

A Study on Fine Interpretation of Carbonate Lithology Based on X Radial Fluorescence Mud Logging Information

Suowei Yang, Zejun Xu, Yansong Liu

Engineering Supervision Center of Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan Hebei
Email: yangsuowei@petrochina.com.cn

Received: Apr. 12th, 2017; accepted: Jul. 6th, 2017; published: Aug. 15th, 2017

Abstract

X Radial Fluorescence Mud Logging (XRF) technology could obtain chemical elements information in rocks. The lithologic characters and strata could be further identified through the combination and content variations of chemical elements. Based on the element mud logging data, the carbonate chemical composition was used to guide the field identification of lithology by establishing carbonate interpretation model, which could effectively improve the ability of identification of carbonate formation. Field application shows that the method is effective and the effect is equal to Schlumberger ECS log. This method can be the reference and guidance for other regions.

Keywords

X Radial Fluorescence Mud Logging, Interpretation Model, Carbonate, Quantitative Interpretation of Lithology

利用元素录井进行碳酸盐岩岩性精细解释研究

杨锁卫, 许泽君, 刘岩松

中石油冀东油田分公司工程监督中心, 河北 唐山

作者简介: 杨锁卫(1983-), 男, 工程师, 现主要从事地质录井研究及监督管理工作。

Email: yangsuowei@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017年4月12日; 录用日期: 2017年7月6日; 发布日期: 2017年8月15日

摘要

元素录井(XRF)技术能够获取岩石中的化学元素信息, 通过化学元素的组合与质量分数的变化, 可以进一步鉴定岩性、划分地层。利用元素录井资料, 通过建立碳酸盐岩解释模型, 计算碳酸盐岩主要化学成分质量分数来指导现场进行岩性识别, 能有效提高碳酸盐岩地层岩性识别能力。现场应用表明该方法解释效果良好, 与斯伦贝谢ECS测井解释结果相当, 该方法对其他地区具有借鉴和指导意义。

关键词

元素录井, 解释模型, 碳酸盐岩, 岩性定量解释

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

元素录井技术(即 X 射线荧光岩屑录井技术, 也简称 XRF)可以实现对岩屑中的化学元素信息进行定性和定量分析, 该项技术是常规岩屑录井的补充, 可有效解决复杂岩性、细碎岩屑的岩性识别问题。李一超、李春山、何国贤、谢元军、邱田民等分别对 X 射线荧光岩屑录井技术进行了适用性研究, 并初步建立了定性化岩性识别和地层划分解释方法[1] [2] [3] [4]。张国龙、杨锁卫等人对该技术在冀东油田大斜度井中的应用进行了研究, 认为该技术可以较好解决大斜度井的岩性识别、潜山界面识别与卡取以及地层划分对比等问题[5] [6]。

随着油田对寒武系潜山、奥陶系潜山内幕的钻探与元素录井工作的深入开展, 对碳酸盐岩潜山地层岩性定量化识别需求显得尤为突出。

2. 元素、矿物与岩石之间的关系

2.1. 岩石与元素

岩石形成的过程就是母岩中元素在各种内外作用下的再分配、重新组合的过程。由于沉积作用的复杂性和多样性, 所以沉积岩的元素组成变化非常大, 不同元素质量分数不同, 同一种岩石中不同元素质量分数也不相同。

如对于陆源碎屑沉积岩来说, Si 元素以极大优势富集于砂岩中, 而 Al 和 Si 元素倾向于在页岩和黏土岩类中聚集; 对于碳酸盐岩沉积而言 Ca 和 Mg 元素则最为富集; 其他例如 Fe、Al、Ti 等元素也可能大量富集以矿石的形式出现, 而微量元素在页岩和黏土岩类中的丰度高于它们在砂岩及碳酸盐岩中的丰度, 如 Mn 和 Sr 元素则显著地富集于碳酸盐岩中。

对于单元素来说, Mg 与 Ca 元素普遍存在于各类岩石中, 但质量分数各有不同, 在碳酸盐岩中 Ca、Mg 元素质量分数占主导地位, 在灰岩中 Ca 元素质量分数最高可达 40%, 白云岩中 Mg 元素最高可达 14% 以上, 它们是碳酸盐岩中最为突出的元素。

2.2. 元素、矿物与岩石

1) 元素与矿物之间的关系

矿物是由化学元素组成的, 它具有稳定的化学组成和较为固定的分子式, 化学元素质量分数的不同决定了矿物种类的不同, 其化学成分是区别不同矿物的重要依据, 反映矿物形成条件。

矿物成分一般都是以单元素的氧化物、硅酸盐、硅铝酸盐、碳酸盐矿物的形式存在, 它们与单元素质量分数之间具有一定的换算关系(见表 1、表 2)。

当已知某元素的质量分数为 a 时, 其对应氧化物的质量分数 A 的计算式如下:

$$A = a \times \alpha$$

式中: A 为某元素对应氧化物的质量分数, %; a 为某元素的质量分数, %; α 为某元素化合物指数。

2) 化合物、矿物与岩石之间的关系

沉积岩的基本化学成分是表生环境稳定非变价氧化物, 其中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 $(\text{MgO}+\text{CaO})$ 这 3 种化学成分决定了 3 种沉积岩石及其过渡岩石类型的分布。砂质沉积物主要由矿物石英、长石组成, 一般表现为 Si 质量分数高, 其他元素质量分数相对较低; 页岩、泥岩类岩石主要由黏土矿物及细碎屑组成, 黏土矿物具有吸附水体中简单离子和络合物的特点, 所以页岩、泥岩中富集碱金属元素, Al_2O_3 、铁质及钙质质量分数相对砂岩较高。

Table 1. The transfer coefficients for elements and the other chemical compounds
表 1. 元素与其化合物之间的转化系数表

元素名称	化合物名称	换算系数
Si	SiO_2	2.13935
Ti	TiO_2	1.66806
Al	Al_2O_3	1.88946
Fe	FeO , Fe_2O_3 , FeCO_3	1.28650; 1.42973; 2.07456
Mn	MnO , Mn_2O_3	1.29124; 1.43686
Mg	MgO , MgCO_3	1.65813; 3.5
Ca	CaO , CaCO_3	1.39921; 2.49717
Na	Na_2O	1.34798
K	K_2O	1.20462
P	P_2O_5	2.29142
S	FeS , CaSO_4	2.741564; 4.245668

Table 2. The contents of various elemental contents in commonly seen minerals
表 2. 常见矿物中各种元素组分质量分数表

矿物名称	元素组分质量分数/%											
	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	H	Ti	C	S
石英	53.26	46.74										
钾长石		30.27	9.69				14.05					
钠长石	48.81	32.13	10.29			8.77						
钙长石		20.19	19.40		14.41							
白云母	48.2	20.32	20.32				9.82		0.51			
黑云母	43.00	18.20	6.00	13.60	0.20	0.40	7.20	7.70	0.45	1.50		
黄铁矿				46.55								53.45
方解石	47.96				39.54			0.37			12.0	
白云石	52.06				21.27			12.90			13.03	
菱铁矿	41.43			48.20							10.37	
硬石膏	47.01				29.41							23.53
石膏	55.76				23.26				2.34			18.60
赤铁矿				70.0								
伊利石	48.78	24.00	12.00	6.50	1.20	0.40	6.90		0.51	0.80		
高岭石	54.97	21.00	19.26	0.80	0.10	0.24	0.10	0.10	1.51	1.18		
蒙脱石	51.42	21.00	9.00	1.00	0.20	0.50	0.50	2.00	0.54	0.20		
绿泥石	44.09	17.90	9.00	16.40	1.60	0.30	5.40	2.50	1.23	2.37		
海绿石	45.24	23.10	4.40	15.50	0.50	0.10	5.90	2.10	0.48	0.10		

碳酸盐岩是一种化学沉积岩，常见于沉积岩体系中，一般富含 CaCO_3 、 MgCO_3 ，Ba、Sr 和 Mn 的元素，其他元素一般质量分数都很低。

火成岩中的矿物成分变化随 SiO_2 的变化而变化：随着 SiO_2 质量分数的增加， Na_2O 、 K_2O 增加， FeO 、 MgO 减少， Al_2O_3 、 CaO 则由少增多，在辉石类及基性岩中达到最大值后降低。

2.3. 元素自身变化特征

1) 大量的分析研究表明：从岩石中元素质量分数差别程度看，微量元素变化从其幅度上、规律性上要比常量元素要好。

2) 从元素在岩石成岩过程中的稳定性来看，不同的沉积环境和物源体系中，各元素质量分数具有明显的差异，具有指导岩性划分的功能。在陆相沉积过程中，Si、Al、Fe、Ti 等元素显然没有 Cl、S、Na、K、Ca、Mg 等元素活跃，因而在岩石的风化搬运过程中呈活跃元素逐渐减少而其他元素逐渐富集的状态；而在化学沉积过程中，由于其特殊的沉积环境 Ca、Mg、S、Cl 等元素则更容易相对富集成岩。

3) 元素比值关系比少数元素更能反映成岩石的气候、环境、母源特征。

3. 解释方法研究

3.1. 现有 XRF 岩性解释方法比较

1) 数据对比解释法

通过对大量不同地区、不同层位、不同岩性的样品进行 X 射线荧光分析，利用统计学方法研究各元素质量分数与岩性之间的关系，建立不同层位、不同岩性元素质量分数分布表，用来指导现场进行岩性

解释。该方法在岩屑代表性好、特征明显、层厚度较大时效果较好，对于薄层岩性，则需要进行挑样分析来提高岩性识别效果。

2) 规律解释法

利用地质作图软件分析各元素变化规律与岩性之间的变化关系是地质工作中常规性的方法之一，解释过程中可以参考多个元素曲线变化规律相互加以印证，从而进行岩性解释。

3) 方法优劣

这两种方法都具备较强的直观性、方便性，但定性化解释方法很难避免人为因素、经验因素的影响，解释结果因人而异；故笔者重点研究定量化解释法。

3.2. 碳酸盐岩定量化解释方法研究

3.2.1. 碳酸盐岩基本特征及分类

碳酸盐岩主要分为石灰岩(方解石质量分数 > 50%)和白云岩(白云石质量分数 > 50%)。构成碳酸盐岩的主要碳酸盐矿物为方解石、白云石、文石(与方解石为同质二相)、菱镁矿、菱铁矿、铁白云石等，其他一些黏土矿物、有机质、石膏、盐岩、黄铁矿、硅质等(表 3~5)。碳酸盐岩定名方案(方解石和白云石)见表 6。

Table 3. The chemical compositions of carbonate

表 3. 碳酸盐岩的化学成分

主要化学成分	次要化学成分
CaO, MgO, CO ₂	SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, Na ₂ O, H ₂ O等

Table 4. The comparison of chemical compositions between the typical limestones and dolomites

表 4. 典型石灰岩与白云岩的化学成分对比

岩石类型	质量分数/%			
	CaO	MgO	CO ₂	SiO ₂
石灰岩	42.61	7.90	41.58	5.91
白云岩	30.40	21.80	47.80	

Table 5. The comparison of chemical compositions of the key minerals in carbonates

表 5. 碳酸盐岩中的主要矿物化学成分对比

项目	方解石	白云石	菱铁矿	菱镁矿
化学式	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	FeCO ₃	MgCO ₃
氧化物	主要氧化物: CaO (43%), MgO (8%), CO ₂ (42%)及 SiO ₂ (5.2%) 其他氧化物(3%): FeO, Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, Na ₂ O, H ₂ O			
微量元素	Sr, Ba, Rb, Ni, Zn, V 等, 可作为判别环境的标志			

Table 6. The named scheme of carbonates

表 6. 碳酸盐岩定名方案(方解石和白云石)

岩类	方解石质量分数/%	白云石质量分数/%	岩石名称	岩石简称
石灰岩类	100~90	0~10	石灰岩	灰岩
	90~75	10~25	含白云质石灰岩	含云灰岩
	75~50	25~50	白云质石灰岩	云灰岩
白云岩类	50~25	50~75	灰质白云岩	灰云岩
	25~10	75~90	含灰质白云岩	含灰云岩
	10~0	90~100	白云岩	白云岩

3.2.2. 碳酸盐岩定量解释

1) 岩石组成基本模型的确立

沉积岩的组成无非是碎屑岩类(即石英、长石等)、黏土矿物类(如伊利石、蒙脱石等)、化学沉积物(如碳酸盐岩颗粒)及其他物质(如岩屑、碳酸岩等)。据此,可以建立岩石组成的基本模型,即:

$$\text{碎屑岩质量分数} + \text{化学沉积类质量分数} + \text{黏土质量分数} + \text{其他} = 100\% \quad (1)$$

2) 碳酸盐岩组成基本模型的确立

通过对碳酸盐岩所含矿物、化学成分、组成及质量分数的分析,进行碳酸盐岩定量解释的关键在于 Ca、Mg、Si、K、Fe、S 等元素质量分数及其所对应的碳酸盐岩质量分数、黏土质量分数以及蒸发岩质量分数的计算上。结合式(1),碳酸盐岩组成基本模型可以写作:

$$\text{方解石质量分数} + \text{白云石质量分数} + \text{黏土质量分数} + \text{其他} = 100\% \quad (2)$$

当待定名岩屑中不含或含极少量黏土矿物时,该模型可以进一步精简为:

$$\text{方解石质量分数} + \text{白云石质量分数} + \text{其他} = 100\% \quad (3)$$

3) 碳酸盐岩解释方程的建立

① Ca 元素质量分数分配方程:

$$C_{Ca} = M_{fjs} C_{fjs} + M_{bys} C_{bys} + M_{qt} C_{qt} \quad (4)$$

② Mg 元素质量分数分配方程:

$$C_{Mg} = M_{bys} C_{bys} \quad (5)$$

③ S 元素质量分数分配方程:

$$C_S = M_{sg} C_{sg} + M_{ysg} C_{ysg} \quad (6)$$

式中: M_{fjs} 、 M_{bys} 、 M_{sg} 、 M_{ysg} 、 M_{qt} 分别代表方解石、白云石、石膏、硬石膏、其他物质的量,%; C_{fjs} 、 C_{bys} 、 C_{sg} 、 C_{ysg} 、 C_{qt} 分别代表方解石、白云石、石膏、硬石膏、其他物质对应的元素分子含量,1; C_{Ca} 、 C_{Mg} 、 C_S 分别是 Ca、Mg、S 元素的质量分数, %。

实际过程中,由于 Ca、Mg、S 等元素质量分数是可以通过元素录井仪器分析获得,通过方程(4)、(5)、(6)即可计算分别得到 M_{fjs} 、 M_{bys} 、 M_{ysg} 等的质量分数。从而通过碳酸盐岩相对含量划分类型标准对待定名岩屑进行类型确定。

4) 碳酸盐岩的元素录井定名

通过上述步骤,可以计算得到 M_{fjs} 、 M_{bys} 、 M_{ysg} 类等的含量,从而通过碳酸盐岩相对含量划分类型标准(表 6、表 7)对待定名岩屑进行类型确定。

在实际操作过程中,由于岩屑是连续捞取,且岩屑是呈混杂连续变化状态存在的,故将计算得到的 M_{fjs} 、 M_{bys} 含量与单元素质量分数、井深、其他分析数据等一并成图,结合 M_{fjs} 、 M_{bys} 含量变化趋势来确定岩性的顶底,具体定名的效果远远好于单点结论判断结果。

结合标准碳酸盐岩物质、岩心及岩屑分析资料,给出碳酸盐岩岩性快速定名标准(表 7)。

Table 7. The named criterion for carbonates in elemental mud logging

表 7. 元素录井碳酸盐岩定名标准

岩石类型	Ca质量分数/%	Mg质量分数/%
灰岩	>30	<3.26
白云质灰岩	30~20	3.26~6.52
灰质白云岩	20~10	6.52~9.78
白云岩	<10	>9.78

5) 与薄片分析、元素测井、碳酸盐岩质量分数分析的对比验证

为了验证计算数据准确性, 选取不通井相同位置的岩心分别进行元素分析(表 8)、薄片鉴定(表 9)。与薄片分析结果对比, 通过计算得到 M_{fs} 、 M_{bys} 、 M_{ygs} 类等的含量不能完全等同于薄片鉴定结果, 存在一定误差, 但不影响对岩性的定名(表 9)。

通过与斯伦贝谢 ECS 测井解释剖面相对比, 该方法得到的解释剖面与其一致性好, 但在石膏岩的解释上存在差距, 主要原因是常规钻井液体系下, 石膏易水化膨胀, 很难获取代表性好的岩屑样品, 因此导致解释存在一定偏差; 而与碳酸盐岩质量分数分析结果定名对比, 利用本方法计算结果在岩性定名上具有明显的优势(图 1)。

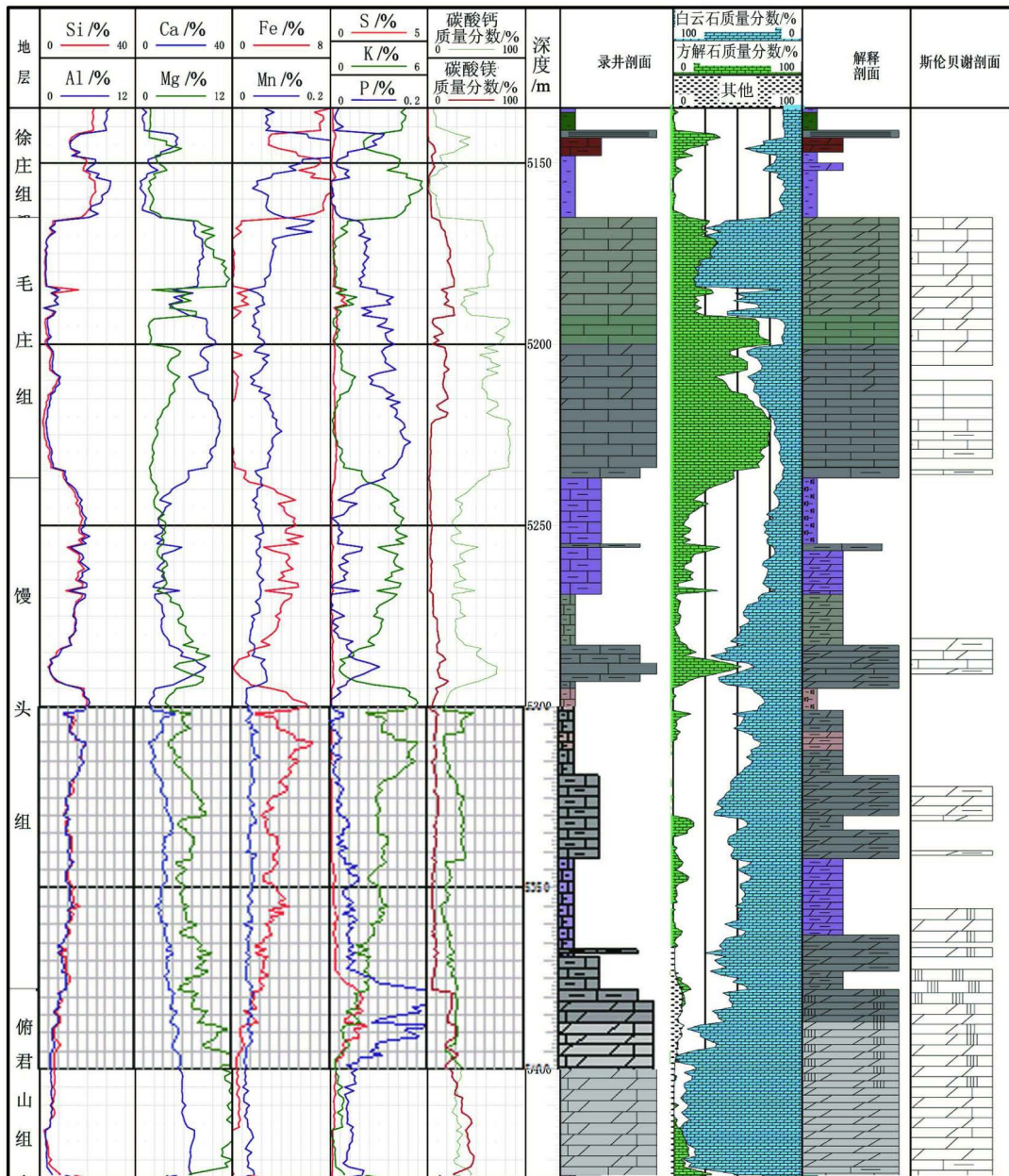


Figure 1. The lithological interpreting diagram of elemental mud logging in Well Nanpu XX

图 1. 南堡 XX 井元素录井岩性解释图

Table 8. The data (part) of rock core element analysis
表 8. 岩心元素分析数据(部分)

井号	样品深度/m	元素质量分数/%							
		Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
T1	1691.94	11.5351	0.3135	5.2636	0.0702	0.366	21.9041	0.0152	0.9713
NP2	4078.72	2.4199	0.9053	7.7263	0.1481	0.1704	27.5259	0.015	0.0885
NP3	5501.60	0.5820	0.6360	0.9441	0.1022	0.0802	32.3909	0.0212	0.0000
NP4	5362	1.8466	3.8650	8.6822	0.1006	1.7014	22.4592	0.0635	0.8096
NP4	5393	1.9816	3.0730	5.8166	0.1698	1.1437	27.3353	0.1069	1.0140

Table 9. The comparison between calculated data and identified rock slice data
表 9. 计算数据与薄片鉴定数据对比表

井号	样品深度/m	元素处理的质量分数/%		薄片鉴定矿物含量/%			薄片结论	解释定名
		方解石	白云石	白云石	方解石	泥质		
T1	1691.94	6.69	88.43	90	5	5	白云岩	细晶白云岩
NP2	4078.72	58.73	18.55	21	61	18	含云含泥灰岩	含云中晶灰岩
NP3	5501.60	78.55	4.46	7	80	13	含泥灰岩	亮晶灰岩
NP4	5362	48.45	14.15	14	51	35	泥质灰岩	泥质灰岩
NP4	5393	60.08	15.19	8	65	27	泥质灰岩	泥质泥晶灰岩

4. 应用实例

4.1. 南堡构造寒武系碳酸盐岩潜山岩性解释

研究区钻遇寒武系地层自上而下钻遇地层分别为徐庄组、毛庄组、馒头组和府君山组 4 套地层(图 2), 其中毛庄组和府君山组主要以碳酸盐岩为主。

1) 毛庄组地层元素特征及岩性解释

毛庄组岩性主要为白云质灰岩。从元素录井特征看, 毛庄组一般具有较高的 Ca、Mg、P 元素质量分数及较低的 Si、Al、Fe、K 元素质量分数, 毛庄组主体储层 2/3 段 Mg 元素质量分数明显高于底部, 经计算上部白云石质量分数接近 50%, 下部质量分数降低, 方解石质量分数明显升高达 50%以上, 综合解释该段上部分为泥质白云岩, 下部为灰岩。

2) 馒头组地层元素特征及岩性解释

设计提示表明该地馒头组岩性主要为紫红、灰绿色泥页岩, 灰色泥灰岩及薄层灰色白云岩, 其中以紫色、灰绿色泥页岩为主。但从元素录井特征看, 馒头组具有较高的 Si、Al、Fe、Mg、K 元素质量分数及较低的 Ca、P、Mn 元素质量分数, 白云石质量分数普遍较高, 多在 25%~40%之间, 方解石质量分数普遍小于 5%, 解释结果为白云质泥岩。

3) 府君山组地层元素特征及岩性解释

寒武系府君山组地层岩性主要以灰岩及灰质白云岩为主。从元素录井特征看, 府君山组具有较高的 Ca、Mg、P 元素质量分数及较低的 Si、Al、Fe、K 元素质量分数, 计算结果表明该地层普遍白云石质量分数大于 50%, 方解石质量分数平均 8%, 解释为泥质白云岩和白云岩。

4.2. 南堡构造奥陶系碳酸盐岩岩性解释

南堡构造奥陶系主要钻遇地层为马家沟组, 岩性主要为灰岩。从元素录井特征看, 该段具有较高的

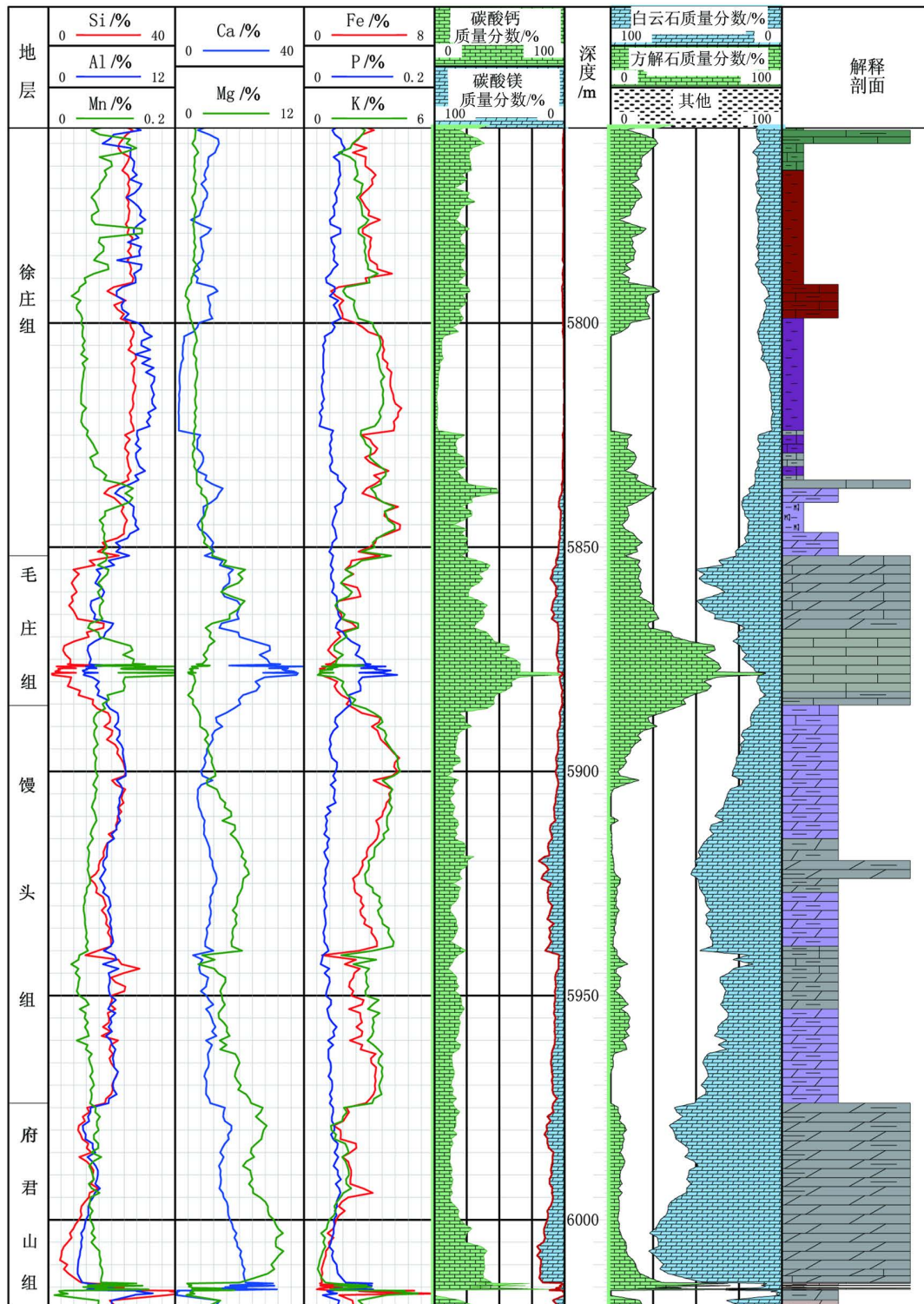


Figure 2. The comprehensive logging interpreting diagram of elemental mud logging in Well Nanpu XX1
 图 2. 南堡 XX1 井元素录井综合解释图

Ca 元素质量分数及较低的 Si、Al、Fe、Mn 元素质量分数, 计算结果表明该地层方解石质量分数大于 70%, 白云石质量分数在 5%~15% 之间, 故解释为灰岩和含云灰岩(图 3)。

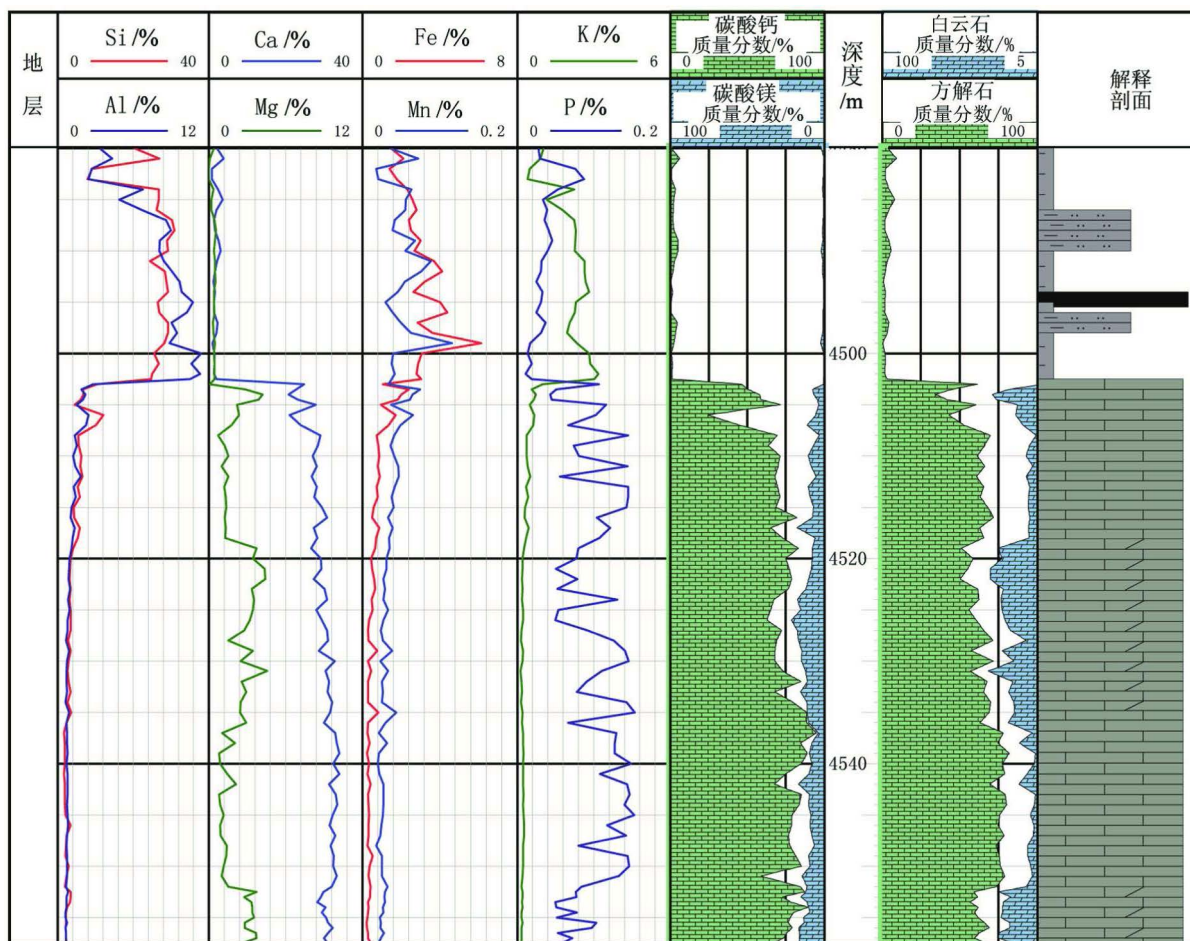


Figure 3. The comprehensive logging interpreting diagram of elemental mud logging in Well Nanpu XX2
 图 3. 南堡 XX2 井元素录井综合解释图

5. 结论

在元素录井技术出现前，现场录井主要依靠肉眼观察和碳酸盐岩分析进行碳酸盐岩的岩性划分。元素录井技术出现后，通过元素质量分数计算对应矿物质量分数从而指导岩性划分，为录井确定岩性提供了一种新方法。应用表明，该解释方法可行，且解释效果良好，能有效指导现场录井工作。

参考文献 (References)

- [1] 李一超, 李春山, 刘德伦, 等. X 射线荧光岩屑录井技术[J]. 录井工程, 2008, 19(1): 1-8.
- [2] 何国贤, 陈英毅, 周天顺, 等. X 射线荧光岩屑录井可行性试验研究[J]. 录井工程, 2008, 19(2): 10-12, 40.
- [3] 李一超, 李春山, 何国贤. X 射线荧光分析在岩屑录井中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(1): 56-68.
- [4] 谢元军, 邱田民, 李琴, 等. X 射线荧光元素录井技术应用方法研究[J]. 录井工程, 2011, 22(3): 22-28.
- [5] 张国龙, 闫长青, 张国庆, 等. X 射线荧光元素录井在南堡油田潜山卡层中的应用研究[J]. 录井工程, 2012, 23(1): 20-24.
- [6] 杨锁卫, 于旺, 胡春文, 等. 南堡油田潜山录井方法研究与应用[J]. 录井工程, 2013, 24(2): 31-36.

[编辑] 黄鹂

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org