

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

徐海军¹, 金振民², 欧新功³

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 为查明磁化率和密度对于中国大陆科学钻探工程(CCS D)主孔 100~2 000 m 岩性的响应和判别特征, 利用 SPSS10.0 统计分析软件进行了判别分析. 研究结果显示, 岩石的密度和体积磁化率主要受岩性的控制. 采用迫入法建立全模型, 对 CCS D 主孔 100~2 000 m 井段岩心的岩性判别率达 84.8%. 其中, 蛇纹石化橄榄岩、正片麻岩、副片麻岩、榴辉岩、角闪岩和退变质榴辉岩的判别率分别为 100%、87.1%、89.7%、89.6%、96.7% 和 63.7%. 该研究表明, 密度和磁化率可以为超高压变质岩石的岩性鉴别和区分提供定量约束, 有利于地球物理探测成果和测井资料的准确解析. 同时, 本文也是 SPSS 统计分析软件在超高压变质岩石类型判别方面的一个应用实例, 对于其他岩石类型的判别分析具有借鉴意义.

关键词: 磁化率; 密度; 岩性判别; 判别分析; 超高压岩石; 中国大陆科学钻探; 东海县.

中图分类号: P318.4; P585

文章编号: 1000-2383(2006)04-0513-07

收稿日期: 2005-09-28

Lithology Determination of Rocks from CCS D 100—2 000 m Main Hole by Magnetic Susceptibility and Density Using Discriminant Function Analysis

XU Hai-jun¹, JIN Zhen-min², OU Xin-gong³

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Magnetic susceptibility (κ) and density (ρ) were measured at 5.7 m depth intervals on drill cores from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. We analyzed the data by discriminant analysis employing SPSS 10.0 for Windows to test whether the lithology can be distinguished by petrophysical parameters. The density and magnetic susceptibility of the CCS D 100—2 000 m main hole are mainly controlled by the lithology. Lithology discriminant functions were constructed by means of the Enter Independents Together method. The results show that the total discriminant rate is 84.8%, while the rates of the serpentinized peridotite, orthogneiss, paragneiss, eclogite, amphibolite and retrograded eclogite are 100%, 87.1%, 89.7%, 89.6%, 96.7% and 63.7%, respectively. This research confirms that the petrophysical parameters of magnetic susceptibility and density can provide quantity constraints for the lithology discrimination of ultrahigh-pressure (UHP) rocks. Furthermore, it throws some light on the lithology determination, and may be useful in improving the interpretations of geophysical surveying and well logging.

Key words: magnetic susceptibility; density; lithology determination; discriminant analysis; ultrahigh-pressure (UHP) rocks; Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD); Donghai.

0 引言

中国大陆科学钻探工程(Chinese Continental Scientific Drilling Project, 简称 CCSD)的主孔位于江苏省东海县西南部的毛北村附近(34. 25°N, 118. 40°E), 构造上属于苏鲁超高压变质带的西南端(图 1). CCSD 的主孔施工已于 2005 年 4 月顺利完成, 终孔深度 5 158 m. 该工程的主要目标是研究“大陆板块会聚边界的地幔动力学”和建立“超高压变质岩石形成和折返机制”的模式. 查明板块会聚带大陆深俯冲物质的组成、俯冲量、俯冲深度、物理状态和地球物理界面性质等对达到既定的科学目标至关重要. 我国科学家自 1996 年起, 围绕 CCSD 的选址和施工, 在苏鲁地区开展了广泛的地质和地球物理工作, 包括: 连续钻取新鲜、定向的岩心样品, 并对之进行岩性、构造、矿化和地球化学等综合研究(许志琴, 2004); 通过重磁、深地震反射、三维地震、大地电磁等地球物理探测工作获得丰富的深部地球物理资料, 建立本区精细的地球物理模型(余钦范等, 2001; Yang, 2002); 详细调查南苏鲁造山带根部的物质组成和变质作用(张泽明等, 2002); 系统测定钻孔岩心和东海县地表岩石的密度、波速、热导率、磁化率等参数, 获得该区超高压岩石大量的物性数据(余钦范等, 2002; 金振民等, 2004; 欧新功等, 2005); 围绕主孔开展系统的地球物理测井工作, 并对部分测井资料进行了初步解释(牛一雄等, 2004).

这些研究工作不仅奠定了该区地质与地球物理工作的基础, 而且为我们综合分析实验岩石物理学



图 1 秦岭—大别—苏鲁造山带地质简图及 CCSD 钻孔位置(Xu et al., 1998)

Fig. 1 Simplified geological map of Qinling-Dabie-Sulu orogen, and the drilling site of CCSD

数据、地球物理探测数据、地球物理测井数据和基础地质数据创造了优越的条件. 对岩石物理资料进行系统深入的统计分析是检验和完善地球物理推断的地质—岩石学模型的基础, 有利于提高我们对地表地球物理成果合理解释的能力. 前苏联科拉半岛 SG-3 和德国 KTB 超深钻的研究为我们提供了一些经验和借鉴(Kozlovsky, 1987; Berckhemer et al., 1997; Emmeimman and Lauterjung, 1997; Rauhen et al., 2000). 本文以 CCSD 主孔 100~2 000 m 的钻孔岩心为研究对象, 旨在查明密度和磁化率对超高压变质岩石主要类别的响应和鉴别特征, 从而为该区地球物理探测成果和地球物理测井资料的准确解析提供多参数约束条件.

1 研究样品和测试

我们在 CCSD 主孔 100~2 000 m 井段采集钻孔岩心共计 352 块, 平均采样间隔约为 5.7 m. 在现场实验室从这些钻孔岩心上钻取小圆柱体, 并磨制成规格为直径 25 mm、高 25 mm 的样品(共 331 个), 用来进行岩石物性参数测量. 岩石的密度和磁化率的测量工作在中国大陆科学钻探工程现场岩石物性实验室完成, 测量条件为 101. 325 kPa、25 °C. 密度测量仪器为 LP1002 型比重仪, 相对误差 ±0.03%; 磁化率测量仪器为卡帕桥 HKB-3 型磁化率仪, 灵敏度 5×10^{-8} SI, 精度优于 10^{-7} SI.

CCSD 主孔 2 000 m 井段所揭示出的岩石类型有 50 多种, 以不同退变质程度的榴辉岩和正、副片麻岩为主(许志琴, 2004). 本文结合岩心手标本的观察描述和岩石薄片在显微镜下的鉴定结果, 将 331 块研究样品中的 315 块划分为榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩(完全退变质榴辉岩)、正片麻岩、副片麻岩、蛇纹石化橄榄岩等 6 种主要岩石类型. 另外 16 块为其他类型, 包括片岩、石英岩、绿泥石化辉石岩和黑云绿帘纤闪石岩等.

2 密度和磁化率对岩石类型的响应特征

图 2a 是 CCSD 主孔 2 000 m 井段简化的岩性柱状图, 图 2b 和图 2c 分别给出了岩石的磁化率(κ)和密度(ρ)随井深的变化剖面(黑色实心点代表岩心

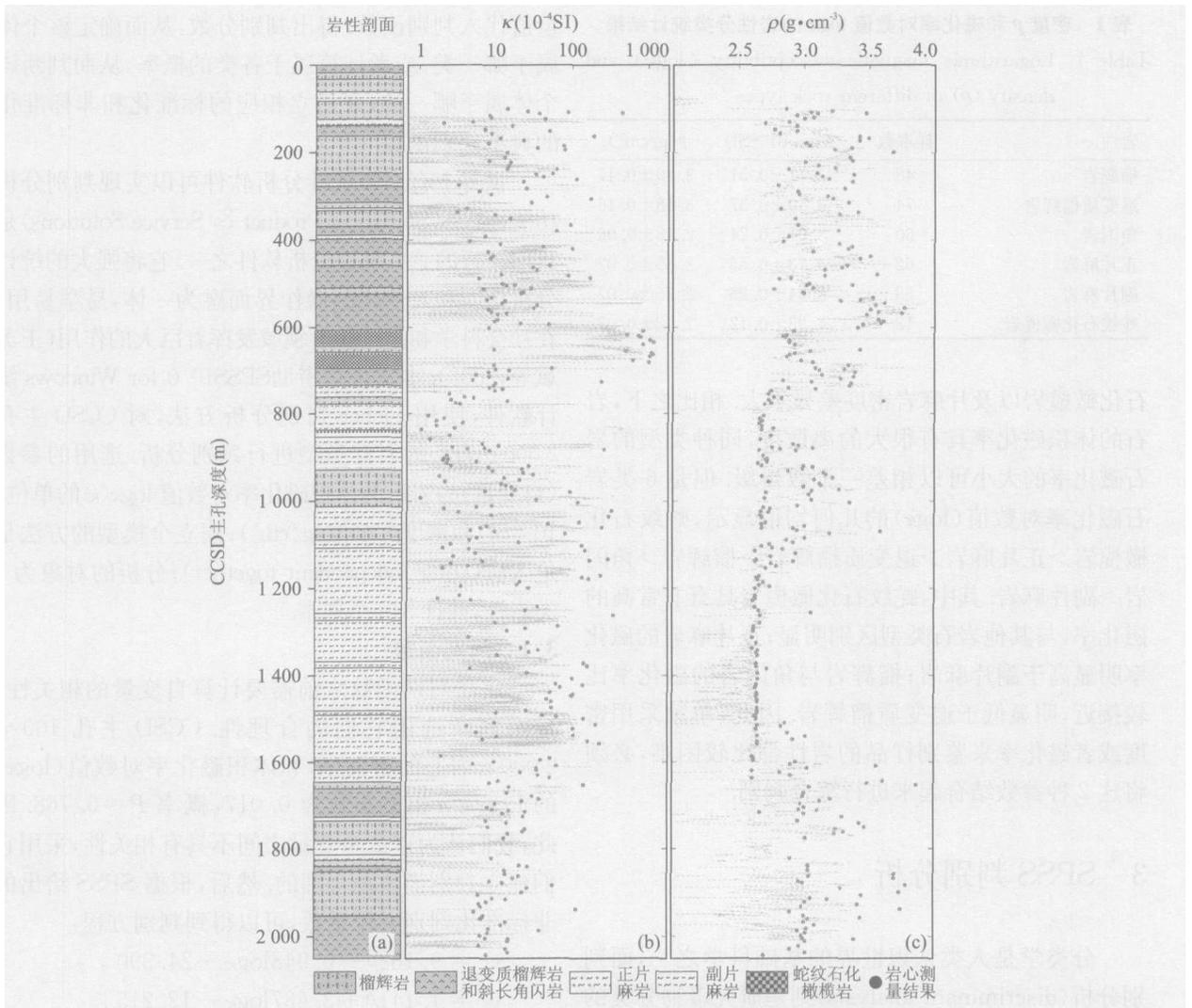


图 2 CCSD 主孔 2 000 m 岩性(a)、磁化率(b)和密度(c)垂向剖面(测井数据由潘和平和牛一雄教授提供)
 Fig. 2 Lithology (a), magnetic susceptibility (b) and density (c) profiles of the CCSD 2 000 m main hole

在现场实验室的测量结果,灰色曲线代表地球物理测井数据).从图上可以看出,密度和磁化率的岩心测量结果与地球物理测井数据具有良好的可比性,二者随井深的变化趋势基本一致.值得注意的是,岩石的密度和磁化率主要受岩性控制,随岩性的变化呈现出明显的垂向分带性:(1)0~608 m,岩性以榴辉岩、退变质榴辉岩和斜长角闪岩为主,夹有不同厚度的薄层副片麻岩.该井段磁化率和密度的变化范围都很大,几何平均值分别为 $\kappa=2.12 \times 10^{-3}$ SI 和 $\rho=3.20$ g/cm³; (2)608~683 m,主要为蛇纹石化石榴橄榄岩,夹有薄层榴辉岩.该井段具有很高的磁化率 $\kappa=6.16 \times 10^{-2}$ SI,但是岩石的密度中等 $\rho=2.95$ g/cm³; (3)683~1 165 m,榴辉岩、退变质榴辉岩、斜长角闪岩和副片麻岩互层产出,夹有少量正

片麻岩.该井段的磁化率和密度都比较低, $\kappa=9.10 \times 10^{-4}$ SI, $\rho=2.93$ g/cm³; (4)1 165~1 600 m,以花岗质片麻岩为主,中间出现数层副片麻岩.该井段密度低而集中, $\rho=2.78$ g/cm³;磁化率相对较高, $\kappa=2.56 \times 10^{-3}$ SI; (5)1 600~2 050 m,以榴辉岩、斜长角闪岩和退变质榴辉岩为主,夹有少量正副片麻岩.该井段磁化率中等并相对集中 $\kappa=1.26 \times 10^{-3}$ SI,密度变化范围较大, $\rho=3.09$ g/cm³.

为进一步查明密度和磁化率与岩石类型的关系,我们对以上数据按照岩性进行了分类统计,结果见表 1.岩石密度(ρ)的离散度不大,从几何平均值来看,榴辉岩>退变质榴辉岩>角闪岩>蛇纹石化橄榄岩>副片麻岩>正片麻岩.其中,榴辉岩的密度与片麻岩和角闪岩具有明显差异,而角闪岩与蛇纹

表 1 密度 ρ 和磁化率对数值 $\log\kappa$ 的岩性分类统计结果
Table 1 Logarithmic magnetic susceptibility ($\log\kappa$) and density (ρ) of different rock types

岩性	样本数	$\log\kappa(10^{-6}\text{SI})$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
榴辉岩	48	3.11 ± 0.31	3.49 ± 0.17
退变质榴辉岩	74	3.50 ± 0.37	3.18 ± 0.16
角闪岩	60	3.01 ± 0.24	2.98 ± 0.06
正片麻岩	62	3.73 ± 0.55	2.65 ± 0.02
副片麻岩	58	2.54 ± 0.25	2.75 ± 0.07
蛇纹石化橄榄岩	13	4.93 ± 0.12	2.92 ± 0.07

石化橄榄岩以及片麻岩密度差异不大,相比之下,岩石的体积磁化率具有很大的离散度,同种类型的岩石磁化率的大小可以相差一个数量级.但是 6 类岩石磁化率对数值($\log\kappa$)的几何均值显示,蛇纹石化橄榄岩>正片麻岩>退变质榴辉岩>榴辉岩>角闪岩>副片麻岩.其中,蛇纹石化橄榄岩具有非常高的磁化率,与其他岩石类型区别明显;正片麻岩的磁化率明显高于副片麻岩;榴辉岩与角闪岩的磁化率比较接近,明显低于退变质榴辉岩.因此,单独采用密度或者磁化率来鉴别样品的岩性都比较困难,必须将这 2 种参数结合起来进行综合判别.

3 SPSS 判别分析

分类学是人类认识世界的基础科学之一,而判别分析(discriminant analysis)则是研究事物分类的基本方法.判别分析就是根据观察或者测量到的若干变量值来判断研究对象如何分类的方法,也是数学地质研究的基本方法之一(赵鹏大等,1990).判别分析是多元统计分析中用于判别样本所属类型的一种统计方法,它要解决的问题是在一些已知研究对象用某种方法已分成若干类的情况下,确定新的观察数据属于已知类别中的哪一类.进行判别分析必须已知观测对象的分类和若干表明观测对象特征的变量值,判别分析就是要从中筛选出能够提供较多信息的变量并建立判别函数,使得利用推导出的判别函数对观测量判别其所属类别时候的错判率最小.判别函数的一般形式为:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_m x_m.$$

其中, y 为判别分数(判别值); x 为反映研究对象特征的变量; a 为各变量的系数,也称为判别系数.对于分为 m 类的研究对象,建立 m 个判别线性函数.在对每一个个体进行判别时,要求把测试的各个变

量值代入判别函数,得出判别分数,从而确定该个体属于哪一类,或者计算属于各类的概率,从而判断该个体属于哪一类,并建立相应的标准化和非标准化的典型判别函数.

世界上有许多统计分析软件可以实现判别分析功能,SPSS(Statistical Product & Service Solutions)是目前流行的三大统计分析软件之一.它将强大的统计分析功能和人性化的操作界面融为一体,易学易用,在社会科学和自然科学领域发挥着巨大的作用(王苏斌等,2003).本文正是借助 SPSS10.0 for Windows 统计软件,使用 Fisher 判别分析方法,对 CCSD 主孔 2 000 m 岩心的岩性类型进行判别分析.选用的参数(自变量)为岩石的体积磁化率对数值 $\log\kappa$ (κ 的单位: 10^{-6}SI)和密度 ρ (单位: g/cm^3);建立全模型的方法是迫入法(enter independent together);分析的对象为 6 类岩性,共计 315 个样本.

3.1 判别函数

建立判别函数之前需要计算自变量的相关性,进而判断选用它们的合理性. CCSD 主孔 100 ~ 2 000 m 岩心的密度(ρ)和体积磁化率对数值($\log\kappa$)的 Pearson 相关系数为 0.017,概率 $P=0.768$.因此,我们认为这 2 个变量之间不具有相关性,采用它们建立判别函数是合理的.然后,根据 SPSS 给出的非标准化判别方程系数,可以得到判别方程:

$$y_1 = 9.182\rho - 0.948\log\kappa - 24.390,$$

$$y_2 = 1.141\rho + 2.687\log\kappa - 12.215.$$

其中, y_1 和 y_2 表示判别函数的得分值(判别值).判别函数 y_1 和 y_2 的特征值,即组间平方和与组内平方和之比,分别为 7.264 和 2.161;典型相关系数分别为 0.938 和 0.827.进行函数检验,函数 y_1 和 y_2 的 Wilks λ 分别为 0.038 和 0.316, x^2 检验值分别为 1 011.480 和 356.801, $P < 0.001$.

借助判别方程的标准化系数和变量与函数之间的相关系数,可以判断密度(ρ)和磁化率($\log\kappa$)对于函数判别结果作用的大小.对于函数 y_1 , ρ 的标准化系数(1.016)大于 $\log\kappa$ (-0.341),而其与函数 y_1 之间的相关系数(0.943)也大于 $\log\kappa$ (-0.124),因此采用函数 y_1 时变量 ρ 作用大于 $\log\kappa$.对于 y_2 , ρ 的标准化系数(0.127)小于 $\log\kappa$ (0.965),而其与函数 y_2 之间的相关系数(0.333)也小于 $\log\kappa$ (0.92),因此采用函数 y_2 时变量 ρ 作用小于 $\log\kappa$.

3.2 预测分类结果

依据判别方程 y_1 和 y_2 可以算出各个样本的判

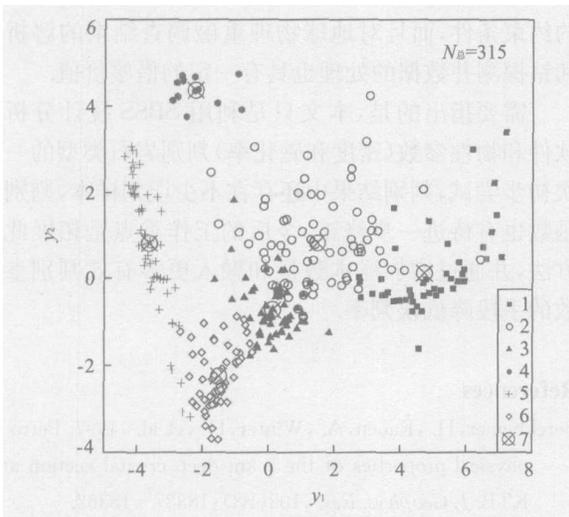


图 3 CCSD 主孔 100~2 000 m 岩心的岩石类型判别分类散点图

Fig. 3 Lithological group scatter plot for the cores from the CCSD 100-2 000 m main hole by discriminant function analysis

1. 榴辉岩; 2. 退变质榴辉岩; 3. 角闪岩; 4. 正片麻岩; 5. 蛇纹石化橄榄岩; 6. 副片麻岩; 7. 聚类中心

表 2 CCSD 主孔 100~2 000 m 岩心岩性判别分析结果

Table 2 Lithological classification results by discriminant analysis for the cores from the CCSD 100-2 000 m main hole

岩性类别	预测分类						总计	
	1	2	3	4	5	6		
1	43	4	1				48	
2	7	47	17	2	1		74	
3		1	58			1	60	
4				13			13	
5					54	8	62	
6			6			52	58	
原始岩性分类	1	89.6	8.3	2.1			100.0	
	2	9.5	63.5	23.0	2.7	1.4	100.0	
	3		1.7	96.7			100.0	
	4				100.0		100.0	
	5					87.1	12.9	100.0
	6			10.3			89.7	100.0

样品总数 315, 误判总数 48, 总判别正确率 84.8%; 岩石类别代号: 1. 榴辉岩; 2. 退变质榴辉岩; 3. 角闪岩; 4. 蛇纹石化橄榄岩; 5. 正片麻岩; 6. 副片麻岩。

别分数, 并据此给出所有样本的岩性判别结果 (图 3, 表 2)。将全部 315 个样本进行回代判别, 总判别率 84.8%, 48 个样品被误判。其中, 榴辉岩样本有 4 个误判为退变质榴辉岩, 1 个误判为角闪岩, 正确率 89.6%; 退变质榴辉岩有 7 个误判为榴辉岩, 17

个误判为角闪岩, 1 个误判为正片麻岩, 正确率为 63.5%; 角闪岩有 1 个误判为退变质榴辉岩, 1 个误判为副片麻岩, 正确率为 96.7%; 正片麻岩有 8 个误判为副片麻岩, 正确率为 87.1%; 副片麻岩有 6 个误判为角闪岩, 正确率为 89.7%; 蛇纹石化橄榄岩正确率 100%, 没有误判。

4 讨论

岩石的物理性质取决于其所含的矿物类型、含量、粒度、形态和结构构造等, 也受到温度、压力、应力、应变等因素的综合影响。岩石的磁化率 (κ) 不仅可以反映岩石的主要矿物组成, 而且对于强磁性的副矿物 (例如磁铁矿、赤铁矿、钛磁铁矿等) 也非常敏感; 岩石的密度 (ρ) 则主要反映岩石的主矿物组成情况, 对于副矿物种类及其含量变化不敏感。密度和磁化率 2 种参数相结合, 可以更好地反映出岩石的总体矿物组成 (主矿物和副矿物) 情况, 从而有利于区分岩石类型。下面对 CCSD 主孔主要岩石类型的密度和磁化率鉴别特征进行分析。

蛇纹石化橄榄岩: 组成矿物为石榴子石、橄榄石和蛇纹石, 含有少量的绿泥石和磁铁矿等。随着橄榄石蛇纹石化程度的增强, 其密度有所降低; 其磁化率则由于蛇纹石化过程中产生的磁铁矿显著增高 (Paul *et al.*, 1990), 并可能作为航磁异常的重要载体 (Liu *et al.*, 2004)。因此, 从蛇纹石化橄榄岩特征的高磁化率可以与其他岩石相区别。

正片麻岩和副片麻岩: CCSD 主孔 2 000 m 的正片麻岩主要是花岗质片麻岩, 包括二长花岗质片麻岩和钾长花岗质片麻岩, 均经历过超高压变质作用和强烈的角闪岩相退变质作用改造, 其矿物组成中, 浅色矿物钾长石+斜长石+石英的含量为 90%~95% 左右, 暗色矿物 (石榴石、角闪石、云母、绿帘石、榍石、磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿等) 含量为 5%~10% 左右 (刘福来等, 2004)。副片麻岩在 2 000 m 井段出现频繁, 通常为薄层形式夹在榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩和正片麻岩中, 包括黑云斜长 (角闪岩) 片麻岩、黑云角闪片麻岩和含石榴绿帘黑云斜长片麻岩等, 被认为是片麻岩质榴辉岩水化、交代和重结晶等作用的产物 (Zhang *et al.*, 2003; 游振东等, 2004)。与正片麻岩相比, 副片麻岩含有较多的暗色矿物, 如黑云母、绿帘石、角闪石、白云母和榍石等; 基本不含磁铁矿等高磁铁矿矿物。因此, 正、副片麻岩

的密度虽然比较接近,但是它们的磁化率差别很大,区分非常明显。

榴辉岩在 CCSD 主孔 2 000 m 井段的累计厚度达到 1 200 m,有石英榴辉岩、金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、普通榴辉岩等多种类型。这些岩石曾经历不同程度的退变质作用改造,具有从新鲜榴辉岩到完全退变质榴辉岩(角闪岩)的完整退变质系列。随着榴辉岩退变质的进行,石榴子石和绿辉石等矿物后成晶过程中产生大量的微晶磁铁矿,金红石向钛铁矿—钛磁铁矿转化,这些出现的高磁性矿物使得退变质榴辉岩的磁化率明显高于新鲜榴辉岩。而在榴辉岩退变质的最后阶段,流体发育,金红石—钛铁矿—钛磁铁矿转变为顺磁性的榍石,磁铁矿消失,岩石的磁化率又显著降低。因此,在榴辉岩→退变质榴辉岩→角闪岩转变过程中,岩石的密度逐渐减小,但是其磁化率则具有先增高后降低的趋势(徐海军等,2004)。当然,相同退变质程度的榴辉岩内部磁化率和密度也有较大的分布范围,这可能源于其矿化程度的差异(徐珏等,2004)或者化学成分的不同(张泽明等,2004)。所以从 SPSS 判别分析结果来看,利用密度和磁化率可以较好地地区分新鲜榴辉岩和角闪岩;退变质榴辉岩作为新鲜榴辉岩和角闪岩的中间过渡,判别率相对较低,但是多数误判为角闪岩和新鲜榴辉岩,比较合理。

5 结论

岩石类型的鉴别划分是地质和地球物理研究工作的基础,也是地球物理调查成果解释的一个重要方面。本文利用岩石的密度和磁化率参数,借助 SPSS10.0 统计分析软件对 CCSD 主孔 100~2 000 m 岩心的岩石类型进行了判别分析,并建立相应的判别函数。通过判别函数的得分值可以很好地鉴别出蛇纹石化橄榄岩,并有效地区分正片麻岩与副片麻岩,而且能够对不同退变质程度的榴辉岩(榴辉岩—退变质榴辉岩—角闪岩)作比较好的鉴别。该研究结果证明,在对不同岩石类型物理性质调查研究的基础上,可以利用物性参数对岩石样品进行判别预测,并进行可靠的岩石类型鉴别。此外,本次判别分析选用的物性参数是岩石的密度和体积磁化率,它们是地球物理探测和钻探测井的基本参数,易于测量和操作。因此,该研究不仅为地球物理探测成果和测井资料的准确解析提供了密度和磁化率参数

的约束条件,而且对地球物理重磁调查结果的解析和钻探测井数据的处理也具有一定的借鉴价值。

需要指出的是,本文只是利用 SPSS 统计软件软件和物性参数(密度和磁化率)判别岩石类型的一次初步尝试,判别结果中还存在不少误判样本,判别函数也有待进一步修正。今后的工作重点是拓展此方法,并通过增加样本数量和融入更多有效判别参数的手段降低误判率。

References

- Bereckhemer, H., Rauen, A., Winter, H., et al., 1997. Petrophysical properties of the 9 km deep crustal section at KTB. *J. Geophys. Res.*, 102(B8):18337—18362.
- Emmeimman, R., Lauterjung, J., 1997. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major result. *J. Geophys. Res.*, 102(B8):18179—18201.
- Jin, Z. M., Ou, X. G., Xu, H. J., et al., 2004. Elastic wave velocities of the 2 000 m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):81—96 (in Chinese with English abstract).
- Kozlovsky, Y. A., 1987. The super-deep well of the Kola peninsula. Spinger, Berlin.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):9—26 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Zhang, Z. M., et al., 2004. Serpentinized peridotite as source of aeromagnetic anomalies. *Journal of China University of Geosciences*, 15(4):416—419.
- Niu, Y. X., Pan, H. P., Wang, W. X., et al., 2004. Geophysical well logging in main hole (0—2 000 m) of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):165—178 (in Chinese with English abstract).
- Ou, X. G., Jin, Z. M., Xia, B., et al., 2005. Correlations between petrophysical properties of ultra-high pressure rocks and its significance on establishing the geophysical interpretation standards for crystalline rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):1005—1014 (in Chinese with English abstract).
- Paul, B. T., Jafar, A. H., Stephen, E. H., 1990. The effects of serpentinization on density and magnetic susceptibility: A petrophysical model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 65(1—2):137—157.

- Rauen, A., Soffel, H. C., Winter, H., 2000. Statistical analysis and origin of the magnetic susceptibility of drill cuttings from the 9.1 km deep KTB drill hole. *Geophysical Journal International*, 142(1): 83-94.
- Wang, S. B., Zhang, H. T., Shao, Q. Q., et al., 2003. SPSS professional statics. Mechanical Engineering Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, H. J., Jin, Z. M., Ou, X. G., et al., 2004. Effects of retrogression of ultrahigh-pressure eclogites on magnetic susceptibility and anisotropy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 674-684 (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 100-2000 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, W. C., Zhang, Z. M., et al., 1998. Scientific significance and site-selection researches of the first Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. *Continental Dynamics*, 3: 1-13.
- Yang, W. C., 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, eastern China. *Tectonophysics*, 354: 277-288.
- 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 100-2000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 43-52 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. F., Guo, Y. Z., Meng, X. H., et al., 2002. Petrophysical parameters at Continental Scientific Drilling site in Subei, China. *Chinese J. Geophys.*, 45(1): 93-100 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. F., Yao, C. L., Meng, X. H., et al., 2001. Interpretation of gravity and magnetic anomalies obtained at Continental Scientific Drilling site in Subei. *Chinese J. Geophys.*, 44(6): 825-832 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Zheng, Y. F., et al., 2003. Transition of UHP eclogites to gneissic rocks of low amphibolite facies during exhumation: Evidence from the Dabie terrane, central China. *Lithos*, 70: 269-291.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2002. Composition and metamorphism of the root of the southern Sulu orogen. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 609-616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100-2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27-42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Wei, M., Li, Z. J., et al., 1990. Statistical analysis of geological exploration. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

附中文参考文献

- 金振民, 欧新功, 徐海军, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2000 m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束. *岩石学报*, 20(1): 81-96.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2004. 中国大陆科学钻探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的识别. *岩石学报*, 20(1): 9-26.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔(0~2000 m)地球物理测井. *岩石学报*, 20(1): 165-178.
- 欧新功, 金振民, 夏斌, 等, 2005. 超高压变质岩物理性质的相关性对建立结晶岩区地球物理解释标尺的意义. *岩石学报*, 21(3): 1005-1014.
- 王苏斌, 郑海涛, 邵谦谦, 等, 2003. SPSS 统计分析. 北京: 机械工业出版社.
- 徐海军, 金振民, 欧新功, 等, 2004. 超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(6): 674-684.
- 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2000 m 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.
- 游振东, 苏尚国, 梁风华, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2000 m 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.
- 余钦范, 郭友钊, 孟小红, 等, 2002. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质. *地球物理学报*, 45(1): 93-100.
- 余钦范, 姚长利, 孟小红, 等, 2001. 苏北大陆科学钻探靶区重磁异常反演解释. *地球物理学报*, 44(6): 825-832.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2002. 南苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用. *地质通报*, 21(10): 609-616.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050 m)榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27-42.
- 赵鹏大, 魏民, 李紫金, 等, 1990. 地质勘探中的统计分析. 武汉: 中国地质大学出版社.