

# 中国大陆科学钻探工程主孔 100~2000 m 放射性产热元素的垂向分布特征及其成因

曾令森 刘福来 张泽明 杨经绥 许志琴

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

**摘要:** 地球内部放射性产热元素 U、Th 及 K(HPE)含量如何随深度的变化而变化是固体地球科学中的一个重要参数,在限定地壳的热和流变学结构、地球化学、岩石和构造模型中起关键性的作用。对 HPE 深部分布的认识主要来自对大型花岗岩岩基的研究及对地表热流值和产热率之间关系的模拟,对高压-超高压变质地体的 HPE 随深度的分布缺乏认识。在苏鲁超高压变质带中实施的中国大陆科学钻探工程届时将提供超过 5 km 的岩心,为确定苏鲁超高压带的 HPE 结构提供了最好的机会。对 CCSD 的 100~2000 m 岩心的 732 块样品详细的放射性产热元素含量的测试及现今产热率计算的初步结果表明:(1)花岗岩片麻岩具有最高的产热率,平均为  $1665 \times 10^{-11} \text{W/kg}$ ; (2)副片麻岩(变沉积岩)具有中等的产热率,为  $994 \times 10^{-11} \text{W/kg}$ ; (3)金红石榴辉岩及石榴石橄榄岩具有最低的产热率,为  $17 \times 10^{-11} \sim 20 \times 10^{-11} \text{W/kg}$ ; (4)放射性产热元素的浓度及相应的产热率随岩性的变化而变化,呈现阶梯状的分布特征。产热率随深度的变化特征表明 CCSD 主孔中的 HPE 三明治结构。该结构可能代表着高压-超高压变质地体中的典型 HPE 结构,比大型花岗岩岩基的 HPE 结构更复杂,与传统的 HPE 指数衰减分布模式不吻合。CCSD 主孔中所揭示的三明治式 HPE 结构是大陆被动陆缘中的基性及超基性岩、沉积岩及花岗岩在深俯冲、折返及折返后构造叠置、变质交代反应综合作用的结果。

**关键词:** 产热元素;产热率;苏鲁超高压变质带;中国大陆科学钻探工程

**中图分类号:** P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0230-09

## 1 前言

了解地球内部放射性产热元素随深度的分布是确定地壳的热及流变学结构的关键一环,同时在限定地壳的地球化学、岩石学及构造模型中也起重要作用<sup>[1~4]</sup>。由于长期复杂的地表和深部物理及地球化学过程,大陆地壳不论是在水平方向还是在垂直方向都表现出高度的不均匀性。出露地表的深部地壳剖面及地球物理的深部探测结果都表明层圈化是大陆地壳最主要的特征之一,要确定或预测大陆地壳的热结构,大陆地壳放射性产热元素(HPE)的垂向分布特征是重要参数,也是识别地壳变质、深熔及变

形作用驱动力来源最基本的参量<sup>[5]</sup>。如果地壳内部的热源本身足够于驱动变质、深熔及变形作用,那么只要考虑能量和物质是怎样在地壳内部重新分布的就可以了;反之,就得求助于来自地幔的热能,如基性岩浆的底侵作用,在这种情况下,所观察到的地质现象是地壳和地幔的共同作用的结果。

1968年,Lachenbruch<sup>[6]</sup>及 Birch等<sup>[7]</sup>提出放射性产热随深度指数衰减的分布模型来解释在美国加州 Sierra Nevada 及新英格兰地区所观测到的地表热流值与地表放射性产热之间的普适性线性关系。后来的大量的地表热流值及地表放射性产热率的测量都满足这种线性关系。自该模型提出以来,尽管有限的经

收稿日期:2005-02-22;改回日期:2005-03-08

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(121201056606)及国家 973 基础研究项目(2003CB716500)资助。

作者简介:曾令森,男,1970年生,博士,主要从事构造地质学、构造地球化学、放射性同位素地球化学及构造地貌学的研究;

E-mail: lzeng@ccsd.org.cn.

验研究并不都支持这一假说,该假说还是得到了广泛的接受并应用于后来的研究中。过去三十几年来,一系列研究揭示了更复杂的地壳放射性生热的分布模式:(1)没有明显的深度变化关系<sup>[8]</sup>,(2)不能确定是线性还是指数衰减关系<sup>[9,10]</sup>,(3)区域分带或三明治式的分布模式<sup>[11]</sup>。过去的研究主要集中于沉积盆地和剥露很深的大型花岗岩岩基,对高压-超高压变质地体的放射性产热元素的垂向分布基本上没有进行过研究。地表地质研究揭示了高压-超高压变质地体中不同岩性段之间复杂的接触关系及构造特征,仅仅依赖地表研究难以确定其 HPE 的深部特征。而 CCSD 主孔 5km 的钻孔所提供的连续岩心,为确定高压-超高压变质地体中 HPE 结构特征提供了最好的机会。本研究对 CCSD 主孔的前 2000 m 岩心进行了详细的放射性产热元素 U、Th 和 K 的含量的测定,初步确定了 CCSD 主孔前 2000 m 的 HPE 及产热率的垂向分布特征。

## 2 放射性产热的基本原理

地幔和地壳的放射性生热是由于放射性同位素铀(<sup>238</sup>U 和 <sup>235</sup>U)、钍(<sup>232</sup>Th)和钾(<sup>40</sup>K)的衰变所造成的。现在,自然铀的组成为 99.27% <sup>238</sup>U 和 0.72% 的 <sup>235</sup>U,自然钍为 100% 的 <sup>232</sup>Th,而自然钾为 0.0128% <sup>40</sup>K。这些元素的产热率和半衰期列在表 1 中。现今的产热率  $H_0$  和这些放射性元素的各自的产热率之间的关系为:

$$H_0 = C_0^U \left[ H^U + \frac{C_0^{Th}}{C_0^U} H^{Th} + \frac{C_0^K}{C_0^U} H^K \right] \quad (1)$$

根据所测得的每个样品的 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 的含量( $C_0^U$ ,  $C_0^{Th}$  和  $C_0^K$ ),笔者利用公式(1)来计算现今的产热率  $H_0$ 。在本文中,为了避免由于假设每一个样品

的密度所带来的额外误差,在利用公式(1)计算产热率  $H_0$  时,并没有引进岩石的密度。

## 3 数据及结果

笔者对 CCSD 主孔的 100~2000 m 的岩心,按 2~5 m 的间隔取样,共取 734 块样品。所取样品主要为:榴辉岩、石榴子石橄榄岩、副片麻岩、花岗质片麻岩和角闪岩(退变质榴辉岩)。每个样品的 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 的含量的测定分别用 ICP-MS 和 XRF 方法在国土资源部国家地质测试中心进行。

CCSD 主孔前 2000 m 岩心,的岩石学及构造变形研究揭示了该段岩心,可分解为以下 7 个构造岩石单元<sup>[12-14]</sup>:(I)100~248 m 主要为石英榴辉岩,具少量的副片麻岩夹层;(II)248~530 m 主要为石英榴辉岩与含金石榴辉岩互层,具副片麻岩夹层;(III)530~600 m 为含金石榴辉岩;(IV)600~695 m 为石榴石橄榄岩,具榴辉岩和片麻岩夹层;(V)695~1160 m 为副片麻岩,具厚度不一的榴辉岩夹层;(VI)1160~1600 m 为花岗质片麻岩,具厚度不一的副片麻岩、角闪岩及榴辉岩夹层;(VII)1600~2050 m 为榴辉岩,具片麻岩夹层。

对于每一构造岩性单元,为了尽可能地去掉夹层对各个岩性单元总体产热元素特征的影响,将每一段的数据进行了过滤。过滤后的主体数据标识为 P,而相应的剩余数据标识为 F。例如,第一段主要为石英榴辉岩,为了尽可能地去掉副片麻岩夹层的影响,则采用 SiO<sub>2</sub> 含量大于或等于 60% 作为标准对该段数据进行了过滤,以更好确定该段的 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 的含量,Th/U 比值及产热率  $H$  的大小。所有 SiO<sub>2</sub> 含量小于 60% 的标识为 I-P,而剩下的样品标识为 I-F。对其他各段也采用了类似的方法,各段的 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 的含量,Th/U 比值及产热率  $H$  的大小见表 2。利用表中所列数据可以讨论岩石类型、分异指数和 HPE 之间的相关关系。

从表 2 中可以看出:

(1) 单元 III 含金石榴辉岩和单元 IV 石榴子石橄榄岩(IV-P)具有相似的 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 含量及产热率。含金石榴辉岩(III)的平均 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 含量分别为  $0.10 \times 10^{-6}$ 、 $0.34 \times 10^{-6}$  和 0.04%,产热率为  $16.6 \times 10^{-11}$  W/kg。而石榴子石橄榄岩(IV-P)平均 U、Th 和 K<sub>2</sub>O 含量分别为  $0.10 \times 10^{-6}$ 、 $0.34 \times 10^{-6}$  和 0.05%,产热率为  $19.5 \times 10^{-11}$  W/kg。

表 1 地球内部重要产热元素的产热率 ( $H$ )和半衰期 ( $t_{1/2}$ )

Table 1 Rate of heat released  $H$  and half-lives  $\tau_{1/2}$  of important radioactive isotopes in the Earth's interior

同位素	$H$ (W/kg)	$t_{1/2}$	浓度 $C$ ( $10^{-6}$ )
<sup>238</sup> U	$9.37 \times 10^{-5}$	$4.47 \times 10^9$	$25.5 \times 10^{-3}$
<sup>235</sup> U	$5.69 \times 10^{-4}$	$7.04 \times 10^8$	$0.185 \times 10^{-3}$
U	$9.71 \times 10^{-5}$		$25.7 \times 10^{-3}$
<sup>232</sup> Th	$2.69 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{10}$	$103 \times 10^{-3}$
<sup>40</sup> K	$2.79 \times 10^{-5}$	$1.25 \times 10^9$	$32.9 \times 10^{-3}$
K	$3.58 \times 10^{-9}$		257

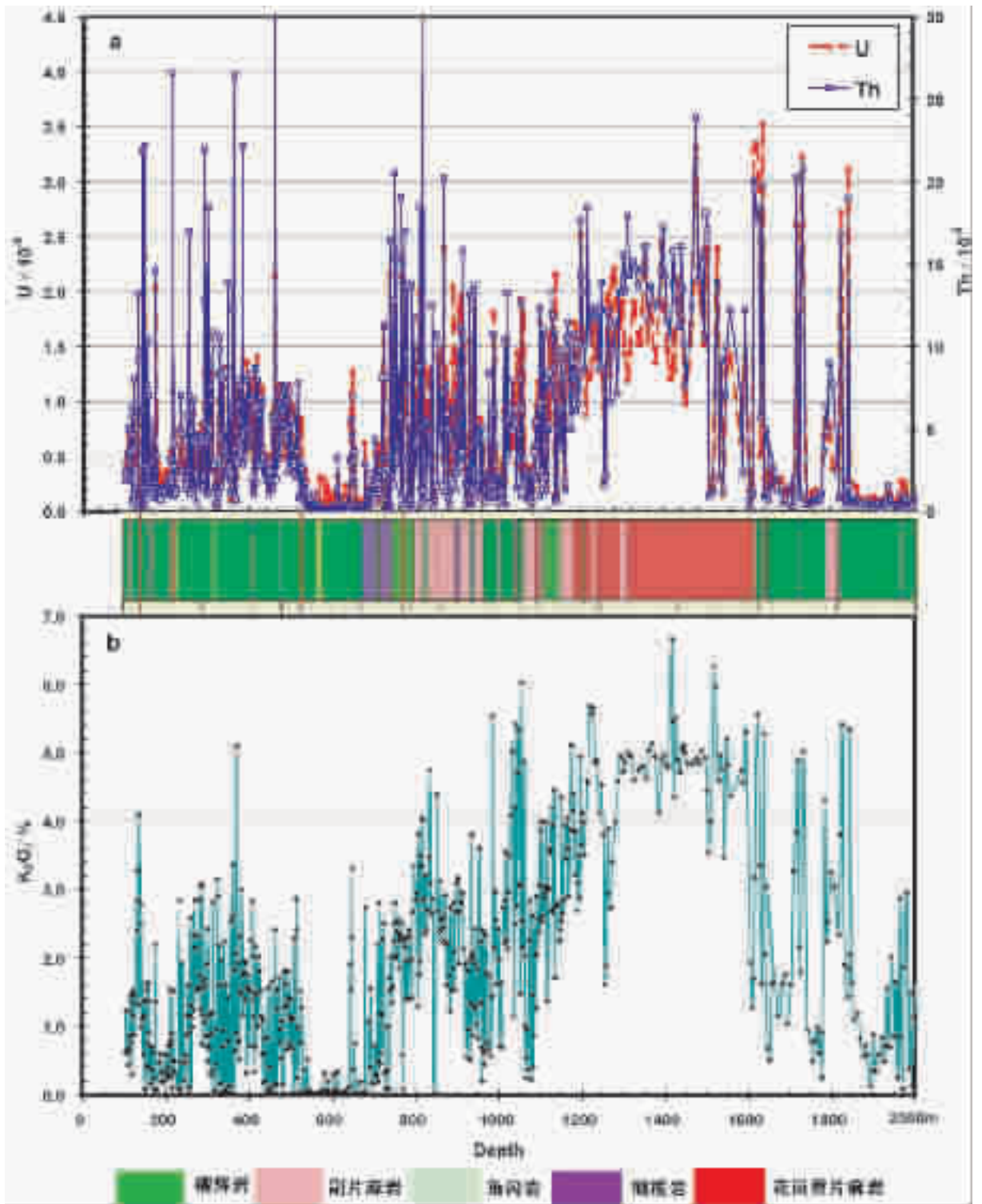


图 1 CCSD 主孔中前 2000 m 的  $K_2O$ 、U 和 Th 含量随深度的变化

Fig. 1 Depth profile of  $K_2O$ , U and Th contents in the 100–2000 m CCSD borehole

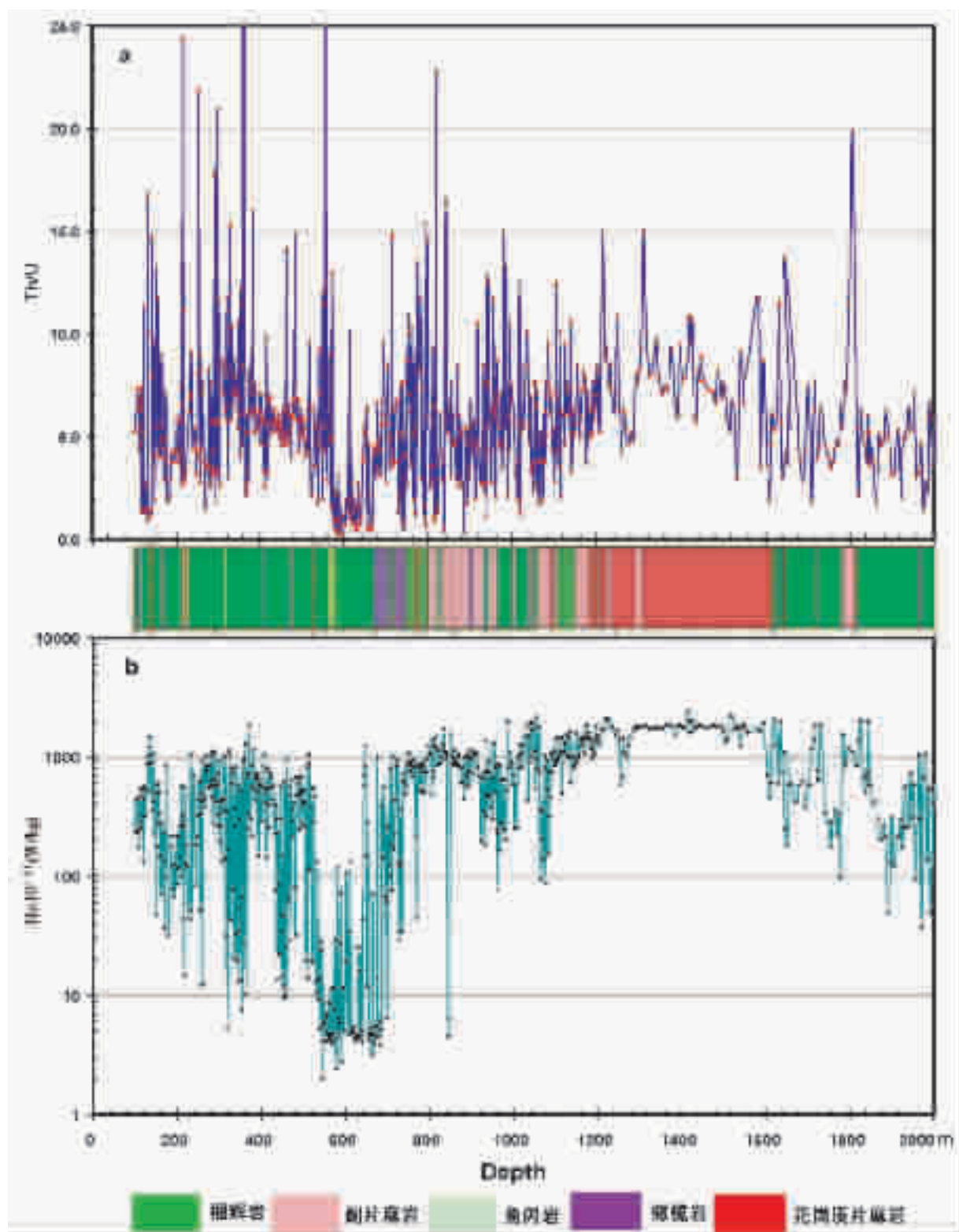


图 2 CCSD 主孔中前 2000 m 的 Th/U 比值(a)及产热率( $H$ )(b)随深度的变化

Fig. 2 Depth profile of (a) Th/U ratios and (b) heat production ( $H$ ) in the 100–2000 m CCSD borehole

(2)对比单元 I 和单元 II 中的主要层及其夹层(主要为副片麻岩),随着夹层的  $K_2O$  从 1.70% 增加到 1.96%, U 和 Th 浓度分别从  $0.90 \times 10^{-6}$  减少到  $0.81 \times 10^{-6}$  和  $11.27 \times 10^{-6}$  到  $7.92 \times 10^{-6}$ , 榴辉岩的  $K_2O$  相应地从 0.80% 增加到 1.05%, U 和 Th 浓度分别从  $0.48 \times 10^{-6}$  和  $2.44 \times 10^{-6}$  增加到  $0.64 \times 10^{-6}$  和  $4.16 \times 10^{-6}$ 。I-P 和 II-P 的产热率分别为  $296.6 \times 10^{-11} W/kg$  和  $392.3 \times 10^{-11} W/kg$ , 而相应的夹层 I-F 和 II-F 的产热率为  $645.9 \times 10^{-11} W/kg$  和  $731.7 \times 10^{-11} W/kg$ 。这种关系表明在单元 I 和 II 中, 榴辉岩与其副片麻岩之间具有某种程度的物质交换, 尤其表现在  $K_2O$  的含量变化。

(3)和单元 II 相比,单元 IV(石榴石橄榄岩)和单元 V(副片麻岩)中的榴辉岩夹层具有升高的  $K_2O$ (1.12%~1.32%), 但降低的 U 和 Th 含量, 分别为  $0.34 \times 10^{-6}$ ~ $0.49 \times 10^{-6}$  和  $1.54 \times 10^{-6}$ ~ $2.4 \times 10^{-6}$ , 相对升高的产热率, 为  $412.7 \times 10^{-11}$ ~ $481.3 \times 10^{-11} W/kg$ 。

(4)单元 VI(花岗质片麻岩)具有最高的  $K_2O$ 、U 和 Th 含量及产热率, 分别为 4.52%、 $1.58 \times 10^{-6}$ 、 $11.85 \times 10^{-6}$  和  $1664.7 \times 10^{-11} W/kg$ 。

(5)单元 VII(榴辉岩)具有和单元 IV 和 V 中榴辉岩夹层相似的  $K_2O$ 、U 和 Th 含量及产热率, 但其  $K_2O$  含量及产热率相对升高, U 和 Th 含量相对降低。而其中的片麻岩夹层具有和单元 VI 中花岗质片麻岩相似的 U 和 Th 含量, 但较低的  $K_2O$  含量及产热率。

(6)相对高的 Th/U 的比值, 所有单元的 Th/U 比值都大于 2.66, 变化范围为 2.66~12.12。

从 CCSD 主孔中前 2000 m 的  $K_2O$ 、U 和 Th 含量随深度的变化(图 1-a, 1-b)及相应的 Th/U 比值及产热率随深度的分布(图 2-a, 2-b)可以看出, 虽然各段的  $K_2O$ 、U 和 Th 的含量及相应的产热率不同程度受不同岩性层之间交换化学反应的影响, 在 CCSD 主孔前 2000 m 岩心中, 产热率呈现出阶梯状分布特征, 相对较高产热率的片麻岩和相对低产热率的榴辉岩及超基性岩成三明治结构(图 2-b)。在较小的尺度下, 在各个主岩性段内部, 同样表现出相似的三明治结构, 但它们的成因可能不同。

综上所述, 通过对 CCSD 主孔的 100~2000 m

表 2 CCSD 主孔前 2000 m 岩心中各岩性段及其夹层的放射性元素 U、Th、K)的含量、Th/U 比值及产热率  $H$ )  
Table 2 Summary of U, Th and  $K_2O$  contents, Th/U ratio and heat production  $H$  in each tectono-lithologic unit of the first 2000 m CCSD core samples

构造岩性段	$K_2O$ /%			Th/ $10^{-6}$			U/ $10^{-6}$			Th/U			$H/10^{-11}(W/kg)$			
	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	
I	P	0.80	4.09	0.01	2.44	14.60	0.22	0.48	2.03	0.15	4.59	9.10	0.98	296.6	1466.3	14.9
	F	1.70	3.27	0.42	11.27	26.58	2.47	0.90	2.32	0.37	12.12	24.39	4.41	645.9	1204.3	177.5
II	P	1.05	5.10	0.01	4.16	26.48	0.30	0.64	1.41	0.05	6.22	32.69	1.54	392.3	1843.9	5.4
	F	1.96	3.07	0.66	7.92	30.15	1.15	0.81	2.14	0.39	8.83	21.84	1.83	731.7	1115.4	249.0
III		0.04	0.36	0	0.34	1.75	0.03	0.10	0.38	0.01	5.32	34.00	0.19	16.6	133.7	2.0
IV	P	0.05	0.75	0.01	0.34	3.63	0.03	0.10	0.57	0.01	2.66	10.19	0.40	19.5	283.8	3.2
	F	1.12	3.32	0.01	2.44	6.97	0.10	0.49	1.26	0.06	4.84	9.58	0.67	412.7	1218.1	11.9
V	P	2.70	5.54	0.22	6.67	31.00	0.26	1.04	2.39	0.17	6.22	22.79	0.37	994.2	1990.5	87.5
	F	1.32	6.03	0.01	1.54	6.26	0.09	0.34	1.35	0.04	4.87	14.78	0.65	481.3	2165.3	4.5
VI	P	4.52	6.67	2.69	11.85	23.90	2.29	1.58	3.31	0.64	7.66	15.04	3.52	1664.7	2428.1	991.1
	F	3.66	6.26	1.62	1.50	2.12	0.95	0.32	0.67	0.15	5.59	9.13	2.90	1318.6	2246.6	585.7
VII	P	1.41	8.04	0.09	0.89	5.76	0.08	0.17	0.50	0.04	4.73	13.72	1.50	510.2	2883.2	37.6
	F	3.65	5.56	1.28	11.72	20.80	2.40	1.87	3.52	0.39	7.11	19.85	3.06	1356.0	2070.9	471.8

注: P—每一岩段的主要成分层; F—每一岩段中的夹层; Avg—平均值; Max—最大值; Min—最小值。

的岩心  $K_2O$ 、U 和 Th 含量的测定及产热率的计算结果表明:

(1) 花岗质片麻岩具有最高的产热率, 平均为  $1665 \times 10^{-11} W/kg$ ;

(2) 副片麻岩(变质表壳岩)具有中等的产热率, 为  $994 \times 10^{-11} W/kg$ ;

(3) 金石榴辉岩及石榴石橄榄岩具有最低的产热率, 为  $17 \times 10^{-11} W/kg \sim 20 \times 10^{-11} W/kg$ ;

(4) 放射性产热元素的浓度及相应的产热率随岩性的变化而变化, 呈现阶梯状的分布特征。

## 4 讨论

根据以上所得的初步结果, 同时结合区域地质、构造变形、岩石地球化学及地质年代学结果来探讨影响地壳中产热元素的分布特征的主要地质作用及 CCSD 主孔中所揭示的 HPE 深度分布的意义。

### 4.1 高压-超高压地质地体的 HPE 特征

大量的地表热流值及地表放射性产热率的测量结果表明: 近地表的热流值和地表产热率之间的关系用以下方程式来描述<sup>[6,7]</sup>:

$$q = q_r + DA_0 \quad (2)$$

其中  $q$  为在地表测定的热流值,  $A_0$  为地表放射性物质的热产率,  $q_r$  为  $A_0$  为零时的截距值(Reduced Heat Flow),  $D$  为比例常数, 单位与深度相同。地表热流研究结果都证明该经验方程的普适性, 适用于不同年龄和不同构造环境地块。对于大型花岗岩为主要成分的大陆地壳来说, Lachenbruch<sup>[6,15-17]</sup>提出了产热元素随深度( $Z$ )指数衰减的分布模式来解释这种线性关系, 即:

$$A(Z) = A_0 e^{-Z/D} \quad (3)$$

虽然随后的研究并没有完全证实这样一种高度理想化的分布模式, 由于其能很好的解释方程(2)中的线性关系, 在地质科学中得到认可和广泛的应用<sup>[11]</sup>。前人对产生这种分布模式的认识归结为: 重力作用下离子扩散 (gravitational ionic diffusion)<sup>[18]</sup>或近固态的交代作用(subsolidus alteration)<sup>[19,20]</sup>。但在某些区域中, 并不能排除产热元素随深度是线性衰减的这—种可能性<sup>[21]</sup>, 即:

$$A(Z) = A_0(1 - Z/D) \quad (4)$$

在 CCSD 主孔中, 前 800 m 的岩心中主要为缺损 U、Th 和 K 产热元素的榴辉岩和超基性岩, 800~1 600 m 为相对富集 U、Th 和 K 产热元素的正片麻

岩和副片麻岩, 1 600~2 000 m 为缺损 U、Th 和 K 产热元素的榴辉岩。这样一种三明治式 HPE 分布形式与 HPE 指数衰减分布模式不符, 有可能代表着高压-超高压变质带中典型 HPE 结构, 而且该结构比大型花岗岩岩基的 HPE 结构更复杂, 既不是指数衰减分布模式, 也不是线性衰减模式。

### 4.2 三明治式 HPE 特征的成因

地壳中产热元素的分布特征受下列因素的影响: (1) 构造活动导致的具有不同地球化学特征的块体的叠置; (2) 部分熔融和变质作用所造成的地壳内部分异作用; (3) 地表风化、剥蚀搬运作用及重沉积作用所造成的元素的重新分布。作用(2)和(3)导致岩石类型、分异指数和 HPE 之间的相关关系。在这里, 将试图区分三种地质作用(变形、沉积及岩浆作用)对地壳岩石的产热元素的分布的控制作用, 而在通常情况下, 变质反应导致沉积岩和岩浆岩的放射性产热元素在矿物间的重新分配, 对岩石的产热元素的总体特征影响较小。而部分熔融、岩浆分异、地表风化、剥蚀搬运作用及物质的再沉积作用会决定所成岩石的总体产热元素特征。

尽管强烈的构造作用(逆冲推覆)有可能导致原来位于深部的产热元素亏损的深部岩片覆盖在产热元素富集的浅部岩片之上。但是, 岩石地球化学及地质年代学的研究<sup>[12,13]</sup>表明 CCSD 主孔中榴辉岩、片麻岩及超基性岩代表着新元古代的被动大陆边缘的一套岩石组合, CCSD 岩心中岩性的变化可能反映了大陆深俯冲及碰撞作用前岩石单元的侧向变化, 即原来位于被动大陆边缘的分异程度较低的基性、超基性岩片和分异程度较高的花岗质岩石、沉积岩在大陆深俯冲及折返过程中, 强烈的构造作用导致这些岩片叠置在一起, 造成现在这种三明治结构。而各个岩性段内部的小尺度的三明治结构是变形前, 在原岩的形成中岩浆侵入作用的结果。例如, 片麻岩中的榴辉岩夹层是玄武岩质岩浆侵入表壳岩或花岗岩的结果, 而榴辉岩中的片麻岩夹层是玄武岩质岩浆侵位中, 围岩下落(Stopping)而被包裹在岩浆中的结果。这种推论和变形构造及岩石地球化学研究相—致<sup>[12-14,22]</sup>。

## 5 结论

对 CCSD 主孔的 100~2000 m 的岩心, 7 个构造岩性段共 734 块样品的  $K_2O$ 、U 和 Th 含量的测定

及现今产热率的计算结果表明:尽管各段的  $K_2O$ 、 $U$  和  $Th$  的含量及相应的产热率不同程度受岩性层之间化学交换反应的影响,花岗质片麻岩具有最高的产热率,平均为  $1665 \times 10^{-11} W/kg$ ;副片麻岩(变质沉积岩)具有中等的产热率,为  $9945 \times 10^{-11} W/kg$ ;金红石榴辉岩及石榴石橄榄岩具有最低的产热率,为  $17 \times 10^{-11} W/kg \sim 205 \times 10^{-11} W/kg$ ;放射性产热元素的浓度及相应的产热率随岩性的变化而变化,呈现阶梯状的分布特征,总体上 HPE 呈三明治结构,与经典的 HPE 指数衰减分布模式不符;这种三明治式的 HPE 结构有可能代表着高压-超高压变质带中典型 HPE 结构,比大型花岗岩岩基更复杂。所揭示的 HPE 结构对理解苏鲁地区相对高的地表热流值<sup>[23-25]</sup>、苏鲁—大别碰撞造山带的热结构及地形的演化<sup>[26]</sup>将起促进作用。

### 参考文献(References):

- [1] Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems[M]. John Wiley & Sons, 1982.1~435.
- [2] Jamieson R A, Beaumont C. Orogeny and metamorphism: A model for deformation and P-T-T paths with applications to the central and southern Appalachians[J]. Tectonics, 1988, 7:417~445.
- [3] Willett S D. Orogeny and orography: the effects of erosion on the structure of mountain belts[J]. J. Geophys. Res., 1999, 104:28,957~28,981.
- [4] Koons P O, Zeitler P K, Chamberlain C, et al. Mechanical links between erosion and metamorphism in Nanga Parbat, Pakistan Himalaya[J]. Am. J. Sci., 2002, 302:749~773.
- [5] Chamberlain C P, Sonder L J. Heat-producing elements and the thermal and baric patterns of metamorphic belts[J]. Science, 1990, 250:763~769.
- [6] Lachenbruch A H. Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada [J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(22): 6977~6989.
- [7] Birch F, Roy R F, Decker E R. Heat flow and thermal history in New England and New York[A]. In:Zen E, White W S, Hadley J B, et al (eds.). Studies of Appalachian Geology, Northern and Maritime [C]. Interscience Publisher, 1968, 437~452.
- [8] Tilling R I, Gottfried D, Dodge F C W. Radiogenic heat production of contrasting magma series: bearing on the interpretation of heat flow[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 1970, 81: 1447~1462.
- [9] Hawkesworth C J. Vertical distribution of heat production in the basement of the Eastern Alps[J]. Nature, 1974, 249: 435~436.
- [10] Hart R J, Nicolaysen L O, Gale N H. Radioelement concentrations in the deep profile through Precambrian basement of the Vredefort Structure [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86:10639~10652.
- [11] Sawka W N, Chappell B W. Fractionation of uranium, thorium and rare earth elements in a vertically zoned granodiorite: implications for heat production distribution in the Sierra Nevada batholith, California, U.S.A[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(8): 1131~1143.
- [12] 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔(100~2050m)榴辉岩岩石化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1):27~42. Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai, et al. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1): 27~42 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 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标志的识别[J]. 岩石学报, 2004, 20(1):9~26. Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1):9~26 (in Chinese with English abstract).
- [14] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔 1200m 构造柱及变形构造初步解析[J]. 岩石学报, 2004, 20(1):53~72. Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. The structure profile of 0~1200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1):53~72 (in Chinese with English abstract).
- [15] Lachenbruch A H. Vertical gradient of heat production in the continental crust 1: theoretical detectability from near-surface measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 73(17): 3842~3851.
- [16] Lachenbruch A H. Vertical gradient of heat production in the continental crust 2: some estimates from borehole data [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 73(17): 3852~3860.
- [17] Lachenbruch A H. Crustal temperature and heat production: implication of the linear heat-flow relation [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(17): 3291~3300.
- [18] Turcotte D, Oxburgh E R. Statistical thermodynamic model for the distribution of crustal heat sources[J]. Science, 1972, 176: 1021~1022.
- [19] Albarede F. The heat flow/heat generation relationship: an interaction model of fluids with cooling intrusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 27: 73~78.
- [20] Buntebarth G. Distribution of uranium in intrusive bodies due to combined migration and diffusion[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 32: 84~90.
- [21] Tilling R I, Gottfried D. Distribution of thorium, uranium and potassium in igneous rocks of the Boulder batholith region, Montana, and its bearing on radiogenic heat production and heat flow [J]. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1969, 614(E): 1~29.
- [22] Zeng L, Liu F, Zhang Z, et al. Heat-producing elements in the first 2000 meters CCSDD drilling core: implications for heat produc-

- tion distribution in the high to ultrahigh pressure metamorphic terranes[J]. *Eos, Trans. AGU*, 2004, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract, F1803.
- [23] 欧新功, 金振民, 王璐, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石热导率及其各向异性:对研究俯冲带热结构的启示[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):109~118.
- Ou Xingong, Jin Zhenmin, Wang Lu, et al. Thermal conductivity and its anisotropy from the depth of 100~2050 m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: revelations to the study on thermal structure of subduction zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 109~118 (in Chinese with English abstract).
- [24] 汪集旸, 胡圣标, 杨文采, 等. 中国大陆科学钻探先导孔地热测量[J]. *科学通报*, 2001, 46(10):847~850.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Yang Wencai, et al. Heat flow measurements in the pilot drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 46 (10): 847~850 (in Chinese).
- [25] 汪集旸, 胡圣标, 程本合, 等. 中国大陆科学钻探靶区深部温度预测[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(6): 774~782.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Cheng Benhe, et al. Prediction of the deep temperature in the target area of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(6): 774~782 (in Chinese).
- [25] Reiners P W, Zhou Z, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology [J]. *American Journal of Science*, 2003, 303:489~518.



## Vertical distribution characteristics and origin of radiogenic heat-producing elements (HPE) in the first 2000 m of the main hole of the CCSD Project

ZENG Ling-sen, LIU Fu-lai, ZHANG Ze-ming, YANG Jing-sui, XU Zhi-qin

(Key Laboratory for Continental Dynamic of the Ministry of Land and Resources, of China Institute of Geology,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** How radiogenic heat-producing elements (HPE) are distributed as a function of depth in the Earth is critical to determine the thermal and rheological structure of continental crust and to constrain geochemical, petrological, and tectonic models of crustal evolution. Our knowledge of HPE distribution within the crust has been derived predominantly from studies of large-scale granitic batholiths. The HPE distribution within high-grade metamorphic terrains are not well studied and thus poorly understood. The Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project provides us an unparalleled opportunity to characterize the vertical HPE distribution in a type example of high- to ultrahigh-pressure metamorphic terrains worldwide. U, Th, and  $K_2O$  contents have been measured on 734 core samples taken at intervals of 2 to 5 m and used to determine the distribution pattern of radiogenic heat production. Preliminary results show that: (1) the granitic gneisses have the highest heat production with an average of  $1665 \times 10^{-11} W/kg$ ; (2) the paragneisses have the intermediate heat production values; (3) the rutile eclogites and garnet peridotites have the lowest and similar values at about  $17 \sim 20 \times 10^{-11} W/kg$ ; (4) radiogenic HPE concentrations and heat production change stepwise as lithology changes downward. These data reveal a sandwich-like structure for the HPE in the drilling core in which relatively high heat production sections are enclosed by relatively low heat production sections. Such a pattern is not consistent with the downward-decreasing exponential distribution predicted from modeling of surface heat flow data. However, it may represent a typical structure in UHP metamorphic terrains as a result of deformation during or after the exhumation which resulted in the juxtaposition of mafic to ultramafic blocks with felsic blocks.

**Key words:** heat-producing element; heat production rate; Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt; Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project

---

**About the first author:** ZENG Ling-sen, male, born in 1970, Ph.D in Geology from California Institute of Technology, USA. Primary research interests are field geology, structural geology and deformational mechanisms at various levels of the continental lithosphere, elemental and radiogenic isotope geochemistry, and tectonic geomorphology; E-mail: lzeng@ccsd.org.cn.