

中国大陆科学钻探主孔榴辉岩的分类及测井识别

景建恩^{1,2}, 魏文博^{1,2}, 金 胜^{1,2}, 叶高峰^{1,2}, 邓 明^{1,2}

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球物理信息技术学院, 北京 100083

摘要: 榴辉岩是中国大陆科学钻探主孔的主要岩性之一, 分布在 3 245 m 之上. 根据测井响应特征, 如自然伽玛、密度、中子孔隙度等, 可以很好地区分榴辉岩与主孔的其他岩类. 由于主孔榴辉岩具有不同的矿物成分、全岩化学成分和测井响应特征, 这为进一步详细划分榴辉岩亚类奠定了基础. 从原岩的起源、氧化物含量、次要矿物等 3 个角度对主孔榴辉岩进行分类, 研究了基于多元统计学的榴辉岩亚类的测井识别方法; 利用该方法对重构的 11 种榴辉岩亚类进行测井评价, 将可以利用测井资料识别的榴辉岩亚类归并为 6 种; 根据对榴辉岩亚类的识别结果, 将主孔中榴辉岩划分为 20 个层段, 分析了各种榴辉岩亚类在主孔中的深度分布特征, 为地质研究提供了资料.

关键词: 中国大陆科学钻探; 超高压变质岩; 榴辉岩; 测井; 岩性识别; 分类.

中图分类号: P631.8; P584

文章编号: 1000—2383(2007)04—0504—07

收稿日期: 2007—04—12

Classification and Well-Logging Identification of Eclogite in Main Hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project

JING Jian-en^{1,2}, WEI Wen-bo^{1,2}, JIN Sheng^{1,2}, YE Gao-feng^{1,2}, DENG Ming^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083 China

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Eclogite, one of the important lithologies in the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project, is distributed over 3 245 m above the sea-level. Gamma-ray, compensating density and neutron well-logging and so on can be used to distinguish the eclogite from others in the main hole. In the paper, because of diverse mineral and chemical components and well-logging responses, eclogites are classified in terms of three aspects: origin, content of oxides and sub-minerals. The studied statistical method in the paper is used to evaluate 11 kinds of reconstructed eclogites. As a result, eclogites can be divided into 6 types by using of well logs. With the identification of these six types in the main hole, 20 sections of eclogites are sorted and analyzed, which will provide important information for geological research of CCSD.

Key words: Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD); ultrahigh pressure metamorphic rock; eclogite; well-logging; lithology identification; classification.

2001 年 6 月 25 日至 2005 年 1 月 23 日, 在江苏东海实施的中国大陆科学钻探工程(简称 CCSD)是国家“九五”重大科学钻探工程项目和国际大陆科学钻探计划(ICDP)的重点项目, 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(许志琴, 2004; 许志琴等, 2005). 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 多种测井方法, 获得了主孔全井段超高压变质岩的原位测量信息(牛一雄等, 2004). 测井结果表明, 利用自然伽玛、密度、中子孔隙度、自然伽玛能谱测井的 K 含量,

基金项目: 中国大陆科学钻探工程中心专题解释项目(No. CCSD2004—04—01); 北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助.

作者简介: 景建恩(1973—), 男, 博士, 从事地球物理测井的教学与科研工作. E-mail: jje2008@cugb.edu.cn

参考光电吸收截面指数和双侧向电阻率测井等资料,能够较好地识别 CCSD 主孔的蛇纹岩、正片麻岩、副片麻岩、角闪岩、榴辉岩等大类(潘和平等, 2005)。岩石的磁化率和密度等实验参数的研究表明,主孔各岩类存在较为明显的物性差异(徐海军等, 2006)。

榴辉岩是中国大陆科学钻探主孔最主要的岩性之一,分布在主孔的 3 245 m 之上,测井统计的总厚度为 979 m。榴辉岩主要由石榴石、绿辉石组成,含少量石英、金红石、多硅白云母、蓝晶石、角闪石、黝帘石(绿帘石)和锆石等。研究表明,这些榴辉岩具有不同的矿物成分和全岩化学成分,代表了各自不同的原岩类型和变质过程(张泽明等, 2004; 张泽明等, 2005)。由于不同矿物组分的物理性质存在差异,因此含不同矿物组分的榴辉岩的测井响应特征存在一定的差异。为了进一步掌握榴辉岩的岩性,本文对主孔的榴辉岩分类方法进行了总结,研究了利用测井资料对榴辉岩进行精细解释的方法。根据榴辉岩亚类的识别结果,对各亚类在主孔中的分布特征进行了分析。

1 主孔榴辉岩的测井响应特征

榴辉岩属超高压变质岩。中国大陆科学钻探工程对超高压变质岩实施的测井在国内尚属首例。榴辉岩区别于其他岩性的显著测井响应特征如下:

(1)石榴石、绿辉石都是密度较大的矿物,约为 3.8 g/cm^3 和 3.4 g/cm^3 。因此,榴辉岩的密度测井值高于主孔的其他岩性,一般为 $2.95 \sim 3.51 \text{ g/cm}^3$ 。当榴辉岩中富集密度更大的矿物时,如金红石、钛铁矿、黄铁矿,密度测井值会更大,可超过 4.0 g/cm^3 。当榴辉岩发生退变质时,角闪石含量增加,石榴石和辉石含量减少,此时榴辉岩的密度测井值会有所降低,退变质程度越高,密度越小。

(2)榴辉岩的原岩属基性至中性岩,其自然伽玛测井值低于片麻岩,但高于蛇纹岩,平均值为 16.48 API 。当发生退变质时,放射性强度稍有增加。

(3)榴辉岩的 Pe 测井值稍高于片麻岩和角闪岩,平均值约为 4 b/e 。由于钛和铁元素的原子序数较大,当富集金红石、黄铁矿等矿物时, Pe 测井值更大,有时出现超过 $16 \sim 18 \text{ b/e}$ 的尖峰。CCSD 主孔的 Pe 曲线高尖峰出现的位置与地科院矿床所(徐珏等, 2004)的矿化剖面有极好的相关性,说明 Pe 测井资料在变质岩金红石和黄铁矿矿化研究中具有重要的作用。

(4)榴辉岩的中子孔隙度测井值小,当发生退变质时,含氢量增大,中子孔隙度测井值增大。

2 榴辉岩的分类

主孔榴辉岩在矿物、化学成分等方面存在一定的差别,这些差异为榴辉岩的进一步分类奠定了基础。根据所采用的不同分类标准,可以得出不同的榴辉岩分类结果。

2.1 按照原岩的起源分类

根据矿物学、岩石学和测井响应特征分析,主孔榴辉岩可能有两种来源,即幔源和壳源(游振东等, 2004; 王文先等, 2005)。壳源榴辉岩是指变质前长期居留于陆壳的基性至中性岩浆岩经超高压变质作用的产物;幔源榴辉岩指直接与地幔岩有关的基性岩类在深俯冲过程中加入俯冲板片,以致遭受超高压变质的叠加。

根据测井响应特征,主孔中第一段蛇纹岩之上的金红石榴辉岩是一段很特殊的岩性,主要发育井段为 $531 \sim 700 \text{ m}$,其测井响应特征与其他段的金红石榴辉岩存在显著的差别(图 1)。

图 1a 为与蛇纹岩伴生的幔源型榴辉岩。测井响应特征为:榴辉岩的自然伽玛特低,小于 5 API ,与蛇纹岩相似,属超基性岩特征。自然伽玛能谱在 531 m 之下显示钾和钍明显变低。密度平均值达到 3.60 g/cm^3 ,钛铁矿化突出处最高密度达 4.03 g/cm^3 。中子孔隙度为 $5\% \sim 10\%$,高于其他段榴辉岩的中子孔隙度。光电吸收截面指数很高,平均值达 8 b/e ,更有很多超过 15 b/e 的小峰,最高处有近 20 b/e 的尖峰,表明地层中含有较高的铁质矿物。

图 1b 中, $188.5 \sim 210.8 \text{ m}$ 为典型的壳源金红石榴辉岩,岩石十分新鲜,未发生退变质。测井响应特征表现为:自然伽玛较高(大于 5 API),密度约为 $3.2 \sim 3.4 \text{ g/cm}^3$,中子孔隙度低于 5% ,光电吸收截面指数平均值约 6 b/e ,尖峰普遍小于 10 b/e 。

2.2 按氧化物含量进行分类

根据全岩化学成分测试结果,可将榴辉岩归并成 6 种成分类型,即高硅型、高铝型、高钛型、高钛—铁型、高镁型和普通型(张泽明等, 2004)。主孔中各类榴辉岩具有不同的氧化物含量特征和发育深度。

(1)高钛型榴辉岩:当榴辉岩中 TiO_2 的含量为 $3\% \sim 6\%$ 时,形成所谓的高钛型榴辉岩。主孔中含钛量高的矿物有:金红石、钛铁矿、榍石和钛磁铁矿等;

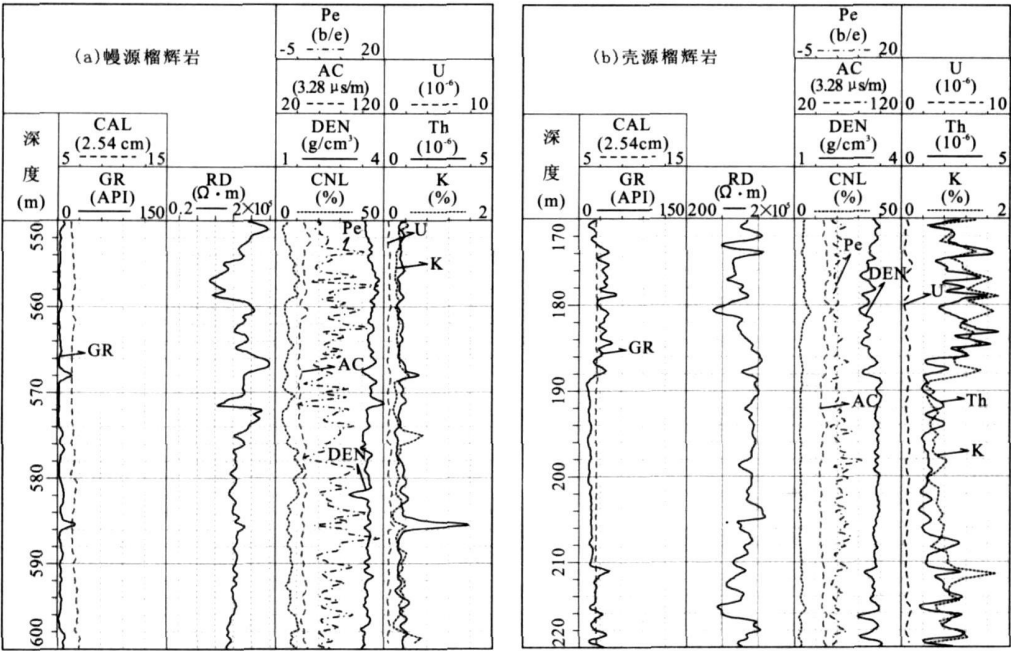


图 1 榴辉岩测井响应特征
Fig. 1 Well logging responses of eclogite

其他矿物,如石榴子石、辉石、角闪石、云母等矿物都含有不同量的钛,但是含钛量一般不超过 2.67% (徐珏等, 2004). 在主孔含钛的所有矿物中,以金红石最为发育. 所以,主孔中的高钛型榴辉岩主要对应于金红石榴辉岩.

(2)高钛—铁型榴辉岩:与钻孔中其他类型的榴辉岩相比,高钛—铁型榴辉岩具有十分特殊的化学成分:最低的 SiO₂ (<45%),最高的 TFe (>20%) 含量, TiO₂ 和 CaO 的含量与高钛型榴辉岩的相当,而高于其他类型的榴辉岩. 高钛—铁型榴辉岩主要出现在主孔的 531~603.4 m,与上面描述的慢源榴辉岩相对应. 根据岩心描述,该段主要为含黄铁矿金红石榴辉岩,部分层段发育钛铁矿化.

(3)高镁型榴辉岩:高镁型榴辉岩主要出现在主孔 606.0~684.2 m 井段,为石英榴辉岩,岩层厚 0.8~2 m. 根据岩心描述资料,该段榴辉岩与蛇纹岩呈互层产出,两者之间多为渐变接触关系. 该类榴辉岩的 MgO 含量 (12.2%~21%) 是所有类型榴辉岩中最高的; Na₂O+K₂O 和 TiO₂ 含量低. 与互层的蛇纹岩相比,该型榴辉岩的测井响应表现特征为高 Pe、DEN,低 CNL、磁化率. 该型榴辉岩与慢源型榴辉岩相对应. 高镁型榴辉岩与高钛—铁型榴辉岩相比,具有较低的 TFe 含量.

(4)高硅型榴辉岩:高硅型榴辉岩主要出现于主

孔 1 000 m 以上,岩性多为退变质榴辉岩(发生角闪石化). 这是由于榴辉岩由新鲜到退变质,体系中的 SiO₂ 含量越来越高所致. 镜下和岩心的观察发现,榴辉岩中大量石榴石、绿辉石等矿物呈孤岛状漂浮在石英中,这说明在榴辉岩退变质过程中不断有含 SiO₂ 质流体的参与. 另外,在退变质过程中,榴辉岩 MgO、CaO 和 FeO 的含量都在明显降低,而 Al₂O₃ 则表现为等化学系列,基本没有变化 (梁凤华等, 2005). 因此,该型榴辉岩具有较高的 SiO₂ (55%~60%) 和 Na₂O+K₂O (2.9%~7.8%) 含量,较低的 CaO (3.4%~8.4%)、TFe (6.5%~13.9%) 和 MgO (0.8%~5.3%) 含量.

(5)高铝型榴辉岩:高铝型榴辉岩对应的岩性为多硅白云母榴辉岩. 在组成多硅白云母榴辉岩的常见矿物中, Al₂O₃ 含量各不相同. 其中,白云母中 Al₂O₃ 含量近 40%,石榴石中 Al₂O₃ 含量为 20% 左右,辉石中 Al₂O₃ 含量低于 15%,其他副矿物(如金红石、榍石、钛磁铁矿、钛斜硅镁石等)中 Al₂O₃ 含量一般低于 1% (斯仑贝谢测井公司, 1998). 可见,随着白云母含量增加,榴辉岩中铝含量也会相应地增加. 高铝型榴辉岩主要出现于主孔 1 637~2 000 m 的井段. 其 Al₂O₃ 含量大于 18%, SiO₂、TFe、TiO₂ 含量较低.

(6)普通型榴辉岩:普通型榴辉岩是受退变质作

用影响较小、各副矿物含量极低的一种榴辉岩。因此, 该型榴辉岩的 TiO_2 和 TFe 的含量要低于高钛型和铁型榴辉岩, 而高于高硅型和铝型榴辉岩。 MgO 含量低于高镁型榴辉岩, 而超过高硅型榴辉岩。 SiO_2 含量小于高硅型榴辉岩, 而大于高镁型、高钛—铁型榴辉岩。

2.3 按次要矿物分类

受结晶分异作用的影响, 主孔榴辉岩副矿物的类型与含量存在明显的差异。根据岩心观察和镜下鉴定结果, 榴辉岩中所含副矿物有石英(或柯石英)、多硅白云母、蓝晶石、角闪石、黝帘石(绿帘石)、金红石和锆石等。根据变质岩常用的命名原则, 以榴辉岩的次要矿物为标准, 可将榴辉岩分成许多亚类: 石英榴辉岩、金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、磷灰石榴辉岩、蓝晶石榴辉岩、金云母榴辉岩、普通榴辉岩等(梁凤华等, 2005)。研究表明, 这些榴辉岩亚类在交会图上具有各自的物性分区, 这些分区存在很大的交叉部分(牛一雄等, 2006), 增加了手工方法判别榴辉岩亚类的难度。

3 主孔榴辉岩亚类的测井识别

下文介绍一种充分利用各种测井资料识别榴辉岩亚类的多元统计学方法——空间距离法。

3.1 空间距离的定义

CCSD 采用了多种测井技术进行测量, 获得了地层的多方面信息。每一种测井信息都可以看成是反映地层岩性变化的一个随机变量。在这里, 自然伽玛(GR)、钾(K)、钍(Th)、铀(U)、深侧向电阻率(RD)、密度(DEN)、光电吸收截面指数(Pe)、中子孔隙度(CNL)、声波时差(AC)等是反映岩性变化的9个变量。它们构成一个多维空间。进行岩性识别时, 根据测井曲线对地层进行划分, 提取地层的测井响应平均值作为相应的变量值, 则每一个地层对应着一个矢量。这个矢量由9个变量值组成, 对应着多维空间的一个点。

主孔中每一种榴辉岩亚类的所有地层都对应着多维空间的一个点群。点群中所有点矢量的平均矢量定义为该点群的重心, 在一个点群中, 每个点矢量与重心距离的平均值定义为该点群的半径。两个点群重心之间的距离称为两个点群的空间距离, 可采用欧氏距离公式计算(矫希国等, 1993)。

3.2 点群空间距离与岩性识别效果的关系

利用上述9种资料识别岩性时, 如果代表两个岩性亚类的点群没有重叠部分, 则利用测井资料能够很好地将这两种岩性分开; 如果两个点群完全重叠在一起, 则这两种岩性不能分开; 如果两个点群只有部分重叠, 则在识别岩性时会出现误判, 重叠部分所占两个点群空间的比例越大, 则它们出现误判的可能性就越大。

通过对比两个点群空间距离和半径的关系, 可以判断两个岩性亚类的划分效果。一般来说, 空间中两个点群的位置关系存在4种情况(图2)。图中两个点群的重心为 O_1 、 O_2 , 半径为 R_1 、 R_2 (设 $R_1 > R_2$), 点群空间距离为 O_1O_2 , K 为两个点群的距离与两点群半径的差值, 即 $K = O_1O_2 - R_1 - R_2$ 。

图2a中, $K > 0$, 显然两类岩性亚类的识别效果很好; 图2b中, $K < 0$, $|K| < R_2$, 表明两个岩性亚类空间点群重叠部分较少, 且 $|K|/R_2$ 越小, 两岩性的识别效果越好; 图2c中 $K < 0$, 并且 $|K| > R_2$, 识别效果较差; 图2d中 $K < 0$, 并且 $|K| > 2R_2$, 识别效果最差或不能识别。

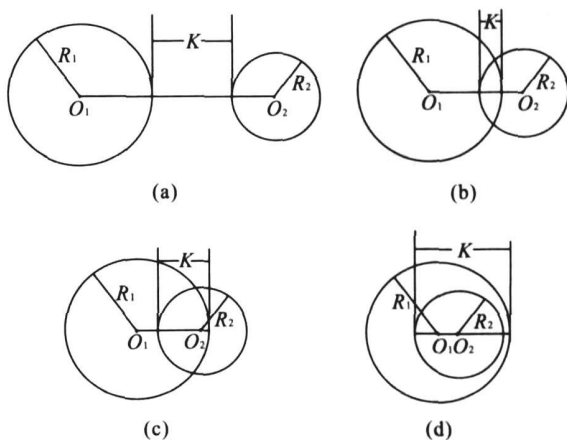


图2 两个点群的空间关系示意图

Fig. 2 Spatial relationship of two kinds of point cluster

3.3 利用点群空间距离识别岩性的方法

利用空间距离识别岩性分2个阶段: 建立模型阶段和判别阶段。

(1) 建立模型阶段: 根据已知钻井编录资料, 进行岩性重构。利用测井曲线划分地层, 提取每个岩性层各种测井响应的平均值, 构成多维空间的一个矢量, 则同一种岩性对应的各矢量构成一个多维空间点群。这个点群代表了这种岩性的空间分区。按照点群空间关系, 对重构岩性的识别效果进行判断, 将属

表 1 6 种榴辉岩亚类重心与半径数据
Table 1 Centers and radius of six kinds of eclogite

亚类	G R	K	Th	U	lgRD	DEN	Pe	CNL	AC	半径
(1)	0.575	0.531	0.414	0.259	0.668	0.261	0.259	0.105	0.602	0.387
(2)	0.325	0.270	0.269	0.243	0.672	0.520	0.342	0.115	0.470	0.389
(3)	0.000 5	0.000 6	0.019	0.208	0.095	0.969	0.588	0.223	0.334	0.438
(4)	0.131	0.020	0.184	0.305	0.297	0.663	0.579	0.267	0.432	0.240
(5)	0.237	0.137	0.252	0.278	0.536	0.320	0.253	0.680	0.690	0.467
(6)	0.395	0.423	0.187	0.350	0.387	0.301	0.258	0.191	0.421	0.406
最大值	68.485	2.738	7.197	1.749	4.690	3.855	10.186	32.452	61.067	/
最小值	2.261	0.225	0.737	0.130	2.072	2.689	2.854	1.367	36.459	/

注：(1)榴辉岩、退变质榴辉岩；(2)石英金红石榴辉岩、多硅白云母金红石榴辉岩、金红石榴辉岩；(3)钛铁矿金红石榴辉岩；(4)角闪石金红石榴辉岩；(5)石英榴辉岩；(6)绿泥石多硅白云母榴辉岩、角闪多硅白云母榴辉岩、多硅白云母榴辉岩。

于图 2d 情况的两个点群归为一类. 如此进行下去, 直到不存在图 2c 和图 2d 的情况为止. 最后, 得到每种岩性的重心矢量及半径.
当钻井编录资料较少时, 可在测井资料分层的基础上, 提取各岩性层测井响应的平均值, 采用交会图或聚类分析的方法重构岩性.

(2)判别阶段: 对于未知岩性地层, 提取该层测井响应的平均值矢量, 计算它与模型各岩性重心的距离. 当这个距离只小于一个点群的半径时, 则将该层的岩性确定为这个点群所代表的岩性. 若这个距离小于多个点群的半径时, 则根据半径与这个距离差值的最大值来判别岩性.

3.4 重构和识别榴辉岩亚类

根据 CCSD 主孔的钻井编录资料, 对榴辉岩亚类进行重构. 重构的榴辉岩亚类包括: 榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、退变质榴辉岩、金红石榴辉岩、石英榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、钛铁矿金红石榴辉岩、石英金红石榴辉岩、角闪石金红石榴辉岩、角闪石多硅白云母榴辉岩、绿泥石多硅白云母榴辉岩.

考虑到不同测井响应值存在数量级差别, 深测向电阻率取以 10 为底的常用对数, 在识别榴辉岩亚类时, 各种测井数据都进行了归一化处理. 利用前面介绍的空间距离关系, 对重构 11 种榴辉岩亚类的识别效果进行判断, 判断的结果为: 钛铁矿金红石榴辉岩、角闪石金红石榴辉岩、石英榴辉岩与其他亚类的空间关系属于图 2a 的情况, 具有明显的识别效果; 榴辉岩与退变质榴辉岩空间分区属于图 2c, 识别效果较差, 应归为一类; 石英金红石榴辉岩、多硅白云母金红石榴辉岩、金红石榴辉岩的空间分区属于图 2c, 识别效果较差, 应归为一类; 绿泥石多硅白云母榴辉岩、角闪石多硅白云母榴辉岩、多硅白云母榴辉岩属于图 2c, 识别效果较差, 应归为一类. 重新对新

产生的 6 个亚类的判别效果进行评价, 它们任意两类之间的空间关系没出现图 2c 和图 2d 的情况. 这样, 利用测井资料可识别的榴辉岩亚类最终被归并为 6 类. 表 1 给出了 6 种榴辉岩亚类的归一化重心与半径.

4 主孔榴辉岩亚类的分段分析

根据对榴辉岩亚类的划分与识别结果, 将主孔中榴辉岩划分为 20 个层段(图 3). 由图 3 可见, 主孔中榴辉岩主要发育在 2000 m 以上; 2000 m 以下榴辉岩较少, 主要为退变质榴辉岩, 以第 19、20(2 682.4 ~ 2829.4 m、3 018.4 ~ 3 039 m)段相对较为集中.

(石英、多硅白云母)金红石榴辉岩属高钛型榴辉岩, 主要出现在 1 000 m 以上, 发育于第 1 段的上部和第 2、4、6、8、10 段. (退变质)榴辉岩属高硅型榴辉岩, 主要出现在第 1 段的下部和第 3、5、7、11、12、15、16、17 段, 分布深度较广. 另外, 第 13、14 段中, 退变质榴辉岩和金红石榴辉岩交替出现.

钛铁矿金红石榴辉岩属高钛—铁型榴辉岩, 主孔仅发育 3 层. 其中, 第 8 段发育两层; 第 10 段上部发育一层. 第 8、9 段(531 ~ 603.4 m、606.5 ~ 679 m)为幔源榴辉岩. 第 8 段主要为幔源型金红石榴辉岩; 第 9 段全部为石英榴辉岩, 属于高镁型榴辉岩, 与蛇纹岩相伴生. 第 18 段(1 601.7 ~ 1 994.6 m)以多硅白云母榴辉岩为主, 对应高铝型榴辉岩.

5 结语

榴辉岩与主孔其他岩性的响应特征存在明显的差别, 利用自然伽玛、密度、中子孔隙度、自

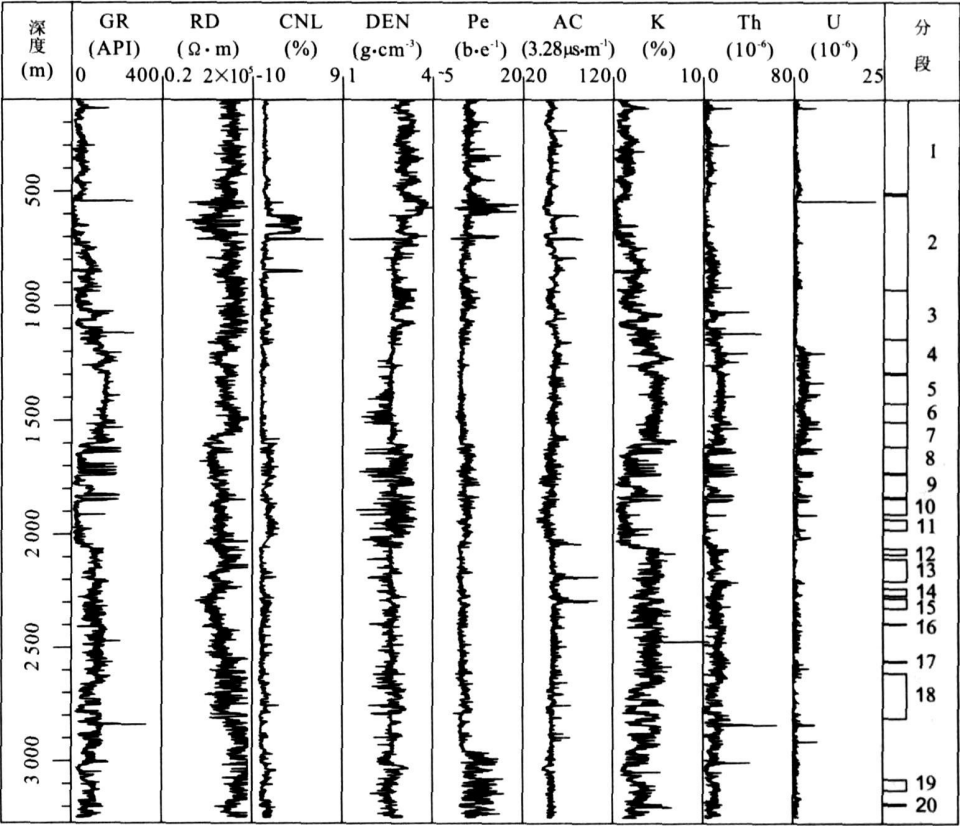


图 3 主孔榴辉岩的测井响应及层段划分

Fig. 3 Well logging responses and divided sections of eclogites in main hole of CCSD

然伽玛能谱的 K 含量、光电吸收截面指数和双侧向电阻率等测井资料, 能够较好地识别 CCSD 主孔的榴辉岩。

研究了识别榴辉岩亚类的多元统计学方法——空间距离法。该方法包括建模和判别两个阶段, 不仅可以对现有分类结果的识别效果进行评价, 而且可以判别未知地层的岩性。应该指出, 本文仅对空间距离法进行了初步的研究。为了提高识别效果, 该方法还存在需要改进的地方: 如, 根据各种测井资料反映不同岩性的显著性, 在建模时应赋予不同的权值, 区别对待; 用其他更复杂甚至不规则形体代替多维空间的球体, 可以对多维空间中各岩性的分区进行更准确的划分。

致谢: 本文得到了中国大陆科学钻探测井中心牛一雄高工、潘和平教授、王文先高工的热情支持, 以及蔡柏林教授、曾繁超总工、刘士毅总工的帮助和指导。在此, 对几位专家表示诚挚谢意。

References

Liang F. H., Su S. G., You Z. D., et al., 2005. Retrograde metamorphism of eclogites from the main hole (0—2000 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling, Donghai, Jiangsu Province. *Geology in China*, 32(2): 218—229 (in Chinese with English abstract).

Niu Y. X., Pan H. P., Wang W. X., et al., 2004. Geophysical well logging in main hole (0—2000 m) of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 165—178 (in Chinese with English abstract).

Niu Y. X., Pan H. P., Wang W. X., et al., 2006. Geophysical well logging in main hole (0—2000 m) of Chinese Continental Scientific Drilling. China University of Geoscience Press, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Pan H. P., Niu Y. X., Wang W. X., et al., 2006. Joint interpretation of reflectors via well logging and seismic data in the pilot hole of CCSD. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(Suppl.): 49—56(in Chinese with English abstract).

Jiao X. G., Sun F. X., Yang Y. H., et al., 1993. Multivariate statistics analysis. Jilin University Press, Changchun (in Chinese with English abstract).

- eral in log interpreting. Translated by Wu Q. Y., Zhang A. J.. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. X., Ni, Y. X., Pan, H. P., et al., 2005. Well logging analysis of ultrabasic rock section in main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30 (Suppl.): 83–87 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Jin, Z. M., Ou, X. G., 2006. Lithology determination of rocks from CCSD 100–2 000 m main hole by magnetic susceptibility and density using discriminant function analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 513–519 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100–2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 119–126 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Zhang, Z. M., et al., 2005. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. *Geology in China*, 32(2): 177–183 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Su, S. G., Liang, F. H., et al., 2004. Petrography and metamorphic deformational history of the ultrahigh pressure metamorphic rocks from the 100–2 000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 43–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100–2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Zhang, J. F., Xu, Z. Q., et al., 2005. Petrology of eclogites from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drill Project. *Geology in China*, 32(2): 205–207 (in Chinese with English abstract).
- 207 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 梁凤华, 苏尚国, 游振东, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔 (0~2 000 m) 榴辉岩的退变质过程. *中国地质*, 32(2): 218–229.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 (0~2 000 m) 地球物理测井. *岩石学报*, 20(1): 165–178.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先, 等, 2006. 中国大陆科学钻探主孔 0~2 000 m 地球物理测井. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 潘和平, 牛一雄, 王文先, 等, 2005. 放射性测井在中国大陆科学钻探中的应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(增刊): 49–56.
- 矫希国, 孙凤兴, 杨毅恒, 等, 1993. 多元统计分析方法. 长春: 吉林大学出版社.
- 斯伦贝谢测井公司, 1998. 测井解释常用岩石矿物手册. 吴庆岩, 张爱军, 译. 北京: 石油工业出版社.
- 王文先, 牛一雄, 潘和平, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔基性岩段的测井分析. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(增刊): 83–87.
- 徐海军, 金振民, 欧新功, 2006. 磁化率和密度对中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石类型的判别. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 513–519.
- 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 米超高压变质岩中的钛矿化. *岩石学报*, 20(1): 119–126.
- 许志琴, 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1–8.
- 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 等, 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展. *中国地质*, 32(2): 177–183.
- 游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 米超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. *岩石学报*, 20(1): 43–52.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100~2 050 m) 榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27–42.
- 张泽明, 张金凤, 许志琴, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩的岩石学研究. *中国地质*, 32(2): 205–207.