

海底多金属结核的氦同位素异常及地质意义

李延河 李金城 宋鹤彬

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京)

提 要: 太平洋中部 CC 区海底多金属结核的氦丰度和同位素比值被测定, $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.73 \times 10^{-5} \sim 13.26 \times 10^{-5}$ 。通过与大气、地壳、地幔及宇宙尘的氦同位素对比提出多金属结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常可能与海底热液或宇宙尘的注入有关。根据氦同位素异常与海底热液活动的关系指出结核中的成矿物质可能主要来源于海底热液; 深海沉积物与多金属结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值相似, 表明沉积物的沉积速率与多金属结核的生长速率基本一致。

关键词: 多金属结核 氦同位素 海底热液 宇宙尘

海底多金属结核富含铁、锰、铜、镍和钴等有用金属元素, 储量巨大, 仅东太平洋 CC 区多金属结核的资源量就达 80~150 亿吨。海底多金属结核作为一种潜在的重要资源受到各国政府的重视。从 60 年代末至 80 年代初, 美国、前苏联、日本、法国、英国、德国等先后对海底多金属结核开展了大规模的调查研究。我国自 1986 年起对中、东太平洋海底多金属结核资源进行了系统的调查研究; 1991 年 3 月 5 日中国大洋矿产资源研究开发协会正式被联合国国际海底管理局筹委会批准为深海采矿先驱投资者; 在 CC 区划定了中国开辟区。然而由于缺乏有效的研究手段和方法, Fe、Mn、Cu、Ni、Co 等成矿物质来自何方; 海底多金属结核的生长速率与周围沉积物的沉积速率关系等一些重大问题, 迄今还不清楚, 而这些问题研究解决不仅对认识结核的成因具有重要的理论意义, 而且对于研究掌握结核的分布规律, 进一步寻找富矿结核具有重大现实意义。我们对东太平洋 CC 区多金属结核的氦同位素进行了初步研究, 发现其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值存在明显的异常, 并据此探讨了海底多金属结核与海底热液活动的关系、结核生长速率与沉积物沉积速率的关系。

1 样品及分析方法

海底多金属结核样品采自太平洋东部 CC 区我国申请开辟区。结核多数为小型水成结核, 从内向外可明显地分为 2 个层组。样品于 105℃ 加热去气 48 h; 1500℃ 加热熔样 40 min, 使样品完全熔融分解。释放出的气体经海绵钛泵 (800℃)、活性碳液氮冷阱 4 次纯化, H_2 、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2O 、有机质等均被冷冻、吸附。纯净的 He、Ne 进入分析系统。随 He、Ne 进入分析系统的微量 H_2 、Ar 等杂质气体经加液氮的钛升华泵再次纯化去掉。氦同位素分析用乌克兰生产的 MI-1201 IG 惰性气体质谱计进行。 ^4He 用法拉第杯接收, ^3He 用电子倍增器接收。倍增器的分辨率调至 1200, 使 ^3He 与 $\text{HD} + \text{H}^3$ 峰完全分开, 勿需 $\text{HD} + \text{H}^3$ 校正。工作标准由大气在液氮温度下纯化制得, 后又用大气标准进行了多次标定。大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 1.40×10^{-6} 。测样品之前先测工作标准, 通过与工作标准对比计算样品的 ^4He 含量和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。样品的测量精度为 1%~5%。

2 分析结果

太平洋东部 CC 区海底多金属结核的氦同位素分析结果示于表 1 中。从表 1 中可以看出

表 1 太平洋海底多金属结核和沉积物的氦同位素组成

样 号	样品名称	$\frac{{}^3\text{He}}{{}^4\text{He}}/10^{-5}$	$\frac{{}^4\text{He}}{\text{cm}^3 \text{ STP/g}}(10^{-7})$	地质情况	资料来源
5234-1	结核(外)	1.73	2.02	CC 区	本文
5234-2	结核(内)	13.26	1.55		
5420-1	结核(外)	2.32	2.44		
5420-2	结核(内)	10.39	3.24		
5314-1	结核(外)	3.49	3.10		
5314-2	结核(内)	7.45	1.63		
5302-1	结核(外)	5.24	1.73		
5302-2	结核(内)	4.45	1.34		
5459-1	结核(外)	4.41	1.82		
5459-2	结核(内)	5.74	1.75		
1	结核(上)	7.54	1.92	CC 区	[8]
1	结核(下)	3.90	2.17		
2	结核(上)	3.97	1.98		
2	结核(下)	1.83	1.72		
3	结核(上)	2.77	1.27		
3	结核(下)	1.89	3.21		
4	结核(上)	1.95	5.28		
5	结核(上)	1.05	3.40		
KHT5-3-5-2				26°00.8'N,150°00.0'E	[1]
Bulk	沉积物	6.59	3.92		
NM	非磁性部分	5.16	4.02		
M ₁	磁性部分	21.8	165.5		
M ₂	磁性部分	18.7	31.0		
M ₃	磁性部分	17.5	12.3		
GH79-1-1476				9°49.96'N,167°17.68'W	[2]
M	磁性部分	13.8	117.9		
GH80-1-1627				5°27.32'S,163°46.01'W	
M	磁性部分	23.7	452.6		[3]
BO	沉积物	8.96	5.07	14°29.61'S,158°52.98'W	
BZM	磁性部分	27.3	102.0		[4]
Bulk(LSR)	沉积物	10.0	5	低沉积速率区	
Bulk(HSR)	沉积物	0.05	2	高沉积速率区	[5]
MG1-2	磁性部分	23.6	88.0	9°30'N,174°17'W	
MG1-3	磁性部分	24.2	89.1		[4]
PC-72(34 ^①)	沉积柱	1.0 ^②	0.79	0°,139°W	
	沉积柱	2.06 ^③	0.32		

① 样品数, ② 最低值, ③ 最高值

结核中含有丰富的氦, ^4He 含量均在 $1.34 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g}$ 之上;结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $1.73 \times 10^{-5} \sim 13.26 \times 10^{-5}$,异常明显。同一结核不同圈层的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值明显不同,内层(早期)普遍高于外层。结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值还显示出一定的区域性变化规律。从东向西(由 5459 号至 5234 号),内层(早期)结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值由 5.74×10^{-5} 逐渐升高至 13.26×10^{-5} ;外层(晚期)结核 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的变化趋势刚好相反,由 4.41×10^{-5} 逐渐降低至 1.73×10^{-5} 。表中还列出了 Ануфриев^[8]对太平洋中部 CC 区海底多金属结核的氦同位素分析结果。 ^4He 含量为 $1.27 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g} \sim 5.28 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $1.05 \times 10^{-5} \sim 7.54 \times 10^{-5}$,与我们的分析结果基本一致。同一结核上部的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍高于下部。为了便于对比,表中还给出了 Amari^[1]、Fukumoto^[2]、Ozima^[3]、Marcantonio 等^[4,5]对太平洋深海沉积物的氦同位素分析结果。与海底多金属结核相似,深海沉积物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值也很高,大部分位于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 之间。同一样品磁性部分相对非磁性部分 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 ^4He 含量均明显偏高。

3 讨 论

自然界中氦主要由 3 部分组成:① 元素合成阶段形成的原始氦;② 宇宙射线与物质相互作用产生的宇宙成因氦;③ 放射元素衰变及其诱发的核反应生产的放射性成因氦。不同成因的氦其同位素组成明显不同。高能射线与物质相互作用产生 ^3He ,使宇宙成因氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值达高 $n \times 10^{-1}$;U、Th 等元素衰变产生 ^4He ,使放射性成因氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值很低,小于 10^{-8} ;原始氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-4}$ 。自然界中各种物质的氦同位素组成实际上是上述 3 种不同成因氦的不同比例的混合。宇宙尘、陨石中的氦主要是宇宙成因氦与原始氦的混合,其氦丰度和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值均很高。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $n \times 10^{-4}$; ^4He 含量为 $n \times 10^{-2} \text{cm}^3 \text{STP/g} \sim n \times 10^{-1} \text{cm}^3 \text{STP/g}$ ^[6],是地球样品的 $10^6 \sim 10^7$ 倍。地球样品中的氦主要是放射性成因氦和地球原始氦的混合。陆壳岩石富含 U、Th 等放射性元素,U、Th 衰变产生 ^4He ,使陆壳岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍偏低,一般为 $n \times 10^{-8}$;地幔中放射性元素含量很低,U、Th 衰变产生的 ^4He 很少,使其基本保持了地球形成时原始地幔氦的同位素特征, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $n \times 10^{-5}$ 左右。海底火山、热液的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值相似,为 $n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-5}$;大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值非常稳定,为 1.4×10^{-6} ;正常海水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值基本一致。海底多金属结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与陆壳、大气及正常海水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值明显不同,而与地幔物质或宇宙尘的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值相似,这表明海底多金属结核的氦同位素异常可能与①地幔物质或②宇宙尘的注入有关。

海底热液活动是地幔物质上涌进入海洋的重要形式,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍较高。海底观测发现海底热液活动正在喷出大量 Fe、Mn、Cu、Ni、Co、 CH_4 、 ^3He 等成矿物质,一部分成矿物质在喷口附近沉淀形成海底黑烟囱,海底硫化物和铁锰氧化物(结壳),另一部分成矿物质随洋流漂移至远处沉淀。Lupton^[7]研究了太平洋海水的氦同位素组成和变化规律,发现太平洋深部海水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常是由东太平洋中脊热液活动、地幔氦的注入引起的。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常由太平洋中脊向西随海流漂移了数千公里。随着远离热液活动中心,异常幅度逐渐减小。另外,我们还对马里亚那海槽、冲绳海槽热液烟囱和海底硫化物的氦同位素进行了研究, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.36 \times 10^{-5} \sim 15.5 \times 10^{-5}$ 。即太平洋中部 CC 区多金属结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$

比值与海底热液、海底黑烟囱和海底硫化物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值基本一致,这说明结核的氦同位素异常可能是由海底热液活动造成的,成矿物质主要来源于海底热液。

宇宙尘是引起海底多金属结核氦同位素异常的另一个可能原因。宇宙尘含有丰富的氦, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值很高,少量宇宙尘的加入即可引起明显的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常。Ozima^[3]、Amari^[1]、Fukumoto^[2]等先后对深海沉积物的氦同位素进行了研究,发现其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常高(为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$),特别是磁性部分的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍高达 $n \times 10^{-4}$, ^4He 含量较非磁性部分高2个数量级。另外深海沉积物的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 、 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值也存在明显的异常^[1,2],具有太阳风的特征。他们认为深海沉积物的氦同位素异常是由宇宙尘(IDPs)引起的,这些宇宙尘颗粒细小,约几十微米,在穿过大气圈落入海洋过程中未被明显加热,所含惰性气体很少丢失。深海沉积物与海底多金属结核的形成环境相同,氦同位素组成相似。二者的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值异常应具有相同的成因。Ozima^[3]还发现深海沉积物的 ^3He 含量和沉积速率具有明显的反相关关系,沉积速率越慢, ^3He 含量越高;反之,沉积速率越快, ^3He 含量越低。Marcantonio^[4]对一长379 m的深海沉积柱的 ^3He 含量和 ^{230}Th 的放射性进行了系统的对比研究,发现二者的变化规律非常一致,提出可根据沉积物的 ^3He 含量计算沉积物的沉积速率。海底多金属结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与沉积物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值非常相似,这表明沉积物的沉积速率与结核的生长速率基本一致,这可能是多金属结核未被埋藏的根本原因。

海底多金属结核的氦同位素异常到底是海底热液成因的,还是宇宙尘成因的,我们正在做进一步的研究。无论何种原因引起的异常,都对从不同的侧面认识结核成因具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Amari S and Ozima M. Search for origin of exotic helium in deep-sea sediments. *Nature* 1985, 317: 520~522.
- 2 Fukumoto H, Nagao K and Matsuda J. Noble gas studies on the host phase of high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, 50: 2245~2253.
- 3 Ozima M, Takayanagi M, Zashu S et al. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio in ocean sediments. *Nature*, 1984, 311: 448~450.
- 4 Marcantonio F, Kumar N, Stute M et al. A comparative study of accumulation rates derived by He and Th isotope analysis of marine sediments. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1995, 133: 549~555.
- 5 Hiyagon H. Retention of Solar helium and neon in IDPs in deep sea sediment. *Science*, 1994, 263: 1257~1259.
- 6 Nier A O, Schlutter D J. Extraction of helium from individual interplanetary dust particles by step-heating. *Meteoritics*, 1992, 27: 166~173.
- 7 Lupton J E, Craig H. A major ^3He source on the East Pacific rise. *Science*, 1981, 214: 13~18.
- 8 Ануфриев Г С, Болтенков Б С, Капитонов И Н. Изотопы гелия и неона в железомарганцевых конкрециях из рудной провинции Кларифон-Клиппертон XIV Симпозиум по геохимии изотопов, Москва, 1995, 9~10.