

# 中国大陆科学钻探主孔自然放射性测井及其解释

骆 淼<sup>1,2</sup>, 潘和平<sup>2</sup>, 赵永刚<sup>3</sup>, 张红杰<sup>1</sup>, 周 峰<sup>1</sup>

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

3. 中国石化集团华北石油局数字测井站, 河南新乡 453700

**摘要:** 为了认识江苏东海超高压变质带上地壳岩石自然放射性的垂向分布特征, 榴辉岩退变质程度对放射性元素浓度的影响, 以及放射性产热率对地温梯度的影响, 利用中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔 100~5 000 m 自然放射性测井 (自然伽马和自然伽马能谱) 资料统计了 CCSD 主孔各类岩石的自然放射性强度和铀、钍、钾元素的浓度, 计算出产热率曲线。自然伽马、铀、钍、钾浓度和产热率从蛇纹岩到榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩依次增大。随着榴辉岩退变质程度的增强, 其铀、钍、钾元素的浓度值逐渐增大。CCSD 主孔自然放射性的垂向分布特征主要受岩性控制, 自然放射性随深度增加有增强趋势。产热率与自然伽马测井值之间有很好的线性关系, 在高放射性岩层的上部, 地温梯度会出现较强扰动和低值异常。

**关键词:** 中国大陆科学钻探主孔; 超高压变质岩; 自然放射性测井; 产热率。

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2008)05-0661-11

收稿日期: 2008-02-15

## Natural Radioactivity Logs and Interpretation from the CCSD Main Hole

LUO Miao<sup>1,2</sup>, PAN He-ping<sup>2</sup>, ZHAO Yong-gang<sup>3</sup>, ZHANG Hong-jie<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>

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

2. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Well Logging Station of North China Petroleum Bureau of SINOPEC, XinXiang 453700, China

**Abstract:** In order to understand the vertical distribution of natural radioactivity of the upper crust of the ultra-high pressure (UHP) metamorphic belt in Donghai County, Jiangsu province, as well as the influence of the retrogression intensity of eclogite on the concentration of radioelement, and the influence of radiogenic heat production rate on the geothermal gradient, the natural radioactivity logs (gamma ray and gamma spectrometry logs) from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) were utilized to obtain the natural gamma intensity and the concentration of U, Th and K of main lithologies and the heat production rate log. The natural gamma intensity and concentration of U, Th and K gradually increase from serpentine to eclogite, amphibolite, paragneiss, and orthogneiss. With the strengthening of the retrogression of eclogite, the concentration of U, Th and K of eclogite increase. This indicates that some exotic fluids with U, Th and K elements join in the retrograde metamorphism. The vertical distribution of the natural gamma intensity and concentration of U, Th and K is dominated mainly by lithology. The natural gamma intensity approximately increases with the depth. The heat production rate and the natural gamma log have a good linear relationship. The formation with high radioactivity could cause disturbance and low anomalies on geothermal gradient on its upper formation.

**Key words:** main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling; ultra-high pressure metamorphic rocks; natural radioactivity logging; heat production rate.

地壳岩石中含有 60 多种不稳定核素, 这些自然放射性核素衰变时能够释放出  $\alpha$ 、 $\beta$  或  $\gamma$  射线, 同时

释放出热能,这种放射性热能是地球内部的主导热源。在地球发展的整个历史时期中,能为地球提供大量热能的放射性同位素主要是长寿命的放射性同位素——铀、钍和钾(刘时彬,2005)。所以研究放射性产热元素(铀、钍和钾)在地壳中的分布对于研究地壳和地幔的产热能力、建立岩石圈的热演化模型十分重要(Chiozzi *et al.*, 1998)。

要确定地壳深处岩石的放射性产热率,一方面可以通过地球化学方法(ICP-MS 和 XRF 方法)测量岩心样品中放射性产热元素 U、Th、K 元素的含量,另一方面可以采用自然放射性测井方法直接深入钻孔测量井壁岩石中 U、Th、K 元素的含量。

自然放射性测井包括自然伽马(GR)测井和自然伽马能谱(NGS)测井,GR 测井记录的是岩石的总自然伽马射线强度( $\gamma_t$ ),NGS 测井能够提供岩石中 U、Th、K 元素的含量( $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ )。目前,GR 测井和 NGS 测井已经广泛应用于沉积地层的岩性识别、沉积环境和古气候反演。由于超高压(UHP)变质岩地区的钻孔极少,所以关于超高压变质岩自然放射性测井研究的报道很少。

由于放射性产热元素(HPEs)的分布特征对于研究岩石圈的热结构、热演化有重要意义,人们已经对地壳岩石的放射性元素含量和产热率进行了大量研究。迟清华和鄢明才(1998)根据岩石中 U、Th、K 的含量和地壳各结构层的岩石组成,计算了地壳各壳层放射性产热元素的含量,系统研究了华北地台岩石与各时代地层的平均生热率及其变化。Chiozzi *et al.* (1998)对 Lipari 岛 4 种不同火山岩的研究表明:3 种放射性元素的浓度清楚地反映了岩浆的演化,含长英质矿物越多的岩石, U、Th、K 越富集, U 在空间上的分布与 Th 和 K 有关系,超基性岩中 U、Th、K 含量都低。德国 KTB 超深钻岩心的伽马能谱测试表明:副片麻岩中的 K、U、Th 含量高;准基性岩中的 K、U、Th 含量较低,伽马能谱剖面能很好地反映钻孔中的岩性分布特点,岩石中放射性元素含量除与岩性相关外,还表现出与构造相关的异常(杨晓松和金振民,1998)。

中国大陆科学钻探(CCS D)主孔 100~2 000 m 超高压变质岩自然放射性的研究已经取得了一些初步成果。潘和平等(2005)报道了 CCS D 主孔 100~2 000 m 自然放射性测井的结果。曾令森等(2005)对 CCS D 主孔 100~2 000 m 岩心样品的研究表明:CCS D 主孔 100~2 000 m 放射性产热元素的浓度与产热率呈现阶梯状的分布,总体上 HPEs 呈三明治结构。

本文首次报道了 CCS D 主孔 100~5 000 m 自然伽马(GR)和自然伽马能谱(NGS)测井的结果,对比了岩心样品和测井测量的 Th、K 元素含量的数据,检验了测井数据的可靠性,统计了 CCS D 主孔所钻遇的各种超高压变质岩的  $\gamma_t$  和  $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ ,分析了超高压榴辉岩在退变质过程中  $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  的变化,利用自然伽马能谱测井资料计算了 CCS D 主孔岩石的产热率,并对主孔 100~5 000 m 的  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  与产热率、地温、地温梯度、热导率的垂向分布特征进行了综合对比分析。

## 1 孔区地质背景

中国大陆科学钻探(CCS D)主孔位于苏鲁超高压(UHP)变质带南部——江苏省东海县毛北村(34°24'N, 118°40'E)。CCS D 主孔从 2001 年 6 月 25 日开始施工,至 2005 年 1 月 23 日竣工,进尺 5 118.2 m。中三叠世时扬子和中朝克拉通在这个带碰撞,造成陆块俯冲入地幔并快速折返回到上地壳,形成了这一世界上规模最大的 UHP 变质带,它的研究对了解发生在板块会聚边缘的地质作用具有重要意义(Cong *et al.*, 1994; 许志琴等, 2006)。

CCS D 孔区近地表的岩石主要为片麻岩,包括正片麻岩和副片麻岩,岩性包括二长片麻岩、黑云母二长片麻岩与黑云母斜长片麻岩等,它们的原岩是在元古代形成的,在三叠纪又经受了超高压变质,因此 CCS D 主孔中的片麻岩大都含有柯石英。在片麻岩中又含有大量榴辉岩体和不同程度蛇纹岩化的橄榄岩体。榴辉岩体大都含有柯石英,原岩是元古代的基性火山岩,在三叠纪经过超高压变质,最大的榴辉岩体出现在毛北和青龙山,约 3 km 长,400 m 宽,产状很陡,延深可达 800 m 左右。橄榄岩主要是在超高压变质岩块折返时期从上地幔上来的,最大的橄榄岩体出现在蒋庄和芝麻坊,尺度比榴辉岩体略小。在毛北和芝麻坊的橄榄岩体中还发现了两颗金刚石晶体,说明变质的最大压力在 4 GPa 以上(许志琴, 2004; 陈世忠等, 2006; 杨文采等, 2006)。

## 2 自然伽马与自然伽马能谱测井

中国大陆科学钻探测井子工程分别在 0~100 m、100~800 m、800~1 200 m、1 200~2 046 m、

2 046~2 987 m、2 680~3 623 m、3 579~4 410 m、4 390~5 140 m 的裸眼钻孔中进行了 8 次综合测井,获得了 CCSD 主孔 100~5 050 m 的自然伽马、自然伽马能谱、密度、声波时差、电阻率等 20 多种岩石物理化学参数. CCSD 测井子工程采用了目前国际上最先进的测井装备——ATLAS 公司的 ECLIPS-5700 成像测井系统,其中,自然伽马和自然伽马能谱测井仪器的径向探测深度约 25 cm,纵向分辨率约为 45 cm.

自然伽马测井是采用伽马射线探测器(NaI 探测器)测量岩石天然的总伽马射线强度  $\gamma_t$ ,国际上自然伽马测井的单位习惯采用 API,它是由建造在美国休斯顿大学的标准刻度井定义的. 岩石的天然放射性主要取决于铀( $^{238}\text{U}$ )、钍( $^{232}\text{Th}$ )和钾( $^{40}\text{K}$ )3 种放射性同位素的含量,它们发射出的伽马射线具有不同的特征能量—钾( $^{40}\text{K}$ )的特征能量是 1.46 MeV,钍系( $^{232}\text{Th}$ )的特征能量是 2.62 MeV,铀系( $^{238}\text{U}$ )的特征能量是 1.76 MeV,自然伽马能谱测井正是利用能谱分析技术来确定岩石中  $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  的含量( $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ )的, $C_U$  和  $C_{Th}$  的单位为  $10^{-6}$

(或 mg/kg), $C_K$  的单位为 % (牛一雄等,2004;尉中良和邹长春,2005).

图 1 中给出了 CCSD 主孔 100~5 000 m 深度的自然伽马( $\gamma_t$ )和自然伽马能谱( $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ )测井曲线. 测井曲线由于受钻孔几何形状、泥浆等外界因素的影响有时会偏离地层的真实物性值,对于取心的钻孔很有必要利用岩心样品的测试结果对测井曲线进行质量检查和刻度. 所以笔者把 CCSD 主孔 100~2 000 m 的 K、Th 测井曲线和岩心样品测定结果进行了对比(图 2). 测井曲线和岩心样品测定结果很吻合,也有个别点差别较大(如 300~400 m 之间  $C_K$ 、 $C_{Th}$  都出现了个别岩心样品测定结果远大于测井值的点),总体来看,测井曲线质量优良,测井数据可靠.

根据前人对 CCSD 主孔岩心的研究(许志琴,2004)和测井资料,本文把 CCSD 主孔划分为 7 个岩性单元:(I)0~740 m 主要为金红石榴辉岩夹超镁铁质岩(蛇纹岩)与角闪岩,及少量副片麻岩;(II)740~1 110 m 主要为副片麻岩夹金红石榴辉岩与超镁铁质岩(蛇纹岩);(III)1 110~1 600 m 主要为正

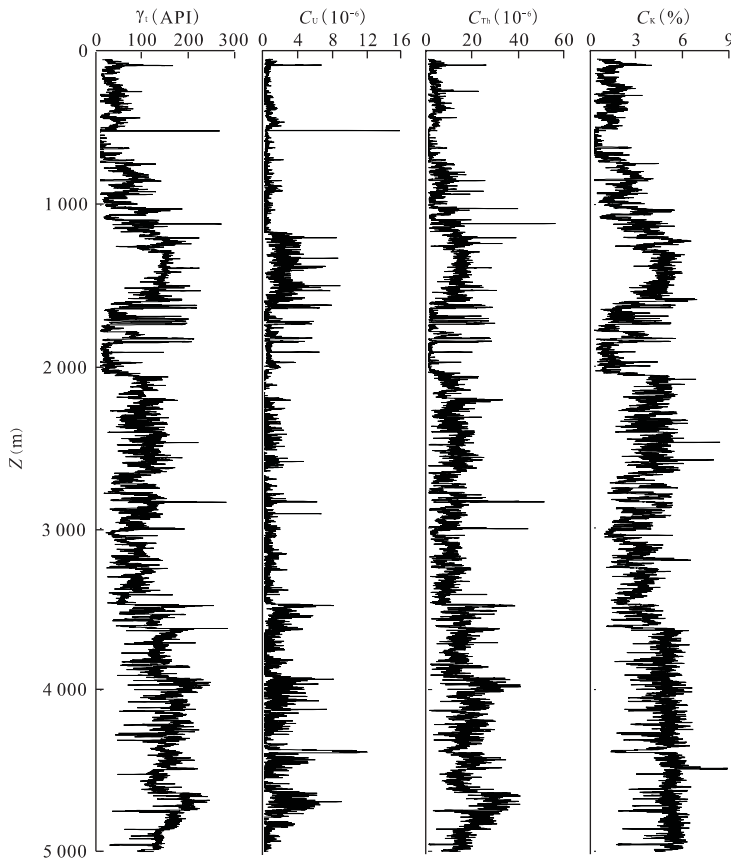


图 1 CCSD 主孔自然伽马( $\gamma_t$ )与自然伽马能谱( $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ )测井曲线

Fig. 1 Gamma ray ( $\gamma_t$ ) and gamma spectrometry ( $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ ) logs from CCSD main hole

片麻岩,夹少量副片麻岩;(IV)1 600~2 040 m 主要为多硅白云母榴辉岩与角闪岩以及少量片麻岩夹层;(V)2 040~2 450 m 主要为正片麻岩夹副片麻岩以及少量的角闪岩和榴辉岩;(VI)2 450~3 080 m 主要为副片麻岩,夹有正片麻岩、角闪岩和榴辉岩;(VII)3 080~5 000 m 主要为正片麻岩夹副片麻岩,及很少量角闪岩和榴辉岩夹层。

从图 1 中可以观察到上述各岩性单元的  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  存在不同程度的差异:单元 I 的  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  都很低,特别是蛇纹岩段(606~683 m)的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  为全井最低;单元 II 的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  为中等大小,而  $C_U$  较低;单元 III 的  $\gamma_t$  和  $C_{Th}$  较高, $C_U$  和  $C_K$  特别高;单元 IV 的  $\gamma_t$  和  $C_{Th}$  特别低, $C_U$  和  $C_K$  也很低;单元 V 的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  较高,其中 2 040~2 200 m 的  $C_U$  特别低,2 200~2 450 m 的  $C_U$  也较

低;单元 VI 的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_U$ 、 $C_K$  为中等大小;单元 VII 的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_U$ 、 $C_K$  总体上都很高,尤其 3 500~5 000 m 的  $\gamma_t$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_U$ 、 $C_K$  明显比 3 085~3 500 m 还要高,为全井段最高,所以 3 600~5 000 m 与其上覆岩层物性差异较大,可能来源于不同的岩性构造单元。

另外, $C_{Th}$ 、 $C_U$  和  $\gamma_t$  曲线在 3 600~5 000 m 一致呈现出叠瓦状曲线形态(明显存在 4 个周期变化,每一个周期都是  $C_{Th}$ 、 $C_U$  和  $\gamma_t$  突然增大,然后向下逐渐减小)。对该井段岩性的分析发现,第 2 个周期(3 900~4 350 m)和第 3 个周期(4 350~4 600 m)都是上部为正片麻岩,下部主要为副片麻岩(夹角闪岩)。这种曲线模式可能表明:每个周期内上部正片麻岩逐渐过渡到下部的副片麻岩(夹角闪岩),而两个相邻的周期之间为副片麻岩(夹角闪岩)快速地转变为正片麻岩。同时该深度段  $C_{Th}$  和  $C_U$  曲线变化的一致性表明 U 和 Th 在该深度段具有很好的共聚性,而  $C_K$  在该深度段上整体都很高。

除了上述特征之外,曲线上还有许多局部的小异常(图 1),例如: $C_U$  在 541 m 附近有一个特别高的峰值(大于  $22 \times 10^{-6}$ ),4 380~4 400 m 之间也有一个异常高的峰值(大于  $10 \times 10^{-6}$ ); $C_{Th}$  在 1 110 m 附近和 2 830 m 附近分别出现异常高的峰值(大于  $50 \times 10^{-6}$ ), $C_K$  在 2 470~2 472 m、4 586~4 593 m 之间分别出现异常高的峰值(大于 7%), $C_{Th}$ 、 $C_U$ 、 $C_K$  的异常使得自然伽马在相应位置也都出现了异常,这些异常主要是由于放射性元素(铀、钍或钾)局部富集造成的。

CCSD 主孔 0~5 000 m 钻遇的岩性种类很多,总体上可以划分为榴辉岩、蛇纹岩化橄榄岩、角闪岩、正片麻岩、副片麻岩。CCSD 测井专家组根据岩心编录(许志琴,2004;刘福来等,2005a)和测井资料(牛一雄等,2004)对岩性亚类进行了划分,把榴辉岩分为金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、退变质榴辉岩、石英榴辉岩。笔者根据测井专家组提供的岩性划分资料对各类岩性的  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  测井响应值进行了统计(表 1)。从表 1 可以看出:(1)总自然伽马强度( $\gamma_t$ )和  $C_K$  从蛇纹岩到石英榴辉岩、金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩依次变大。(2) $C_{Th}$  和 钍铀比值( $C_{Th}/C_U$ )从蛇纹岩到多硅白云母榴辉岩、金红石榴辉岩、石英榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩依次变大。(3) $C_U$  从蛇纹岩到金红石榴辉岩、退变质榴辉岩、石英榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩依次变大。

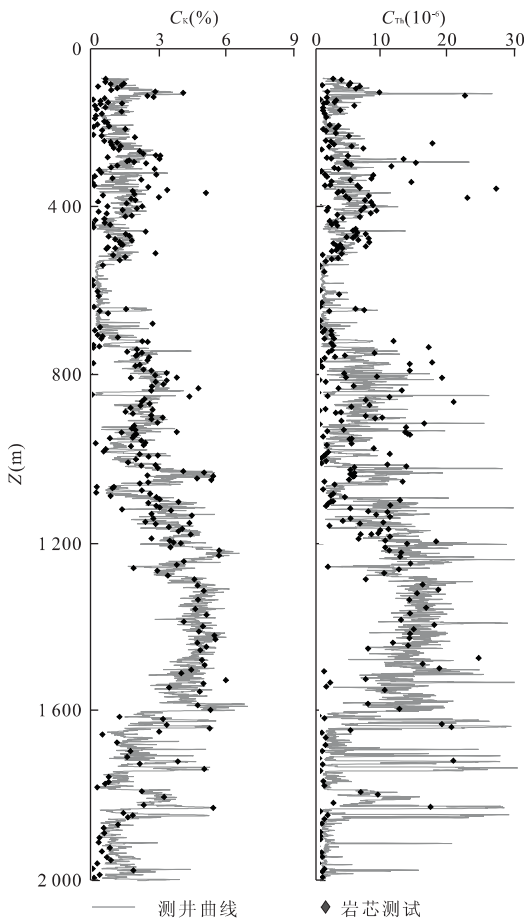


图 2 CCSD 主孔 100~2 000 m 的测井和岩心样品  $C_K$ 、 $C_{Th}$  测量结果的对比(岩心测试数据引自曾令森等,2005)

Fig. 2 Curves showing the contrast of  $C_K$  and  $C_{Th}$  from well logs and core test in 100~2 000 m interval of CCSD main hole

CCSD 主孔 100~5 000 m 井段  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  的平均值分别为:  $(100.85 \pm 53.14)$  API、 $(1.07 \pm 1.22) \times 10^{-6}$ 、 $(11.16 \pm 7.42) \times 10^{-6}$ 、 $(3.46 \pm 1.64)\%$ 。 $C_U$  的平均值与基性岩接近, 而  $C_{Th}$ 、 $C_K$  的平均值与酸性岩接近, 这表明 CCSD 主孔岩石 U 元素较为亏损。刘福来等(2005b)认为: CCSD 主孔的一部分正片麻岩可能形成于陆缘火山弧的构造环境(富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Th), 副片麻岩的原岩可能形成于被动大陆边缘的一套典型的沉积岩或者沉积岩(富集大离子亲石元素 K、Ba、Th), 所以 CCSD 主孔的正片麻岩和副片麻岩继承了其原岩高  $C_{Th}$ 、 $C_K$  的特征。

### 3 讨论

#### 3.1 超高压变质岩的自然放射性

CCSD 主孔钻遇的 UHP 变质岩包括了超基性

岩(蛇纹岩)、基性岩(榴辉岩、角闪岩)、中酸性岩(榴辉岩相变质片麻岩)和酸性岩(花岗质片麻岩), 这为我们研究 UHP 变质岩的自然放射性提供了丰富的资料。从表 1 中的统计结果来看, 从蛇纹岩到榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩,  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  测井值都逐渐变大, 这与地壳岩石放射性元素分布的一般规律相一致, 即: 从超基性岩到基性岩、中性岩、酸性岩,  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  均逐渐增大。

CCSD 主孔各类 UHP 变质岩之间的自然放射性存在一定的差异(表 1), 这为利用自然放射性识别钻孔中 UHP 变质岩的岩性提供了较好的物性基础。图 3 给出了 CCSD 主孔  $\gamma_t$ - $C_K$  和  $C_K$ - $C_{Th}$  的交绘图, 可以看到蛇纹岩、榴辉岩、正片麻岩特征明显, 比较容易与其他岩性区分, 副片麻岩的自然放射性介于角闪岩和正片麻岩之间, 仅仅依靠自然放射性不太容易区分出来。另外, 图 3 也表明 CCSD 主孔 UHP

表 1 CCSD 主孔 UHP 变质岩  $\gamma_t$ 、 $C_K$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$  的统计结果

Table 1 Statistics data of  $\gamma_t$ 、 $C_K$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$  of UHP rocks in CCSD main hole

岩性	样点数	$\gamma_t \pm SD$ (API)	$C_K \pm SD$ (%)	$C_U \pm SD$ ( $10^{-6}$ )	$C_{Th} \pm SD$ ( $10^{-6}$ )	$C_{Th}/C_U$
蛇纹岩	519	$6.380 \pm 4.249$	$0.318 \pm 0.116$	$0.457 \pm 0.145$	$1.131 \pm 0.578$	2.475
石英榴辉岩	115	$17.928 \pm 6.539$	$0.580 \pm 0.227$	$0.616 \pm 0.239$	$2.204 \pm 1.046$	3.578
金红石榴辉岩	2 279	$18.359 \pm 11.450$	$0.744 \pm 0.409$	$0.544 \pm 0.204$	$1.882 \pm 1.224$	3.460
多硅白云母榴辉岩	1 083	$26.657 \pm 10.236$	$1.231 \pm 0.517$	$0.631 \pm 0.237$	$1.855 \pm 1.018$	2.940
退变质榴辉岩	2 923	$41.608 \pm 12.008$	$1.620 \pm 0.492$	$0.563 \pm 0.400$	$3.693 \pm 1.552$	6.560
角闪岩	2 632	$58.257 \pm 26.584$	$2.353 \pm 0.907$	$0.709 \pm 0.566$	$5.432 \pm 4.022$	7.661
副片麻岩	6 424	$82.850 \pm 23.862$	$2.803 \pm 0.772$	$0.830 \pm 0.701$	$8.884 \pm 3.933$	10.704
正片麻岩	19 829	$141.180 \pm 31.213$	$4.733 \pm 0.858$	$1.271 \pm 1.455$	$16.185 \pm 5.960$	12.734

注: 数据格式—平均值 $\pm$ SD, SD 为标准方差。

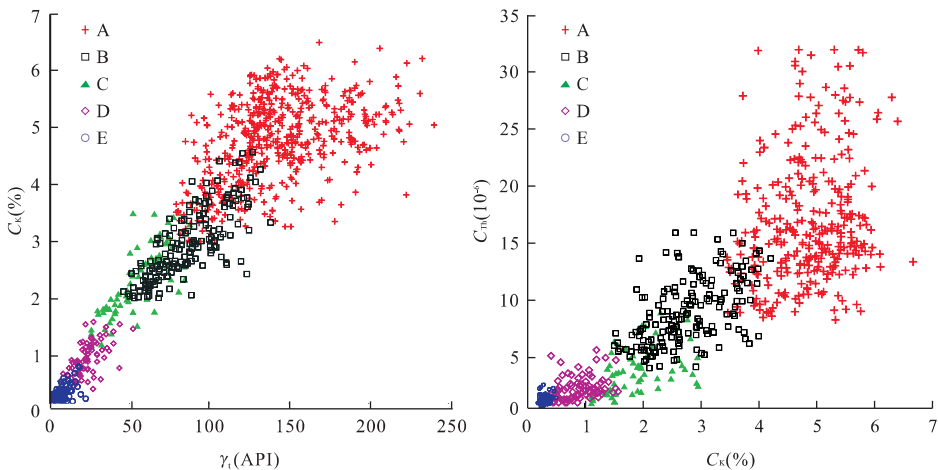


图 3 超高压变质岩  $\gamma_t$ - $C_K$  和  $C_K$ - $C_{Th}$  的交绘图

Fig. 3 Cross plot of  $\gamma_t$ - $C_K$  and  $C_K$ - $C_{Th}$  of UHP metamorphic rocks

A. 正片麻岩; B. 副片麻岩; C. 角闪岩; D. 榴辉岩; E. 蛇纹岩

变质岩  $\gamma_t$  与  $C_K$  之间和  $C_K$  与  $C_{Th}$  之间均有着很好的正比的线性关系.

变质岩的自然放射性强度与其原岩及退变质过程等因素有关. 目前,关于 CCSD 孔区 UHP 变质岩的原岩还颇有争议. 但是通过对 CCSD 主孔岩石的大量研究,研究人员已经对 UHP 变质岩的原岩有了较多的认识:

蛇纹岩的原岩可能是地幔橄榄岩(张泽明等, 2005). 角闪岩是榴辉岩退变质的产物(张泽明等, 2004). 榴辉岩的原岩有 5 种可能:(1)板内玄武岩(赵子福等, 2005);(2)双峰式火山岩;(3)变质表壳岩;(4)基性层状侵入体、基性—超基性层状侵入体(张泽明等, 2004). 正片麻岩的原岩有 2 种可能:(1)酸性岩浆岩(赵子福等, 2005);(2)榴辉岩(游振东

等, 2005). 副片麻岩的原岩有 3 种可能:(1)沉积岩或者变沉积岩(刘福来等, 2005b);(2)基性岩浆岩(赵子福等, 2005);(3)榴辉岩(薛怀民和刘福来, 2005;游振东等, 2005).

可见蛇纹岩和榴辉岩的铀、钍、钾含量与其原岩(超基性岩和基性岩)类似;副片麻岩和正片麻岩的情况较为复杂,如果它们的原岩为榴辉岩(或其他基性岩),则它们的铀、钍、钾含量就比原岩要大的多了,说明在榴辉岩退变质晚期有大量铀、钍、钾元素富集.

### 3.2 退变质作用对超高压榴辉岩自然放射性的影响

CCSD 主孔榴辉岩在折返过程中经历了不同的退变质作用,有从新鲜榴辉岩到完全退变质榴辉岩的完整退变质系列,这为研究榴辉岩在退变质过程

表 2 不同退变质程度榴辉岩的  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_K$ 、 $C_{Th}$  的统计结果

Table 2 Statistics data of  $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_K$ 、 $C_{Th}$  of eclogites of different retrogressions

岩性	样点数	$\gamma_t \pm SD$ (APD)	$C_U \pm SD$ ( $10^{-6}$ )	$C_{Th} \pm SD$ ( $10^{-6}$ )	$C_K \pm SD$ ( $10^{-6}$ )	$C_{Th}/C_U$
新鲜榴辉岩	512	13.618±13.806	0.601±0.840	1.578±1.264	0.582±0.429	2.627
弱至中等退变质榴辉岩	747	27.346±16.298	0.621±0.367	2.628±1.913	1.042±0.527	4.232
强退变质榴辉岩	598	38.875±12.520	0.693±0.468	3.205±1.370	1.485±0.472	4.623
完全退变质榴辉岩	517	49.713±27.283	0.749±0.586	4.169±3.508	1.909±0.786	5.566

注:数据格式—平均值±SD, SD 为标准方差.

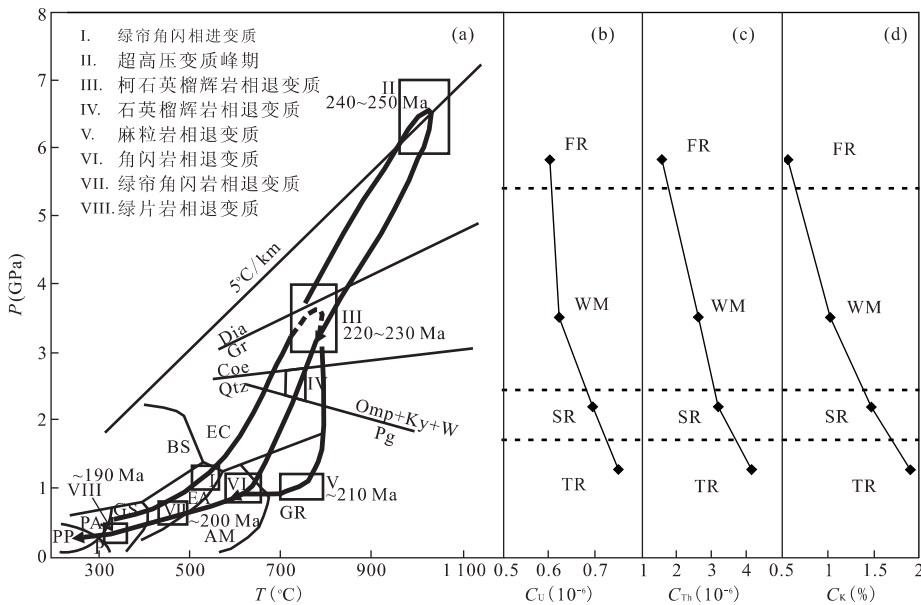


图 4 超高压榴辉岩退变质过程的  $P$ - $T$  轨迹及其  $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  的变化(图(a)引自张泽明等(2005))

Fig. 4  $P$ - $T$  path and variation of  $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$  of ultra-high pressure eclogite

M. 角闪岩; EA. 绿帘角闪岩相; EC. 榴辉岩相; GR. 麻粒岩相; GS. 绿片岩相; BS. 蓝闪片岩相; P. 葡萄石相; PA. 绿帘石阳起石相; PP. 葡萄石阳起石相; Qtz. 石英; Coe. 柯石英; Pg. 钠云母; Omp. 绿辉石; Ky. 蓝晶石; W. 水; Gr. 石墨; Dia. 金刚石; FR. 新鲜榴辉岩; WM. 弱至中等退变质榴辉岩; SR. 强退变质榴辉岩; TR. 完全退变质榴辉岩

中物性的变化提供了很好的条件,徐海军等(2004)根据榴辉岩的岩石学和矿物学特征,从岩石物理的角度将CCSD主孔榴辉岩分为:新鲜榴辉岩、弱退变质榴辉岩、中等退变质榴辉岩、强退变质榴辉岩和完全退变质榴辉岩.本文根据徐海军等(2004)对榴辉岩的分类,找到已确定类型的榴辉岩的深度段,对不同退变质程度的榴辉岩的自然放射性测井响应进行了统计和分析(表2和图4).表2中的统计结果表明:随着榴辉岩退变质程度的增强, $\gamma_t$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ 、 $C_{Th}/C_U$ 逐渐变大.张泽明等(2005)的研究表明:榴辉岩的退变质轨迹可以分为3个阶段:(1)从超高压变质峰期到柯石英榴辉岩相退变质阶段,超高压变质岩从200 km快速折返到100 km深度,而温度仅降低200~250 °C,估计抬升速率约为5 km/Ma,冷却速率为10 °C/Ma.(2)从超高压退变质阶段到麻粒岩相或角闪岩岩相退变质阶段,也是快速折返过程,超高压变质岩从100 km抬升到30 km,抬升速率大约为4 km/Ma.从榴辉岩相到麻粒岩相为近等温降压过程,从榴辉岩到角闪岩相为缓慢降温过程,冷却速率大约是8 °C/Ma.(3)从麻粒岩相,经过角闪岩相、绿帘角闪岩相到绿片岩相,为缓慢抬升过程,抬升速率大约为1 km/Ma,但该阶段总体是快速降温过程,冷却速率可达20 °C/Ma(图4).

从图4可以看出:从新鲜榴辉岩到弱至中等退变质榴辉岩,岩石中铀、钍、钾元素丰度的增加量相对较少,从弱至中等退变质榴辉岩到完全退变质榴辉岩,铀、钍、钾元素丰度的增加量相对较多.这可能表明:从新鲜榴辉岩到中等退变质榴辉岩(即超高压变质岩从200 km快速折返到100 km深度)的退变质过程中,参与变质作用的流体很少,所以元素的迁移很困难,铀、钍、钾元素的增加量就很少;而从中等退变质榴辉岩到完全退变质榴辉岩(即超高压变质岩从100 km快速折返到30 km深度以后)的退变质过程中,大量外来含水流体参与了变质作用,同时也带来了铀、钍、钾等元素,所以铀、钍、钾元素的增加量相对较多.

### 3.3 CCSD主孔产热率与其他热场参数的分布

放射性产热率 $A$ 、热导率 $\lambda_c$ 、地温 $T$ 、地温梯度 $G$ 等参数是研究岩石圈热结构的基本参数.温度和压力是控制超高压变质作用的两个重要因素,对于变质作用的类型和速度有直接影响.所以研究CCSD主孔岩石的产热率与热导率以及钻孔的温度与地温梯度对于认识苏鲁UHP变质带的热结构和

热演化有重要意义.

岩石的放射性产热率是单位体积岩石中所含放射性元素(铀、钍、钾)在单位时间由衰变所释放的能量.放射性元素的时空分布对地球内部温度场的影响很大,有时达30%~40%的地表热流密度是由放射性元素产生的(Rybach,1988).在实际测量中,一般是测定岩石样品中铀、钍和钾的含量,采用一些学者提出的经验公式进行计算,例如:Rybach(1988)提出的计算公式如下:

$$A = \rho(3.48(C_K) + 2.56(C_{Th}) + 9.52(C_U)) \times 10^{-2}, \quad (1)$$

式(1)中 $A$ 为岩石产热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ; $\rho$ 为岩石密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $C_K$ 为岩石中K元素的含量,%; $C_{Th}$ 为岩石中Th元素的含量, $10^{-6}$ ; $C_U$ 为岩石中U元素的含量, $10^{-6}$ .本文采用公式(1)对CCSD主孔岩石的产热率 $A$ 进行了计算,其中 $\rho$ 来源于密度测井.

图5给出了CCSD主孔产热率 $A$ 、地温 $T$ 、地温梯度 $G$ 、热导率 $\lambda_c$ 的分布(何丽娟等,2006).很明显 $A$ 随深度的变化规律与 $\gamma_t$ 随深度变化的规律十分相似,这表明岩石的 $\gamma_t$ 与 $A$ 之间有很好的相关关系.1986年,Rybach提出 $\gamma_t$ 与 $A$ 之间具有线性关系,Bücker and Rybach(1996)通过对大量资料的研究提出了新的线性关系式:

$$A = 0.0518\gamma_t - 0.01264. \quad (2)$$

图6为CCSD主孔岩石 $A$ 与 $\gamma_t$ 之间的关系, $A$ 与 $\gamma_t$ 之间有很好的线性关系(相关系数 $R = 0.9253$ ),其线性关系式与式(2)略有不同.

CCSD主孔的温度测量表明:苏鲁UHP变质带中现今温度与深度具有很好的线性关系(图5,图6),平均地温梯度 $G$ 为24.8 °C/km,1700 m以上 $G$ 有较大波动可能与地下水活动有关,而1700 m以下 $G$ 相对较为稳定,0~500 m井段 $G$ 减小,500~2700 m井段 $G$ 增大,2700~3600 m井段 $G$ 减小,3600~4500 m井段 $G$ 增大(何丽娟等,2006).欧新功等(2004)的研究表明:CCSD主孔岩石热导率变化范围在1.711~4.026 W/(m·K)、平均2.716 W/(m·K),榴辉岩的热导率随着其变质程度增加而降低.可以看到CCSD主孔100~3000 m井段 $A$ 逐渐增大而 $\lambda_c$ 逐渐减小.一般高产热率的岩石会使得地温梯度降低,CCSD主孔3500 m左右的 $G$ 出现了一段低值,而3500 m以下 $A$ 值较高,1200 m也出现了类似的现象,可能由于热量是从深部流向浅部的,所以高产热率(即高放射性)岩层的上部地温

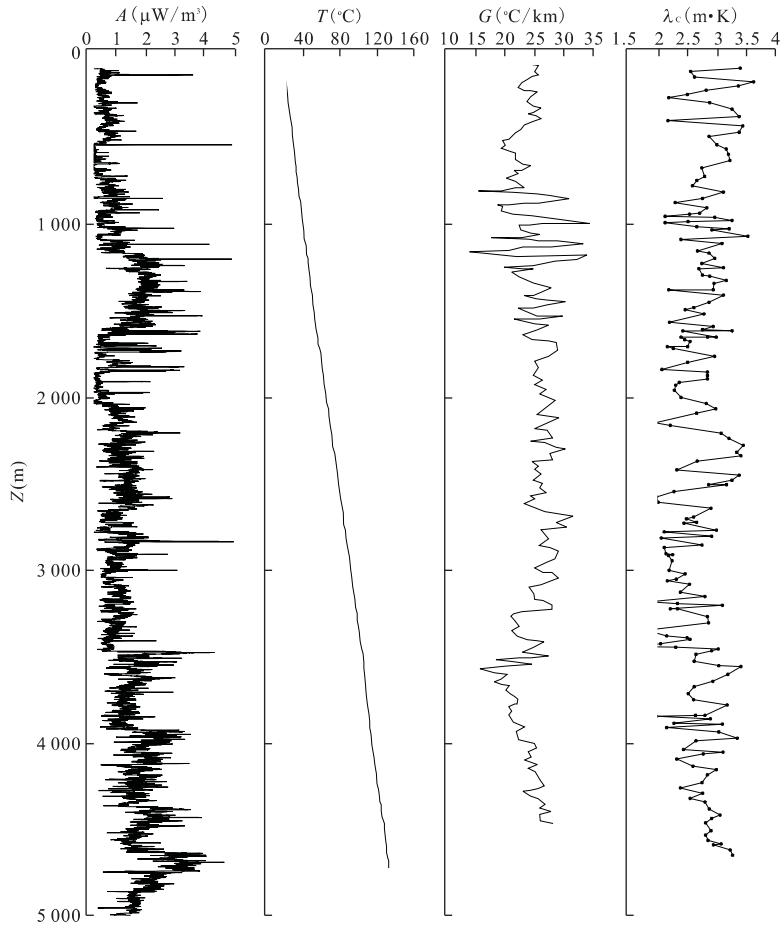


图 5 CCSD 主孔  $A$ 、 $T$ 、 $G$  与  $\lambda_c$  的分布(地温、地温梯度与热导率资料来源于何丽娟等(2006))

Fig. 5 The distribution of heat production rate, temperature, thermal gradient and thermal conductivity in CCSD main hole

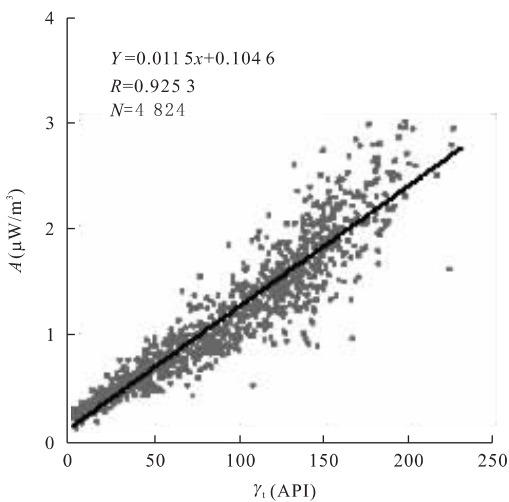


图 6 CCSD 主孔 UHP 岩石  $A$  与  $\gamma_1$  之间的线性关系( $R$  为相关系数,  $N$  为数据个数)

Fig. 6 The linear relation between  $A$  and  $\gamma_1$  of UHP metamorphic rocks in CCSD main hole

梯度会出现低值异常. 另外, 3 500 m 深度处产热率、地温梯度与热导率均发生了明显的突变, 再次表明 3 500 m 之下的岩片与其上覆岩片的热物理性质有明显差异, 可能属于不同的岩性构造单元.

总体上来看, CCSD 主孔 100~5 000 m 范围内  $A$  随深度有逐渐增加的趋势, 100~3 500 m 之间除了 1 200~1 600 m 外  $A$  值都较低, 3 500~5 000 m 的  $A$  相对较大(图 5). 前人对于地壳放射性产热率随深度的变化关系已进行过较多研究, 主要的结论包括: (1) 放射性产热率随深度呈指数衰减(Tilling *et al.*, 1970); (2) 不能确定是线性还是指数衰减关系(Hawkesworth, 1974); (3) 区域分带或三明治式的分布模式(Sawka and Chappell, 1988). 曾令森等(2005)通过对 CCSD 主孔 100~2 000 m 井段 HPEs 分布特征的研究认为: CCSD 主孔具有三明治式的 HPEs 分布特征. 但是从 CCSD 主孔 100~5 000 m 的 HPEs 和  $A$  分布特征来看:  $A$  随深度不是衰减



表 3 CCSD 主孔 UHP 变质岩的密度和生热率

Table 3 Density and heat production rate of UHP metamorphic rocks in CCSD main hole

岩性	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$A(\mu\text{W}/\text{m}^3)$
蛇纹岩	2.920	0.244
石英榴辉岩	3.187	0.431
金红石榴辉岩	3.430	0.432
多硅白云母榴辉岩	3.221	0.484
退变质榴辉岩	2.982	0.610
角闪岩	2.914	0.841
副片麻岩	2.726	1.101
正片麻岩	2.612	1.829

的,而是有逐渐增加的趋势,且不能确定是线性还是指数关系, $A$  主要受岩性控制,出现了多组三明治分布结构,高值与低值相间出现,分层较明显。但是 5 000 m 的深度尚不能说明苏鲁 UHP 变质带岩石圈中 HPEs 和  $A$  的分布规律。根据苏鲁 UHP 变质带岩石圈地震组构的研究,苏鲁 UHP 变质带上地壳由 UHP 变质岩片与下方片麻岩组成,中地壳含有大量片麻岩,下地壳主要由酸性麻粒岩和基性麻粒岩组成,岩石圈地幔主要由尖晶石橄榄岩、方辉橄榄岩和二辉岩组成(Yang *et al.*, 2004)。这种岩石圈结构总体上也应该具有近似指数衰减的 HPEs 和  $A$  分布,所以 CCSD 主孔出现的三明治式 HPEs 分布应该是上地壳中的基性和超基性 UHP 变质岩体所造成的局部异常。

根据表 1 中 CCSD 主孔各类 UHP 变质岩 U、Th、K 元素含量的平均值,再结合密度测井数据,可以计算出各类岩石的平均产热率(表 3)。CCSD 主孔岩石的产热率都不高,产热率从蛇纹岩到石英榴辉岩、金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩依次变大,与  $\gamma_t$  的变化规律一致。正片麻岩的生热率是蛇纹岩和榴辉岩的 3 倍多,这种差异对温度场的影响不能忽略。表 3 中几类 UHP 变质岩的密度与产热率有反比的关系。

## 4 结论

(1) 通过将 CCSD 主孔  $C_{\text{Th}}$ 、 $C_{\text{K}}$  测井曲线和岩心测试结果进行对比,发现两种测量岩石放射性元素含量的方法得到的数据吻合很好,所以利用自然伽马能谱测井方法可以较准确地得到岩石中放射性元素的含量,而且测井可以在钻孔中进行原位连续

测量,效率高,费用低。

(2) CCSD 主孔各类超高压变质岩的自然放射性存较大差异,主要受岩性控制。从蛇纹岩到榴辉岩、角闪岩、副片麻岩、正片麻岩, $\gamma_t$ 、 $C_{\text{U}}$ 、 $C_{\text{Th}}$ 、 $C_{\text{K}}$ 、 $A$  逐渐增大,所以自然放射性测井是识别钻孔中超高压变质岩岩性的有效方法。

(3) 超高压榴辉岩在退变质的过程中铀、钍、钾元素含量逐渐增大,尤其是从中等退变质榴辉岩到完全退变质榴辉岩的阶段,铀、钍、钾元素的增加量相对较多,表明在退变质晚期,大量外来含水流体参与了变质作用,同时也带来了铀、钍、钾元素。

(4) CCSD 主孔 100~5 000 m 的  $\gamma_t$ 、 $C_{\text{U}}$ 、 $C_{\text{Th}}$ 、 $C_{\text{K}}$ 、 $A$  总体上是随深度增加而增大的,这与前人提出的指数衰减分布模型不同,CCSD 主孔的自然放射性元素和产热率主要受岩性控制,呈现多组类似三明治式的分布,但 CCSD 主孔地区上地壳 HPEs 的这种异常分布应该是上地壳中的基性和超基性 UHP 变质岩体所造成的局部异常。CCSD 主孔 UHP 变质岩放射性产热率和总自然伽马强度之间有很好的线性关系。通过与前人的地温梯度和热导率资料进行对比,发现产热率(或自然放射性)的变化对地温梯度有一定影响。

## References

- Bücker, C., Rybach, L., 1996. A simple method to determine heat production from gamma-ray logs. *Marine and Petroleum Geology*, 13(4): 373–375.
- Chen, S. Z., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2006. Transformation of chromium spinel and garnet: Evidence of CCSD-PP3 ultramafic rocks processed UHP metamorphism. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 475–487 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q. H., Yan, M. C., 1998. Radioactive elements of rocks in North China platform and the thermal structure and temperature distribution of the modern continental lithosphere. *Acta Geophysica Sinica*, 41(1): 38–48 (in Chinese with English abstract).
- Chiozzi, P., Pasquale, V., Verdoya, M., 1998. Ground radiometric survey of U, Th and K on the Lipari Island, Italy. *Journal of Applied Geophysics*, 38(3): 209–217.
- Cong, B. L., Wang, Q. L., Zhai, M. G., et al., 1994. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, China: Their formation and exhumation. *Island Arc*, 3: 135–150.

- Hawkesworth, C. I., 1974. Vertical distribution of heat production in the basement of the eastern Alps. *Nature*, 249: 435—436.
- He, L. J., Hu, S. B., Yang, W. C., et al., 2006. Temperature measurement in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 745—752 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Xue, H. M., et al., 2005a. Ultrahigh-pressure mineral inclusions preserved in zircons separated from eclogite and its country-rocks in the main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling project (0~4 500 m). *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 277—292 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2005b. Geochemical characteristics and genetic mechanism of orthogneiss and paragneiss in the depth intervals of 2 000~3 000 m from main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 305—324 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. B., 2005. Geothermal resources and its exploitation and reserve. Chemistry Industry Press, Beijing, 82—87 (in Chinese).
- 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., Wang, L., et al., 2004. Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100~2 000 m main hole of Chinese Continental Scientific Drilling; Revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109—118 (in Chinese with English abstract).
- Pan, H. P., Niu, Y. X., Wang, W. X., et al., 2005. The application of radioactive logging in CCSD main hole. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(Suppl.): 49—56 (in Chinese with English abstract).
- Rybach, L., 1988. Determination of heat production rate. In: Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L., eds., Handbook of terrestrial heat-flow density determination. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Sawka, W. N., Chappell, B. W., 1988. Fractionation of uranium, thorium and rare earth elements in a vertically zoned granodiorite; Implications for heat production in the Sierra Nevada batholith, California, U. S. A.. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1131—1143.
- Tilling, R. I., Gottfried, D., Dodge, F. C. W., 1970. Radiogenic heat production of contrasting magma series; Bearing on interpretation of heat flow. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81: 1447—1462.
- Wei, Z. L., Zou, C. C., 2005. Geophysical well logging. Geological Publishing House, Beijing, 78—87 (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, 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., Qi, X. X., Yang, J. S., et al., 2006. Deep subduction erosion model for continent-continent collision of the sulu HP-UHP metamorphic terrain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 427—436 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2004. The structure profile of 0~1 200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53—72 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Liu, F. L., 2005. Geochemical characteristics and genesis of plagiogneiss from the 0~2 000 m main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 355—368 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Yang, W. Y., Jin, Z. M., et al., 2004. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Science in China (Ser. D)*, 34(4): 307—319.
- Yang, W. C., Liu, G. L., Yang, K., et al., 2006. All-laid-out three-dimensional seismic survey at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 735—744 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. S., Jin, Z. M., 1998. The significance of the studies on petrophysical property measurements in continental scientific drilling. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 338—346 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Su, S. G., Liang, F. H., et al., 2005. The metamorphic evolution of the eclogitic rocks in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project; An elucidation on the uplift processes of the ultrahigh-

- pressure metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 381—388 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. S., Liu, F. L., Zhang, Z. M., et al., 2005. Vertical distribution characteristics and origin of radiogenic heat-producing elements (HPE) in the first 2 000 m of the main hole of the CCSD Project. *Geology in China*, 32(2): 230—238 (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., You, Z. D., et al., 2005. Ultra-high-pressure metamorphic P-T-t path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 257—270 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Chen, B., et al., 2005. A geochemical study of element and Sr-Nd isotopes for eclogite and gneiss from CCSD core 734 to 933 m. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 325—338 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 陈世忠, 杨经绥, 许志琴, 等, 2006. 铬尖晶石和石榴石的相变: 大陆科学钻探 CCSD-PP3 孔超镁铁岩超高压变质作用的证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 475—487.
- 迟清华, 鄯明才, 1998. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布. *地球物理学报*, 41(1): 38—48.
- 何丽娟, 胡圣标, 杨文采, 等, 2006. 中国大陆科学钻探主孔动态地温测量. *地球物理学报*, 49(3): 745—752.
- 刘福来, 许志琴, 薛怀民, 等, 2005a. 中国大陆科学钻探主孔 0~4 500 m 变质岩石锆石中保存的超高压矿物包体. *岩石学报*, 21(2): 277—292.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2005b. 中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 m 正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制. *岩石学报*, 21(2): 305—324.
- 刘时彬, 2005. 地热资源及其开发利用和保护. 北京: 化学工业出版社, 82—87.
- 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.
- 欧新功, 金振民, 王璐, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示. *岩石学报*, 20(1): 109—118.
- 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(Suppl.): 49—56.
- 尉中良, 邹长春, 2005. 地球物理测井. 北京: 地质出版社, 78—87.
- 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.
- 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, 戚学祥, 杨经绥, 等, 2006. 苏鲁高压—超高压变质地体的陆—陆碰撞深俯冲剥蚀模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 427—436.
- 许志琴, 张泽民, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 1 200 m 构造柱及变形构造初步解析. *岩石学报*, 20(1): 53—72.
- 薛怀民, 刘福来, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 0~2 000 m 斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究. *岩石学报*, 21(2): 355—368.
- 杨文采, 刘光林, 杨锴, 等, 2006. 中国大陆科学钻探孔区全观式三维地震采集. *地球物理学报*, 49(3): 735—744.
- 杨晓松, 金振民, 1998. 大陆科学钻探中岩石物理性质研究的意义. *地学前缘*, 5(4): 338—346.
- 游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩类岩石退变质过程——对超高压变质地体隆升的启示. *岩石学报*, 21(2): 381—388.
- 曾令森, 刘福来, 张泽明, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 100~2 000 m 放射性产热元素的垂向分布特征及其成因. *中国地质*, 32(2): 230—238.
- 赵子福, 郑永飞, 陈斌, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔(734~933) m 榴辉岩和片麻岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21(2): 325—338.
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等, 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹. *岩石学报*, 21(2): 257—270.
- 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.