

# 南海铁锰结核(壳)的稀土元素地球化学\*

鲍根德 李全兴

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**提要** 于 1987 年 5—6 月间, 中、西德在南海进行地球科学调查, 获得 5 个铁锰结壳、6 个铁锰结核样品。本文在利用 X 荧光法测定 15 个稀土元素的基础上, 对南海铁锰结核(壳)的稀土丰度、配分模式与伴生元素的关系以及稀土的来源作了较为详细的探讨。研究表明, 南海铁锰结核(壳)的平均丰度为  $1.625 \times 10^{-6}$ , 铁锰结核为  $2.167 \times 10^{-6}$ , 分别要比太平洋结核高 1—2 倍, 比太平洋北部沉积物高 3—4 倍, 比南海沉积物高 10—20 倍; 结核和结壳的稀土经球粒陨石标准化后的配分模式基本相同, Ce 正异常, Eu 亏损不明显; 与伴生元素、沉积物及岩石稀土对比研究表明, 结核(壳)中稀土主要来自南海中酸性岩类风化、淋漓后缓慢沉积。

**关键词** 铁锰结核 结壳 稀土元素 中国南海

南海是世界上成因最复杂的边缘海之一。有关其地质、生物、水文气象、化学等专题调查和综合调查, 国内外均已做了不少工作, 并发表了许多报告和专题论文。然而, 由于大量的发现铁锰结核(壳)是近几年的事, 因而对于南海铁锰结核(壳)的稀土元素地球化学的详细研究尚为少见。

为开展对南海铁锰结核(壳)的地球化学、形成机制及生成环境研究, 1987 年 5—6 月间国家海洋局第二海洋研究所和联邦德国地球科学与自然科学资源研究所共同利用“太阳”号科学考察船在我国南海进行了联合调查, 对用垂锤岩石拖网 (dreget dregehammer) 和圆筒状岩石拖网 (pipe drege) 采集岩石样品时收集的铁锰结核和铁锰结壳, 用 X 荧光光谱法测定了 15 个稀土元素, 并与太平洋北部铁锰结核、沉积物、岩石和南海沉积物、岩石中的稀土资料作对比研究, 详细探讨了南海铁锰结核(壳)稀土元素的地球化学。同时, 为探讨结核(壳)不同层次上稀土元素含量变化, 分别取 KD35 站一个结核和 KD17 站一个结壳进行剖面上的详细分析。

## 1 铁锰结核(壳)及稀土元素丰度

拖网站位及其具体情况见表 1。

在 KD17, KD21, KD29 站上采集到的结壳主要为平板状, 底部较平滑, 一般与所依托的岩石表面相一致。三个侧面为断裂面, 表面凹凸不平, 有一个侧面表现为斜面, 其上面覆盖了一层黑色铁锰结皮, 上薄下厚, 上层仅几毫米, 表面鲕状结构明显。铁锰结核主要为球状、椭球状、扁平状和不规则状等。这与 Moritani (1977) 报道的和我国在太平洋北部多次采集到的结核形状差不多(国家海洋局第二海洋研究所, 1989)。球状结核

\* 赖来仁同志完成样品分析, 谨志谢意。

收稿日期: 1990 年 3 月 21 日; 接受日期: 1992 年 9 月 22 日。

表 1 取样站位  
Tab. 1 Sampling stations

站 位	水深 (m)	取样 个数	地 理 位 置		结核 (壳)	Mn/Fe <sup>1)</sup>	Fe(% <sup>1)</sup> )	Mn(% <sup>1)</sup> )
			N	W				
KD17	2 470	3	18°54'	115°21'	结壳	0.90	17.74	15.98
KD18	3 400	2	28°28'	115°21'	结核	0.85	18.42	15.73
KD20	1 070	1	17°01'	115°24'	结核	1.12	18.14	20.26
KD21	2 170	1	16°56'	114°23'	结壳	0.97	18.67	18.12
KD35	1 500	2	17°10'	113°03'	结核	1.14	16.99	19.37
KD23	1 400	1	16°46'	114°36'	结核	0.95	17.32	16.52
KD29	1 250	1	16°04'	114°58'	结壳	0.76	20.39	15.51

1) 分别取自样品的平均值。

较小,表面较光滑。椭球状结核个体较大,大多表面光滑,个别表面粗糙。扁平状结核往往是大结核遭到破坏后形成的,在破碎结核碎片上再次成长,表面较光滑。不规则状结核,如锥状结核,表面同球状差不多。总体而言,南海铁锰结核(壳)形状没有像大洋铁锰结核(壳)多,表面一般比太平洋结核(壳)光滑。表 2 是所研究结核(壳)样品中稀土元素分析及其与太平洋北部铁锰结核、沉积物和南海中部沉积物及与结核(壳)伴生的岩石中稀土比较结果。

从表 2 中可见,稀土元素总量,南海铁锰结核比结壳高,然而南海结核(壳)比太平洋北部高一倍以上(国家海洋局第二海洋研究所);比太平洋北部沉积物高 3 倍以上,比南海沉积物则高 10 多倍(古森昌等,1989)。从南海结核(壳)本身比较来看,其共性是铈族稀土( $\Sigma\text{Ce}$ )均一致地显著大于钇族稀土( $\Sigma\text{Y}$ )。这与太平洋北部铁锰结核、沉积物,南海沉积物、岩石较为一致,表现其陆壳稀土元素的典型特征。不同的是南海铁锰结核中轻稀土的富集程度比结壳大,其  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  与南海花岗岩接近,与沉积物相差甚远。这表明南海铁锰结核(壳)中的稀土可能与南海中酸性岩类岩石具有某种内在联系。

表 3 是 KD17 结壳和 KD35 结核不同层次上稀土的测定结果。从表中数据可以看出:① KD17 结壳和 KD35 结核各层次中  $\Sigma\text{Ce}$  明显的比  $\Sigma\text{Y}$  富集。② KD17  $\Sigma\text{REE}$  显示两头高中间低的趋势,即由表向里减少,然后又由里向底升高。而 KD35 站结核中  $\Sigma\text{REE}$  则相反,显示中心高两头低的趋势。以上结核(壳)中  $\Sigma\text{Ce}$ ,  $\Sigma\text{Y}$ ,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  均为上述趋势,且  $\Sigma\text{Ce}$  是  $\Sigma\text{Y}$  4 倍左右,接近中国大陆架沉积物中稀土的比例(赵一阳等,1990)。③ 无论是结核还是结壳,各层次上  $\Sigma\text{REE}$  最高与最低含量相差三分之一以上,前者变化范围在  $1880.2 \times 10^{-6} - 2526.3 \times 10^{-6}$ ,后者在  $1583.5 \times 10^{-6} - 2566.5 \times 10^{-6}$  之间。上述结果表明,结核(壳)在形成、生长过程中,或是稀土元素的来源可能随着南海环境的变迁,存在着某种差异,或是结核(壳)中包裹着的岩石或其它与结核(壳)成分不同的物质使  $\Sigma\text{REE}$  含量波动。

## 2 结核(壳)中稀土元素配分模式

从图 1 (a), (b) 中可见,南海铁锰结壳和结核的稀土配分曲线极为相似,其主要特征为负斜率,即相对富集轻稀土; Ce 明显的正异常, Eu 亏损不明显,且其配分曲线较

表 2 南海铁锰结核(壳)中稀土含量( $\times 10^{-6}$ )  
Tab. 2 Concentration of rare earth elements in ferromanganese nodules (crusts) of the South China Sea

样品	样品数	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ Ce	$\Sigma$ Y	$\Sigma$ Ce/ $\Sigma$ Y	资料来源
南海 铁锰结核壳	5	165.80	917.00	41.00	132.60	44.00	12.76	48.00	9.74	53.00	7.30	22.12	5.44	19.60	4.98	141.80	1625.14	1313.16	311.98	4.21	本文
南海 铁锰结核	6	233.00	1315.50	52.83	170.50	52.83	13.95	55.83	7.65	59.00	5.82	22.00	4.95	19.00	4.87	149.17	2166.90	1838.61	328.29	5.60	本文
太平洋 铁锰结核	5	120.54	383.66	38.39	124.45	31.75	7.72	30.27	5.24	29.33	5.35	15.26	2.40	14.87	2.24	112.99	924.46	706.51	217.95	3.24	(Courtois, 1980)
太平洋锰 结核区沉 积物	1	87.06	134.57	23.65	99.37	31.22	6.03	25.90	4.27	25.23	5.11	14.26	2.27	13.18	2.13	158.02	632.27	381.90	250.37	1.53	(国家海洋局第 二海洋研究所, 1989)
南海 沉积物	53	28.63	55.80	6.31	22.65	4.71	1.09	4.27	0.68	4.00	0.82	2.43	0.34	2.18	0.43	21.81	156.15	119.19	36.96	3.22	(古森昌等, 1989)
南海 花岗岩	1	18.01	84.36	3.35	11.10	1.69	0.92	0.66	0.06	1.13	0.03	0.44	0	0.24	8.12	13.00	143.11	119.43	23.68	5.04	本文
南海 辉长岩	1	27.00	101.26	7.97	38.03	10.90	9.29	10.56	2.74	13.87	6.94	7.91	1.82	6.67	2.31	47.95	295.22	194.45	100.77	1.93	本文

表 3 不同层次铁锰结核(壳)稀土含量分析结果 ( $\times 10^{-6}$ )<sup>1)</sup>

Tab. 3 Concentration of rare earth elements in different layers of ferromanganese nodules (crusts) of the South China Sea

层次 (KD17)	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ Ce	$\Sigma$ Y	$\Sigma$ Ce/ $\Sigma$ Y
1	2 444.30	1 986.00	458.30	4.33
2	1 986.90	1 553.60	433.30	3.59
3	2 055.10	1 625.50	428.60	3.79
4	1 987.30	1 536.00	451.30	3.40
5	2 026.20	1 562.00	464.20	3.36
6	1 880.20	1 520.50	359.70	4.23
7	2 316.20	1 890.00	426.20	4.43
8	2 298.70	1 847.00	451.70	4.09
9	2 526.30	2 040.00	486.30	4.19
10	2 480.10	2 013.00	467.10	4.31
层次 (KD35)	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ Ce	$\Sigma$ Y	$\Sigma$ Ce/ $\Sigma$ Y
1	1 583.50	1 257.50	326.00	3.86
2	1 681.90	1 385.00	296.90	4.66
3	2 137.80	1 759.00	378.80	4.64
4	2 119.10	1 672.00	447.10	3.74
5	2 130.90	1 711.00	419.90	4.07
6	2 566.50	2 225.90	341.50	6.52
7	2 440.60	2 096.00	344.60	6.08
8	2 199.70	1 716.00	483.70	3.55
9	1 780.00	1 411.40	368.60	3.83
10	2 369.70	2 03.80	331.70	6.14

1) KD17 站为铁锰结壳, KD35 站为铁锰结核。

明显的平缓,与太平洋北部结核(图 1 (c))和南部中部、太平洋北部沉积物(图 1 (d))中稀土配分曲线明显不同。这表明南海铁锰结核(壳)遭受海水的作用比太平洋北部大,而太平洋北部铁锰结核遭受成岩作用比南海结核(壳)大(Elderfield, et al., 1981)。这显然与南海结核(壳)所处的独特沉积环境有关(国家海洋局第二海洋所,1989)。

KD17 结壳和 KD35 结核各层稀土经球粒陨石标准化后的配分曲线表明,各层的稀土配分曲线几乎相同,Ce 呈明显的正异常, Eu 呈不同程度的负异常。这表明,尽管从表 3  $\Sigma$ REE 的总量有一定的差异,但在结核(壳)的形成、生长过程中,稀土的来源几乎是相同的。

### 3 结核(壳)中稀土元素来源

**3.1 吸附型稀土回收试验** 分别于 NaCl 和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  溶液浸取 KD 17 结壳及 KD35 结核,结果其吸附型稀土含量为 0.096%,接近华南地区广泛存在花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床(工业利用品位为 0.1%)。由于样品在碎石碎样制备过程中起变化,引起离子吸附相降低,因而南海结核(壳)中吸附型稀土实际含量为  $>0.096\%$ 。这表明南海结核(壳)中稀土主要是呈离子形式被吸附,而不是以类质同象形式存在于粘土矿物的晶

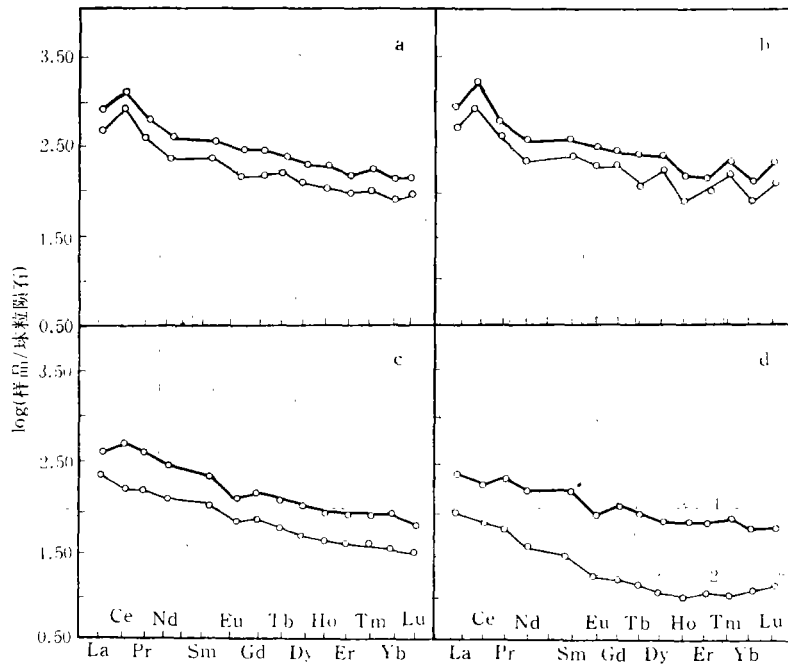


图1 铁锰结核(壳)稀土元素配分模式

Fig. 1 REE partitions of ferromanganese nodules (crusts) and rare earth elements of the South China Sea

a 结壳; b 结核; c 太平洋结核; d 太平洋(1)和南海(2)沉积物。

格之中,这一结果与太平洋北部和南海中部及中国陆架沉积物中稀土存在形式完全不同(古森昌等,1989;国家海洋局第二海洋研究所,1989;赵一阳等,1990),表明南海结核(壳)中的稀土主要来自成核(壳)物质从海水中的吸附。

**3.2 铁锰结核(壳)中稀土与伴生元素的关系** 纵观图2,不难发现,无论是重稀土( $\Sigma Ce$ ),还是轻稀土( $\Sigma Y$ ),均与铁锰结核(壳)中 Fe, Mn 呈较明显的正相关。这表明,结核(壳)中稀土元素可能与结核(壳)中 Fe, Mn 的来源相似。大量的研究资料已经证实,无论何种类型,任何环境下生长的结壳,其物质来源主要来自上覆水的缓慢沉积,即可溶性  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  氧化物水化物的沉淀(鲍根德,1991; Courtois, et al., 1980)。因为有关的地球化学实验已经证实,从海底火山物质中淋溶出来的 Fe, Mn 等金属离子,由于其携带溶液与新鲜海水的作用,而使  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  发生氧化,然后围绕一定的核心缓慢沉积下来,这种混合液往往呈胶体,因而造成结核的环状带构造。同时, Fe, Mn 氧化物水化物的沉淀也促进了稀土的水解,由于  $MnO_2$  的形成促使了  $Ce^{4+}$  向转化,因  $Ce^{4+}$  最易沉淀(王贤觉等,1984),导致结核(壳)中 Ce 呈正异常(图1(a),(b))。因此,作者认为,南海铁锰结核(壳)中稀土的沉积,水体中 Fe, Mn 氧化物的水化物既是稀土水解的催化剂,又是沉淀时载体,致使结核(壳)中 Fe, Mn 与  $\Sigma REE$ ,  $\Sigma Ce$ ,  $\Sigma Y$  呈正相关(图2)。也正是由于南海结核(壳)主要由  $2.45 \text{ \AA}$ ,  $1.42 \text{ \AA}$  的 Fe, Mn 氧化物水化物组成的  $\delta\text{-MnO}_2$  矿组成,而太平洋北部铁锰结核主要由  $10 \text{ \AA}$  水锰矿(钡镁锰矿)组成(鲍根德等, 1991),

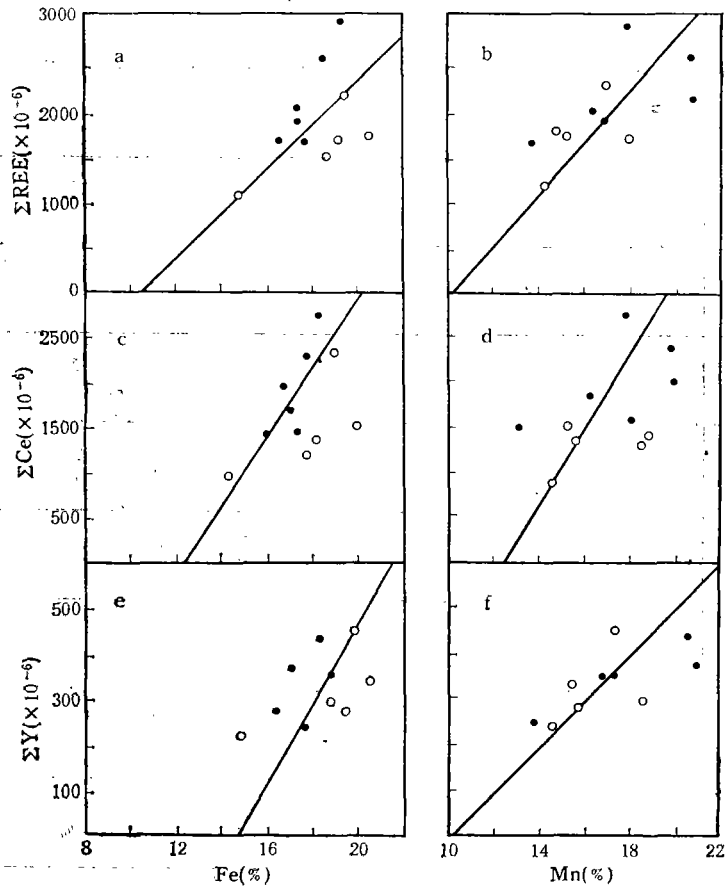


图 2 结核(壳)中稀土 Fe, Mn 的关系

Fig. 2 Relationship between rare earth elements and Fe, Mn in nodules and crusts of the South China Sea

a  $\Sigma\text{REE} = -497.07 + 133.92 \text{ Fe}$ ,  $r = 0.40$ ; b  $\Sigma\text{REE} = -506.67 + 141.61 \text{ Mn}$ ,  $r = 0.58$ ; c  $\Sigma\text{Ce} = -373.41 + 109.31 \text{ Fe}$ ,  $r = 0.36$ ; d  $\Sigma\text{Ce} = -426.46 + 118.21 \text{ Mn}$ ,  $r = 0.54$ ; e  $\Sigma\text{Y} = -140.99 + 25.59 \text{ Fe}$ ,  $r = 0.52$ ; f  $\Sigma\text{Y} = -80.28 + 23.41 \text{ Mn}$ ,  $r = 0.66$ 。●为结核; ○为结壳。

从而结核中稀土含量比太平洋北部铁锰结核高得多(表 2)。

笔者用最小二乘法计算得出的铁锰结核(壳)中稀土与某些主要和微量元素的关系(表 4)。结果亦阐明了南海结核(壳)中稀土元素来自上覆水的缓慢沉积。因为就元素地球化学个性来说, Al 是“惰性”元素, 一般情况下主要存在于碎屑沉积中 (Zhao Yiyang, 1985), 结核(壳)中 Al 主要可能来自被包裹着的岩石碎屑中, 从而与稀土呈负相关 ( $r = -0.54$ )。而结核(壳)中 Co, 由于其较高的氧化还原电位 ( $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+} = 1.84$ ), 在水体较  $\text{Mn}^{2+}$  更稳定的存在, 可以随着某些“载体”的吸附而沉降(鲍根德, 1990), 从而与稀土呈强烈的正相关 ( $r = 0.85$ )。

**3.3 铁锰结核(壳)中稀土与岩石、沉积物的关系** 为查明南海水体中稀土元素的来源, 而绘制出南海结核(壳)中稀土元素与岩石、沉积太平洋北部铁锰结核的关系图 3—图

表 4 南海铁锰结核(壳)中元素间相关系数矩阵  
 Tab. 4 Relationship between rare earth elements and associated elements nodules (crusts) of the South China Sea

	ΣREE	ΣCe	ΣY	Fe	Mn	Ti	Sr	Ca	Cu	Co	Ni	Ba	V	K	Na	P	Al
ΣREE	1.00																
ΣCe	0.99	1.00															
ΣY	0.72	0.64	1.00														
Fe	0.40	0.36	0.52	1.00													
Mn	0.58	0.54	0.66	0.04	1.00												
Ti	0.43	0.48	0.01	0.22	-0.02	1.00											
Sr	-0.116	-0.13	0.03	0.06	0.34	0.07	1.00										
Ca	0.24	0.25	0.08	0.04	0.18	0.78	0.22	1.00									
Cu	0.22	0.26	-0.06	-0.23	0.70	0.06	-0.21	-0.13	1.00								
Co	0.85	0.85	0.64	0.17	0.70	0.56	0.04	0.62	-0.02	1.00							
Ni	-0.31	-0.30	-0.26	-0.21	-0.06	0.37	-0.08	0.47	-0.17	0.01	1.00						
Ba	-0.05	-0.05	-0.06	-0.43	0.51	-0.34	-0.02	-0.17	0.06	0.13	-0.85	1.00					
V	0.12	0.09	0.26	-0.21	0.19	0.02	0.01	0.51	-0.21	0.42	-0.13	-0.12	1.00				
K	-0.43	-0.37	-0.67	-0.47	-0.44	0.38	0.05	0.18	0.31	-0.29	0.40	-0.17	-0.33	1.00			
Na	0.35	0.35	0.46	0.16	-0.06	0.84	-0.11	0.75	-0.07	0.49	0.34	-0.58	0.44	0.30	1.00		
P	0.39	0.38	0.39	0.23	0.08	0.47	-0.43	0.50	-0.44	0.54	0.44	-0.03	0.37	-0.32	-0.13	1.00	
Al	-0.59	-0.54	-0.54	-0.38	-0.73	0.09	-0.24	-0.25	0.25	-0.61	0.24	-0.27	-0.10	0.88	0.14	-0.32	1.00

5。

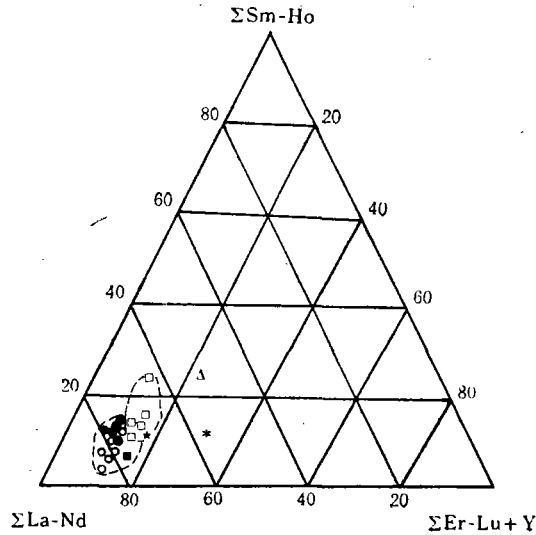


图 3 稀土元素三组分图解

Fig. 3  $\Sigma\text{Sm-Ho}-\Sigma\text{La-Nd}-\Sigma\text{Y-Lu+Y}$  diagram of the South China Sea

●为南海铁锰结核壳;○为南海铁锰结核;■为南海花岗岩;△为南海辉长岩;☆为南海沉积物;□为太平洋北部铁锰结核;\*为太平洋北部沉积物。

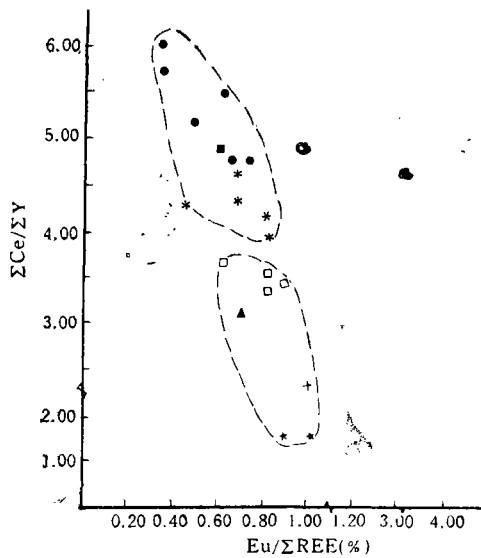


图 4 结核(壳)、沉积物及岩石中  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  与  $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}(\%)$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  and  $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}(\%)$  in nodules (crusts) of the South China Sea

●为南海铁锰结核;☆为南海铁锰结核壳;■为南海花岗岩;▲为南海沉积物;△为南海辉长岩;□为太平洋北部结核 ( $\text{Mn}/\text{Fe}>2.00$ ); +为太平洋北部结核 ( $\text{Mn}/\text{Fe}<1.50$ ); ★为太平洋北部沉积物。



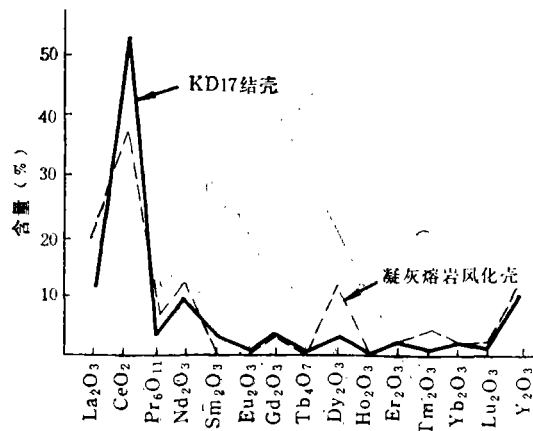


图5 南海结核(壳)与江西凝灰熔岩的关系(据李全兴等资料)

Fig. 5 Relationship between nodules (crusts) of the South China Sea and volcanic rock of Jiangxi Province (by Li Quanxing)

由图3可见,南海结核(壳)比太平洋北部结核处于更富 $\Sigma\text{La-Nd}$ , 贫 $\Sigma\text{Sm-Ho}$ 区域,与同一拖网所取得的花岗岩同处一个区域。为进一步说明其富 $\Sigma\text{La-Nd}$ 的程度,图4清楚可见,尽管南海结核(壳)和太平洋北部结核同处在富 $\Sigma\text{Ce}$ , 贫 $\text{Eu}$ 区( $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}\% < 1.00$ ),但南海结核(壳)中 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 比太平洋北部结核高得多。前者绝大多数 $> 4.50$ ,同样与南海花岗岩同属一个区域,后者绝大多数 $< 3.00$ ,与南海、太平洋北部铁锰结核富集区沉积物相接近。图3、图4的结果既说明了南海结核(壳)中稀土不可能与沉积物来源相同,同时又进一步证实了来自南海的中酸性岩类。

如果把南海结核(壳)中稀土氧化物总量定为100%,把各氧化物与总量之比同火山喷发物风化壳比较,其稀土配分曲线与江西某地的凝灰岩风化壳稀土配分曲线相类似(图5)。这表明南海铁锰结核(壳)中稀土可能主要来自火山喷发物的淋漓。上述结果与结核(壳)的化学分析结果表明,结核(壳)中 $\text{K/Rb}$ 较小,变化在10—223之间,绝大多数在100左右,同时铁族元素 $\text{Ni}$ ,  $\text{V}$ 和 $\text{SiO}_2$ 含量呈负相关是一致的<sup>1)</sup>。同样与南海磁力和沉积物调查表明,铁锰结核(壳)富集地区的构造部位与较大的断裂带,如南海北部陆坡下部,中沙四周,中、西沙之间等相吻合(国家海洋局第二海洋研究所,1989)。

#### 4 结语

南海铁锰结核(壳)中稀土含量比太平洋北部铁锰结核高1倍以上,比太平洋北部铁锰结核富集区沉积物高3倍以上,其稀土主要以离子吸附型形式存在。

南海铁锰结核(壳)中稀土配分模式基本相同,富轻稀土,负斜率,明显的 $\text{Ce}$ 正异常 $\text{Eu}$ 亏损不明显。

南海铁锰结核(壳)中稀土元素的来源,主要为陆源中酸性岩石风化、淋漓和沉积。

1) 李全兴等,南海铁锰结核(壳)及其意义。

## 参 考 文 献

- 王贤觉等, 1984, 铁锰结核的稀土和微量元素地球化学及其成因, *海洋与湖沼*, **15**(6): 501—514。
- 古森昌等, 1989, 南海表层沉积物稀土元素的地球化学, *热带海洋*, **8**(2): 93—101。
- 国家海洋局第二海洋研究所, 1989, 太平洋锰结核资源调查报告(1985—1986), 海洋出版社, 77—84。
- 国家海洋局第二海洋研究所, 1989, 南海地球科学研究报告, *东海海洋*, **7**(4): 10—29。
- 赵一阳等, 1990, 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素, *沉积学报*, **8**(1): 37—43。
- 鲍根德, 1991, 控制铁锰结核地球化学特征的主导因素研究 II. 不同 Mn/Fe 结核的形成机制, *中国科学*, **9**: 970—978。
- 鲍根德, 1990, 铁锰结核中重金属的含量分布特征、来源及其与沉积环境的关系, *海洋与湖沼*, **21**(4): 364—373。
- 鲍根德等, 1991, 铁锰结核的红外光谱分析及其意义, *海洋学报*, **13**(6): 862—873。
- Courtois, C. and Clauer, N., 1980, Rare earth elements and strontium isotopes of polymetallic nodules from Southeastern Pacific Ocean. *Sedimentology*, **27**(6): 687—695。
- Elderfield, H. et al., 1981, Negative cerium anomalies in the rare earth elements pattern of oceanic ferromanganese nodules. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **55**(1): 163—170。
- Moritani, T. et al., 1977, Description, classification and distribution of manganese nodules. *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, **8**: 136—158。
- Zhao Yiyang, 1985, Some geochemical patterns of shelf sediments of the China Sea, *J. Chin. Oceanol. Limnol.*, **3**(2): 200—211。

## GEOCHEMISTRY OF RARE EARTH ELEMENTS IN FERROMANGANESE NODULES (CRUSTS) OF THE SOUTH CHINA SEA

Bao Gende Li Quanxing

(Second Institute of Oceanography, SOA, Huangzhou 310012)

### ABSTRACT

Five ferromanganese crusts and 6 ferromanganese nodules samples collected by the Joint Chinese-West Germany Geophysical Investigation Team in May—June, 1987 were analyzed for their rare earth element contents by means of X-Ray fluorescent spectrometry. On the basis of study of 15 rare earth elements detected, the relationship among rare earth element concentration, source, as well as distribution pattern and associated elements was discussed in detail. Results show that 1) The average concentration of rare earth elements in South China Sea ferromanganese crusts and nodules was  $1.625 \times 10^{-6}$  and  $2.167 \times 10^{-6}$  respectively. This concentration is 1—2 times higher than that in Pacific ferromanganese nodules, 5—6 times higher than that in North Pacific sediments, and 10—20 times higher than that in South China Sea sediments. 2) Distribution pattern of rare earth elements in ferromanganese nodules and crusts are basically the same. Ce is positively abnormal and Eu deficit is not obvious. Results of comparative study of associated elements, sediments, and rare earth elements of rocks show that rare earth elements in ferromanganese nodules and crusts were deposited mainly in South China Sea medium-acidic rocks after they had undergone weathering and wetting.

**Key words** Ferromanganese nodule Crust Rare earth element South China Sea