

变质岩岩石化学组分的测井评价 及其在岩矿分析中的应用

——以中国大陆科学钻探工程主孔超高压变质岩为例

韩延礼¹, 景建恩², 侯本军³, 侯国正¹

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 中国地质大学(北京)地球物理信息技术学院, 北京 100083; 3. 上海海洋石油局第一海洋地质调查大队, 上海 201208)

摘要:为了更有效地利用测井资料识别岩性,以中国大陆科学钻探工程主孔超高压变质岩的测井与岩心化学分析资料为对象,研究两者之间的内在关系。从相关文献中搜集和整理了主孔的189个岩心样品的全元素分析资料,提取了岩心分析与测井响应的样本数据。在此基础上,分析了氧化物含量与常规测井响应的统计关系,并通过逐步线性回归方法,建立了氧化物含量的测井评价模型。利用测井资料,计算主孔72~2010 m井段地层的氧化物含量,对主孔地层岩性和钛矿(化)发育特征进行解释。研究表明,对于复杂的变质岩类,常规测井响应与地层元素组分之间存在内在的联系;在获得岩心全元素分析数据的条件下,利用测井资料建立地层化学组分的评价模型,能够为岩性与含矿分析提供更为直接的数据。

关键词:中国大陆科学钻探;超高压变质岩;测井;线性回归;氧化物含量

中图分类号:P618.51

文献标识码:B

引文格式:韩延礼,景建恩,侯本军,等.变质岩岩石化学组分的测井评价及其在岩矿分析中的应用——以中国大陆科学钻探工程主孔超高压变质岩为例[J].山东国土资源,2015,31(4):61-66. HAN Yanli, JING Jian'en, HOU BenJun, etc. Well Logging Evaluation and Its Application of Chemical Components in Metamorphic Rock——Setting Super-high Pressure Metamorphic Rocks in Main Holes of CCSD Project as an Example[J]. Shandong Land and Resources, 2015,31(4):61-66.

0 引言

地球物理测井(简称测井)是为了满足石油、天然气勘探需要而发展起来的一个地球物理勘探分支,现在其应用已扩展到非油气资源、科学钻探及工程、灾害和环境地质等领域,成为人们研究地球和解决地质问题的关键技术之一。随着生产实践不断深入,测井技术面临越来越多的复杂岩性解释问题,其中以火成岩与变质岩岩性评价最为突出。由于矿物种类多、含量变化大、岩性分类复杂,这些岩性的测井解释工作存在较大困难。测井、岩心岩屑分析是获知钻井岩性剖面的主要手段。与岩心岩屑资料相比,测井具有分辨率低、测量结果受井眼环境影响等

缺点。但是,测井能够提供原位的测量信息,可用于研究沿井身连续变化的岩石矿物学特征,并给出较准确的深度信息。因此,利用测井资料识别岩性,就成为测井解释人员的一个重要研究课题。

针对复杂岩性的测井识别问题,学者们研究了交会图方法^[1-2]、人工神经网络方法^[3-4]、多元统计方法^[5-6]。交会图方法要求每种岩性具有不同的测井响应特征,对于复杂岩性,这一条件很难得到满足。人工神经网络法要求足够多具有代表性的样本,并且常用简单的数字组合代表不同岩性,这些数字一般没有明显地质意义。多元统计方法利用众多测井曲线,通过降维处理提取对岩性敏感的少数参数,并进一步利用提取的参数判断岩性。可以说,多元统计方法是交会图方法的延伸,同时所提取参数

收稿日期:2014-06-03;修订日期:2014-09-03;编辑:陶卫卫

作者简介:韩延礼(1973—),男,山东章丘人,高级工程师,主要从事地球物理勘查及方法研究;E-mail:hanyanli@139.com

的地质意义仍然不是十分明确。为克服上述研究方法的不足,文献^[7-10]利用元素俘获(ECS)测井从岩石化学成分角度对火成岩岩性进行识别,但是 ECS 测井各种误差及测井费用较高等制约了 ECS 测井方法的推广。对比发现,ECS 测井得到的元素产额与常规测井曲线具有内在相关性,揭示这种关系可以为没有测量 ECS 的井进行准确的岩性与矿化识别打下基础^[8]。

2001—2005 年,在江苏东海实施的第一个中国大陆科学钻探工程(简称 CCSD)计划,以重要命题“大陆板块会聚边界的地幔动力学”和“超高压变质岩形成与折返机制”的研究为科学目标,受到了国际地学界的高度重视^[11-12]。为了保证科学钻探的顺利实施和地学研究目标的全面实现,CCSD 采用先进的 ECLIPS5700 测井系统的 20 多种测井技术,获得了主孔全井段超高压变质岩的原位测量信息^[13],进行了全井段取心和岩心的岩石学特征分析,为研究常规测井曲线与地层元素产额的内在联系提供了宝贵的数据资料。该文已从已发表的资料获得 CCSD 主孔 189 块岩心样品氧化物含量的测试数据,经过对岩心样品的深度校正,提取岩心测试与测井响应数据样本,分析氧化物含量与各常规测井响应之间的内在关系,通过逐步线性回归方法建立氧化物含量的测井评价模型。根据所建立的测井回归模型,计算 CCSD 主孔 72~2 010 m 井段地层的氧化物含量,对该井段的岩性和含矿性特征进行分析研究。

1 全岩氧化物组分的测井分析基础

从矿物化学分析的角度,同一地区相同岩性的组成矿物都具有相对稳定的化学元素或氧化物组成^[14]。若已知某岩石的矿物组成及含量,则可以估计该岩石中元素或氧化物组分的含量。根据岩石体积物理模型,可得到测井与各组分物理参数之间的响应方程。由此判断,测井响应与地层的氧化物含量之间必然存在着内在的关系。这里对这个关系进行分析,寻找建立地层氧化物质量百分含量测井评价模型的理论基础。

根据岩石体积模型,测井响应与各组分物理参数关系方程为:

$$L = CV \quad (1)$$

式中: L 为由测井参数构成的列向量; V 为由地层矿物和孔隙度相对体积含量构成的列向量; C 为矿物

参数矩阵。当测井参数个数大于地层组分个数时,该方程组为超定方程,其解可表示为^[15-16]。

$$V = (C^T C)^{-1} C^T L \quad (2)$$

若得到地层各矿物组分的相对体积百分含量,则可由下式计算各氧化物体积密度参数:

$$O_d = M(V \cdot \rho) \quad (3)$$

式中: O_d 为单位体积岩石中各种氧化物质量的列向量; ρ 为与 V 对应的矿物组分的体积密度列向量; M 为矿物中各氧化物质量百分含量矩阵。由此进一步得到地层中各氧化物质量百分含量的计算公式:

$$O_w = \frac{O_d}{\rho_b} = \frac{1}{\rho_b} M[(I\rho)(C^T C)^{-1} C^T] L \quad (4)$$

式中: O_w 为各氧化物质量百分含量; ρ_b 为地层岩石体积密度标量。

$$\rho_b O_w = M[(I\rho)(C^T C)^{-1} C^T] L \quad (5)$$

由(5)式可知,在地层各矿物的化学元素或氧化物组成与含量相对稳定的条件下,地层中各氧化物质量百分含量与测井响应总体上满足一种线性关系。因此,在获得岩心样本与测井数据之后,利用线性回归分析方法,能够建立氧化物质量百分含量的测井评价模型。

2 氧化物含量与测井响应样本

近年来,多名岩石学专家采用 X 荧光光谱分析法对主孔的岩样进行了全岩氧化物含量测试,涉及岩性包括榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩及蛇纹岩等,测试误差 $< 0.5\%$ ^[17-21]。通过对上述岩样资料进行收集和整理,共获得 189 块可供利用的岩样测试数据,其中榴辉岩 75 块、副片麻岩 50 块、正片麻岩 52 块,其他岩类 12 块,为利用测井资料重建 CCSD 主孔的氧化物质量百分含量剖面奠定了基础。由于岩心编录深度与测井深度之间存在一定的偏差,在建立测井回归模型时,首先对岩样测试资料进行深度校正。Kessels, W.^[22] 和牛一雄等^[23] 介绍了岩性深度归位的方法。这里根据主孔岩性归位资料分析岩心深度误差与岩心编录深度的关系(图 1)。由图 1 可知,岩心深度误差与岩心编录深度具有较好的统计关系,根据统计方法得到岩心深度校正量的分段计算公式(6)。

$$E_r = \begin{cases} -0.004864 \times D_c + 0.415 & D_c \in (100 \sim 500\text{m}) \\ 0.000776 \times D_c - 0.246 & D_c \in (500 \sim 2000\text{m}) \\ -0.000244 \times D_c + 1.656 & D_c \in (2000 \sim 3000\text{m}) \\ 0.004174 \times D_c - 16.486 & D_c \in (3620 \sim 5100\text{m}) \end{cases} \quad (6)$$

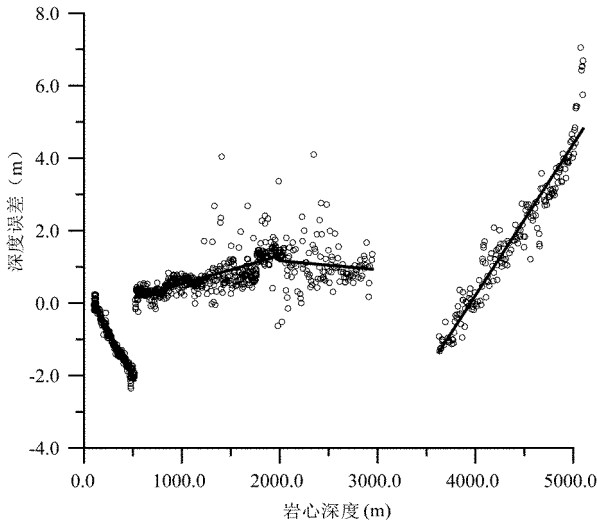


图 1 CCSD 主孔岩心深度误差与岩心编录深度关系

式中： E_r 是测井深度减去岩心编录深度的误差； D_c 表示岩心编录深度(m)。利用上面建立的关系对岩样测试资料进行深度校正。根据校正后的岩样深度，提取相应的测井数据，获得 189 个氧化物含量的测井响应样本。

3 CCSD 主孔变质岩氧化物含量的测井回归模型

该文在建立回归模型时，使用了 103 块岩心样

品的测试资料，另外 86 块样本资料来自文献[18-21]，用于对模型进行检验。下面以全铁氧化物 TFe (包含 FeO 与 Fe_2O_3) 的质量百分含量(由 m_{TFe} 表示)为例，介绍氧化物含量测井回归模型的建立方法。在分析中， $AC, DEN, CNL, PE, GR, K, Th$ 和 RD 分别表示声波时差、密度、补偿中子、光电吸收截面指数、自然伽玛、自然伽玛能谱钾、钍、深测向电阻率的测井响应变量。为了分析 m_{TFe} 与各测井响应的内在关系，绘制了 189 块样本数据的散点图 2。由图 2 可知，与 AC, DEN, CNL, PE 具有较明显的线性统计关系，与 GR, K, Th 的常用对数具有较好的线性关系，与 RD 的关系不明确。因此，以 DEN, PE, AC, CN 和 GR, Th, K 的常用对数等测井数据为自变量，以 m_{TFe} 为因变量，采用逐步线性回归法与进入回归法进行分析，得到回归方程式(7)。

$$TFe = 4.112 + 4.139DEN + 0.624PE - 6.243lgGR \quad (7)$$

回归结果的相关系数为 0.893，残差标准偏差为 2.722%， F 检验表明回归系数显著性明显。

对各氧化物质量百分含量进行回归分析，得到回归模型系数见表 1。除 MnO 与 P_2O_5 之外，各回归模型的相关系数都大于 0.7，表明在满足表 1 所示标准偏差精度要求下，可以利用测井资料估计钻孔地层氧化物含量。为了给出更好的模型，该文根据 189 块岩样资料，利用上述方法建立了回归模型。

表 1 氧化物质量百分含量的测井回归模型系数

氧化物	SiO ₂	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	TFe	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅
常数项	86.695	-0.184	-3.109	7.222	4.112	9.139	-4.902	-0.211	11.547	23.767	0.338	-1.918
AC	0.117	-0.240	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
CNL	-0.422	0.744	/	/	/	-0.152	/	/	-0.120	-0.260	-0.003	/
DEN	-11.868	5.945	3.714	0.425	4.139	/	1.613	/	-2.287	-2.235	/	0.803
PE	/	-0.904	0.637	-0.013	0.624	0.364	0.356	/	/	/	/	/
lgGR	/	/	-2.764	-3.479	-6.243	/	/	/	/	/	/	/
lgK	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
lgTh	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
GR	0.121	/	/	/	/	/	/	0.025	/	/	-0.002	/
K	/	/	/	/	/	-1.870	/	0.535	-0.384	/	/	/
Th	/	/	/	/	/	/	/	-0.093	/	-0.321	/	/
残差标准偏差	4.270%	3.228%	2.308%	1.818%	2.722%	2.020%	0.985%	0.520%	0.823%	2.17%	0.115%	0.691%
相关系数	0.945	0.923	0.844	0.757	0.893	0.864	0.782	0.962	0.778	0.707	0.636	0.399

注：表中“/”表示该测井响应不出现在对应的回归模型中

在表 1 中， DEN 出现的次数较多，并且在模型中的系数最大，表明密度测井与各氧化物含量具有十分密切的关系； AC, K, Th 出现的次数较少，说明声波测井、自然伽玛能谱测井响应与各氧化物含量 TFe 含量呈负相关关系。PE 与 MgO 含量负相关，

的相关关系较差；从各模型系数看， DEN 与 FeO, Fe_2O_3, TFe, MgO, TiO_2 等含量呈正相关关系，与 SiO_2, Na_2O, Al_2O_3 含量呈负相关关系；GR 或 lgGR 与 SiO_2, K_2O 含量呈正相关关系，与 FeO, Fe_2O_3 ，与 FeO, CaO, TiO_2 含量呈正相关关系。

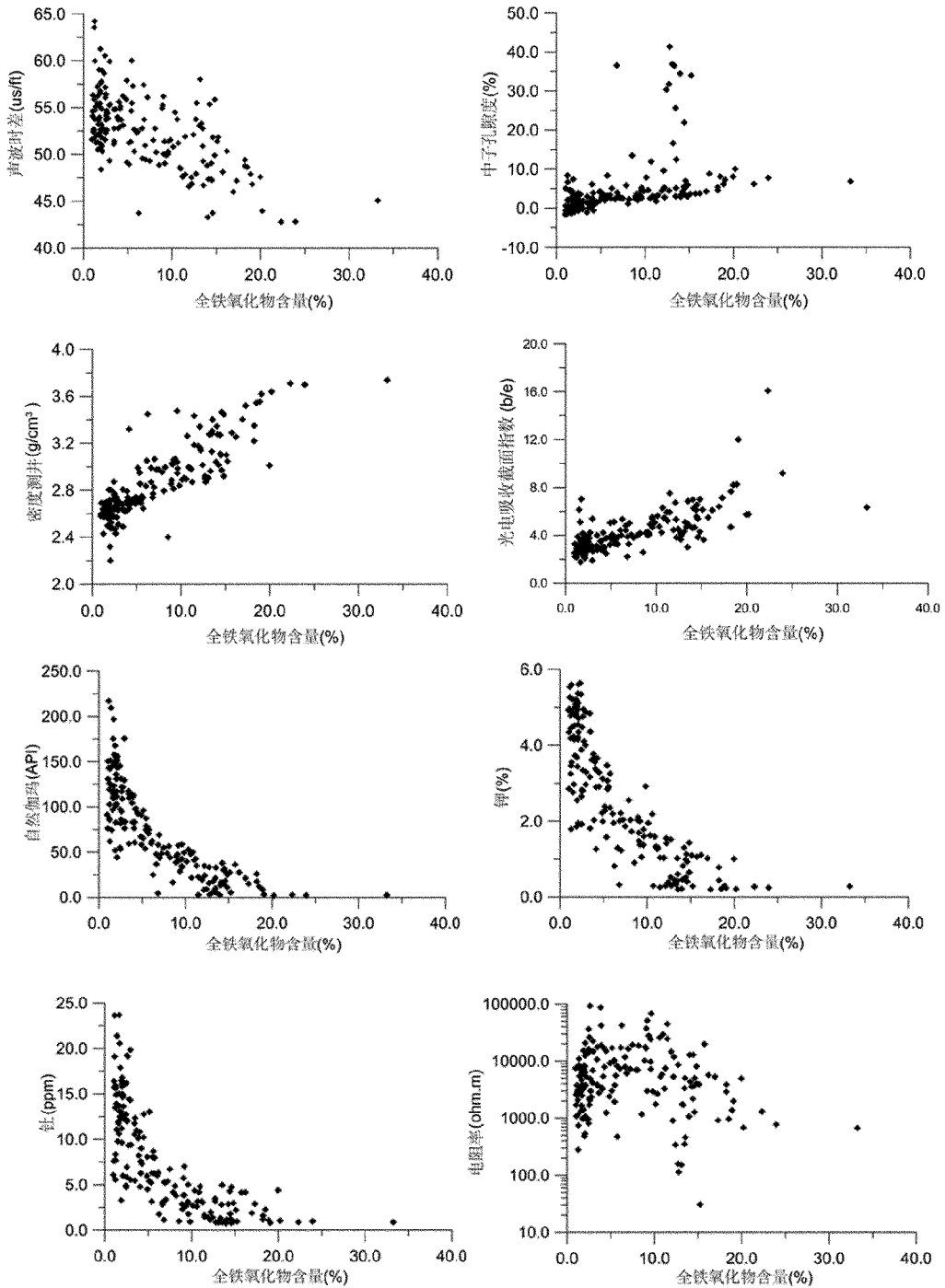


图 2 全铁氧化物含量 m_{TFe} 与各测井响应交会图

4 CCSD 主孔氧化物含量分布特征与岩矿分析

根据所建模型,利用测井资料计算中国大陆科学钻探工程主孔 70~2 010 m 地层的氧化物含量曲线(图 3)。图 3 中离散点为岩心测试数据,其中,

圆点表示建立回归模型时用到的 103 个样本点数据,三角形点表示没有参与模型回归的样本,用于检验回归模型的可靠性。由图可知,圆点和星点与回归曲线具有很好的一致性。尤其在 750~1 150 m 和 1 700~1 850 m 井段,在没有圆点样本控制的情

况下,三角形点与连续曲线表现出很好的拟合关系。这说明该文所建氧化物百分含量的回归模型是可靠的,所计算的氧化物含量曲线比较可信。

根据大陆科学钻探中心对主孔岩性识别与分层结果,将主孔 100~2 000 m 井段揭示的榴辉岩划分为 18 个层段(图 3)。

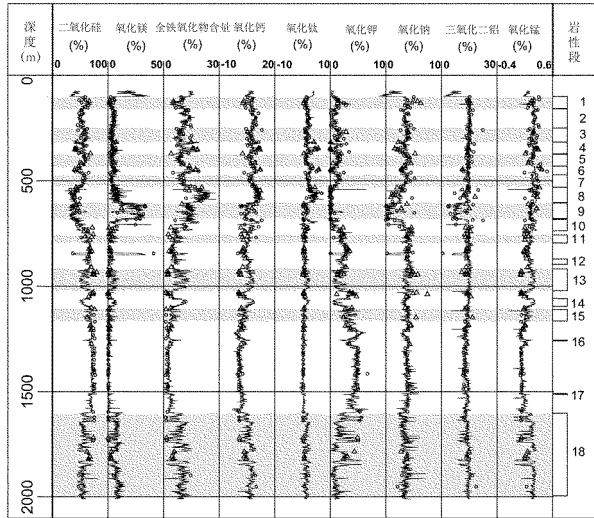


图 3 岩心测试与测井估计的氧化物含量

图 3 反映了钻孔中不同岩性各氧化物含量的变化特征,其中,100~603.4 m 和 1 058~1 092.4 m 井段的 SiO_2 , Na_2O , K_2O 含量较低; TFe , MgO , TiO_2 , CaO 含量较高,主要岩性为榴辉岩,对应 1~8,14 层段。603.4~683.2 m 和 843.0~850.6 m 井段的 SiO_2 , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 含量最低; TFe 含量较高, MgO 含量最高,表现为超基性岩特征,对应岩性为蛇纹岩。1 165.5~1 578.2 m 井段 SiO_2 , Na_2O , K_2O 含量较高; TFe , MgO , TiO_2 , CaO 含量最低,对应的主要岩性为片麻岩。683.2~1 058.0 m 和 1 578.2~2 000 m 井段各氧化物含量曲线高低起伏变化较大,揭示了榴辉岩、片麻岩和少量角闪岩的互层特征,对应第 18 层段。

钛是一种非常重要的金属元素。随着滨海型钛矿物、矿砂的日趋枯竭,榴辉岩型的变质钛矿床,可能成为重要的钛矿物资源。徐珏等学者^[24]从岩石和矿物学角度对 CCSD 主孔的钛矿化进行了研究,指出有经济价值的含钛相矿物主要是金红石,其次是钛磁铁矿,其他矿物不含或含微量钛。因此,可以根据 TiO_2 含量曲线,对主孔中这 2 种含钛相矿物的分布特征进行分析解释。根据 TiO_2 含量曲线识别整个井段中钛矿化程度较高的 4 个层位,其深度

区间分别为 316~371.5 m, 430.6~471.4 m, 531~603.4 m, 683.2~704.4 m, 对应第 3, 4, 8, 10 层段。

5 结语

地球物理测井是研究地球和解决地质问题的关键技术之一。利用测井资料进行复杂岩性评价是测井解释人员的一个重要研究课题。该文从理论上对地层元素组分与常规测井曲线的内在关系进行分析,推导了利用测井响应评价地层氧化物含量的线性化公式,为从化学组分角度识别复杂岩性奠定了基础。

利用中国大陆科学钻探工程主孔的测井与岩心全元素分析数据,对两者之间的关系进行研究,建立了主孔地层主元素氧化物含量的测井回归模型。利用常规测井资料计算了主孔 72~2 010 m 井段的氧化物含量。计算结果表明,主孔中各种岩性具有明显不同的氧化物含量特征。该文利用各氧化物含量曲线对该井段岩性与钛矿(化)的发育特征进行了分析解释,进一步划分了 4 个钛矿化程度较高的层段。

研究表明,在获得岩心全元素分析数据的条件下,可通过测井资料建立地层化学组分的测井评价模型,从而为复杂岩性解释提供了一种值得借鉴的方法。

志谢:笔者在研究中得到了牛一雄高工、潘和平教授、王文先高工的热情支持。李舟波教授、曾繁超总工对该文研究给予了热心帮助和指导。在此,对几位专家表示诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 郑勇,刘作强.石炭系火山岩岩性测井识别—准噶尔盆地西北缘红车断裂带[J].国外测井技术,2010,(177):25-28.
- [2] 范超颖,陈玉平,张洋洋.松辽盆地长岭断陷营城组火山岩测井响应特征与岩性识别[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(Sup.):87-91.
- [3] 郭海峰,李洪奇,孟照旭,等.基于突现自组织映射的数据挖掘:测井岩性识别新方法[J].石油天然气学报,2009,31(2):67-70.
- [4] 刘明军,李恒堂,姜在炳.GA-BP神经网络模型在彬长矿区测井岩性识别中的应用[J].煤田地质与勘探,2011,39(4):8-12.
- [5] 潘保芝,闫桂京,吴海波.对应分析确定松辽盆地北部深层火成岩岩性[J].大庆石油地质与开发,2003,22(1):7-9.
- [6] 刘秀娟,陈超,曾冲,等.利用测井数据进行岩性识别的多元统计方法[J].地质科技情报,2007,26(3):109-112.

- [7] 王拥军,冉启全,童敏,等. ECS 测井在火山岩岩性识别中的应用[J]. 国外测井技术, 2006, 21(1): 13-16.
- [8] 王飞,鲁明文,常银辉. 利用地球化学测井资料识别火山岩岩性[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(5): 139-142.
- [9] 韩琳,张建民,邢艳娟,等. 元素俘获谱测井(ECS)结合 QAPP 法识别火成岩岩性[J]. 测井技术, 2010, 34(1): 47-50.
- [10] 杨英波,周娟,于洪新,等. ECS 测井在火山岩储层岩性研究中的应用[J]. 国外测井技术, 2011, (183): 32-34.
- [11] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 1-8.
- [12] 许志琴,杨经绥,张泽明,等. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展[J]. 中国地质, 2005, 32(2): 177-182.
- [13] 牛一雄,潘和平,王文先,等. 中国大陆科学钻探主孔(0~2000m)地球物理测井[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 165-178.
- [14] 斯仑贝谢测井公司编,吴庆岩,张爱军译. 测井解释常用岩石矿物手册[M]. 北京:石油工业出版社, 1998: 77-81, 116.
- [15] 姜佩仁,王新民. 地学中的近代计算方法(第一版)[M]. 长春:吉林大学出版社, 1993: 78-80.
- [16] John H. Doveton(美),李舟波等译. 地下地质测井分析的原理与计算机方法[M]. 北京:地质出版社, 1989: 125-126.
- [17] 张泽明,许志琴,刘福来,等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050m)榴辉岩岩石化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 27-42.
- [16] 刘福来,许志琴,杨经绥,等. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 9-26.
- [19] 刘福来,许志琴,杨经绥,等. 中国大陆科学钻探工程主孔 2000~3000 米正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 305-324.
- [20] 刘勇胜,张泽明, LeeCin-Ty, 等. CCSD 主孔高 Ti 榴辉岩非耦合的高 Ti、低 Nb(Zr)特征:对玄武质岩浆房中磁铁矿分离结晶作用的指示[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 324-346.
- [21] 薛怀民,刘福来. 中国大陆科学钻探工程主孔 0~2000 米斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 355-368.
- [22] 牛一雄,潘和平,王文先. 中国大陆科学钻探工程科钻一井变质岩测井技术[M]. 北京:科学出版社, 2008: 62-66.
- [23] 徐珏,陈毓川,王登红,等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 米超高压变质岩中的钛矿化[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 119-126.

Well Logging Evaluation and Its Application of Chemical Components in Metamorphic Rock

—Setting Super - high Pressure Metamorphic Rocks
in Main Holes of CCSD Project as an Example

HAN Yanli¹, JING Jian'en², HOU BenJun³, HOU Guozheng¹

(1. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Shandong Jinan 250013, China; 2. Geophysics and Information Technology College of China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. No. 1 Marine Geological Party of Shanghai offshore Petroleum Bureau, Shanghai 201208, China)

Abstract: Well logging is facing more and more questions about complicated lithology interpretation. In order to identify lithology effectively by taking well logging, logging and core test data of main holes in super high pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling Project(CCSD) as examples, internal relations between conventional logging data and element component of stratum have been studied. Whole elements analysis information of 189 pieces of core samples have been collected, and the sample data of core analysis and corresponding logging datas have been extracted. On these basis, statistical relationship between oxide contents and normal corresponding logging datas has been analyzed. By using stepwise linear regression method, logging evaluation model of oxide content has been established. The oxide contents of main holes in 72~2010m section have been calculated by using logging data, and lithology and mineral development characteristics of main holes have been explained. It is showed that immanent connection exists between conventional logging response and element component for the complex metamorphic rock. On the condition of gaining element analysis data, by using well logging data, evaluation models of chemical components in strata has been set up. It can provide more direct data for lithology and ore analysis.

Key words: Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD); ultra - high pressure metamorphic rock; well logging; linear regression; oxide content