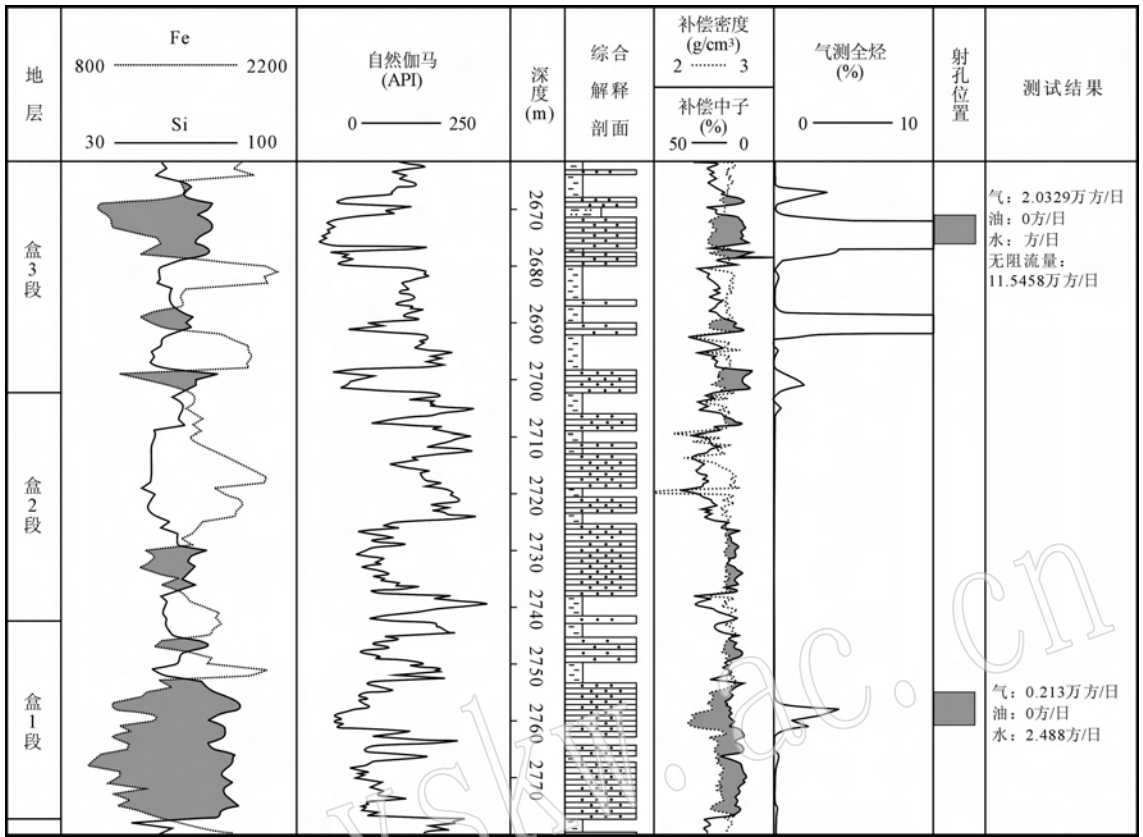


图3 Si、Fe元素曲线与储层的关系

Fig. 3 Si and Fe curve and its relationship to reservoirs

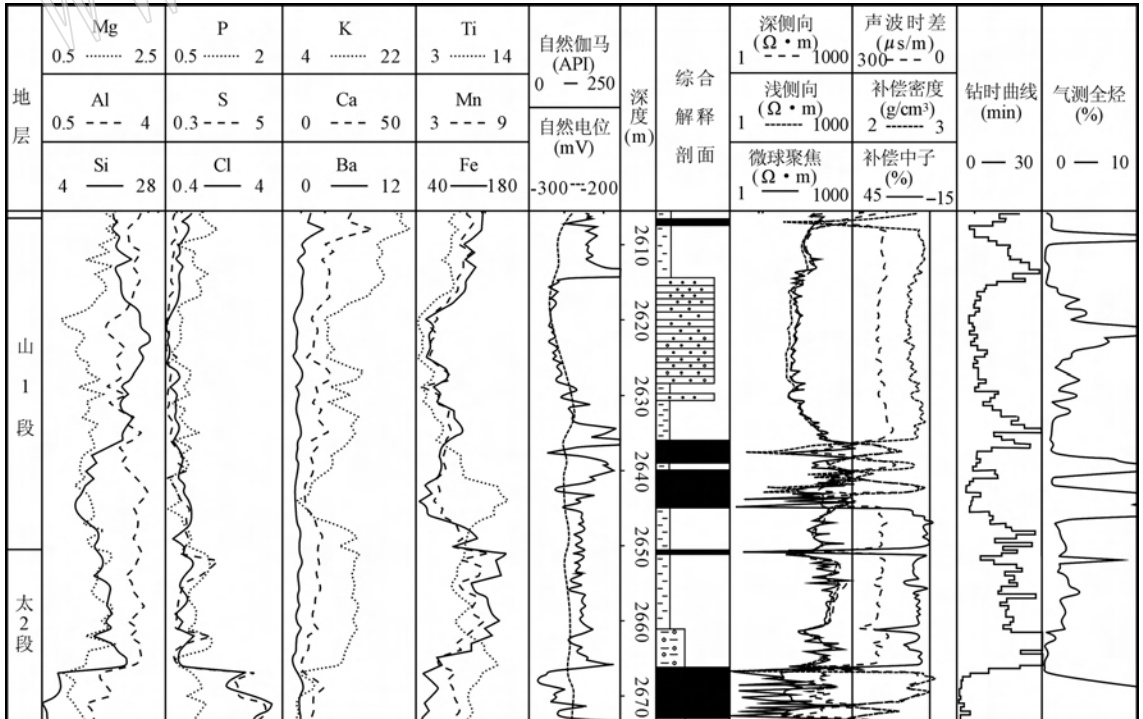


图4 钻时曲线与元素曲线的对应关系(A井)

Fig. 4 Relationship between element curve and drilling-time curve(well A)

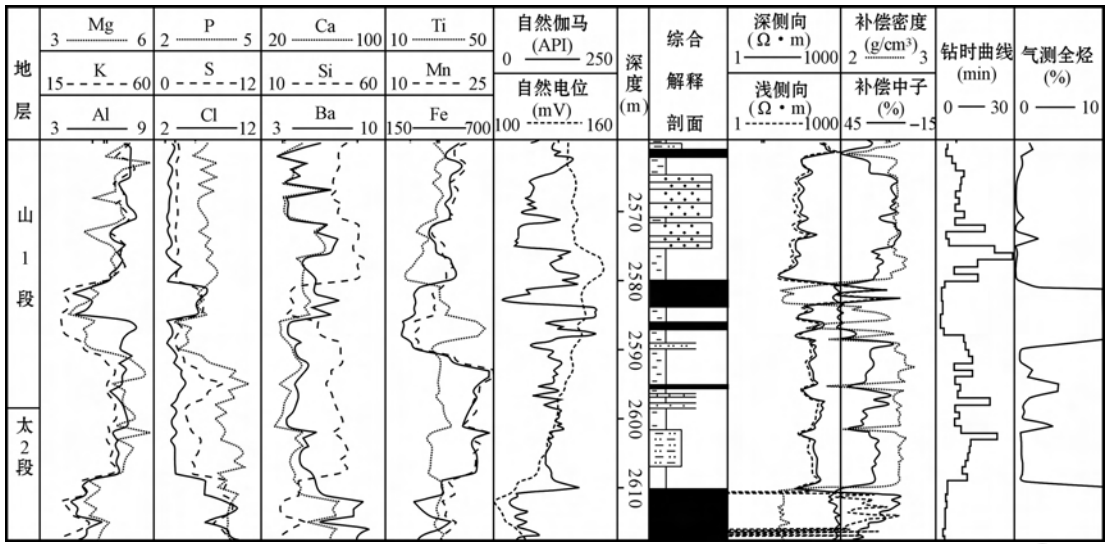


图 5 与 A 井对应关系的比较(B 井)

Fig. 5 Comparison between wells A and B

有助于揭示这些规律。与其他数学地质方法一样,地质属性的变化分析是通过数理统计来完成的(刘昌实, 1987)。

以图 4 和图 5 的 A 井和 B 井现场数据为例来探索岩性和层位的区域对比判别方法。这两口井都是完钻井,并且处于同一区块,各项井筒资料已经整理齐全,由已知井的数据,建立 XRF 录井解释剖面,并根据包括钻井、气测、测井、测试、试油等在内的完井资料相关数据记录,建立已知井的综合解释剖面。由于 XRF 岩屑分析数据是按井名和井深顺序归档的,数据分类统计以层位(或地层代码)作为检索目标,求得该层的极大值、极小值、均值、常见值、标准偏差、偏移系数、峰凸系数、变异系数等分析结果,即可在一口单井的纵向上分辨岩性和地层。如果将多口井的数据归纳在一起,就可判断岩性、地层的区域变化规律。

现将两口井所对应的山西组的山 1 段局部砂岩层(A 井:2 615 ~26 27 m;B 井 2 565 ~2 575 m)和下部太原组的太 2 段的局部泥岩层(A 井:2 650 ~2 663 m;B 井:2 600 ~2 610 m)做一对比(岩屑样品按整米深度连续获取)。两组岩屑的 XRF 分析数据见表 2。对比步骤为:①建立数据矩阵;②计算元素数据均值,并列出最大值和最小值;③计算方差与标准差;④计算硅铁比。其中第 1 步建立数据矩阵,由于本例中入库数据已经过滤筛选,不必再剔除。

4.1 均值、最大值、最小值

根据公式 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 分别计算两段元素数据均

值,并列出最大值和最小值。式中 \bar{x}_j 为该段岩屑所含元素的均值; x_{ij} 为某一深度的岩样所含元素的计数值; n 为岩屑样品数; i 为样品序号; j 为元素序号,按 Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ba、Ti、Mn、Fe 顺序排列。其中 A 井山 1 段从 2 615 ~2 627 m 共 13 个样, $n_{山} = 1, 2, \dots, 13$; B 井山 1 段从 2 665 ~2 625 m 共 11 个样, $n_{山} = 1, 2, \dots, 11$ 。A 井太 2 段从 2 650 ~2 663 m 共 14 个样, $n_{太} = 1, 2, \dots, 14$; B 井太 2 段从 2 600 ~2 610 m 共 11 个样, $n_{太} = 1, 2, \dots, 11$ 。这样分别得到两段各元素的均值、最大值和最小值(表 3)。

从部分元素的均值不难发现,无论是 A 井或 B 井,也无论是山 2 段或太 1 段都表现出 P、Cl、Mg、S、Ba、Al、Mn、Ti、Si、K、Ca、Fe 从小到大的排列顺序,且 Mn、Ti、Si、K、Ca、Fe 等 6 种元素均高出前 6 种元素的数倍到数十倍。根据全井的统计,山西组和太原组地层都以这 6 种元素为主。尽管这 6 种元素都表现出不同程度的分异性,但一个最典型的特征是山 1 段的 Si 质高出太 2 段 25% 以上,这符合沉积岩的一般规律。此外,在极值比较中,各元素的最大最小值之差,太 1 段的泥岩较之于山 2 段的砂岩更为明显,这在下一步方差计算中得到印证。

当然,这里是根据少数岩屑样品来确定元素的平均含量的。利用其平均含量进行对比,虽然能够反映一些岩性差异,但是如果没有考虑这个平均值的真实精度,往往造成错误的判断。一般说来要提高平均值的精度,应增加岩屑样品数。但从概率论中得知,如果总体的频率分布是正态分布,则无论样

表2 两组岩屑的XRF分析数据

 $(N \cdot s) \times 10^3$

Table 2 XPF analytical data of two sets of debris

岩性	地层	井别	深度/m	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Cap	Ba	Ti	Mn	Fe	
砂岩	山1段	A井	2 615	4.80	8.58	40.11	3.00	2.78	3.39	45.96	38.24	5.01	35.51	15.50	314.60	
			2 616	4.88	7.98	40.27	3.11	2.96	3.10	47.91	35.66	4.78	31.76	16.59	343.12	
			2 617	5.30	8.49	39.90	3.29	2.63	3.54	44.11	30.36	4.34	33.43	16.31	335.51	
			2 618	4.96	8.36	47.59	3.49	2.28	3.05	45.52	39.77	5.03	29.74	16.45	370.66	
			2 619	4.96	8.19	46.15	3.58	2.57	3.29	47.36	41.48	4.78	31.40	17.21	384.11	
			2 620	5.00	7.21	39.73	3.52	3.08	3.89	46.93	54.71	6.55	29.34	18.55	391.55	
			2 621	5.86	8.77	44.63	4.13	3.46	3.60	52.55	72.79	8.74	31.30	18.23	421.15	
			2 622	5.18	7.93	41.71	3.85	2.85	3.35	50.02	48.23	5.79	32.07	18.11	425.71	
			2 623	4.84	8.55	42.23	3.47	2.85	3.89	44.84	42.62	5.19	32.85	17.65	370.44	
			2 624	5.21	8.83	41.40	3.50	2.69	3.22	44.51	41.22	5.66	32.64	17.45	381.81	
			2 625	5.61	8.02	45.40	3.44	2.92	3.18	50.20	35.44	4.48	29.40	17.88	433.15	
			2 626	5.65	7.67	44.89	4.17	2.87	3.55	51.76	53.55	5.85	30.90	20.42	494.94	
			2 627	5.23	7.39	43.05	3.81	2.65	3.52	51.13	60.07	6.76	29.99	18.52	434.91	
			2 565	4.97	7.20	39.29	3.73	2.54	3.56	47.68	40.58	5.16	30.89	20.34	480.35	
	2 566	4.97	6.43	38.46	3.27	2.70	3.32	43.98	33.92	4.36	27.53	18.86	481.67			
	2 567	5.01	6.67	39.58	3.70	2.74	3.60	48.03	59.70	6.91	30.41	20.24	490.72			
	2 568	4.48	6.95	37.78	3.30	2.47	3.42	47.96	33.86	4.41	31.65	19.80	487.43			
	2 569	5.14	6.87	42.75	3.22	2.60	3.44	45.28	35.22	4.50	29.47	19.39	456.77			
	2 570	5.13	7.42	40.40	3.31	2.66	3.37	48.53	33.93	4.45	28.91	18.98	480.99			
	2 571	5.24	7.61	41.66	3.46	2.65	3.15	50.18	38.41	4.46	29.64	19.69	484.78			
	2 572	4.93	6.54	49.62	3.55	2.37	3.43	47.98	61.57	6.70	23.77	16.65	396.78			
	2 573	4.13	5.91	49.10	3.28	2.34	3.21	42.17	53.30	6.09	21.55	16.56	371.23			
	2 574	4.47	5.99	49.20	3.59	2.35	3.49	46.08	57.80	7.28	26.86	17.20	386.61			
	2 575	4.92	6.79	47.19	3.44	2.70	3.61	48.94	60.94	7.07	23.25	18.32	416.57			
	泥岩	太2段	A井	2 651	4.19	5.39	24.88	3.97	8.00	7.24	34.01	51.32	6.20	29.02	17.72	372.80
				2 652	4.40	5.85	25.74	3.94	6.88	6.76	38.98	50.61	6.39	29.98	18.78	378.67
				2 653	5.22	6.85	41.18	4.05	3.88	4.61	57.56	55.21	6.92	30.01	20.41	513.33
2 654				5.28	7.29	41.00	3.78	3.17	4.17	56.43	54.37	6.11	31.31	20.29	521.23	
2 655				4.61	5.78	26.77	4.22	6.87	6.90	35.15	70.21	8.29	27.10	17.93	339.83	
2 656				4.81	6.19	28.87	4.07	6.69	6.04	34.17	55.12	6.47	30.56	17.58	372.01	
2 657				4.69	7.94	32.88	3.31	5.15	4.92	35.09	25.76	4.06	36.78	16.81	357.82	
2 658				5.00	7.88	34.60	3.74	4.59	4.12	40.10	56.35	6.46	37.60	16.86	413.52	
2 659				5.08	7.97	37.87	3.28	3.81	3.90	42.18	54.47	6.24	36.26	17.01	383.95	
2 660				5.19	8.86	37.50	3.63	3.94	3.88	45.94	47.78	6.21	38.02	17.89	435.68	
2 661		5.15	8.35	37.40	3.83	3.51	3.72	45.67	60.42	7.18	37.38	17.24	411.74			
2 662		5.78	7.96	42.03	3.76	3.57	4.10	48.45	41.67	4.60	34.18	18.07	460.50			
2 663		5.20	8.29	40.37	4.03	3.86	3.47	50.78	53.21	6.44	32.72	19.27	494.91			
2 600		5.49	7.01	42.85	3.72	3.75	3.68	45.69	32.06	4.37	32.80	21.75	555.40			
2 601		5.02	7.00	42.80	3.93	4.13	3.74	41.83	28.62	4.40	34.88	20.72	541.62			
2 602		5.90	6.00	38.47	4.00	4.41	4.18	42.56	46.73	6.05	27.76	24.24	676.66			
2 603		5.05	6.36	42.45	3.87	5.31	3.58	41.08	41.75	5.34	25.30	22.11	593.86			
2 604		5.45	6.21	44.20	4.36	5.09	3.95	43.31	46.27	5.65	27.57	23.30	589.60			
2 605		5.38	6.46	45.62	4.50	4.97	3.92	43.87	40.56	5.17	27.42	22.28	613.37			
2 606		5.23	6.26	41.85	4.23	4.29	3.92	41.95	37.75	5.12	26.89	22.75	619.80			
2 607	5.21	6.45	45.10	4.53	4.60	3.86	45.25	38.90	5.33	27.08	22.60	618.70				
2 608	5.16	6.40	42.16	3.81	4.37	3.95	44.38	41.67	5.90	26.33	22.00	605.31				
2 609	4.32	4.67	24.84	4.02	8.20	6.90	31.38	40.88	6.03	30.30	18.69	435.48				
2 610	4.58	4.48	25.23	3.81	7.89	6.77	31.85	45.90	6.16	31.55	19.50	443.00				

注:单位采用能量色散型X荧光分析仪的Si-pin检测器计数值。

表3 两组岩屑的元素平均值、最大值、最小值和标准误差

(N·s) × 10³

Table 3 Average values, maximum values and minimum values of standard errors of two sets of debris

		Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Mn	Fe
砂岩	平均值	5.191	8.151	42.850	3.566	2.824	3.428	47.908	45.703	5.612	31.564	17.605	392.435
	A井 最大值	5.86	8.83	47.59	4.17	3.46	3.89	52.55	72.79	8.74	35.51	20.42	494.94
	A井 最小值	4.80	7.21	39.73	3.00	2.28	3.05	44.11	30.36	4.34	29.34	15.50	314.60
	B井 平均值	4.854	3.762	43.184	3.441	2.556	3.418	46.982	46.293	5.581	27.630	18.730	448.536
	B井 最大值	5.24	7.61	49.62	3.73	2.74	3.61	50.18	61.57	7.28	61.65	20.34	490.72
	B井 最小值	4.13	5.91	37.78	3.22	2.34	3.15	42.17	33.86	4.36	21.55	16.56	371.23
	平均值标准误差	0.168	0.695	0.167	0.062	0.129	0.005	0.462	0.295	0.016	1.967	0.562	28.050
泥岩	平均值	5.163	6.118	39.597	4.071	5.183	4.405	41.195	40.099	5.411	28.898	21.813	572.073
	A井 最大值	5.90	7.01	45.62	4.53	8.20	6.90	45.69	46.73	6.16	34.88	24.24	676.66
	A井 最小值	4.32	4.48	24.84	3.72	3.75	3.58	31.38	28.62	4.37	25.30	18.69	435.48
	B井 平均值	4.969	7.277	34.699	3.816	4.917	4.910	43.424	52.038	6.275	33.148	18.143	419.691
	B井 最大值	5.78	8.86	42.03	4.22	8.00	7.24	57.56	70.21	8.29	38.02	20.41	521.23
	B井 最小值	4.19	5.39	24.88	3.28	3.17	3.47	34.01	25.76	4.06	27.10	16.81	339.83
	平均值标准误差	0.097	0.579	2.449	0.127	0.133	0.252	1.114	5.969	0.432	2.125	1.835	76.190

品数多少,样品平均值的概率分布必定是正态分布。在确定岩性识别标准时,必须考虑平均值的精度问题。

4.2 方差、标准差

根据公式 $S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ 计算两个层段

的方差与标准差。式中 S_j^2 为该段各元素的方差,其平方根 S_j 即为该段各元素的标准差。结果见表4。

平均值不能反映数据的离散程度。因此将离均差(某一数据与该批数据平均值的差值)平方加重较大的那些离均差分量,以增加度量变异的灵敏性。用方差或标准差来衡量数据波动时, S_j^2 越大说明数据波动越大、越分散,这时平均值不能确切反映这一批数据的平均状况。反之, S_j^2 越小说明各实测值与平均值之间的差越小,则平均值能反映这一批数据的平均状况。在表3的平均值中,最为典型的是Fe含量的平均值有很大变异,尤其是太2段的泥岩,数据离散程度更大。

数据的离散程度对于沉积岩的分析来说,在一定程度上恰好是岩性的反应,对于细微的岩性差异,方差往往是有效的“放大器”。方差、标准差、协方差都能在一定程度上度量岩性的差异性。

4.3 硅铁比

在岩石化学研究中,岩石化学指数、参数、比值或它们的联合等,常用来解决岩系(或系列)的划分、成分的演化、成因以及与含矿性的关系等。岩石化学指数、参数已有很多,从沉积岩岩性和层位的识别(岩系划分)角度,根据实际地区的分析需要,这里选择Si、Fe的比值(表5)。

一般来说,在碎屑岩成岩过程和沉积后作用下,Fe的富集往往表现在胶结物的高价铁上。XRF分析虽然不能够分辨 Fe^{3+} 或是 Fe^{2+} ,但仍可反映元素的富集程度。而Si的富集往往是碎屑的表现,因此在某种意义上,Fe/Si值反映的是该地区沉积岩的泥质含量。从表5中可以明显的看到,Fe/Si值对于该区

表4 两组岩屑的元素方差、标准差

Table 4 Variances and standard deviations of two sets of debris

		Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Mn	Fe
砂岩	A井 s_j^2	0.113641	0.261564	6.968124	0.122092	0.079027	0.072847	8.551586	139.0946	1.436319	3.177492	1.585844	2397.709
	A井 s_j	0.337107	0.511433	2.639721	0.349417	0.281117	0.269903	2.924309	11.79384	1.198465	1.782552	1.259303	48.96641
	B井 s_j^2	0.117985	0.288156	21.85945	0.032609	0.022825	0.022296	5.587302	148.7084	1.512489	11.52338	1.8998	2134.847
	B井 s_j	0.34349	0.536802	4.675409	0.18058	0.151081	0.14932	2.363747	12.1946	1.229833	3.39461	1.378332	46.2044
泥岩	A井 s_j^2	0.202748	1.651634	50.20529	0.073741	3.304703	2.172798	78.3331	106.3227	1.045642	13.18852	1.350673	4065.245
	A井 s_j	0.450275	1.285159	7.085569	0.271553	1.817884	1.474041	8.850599	10.31129	1.022566	3.6316	1.162184	63.75927
	B井 s_j^2	0.187002	0.676116	55.38228	0.083089	2.205842	1.469887	24.49341	32.50677	0.390889	9.212916	2.624182	5550.525
	B井 s_j	0.432437	0.822263	7.441927	0.288252	1.485208	1.212389	4.949081	5.701471	0.625211	3.035279	1.619933	74.50185

表5 两组岩屑的 Fe/Si 值
Table 5 Fe/si ratios of two sets of debris

	A 井					B 井				
	井深/m	Si	Fe	Fe/Si	Fe/Si	井深/m	Si	Fe	Fe/Si	Fe/Si
砂岩	2 615	40.11	314.60	7.843		2 565	39.29	48.35	12.226	
	2 616	40.27	343.12	8.520		2 566	38.46	481.67	12.524	
	2 617	39.90	335.51	8.409		2 567	39.58	490.72	12.398	
	2 618	47.59	370.66	7.789		2 568	37.78	487.43	12.902	
	2 619	46.15	384.11	8.323		2 569	42.75	456.77	10.685	
	2 620	39.73	391.55	9.855		2 570	40.40	480.99	11.906	
	2 621	44.63	421.15	9.436	9.157	2 571	41.66	484.78	11.636	10.593
	2 622	41.71	425.71	10.206		2 572	49.62	396.78	7.996	
	2 623	42.23	370.44	8.772		2 573	49.10	371.23	7.560	
	2 624	41.40	381.81	9.222		2 574	49.20	386.61	7.858	
	2 625	45.40	433.15	9.541		2 575	47.19	416.57	8.827	
	2 626	44.89	494.94	11.026						
	2 627	43.05	434.91	10.102						
泥岩	2 650	20.66	324.29	15.696		2 600	42.85	555.40	12.961	
	2 651	24.88	372.80	14.984		2 601	42.80	541.62	12.655	
	2 652	25.74	378.67	14.711		2 602	38.47	676.66	17.589	
	2 653	41.18	513.33	12.465		2 603	42.45	593.86	13.989	
	2 654	41.00	521.23	12.713		2 604	44.20	589.60	13.339	
	2 655	26.77	339.83	12.694		2 605	45.62	613.37	13.445	
	2 656	28.87	372.01	12.886		2 606	41.85	619.80	14.810	
	2 657	32.88	357.82	10.883	12.498	2 607	45.10	618.70	13.718	14.723
	2 658	34.60	413.52	11.951		2 608	42.16	605.31	14.357	
	2 659	37.87	383.95	10.138		2 609	24.84	435.48	17.531	
	2 660	37.50	435.68	11.618		2 610	25.23	443.00	17.558	
	2 661	37.40	411.74	11.009						
	2 662	42.03	460.50	10.956						
2 663	40.37	494.91	12.259							

砂、泥岩甚至砂质岩类的粒度和泥质岩类的结构都是有效的,图3的实例也证明了这种判断。此外,两井两层段的 K/Si 比值,也有类似的反应,泥岩含 K 量的高伽玛值在测井的自然伽玛曲线上也得到印证。

4.4 小结

通过上述几个简单的步骤,已能基本上判断出岩性和层位。再通过对分析就可判别岩性地层在区域上的变化。

首先,许多在地球化学研究中对岩浆岩、变质岩的研究方法均可以应用于 XRF 录井。其中最为基础的是聚类分析中的纵向有序数据分割统计,包括最优分段统计(方开泰等,1982)。对相似系数、变异系数、峰凸系数、偏移系数也应当做计算。在图表分析方面,还要加强频率表、误差函数表、聚类谱系图等等的细化分析。尤其要对相关的分析有一套行之有效的验证方法。此外,也可参照适用于岩浆岩、变质

岩的全岩特征数值计算方法(如扎瓦里茨基算法、吴利仁算法、尼格里算法)按沉积岩的分类和地区性特点,对碱金属元素加以分析(邱家骧,1991)。

其次,沉积岩的分析必须强调地区性特征,基础的分析方法固然一致,但具体算法却千差万别。例如国内学者对辽东半岛南部上前寒武系的沉积岩做了元素成分的研究(洪作民,1991),其中对页岩类和砂岩类的元素含量特征的描述与鄂尔多斯地区就有较大差异,那里的页岩中 Al、P、Ca、Mg 不同程度的偏高,而砂岩中的 Al 也较高与前面的实例有差别。这样在选择岩性描述的指数、参数、比值等就应当有所考虑。

第三,作为 XRF 录井这样的实用性技术,更为关注的是统计方法的工程化,即随钻实时分析的特点。因此在地层分析上就不能以组,甚至系为单位。即便细化到段、亚段分析都是不够的,往往还需要精确到以米,甚至分米的微薄夹层。沉积岩的地区特点

和非均质性或许就是分析的最大难点(杨辟元等, 1994)。因此需要在大量的数据做回归、反演。作为XRF录井, 最终的目标是建立一套判别分析模型。对此, 刘昌实(1987)提出的判别分析的一般原则、判别临界值的确定和判别效果的显著性验证方法都是可以借鉴的, 但这对于刚刚起步的XRF录井来说, 具体算法的建立还有一段很长的路要走。

第四, 在实际应用中不可能用单一的XRF参数做岩性和层位的分析, 传统的录井方法, 尤其是综合录井方法可以起到有效的旁证作用。已钻井的资料必然是正钻井的参照, 但沉积相带、沉积厚度的横向变化也不可避免地产生同层岩性的差异和地层不均匀展布, 构造的演变和沉积旋回的变化又可导致地层和岩性的缺失、尖灭、重叠、倒转等, 这些都需要通过区域资料、地震资料作为预前的条件判断(刘泽容, 1993)。

5 讨论与结论

已经完成的30多口井的实践表明, 随钻XRF岩屑分析是一项具有发展远景的录井技术。首先, XRF录井具有岩石主要元素分析的准确性, 其误差常常小于1%(主要元素氧化物); 分析快速及时, 在120~200 s以内即可完成取样、磨样、制样、分析、统计的全过程; 信息量大, 除主要元素外还能提供21种其他元素数据; 需求量少(仅需8 g), 这对于很多难以取样和选样的钻井场合是极其有利的。其次, XRF录井所能提供的地质信息极为丰富, 作为实用技术目前固然是要解决岩性识别和地层层位判定的棘手问题, 作为后续地质研究, 无论对储层的评价、伴生资源的发现, 还是对钻井工程的工况分析, 钻井参数的优选都会提供很大的帮助。第三, 随着地质信息资源的共享概念的提升, 可以大幅度补充地矿纵深信息的不足, 石油钻井目前绝大多数都在3 000 m以上, 地下深度的地矿信息, 尤其是金属矿产信息, 其勘探的经济性质往往是目前的找矿手段望而却步的, 国家级的科学探井毕竟有限, 而石油钻井的实物资料(包括岩心和岩屑)每个油田的库存都有数十到上千万米, 通过XRF分析做历史性普查, 可以相得益彰。

目前, XRF录井主要存在的问题是各种岩石主要元素的理论(计算)数值特征数据库的建立和地区性地层岩性变化元素理论剖面的建立以及取样分辨

率的提高。只有建立了这样的数据库和理论剖面, 才可使XRF录井达到标准化分析。在XRF录井技术之前, 一般钻井样品以1 m为最小取样单位。这一取样间隔必须加大直到达到薄层岩石的分层标准才行。

通过XRF录井的探索, 可以说明:

(1) XRF录井鉴别岩性的理论基础是不同岩性具有不同的化学成分特征;

(2) XRF录井确定地层的理论基础是不同地层具有不同的岩性及厚度组合, 分米级采样分辨率是XRF进行地层组合分析的基本条件;

(3) 数理统计方法在XRF录井中的运用可快速对比不同井位间地层乃至岩性段、矿层在区域上的变化;

(4) XRF录井配合其他分析方法可快速进行储集层的跟踪评价, 是一个有潜力的新方法。

References

- Fang Kaitai and Ma Fengshi. 1982. Splitting in cluster analysis and its application[J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 5(4): 339 ~ 345 (in Chinese).
- Hong Zuomin. 1991. Precambrian Geology in South of Liaotung Peninsula, Geology Report of Geology-Mine Department of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 129 ~ 131 (in Chinese).
- Jiang Zaixing. 2003. Sedimentology[M]. Beijing: Oil Industry Publishing House, 43 ~ 179 (in Chinese).
- Li Gongquan, Cao Daiyong, Chen Gongyang, et al. 2006. Research of lithology identification method while drilling with PDC bit[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 28(2): 25 ~ 27 (in Chinese).
- Liu Changshi. 1987. Petrochemisty Multi-Statistic[M]. Beijing: Geological Publishing House, 85 ~ 119 (in Chinese).
- Liu Zerong. 1993. Reservoir Description Principle and Method[M]. Beijing: Oil Industry Publishing House, 7 ~ 23 (in Chinese).
- Qiu Jiaxiang. 1991. Petrochemistry[M]. Beijing: Geology Publishing House, 16 (in Chinese).
- Wang Xiaoli and Li Xiaoming. 2007. Application of deep orientation and extended-reach techniques in Well Yongxu 927, West-China Exploration Engineering[J]. (1): 77 ~ 78 (in Chinese).
- Xu Dengke. 1979. Method for Mineral-Formula Calculation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 142 (in Chinese).
- Yang Pi Yuan. 1994. Physical Working[M]. Beijing: Oil Industry Publishing House, 57 ~ 100.
- Yin Guodong, Nie Tao, Fan Zhiguo, et al. 2006. Fast and high quality technique for horizontal well through Triassic in Tahe oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Science & Technology*, 16(2): 10 ~ 12 (in Chinese).

- Zhang Hanlin and Li Ji. 2007. Application of PDC bits in air drilling of Puguang-10 well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 29(1): 25 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Zhen Junmao. 1989. Research of Clastic Reservoir Rock Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 5 ~ 36 (in Chinese).
- 北京奥能瑞科石油技术有限公司重庆分公司. 2007. 石油钻井地质 X 射线荧光岩屑录井方法 [P]. 《中国发明专利公报》, 23 (49): 2007100786902.
- 方开泰, 马逢时. 1982. 聚类分析中的分解法及其应用[J]. 应用数学学报, 5(4): 339 ~ 345.
- 洪作民. 1991. 辽东半岛南部上寒武系地质, 中华人民共和国地质矿产部地质专报 [M]. 北京: 地质出版社, 129 ~ 131.
- 姜在兴. 2003. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 43 ~ 179.
- 李功权, 曹代勇, 陈恭洋, 等. 2006. PDC 钻头条件下随钻岩性识别方法研究 [J]. 石油钻采工艺, 28(2): 25 ~ 27.
- 刘昌实. 1987. 岩石化学与多元统计 [M]. 北京: 地质出版社, 85 ~ 119.
- 刘泽容. 1993. 油藏描述原理与方法技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 7 ~ 23.
- 邱家骧. 1991. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 16.
- 王小利, 李晓明. 2007. 大位移深定向探井钻进技术在永斜 927 井的应用 [J]. 西部探矿工程, (1): 77 ~ 78.
- 徐登科. 1979. 矿物化学式计算方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 142.
- 杨辟元. 1994. 物性工作方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 57 ~ 100.
- 尹国栋, 聂涛, 范志国, 等. 2006. 塔河油田三叠系水平井优质快速钻井技术 [J]. 新疆石油科技, 16(2): 10 ~ 12.
- 张汉林, 李季. 2007. PDC 钻头在普光 10 井空气钻井中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 29(1): 25 ~ 27.
- 郑浚茂. 1989. 碎屑储集岩的成岩作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 5 ~ 36.

致 谢

2008 年度, 许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间, 配合编辑部为本刊评审了稿件, 为提高刊物质量做出了贡献。没有这些专家的辛勤劳动, 本刊是不可能在多方面取得进步的。为此, 本刊编辑部向他们表示衷心的感谢!

这些专家有(以姓氏笔画排序):

丁悌平	万渝生	方维萱	王 约	王 琪	王 瑜	王立本	王冠民	王晓霞
史仁灯	刘卫国	刘建明	孙振亚	曲晓明	朱玉双	朱建明	朱祥坤	朱筱敏
祁昌实	许文良	何学贤	余明军	吴大清	吴宏海	吴珍汉	吴朝东	张永生
张建新	张招崇	张泽明	张海祥	李伍平	李延河	李克庆	李昌年	李海兵
李锦轶	杨志明	沈渭洲	陈天虎	陈桂华	周新民	孟繁聪	罗 忠	英基丰
郑建平	金 强	姜在兴	洪大卫	胡超涌	赵志琦	凌洪飞	夏林圻	徐九华
徐文艺	秦 善	秦克章	聂凤军	袁选俊	顾永裕	高 山	黄思静	彭书传
温汉捷	游国庆	蒋少涌	谢玉玲	谢烈文	鲁安怀			