

锰结核生长与沉积环境的关系

罗尚德 王蕾 黄奕普

(厦门大学海洋系)

提要 本文收集了48组世界大洋各种沉积环境锰结核化学组成和生长速率数据并计算了它们的铁锰通量;讨论了不同环境的锰结核的铁锰含量之间的关系,以及锰通量与铁通量、Mn/Fe比的相关性;导出了由锰结核铁锰含量计算生长速率的经验关系;从本质上揭示了锰结核化学组成、生长速率与沉积环境的内在联系,为探讨锰结核形成机理提供了有力的依据。

关键词 锰结核 沉积环境 化学组成 生长速率

第一作者简介 罗尚德 男 29岁 博士研究生 海洋化学

人们很早就注意到大洋各处锰结核化学组成存在很大的差异。近年来又发现锰结核生长速率与形成环境密切相关,例如, Huh 和 Ku (1984) 测定北太平洋三个 MANOP (“锰结核计划”) 锰结核生长速率分别为 R 区域 (红粘土环境): $1-2\text{mm}/10^6\text{yr}$; S 区域 (硅质软泥环境): $3-8\text{mm}/10^6\text{yr}$; H 区域 (半远洋环境): $20-50\text{mm}/10^6\text{yr}$ 。那么锰结核化学组成的差异与生长速率的变化有没有内在的联系呢? 搞清楚这个问题不仅可以从本质上认识锰结核形成过程对其化学组成和生长速率的控制作用,从理论上探讨锰结核的形成机制,而且对于开发深海锰结核资源,比如根据沉积环境判断有否开采价值的锰结核的产状,也具有一定的指导意义。

一、 锰结核铁、锰含量的变化特征与沉积环境的关系

为了探讨锰结核的铁锰含量与生长速率的关系,笔者收集了36组大洋各处锰结核样品铁锰含量和生长速率的数据,加上笔者最近研究中获得的12组数据,按下式计算锰结核锰、铁通量。

$$\left. \begin{aligned} F_{Mn} &= \rho \cdot [Mn] \cdot S \\ F_{Fe} &= \rho \cdot [Fe] \cdot S \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 F_{Mn} 和 F_{Fe} 分别代表锰结核的锰、铁通量 ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 10^6\text{yr}$); $[Mn][Fe]$ 为锰结核的锰、铁含量 (wt%); S 为锰结核生长速率 ($\text{mm}/10^6\text{yr}$); ρ 为锰结核平均密度 ($1.96\text{g}/\text{cm}^3$)。

由表1可以发现,各大洋锰结核有两个明显的特征:一是化学组成变化幅度大,如锰:11.3-44.9%;铁:0.724-20.5%;锰/铁比值:0.8-62。而且当锰含量增大,铁含量则降低;二是生长速率变化大,实测生长速率的范围是0.8-200 $\text{mm}/10^6\text{yr}$ 。一般说来,生长速率大者,锰含量高,铁含量低,即锰/铁比值大。但有趣的是,所计算的锰结核铁锰通量表明,尽管其化学组成和生长速率变化很大,但铁通量变化不大 ($10-10^2\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 10^6\text{yr}$ 数

表 1. 锰结核 Mn、Fe 含量 (wt%) 与通量 F ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 10^6\text{yr}$) 以及生长速率 S ($\text{mm}/10^6\text{yr}$)
 Table 1 The contents (wt.%) and fluxes ($\text{mg}/\text{cm}^2 10^6 \text{yr}$) of Mn and Fe and growth rates ($\text{mm}/10^6\text{yr}$) of manganese nodules

样品号	Mn (%)	Fe (%)	Mn/Fe	F_{Mn}	F_{Fe}	S_{m}	S_{c}	S'_{c}	S''_{c}
罗尚德 (1985)									
M6A-T	17.9	15.5	1.16	53.6	46.5	1.5	2.0	1.4*	1.7
M10A-T	26.0	19.4	1.34	228.8	170.5	4.4	1.8	1.1	1.6
M20A-T	16.1	18.2	0.88	57.9	65.8	1.8	1.3	1.3	1.2
M21A-T	16.5	19.1	0.86	26.4	30.5	0.8	1.1	1.0	1.2
M21A-B	16.2	16.3	1.00	74.7	75.1	2.3	1.7	2.6	1.4
王蕾 (1986)									
M7B-T	13.7	13.1	1.05	41.1	39.3	1.5	2.1	1.6	1.7
M10B-T	15.5	15.5	1.00	93.1	93.1	3.0	1.7	2.7	1.5
M10B-B	13.4	14.4	0.93	48.2	51.8	1.8	1.7	2.1	1.4
M15B-T	18.3	9.3	1.94	148.2	76.3	4.1	4.6	4.2	4.0
M15B-B	11.3	10.0	1.13	47.5	42.0	2.1	2.9	2.4	2.3
M20B-T	16.2	13.9	1.17	32.4	27.2	1.0	2.0	1.7	1.9
M20B-B	16.4	13.4	1.24	39.4	32.2	1.2	2.4	1.8	2.0
Krishnaswami and Lal (1972)									
TF-21	18.6	20.0	0.93	37.2	40.0	1.0	1.2	1.4	1.2
2P-50	18.0	20.5	0.88	36.0	41.0	1.0	1.1	1.1	1.2
2P-52	27.8	4.9	5.67	425.3	75.0	7.3	14.6	18.4	19.0
Dodo-9D	39.8	20.4	1.95	167.2	85.7	2.1	2.1	1.5	1.9
6A	25.4	9.4	2.75	211.6	77.1	4.1	5.6	5.4	5.1
Zetes-30	26.5	17.4	1.52	106.0	69.6	2.0	2.1	1.5	1.8
Pacific av.	25	14	1.79	150.0	84.0	3	3.0	2.4	2.5
Somanajulu et al. (1971)									
Wahine 24F-8									
	24.9	7.31	3.40	492.8	144.7	9.9	8.0	8.4	7.9
	25.6	6.20	4.14	512.6	124.0	10.0	10.3	11.6	11.1
	26.7	6.57	4.09	588.1	144.5	11.0	9.7	10.9	10.3
Heye and Marchin (1977)									
KUC-54	18.0	1.73	10.40	1501.2	144.3	41.7	49.9	37.1	96.7
KUC-54 (2)	22.2	6.0	3.70	399.6	108.0	8-10	10.0	11.0	10.3
KUC-77	18.8	8.9	2.11	150-263	71-125	4-7	5.1	4.7	4.0
KUC-144	24.5	5.7	4.30	490-588	114-137	10-2	11.2	13.0	12.5
KUC-155	23.6	5.48	4.31	259.6	97.9	5.5	11.6	13.6	13.0
Reyss et al. (1982)									
278DK	43.0	0.78	55.1	14448	262.1	168	176.9	173.7	1131.3
Vulcan-I-37BC (Finney et al. (1984))									
T (1)	44.9	0.724	62.0	17960	289.6	200	199.3	194.6	1371.0
B (2)	42.5	1.66	25.6	4250	166.0	50	67.7	54.3	247.2
T	36.7	3.05	12.0	4037	335.5	55	30.0	50.0	63.8
7601-20-2 (Moore et al. (1981))									
T	27.8	5.31	5.27	911.5	173.1	16.3	13.2	16.3	16.2
B	22.1	9.25	2.39	222.5	93.1	5.03	5.3	5.0	4.6
SCHW-1D (Kusakabe and Ku (1984))									
	17.2	19.3	0.89	51.6	57.9	1.8	1.3	1.3	1.2

* S_{c} 、 S'_{c} 、 S''_{c} ——分别为本研究、王蕾 (1986)²和 Lyle¹⁵ (1982) 的公式所计算的生长速率值, 而 S_{m} 为测定值。
 王蕾 (1986) 提出的生长速率计算公式为:

$$L\text{型: } S'_{\text{c}} (\text{mm}/10^6\text{yr}) = 45.5 \frac{(Mn/Fe)^3}{[Mn]} - 0.25$$

$$M\text{型: } S'_{\text{c}} (\text{mm}/10^6\text{yr}) = 30.06 \frac{(Mn/Fe)^{1.66}}{[Mn]} - 0.80$$

$$H\text{型: } S'_{\text{c}} (\text{mm}/10^6\text{yr}) = 70.68 \frac{(Mn/Fe)^{1.20}}{[Mn]} - 28.24$$

Lyle (1982) 提出的生长速率计算公式为:

$$S'_{\text{c}} (\text{mm}/10^6\text{yr}) = 16.0 ([Mn]/[Fe]^2) + 0.448$$

量级)，而锰通量差别悬殊 ($10-10^4 \text{mg/cm}^2 \cdot 10^6 \text{yr}$ 数量级)，这说明在锰结核形成过程中锰相对于铁具有较高的成岩活性。在深海沉积物中，由于氧化剂的消耗，氧化还原电位随深度减小，固态 Mn^{4+} 和 Fe^{3+} 被还原为易溶的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 离子，并通过间隙水向上扩散迁移。由于 Fe^{2+} 比 Mn^{2+} 易被氧化，所以标志 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}$ 氧化还原界面的深度（通常是沉积物由红棕色转变为灰绿色处）是在 $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{2+}$ 氧化还原界面之下。大多数深海沉积物由于近表层是红棕色粘土而表明是被充分氧化的，即 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}$ 氧化还原界面一般位于沉积物-海水界面以下，因而铁在沉积物近表层的成岩再迁移性比锰小得多。这就说明锰结核中铁通量

比较稳定，而锰在沉积物中的成岩再迁移造成锰通量的显著变化。笔者将这部分成岩来源的锰称为成岩组份，通常，还富集铜和镍等；而另一部分由海水中水合铁锰氧化物直接沉积的锰称为非成岩组份或自生组份。

为了进一步阐明沉积环境对锰结核中铁锰含量的控制作用，笔者选取了两个典型环境的锰结核样品，研究其铁、锰含量的相关关系，一是从中太平洋北部的 M_{21A} 站位 ($157^\circ 55.10' \text{ E}$, $22^\circ 4.76' \text{ N}$ ；红粘土环境；水深 5390m) 采集的锰结核样品 M_{21A} ，二是 Finney 等 (1984) 在东太平洋 MANOP 的 H 区域 ($6^\circ 33' \text{ N}$, $92^\circ 49' \text{ W}$ ；半远洋沉积环境；水深 3600m) 采集的富锰的锰结核样品 Vulcan-I-37BC。如表 1 所示，后者比前者具有较高的锰/铁比值和生长速率。这表明后者受到成岩影响要大得多。将它们的锰、铁含量的对数值分别作图 (如图 1 和图 2 所示) 并进行线性回归，其相关关系式为：

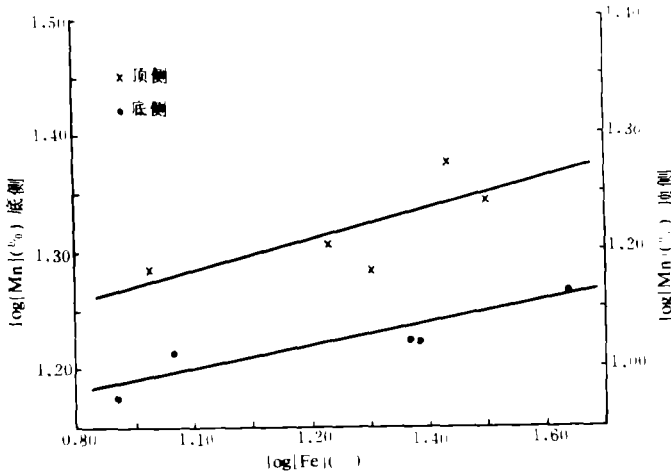


图 1. 锰结核 M_{21A} 中锰、铁含量相关关系

Fig.1 Correlations of manganese to iron concentrations of manganese nodule M_{21A}

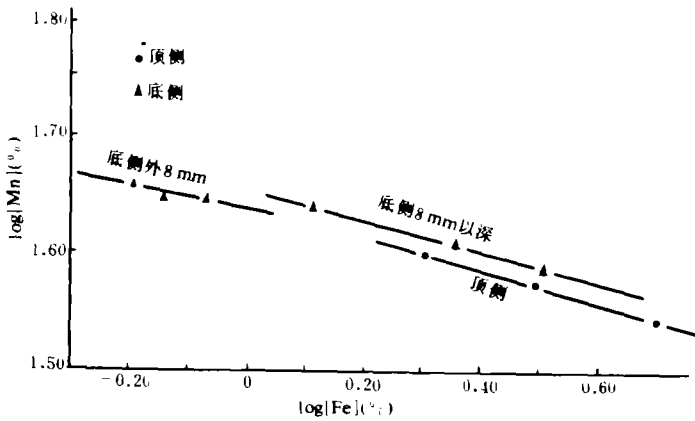


图 2. 锰结核 Vulcan-I-37BC 中锰、铁含量相关关系

Fig.2 Correlations of manganese to iron concentrations of manganese nodule Vulcan-I-37BC

M_{21A} :

$$\begin{array}{l}
 \text{顶侧: } \lg[Mn] = 0.127\lg[Fe] + 1.06 \quad r = 0.70 \\
 \text{底侧: } \lg[Mn] = 0.090\lg[Fe] + 1.11 \quad r = 0.92 \\
 \text{Vulcan-I-37BC:} \\
 \text{顶侧: } \lg[Mn] = -0.150\lg[Fe] + 1.648 \quad r = -0.99 \\
 \text{底侧: (外8mm):} \\
 \quad \lg[Mn] = -0.088\lg[Fe] + 1.640 \quad r = -0.90 \\
 \text{底侧: (8mm以深):} \\
 \quad \lg[Mn] = -0.134\lg[Fe] + 1.641 \quad r = -1.00
 \end{array} \quad (2)$$

r 是相关系数。由此, 不难发现, 在红粘土环境形成的锰结核 (M_{21A}) 中, 锰和铁呈正相关, 表明锰结核的生长以自生作用为主, 特点是锰/铁比值低, 生长速率小; 而在半远洋沉积环境形成的锰结核 (Vulcan-I-37BC) 中, 锰与铁呈负相关, 表明锰结核中锰以成岩来源为主, 大量成岩锰对铁的稀释作用使铁含量降低。值得指出的是, 虽然由于环境的复杂性使得元素结合到锰结核中没有按简单的方式和固定的比例, 但是把握锰结核形成过程中铁、锰行为的差别对于从本质上揭示锰结核形成机理, 找出锰结核生长速率与化学组成的内在联系是很有帮助的。

二、 锰结核锰通量与铁通量及锰/铁比值的相关性

1. 锰、铁通量之间的关系

Dymond 等 (1984) 在研究锰结核化学组成随环境变化时提出在锰结核生长过程中锰的三种堆积方式: (1) 自生作用, 即胶体水合铁、锰氧化物由海水中直接沉积 (Mn/Fe : ~ 1); (2) 氧化性成岩作用, 指氧化性沉积物中发生的铁、锰积累过程 (Mn/Fe : $5-10$), (3) 缺氧性成岩作用, 指由于沉积物中有机物的氧化引起 Mn^{4+} 的还原而导致的成岩作用 (Mn/Fe : $20-70$)。笔者将锰结核按其形成环境与方式分为以下三种类型:

L型 (低锰型): $Mn/Fe \approx 1$, 主要分布在深海红粘土环境, 以自生作用为主;

M型 (中锰型): Mn/Fe : $1-10$, 主要分布在靠近赤道的硅质软泥区, 以氧化性成岩作用为主;

H型 (高锰型): Mn/Fe : > 10 , 通常分布在半远洋沉积环境, 该区沉积物沉积速率较快有机物含量高, 锰的成岩再迁移性大, 以缺氧性成岩作用为主。

将铁、锰通量的对数值按上述三种类型分别作图 (图 3), 并进行回归分析, 得:

$$\begin{array}{l}
 \text{L型: } \lg F_{Mn} = 1.04\lg F_{Fe} - 0.10 \quad r = 0.986 \\
 \text{M型: } \lg F_{Mn} = 1.80\lg F_{Fe} - 1.15 \quad r = 0.925 \\
 \text{H型: } \lg F_{Mn} = 3.27\lg F_{Fe} - 3.77 \quad r = 0.987
 \end{array}$$

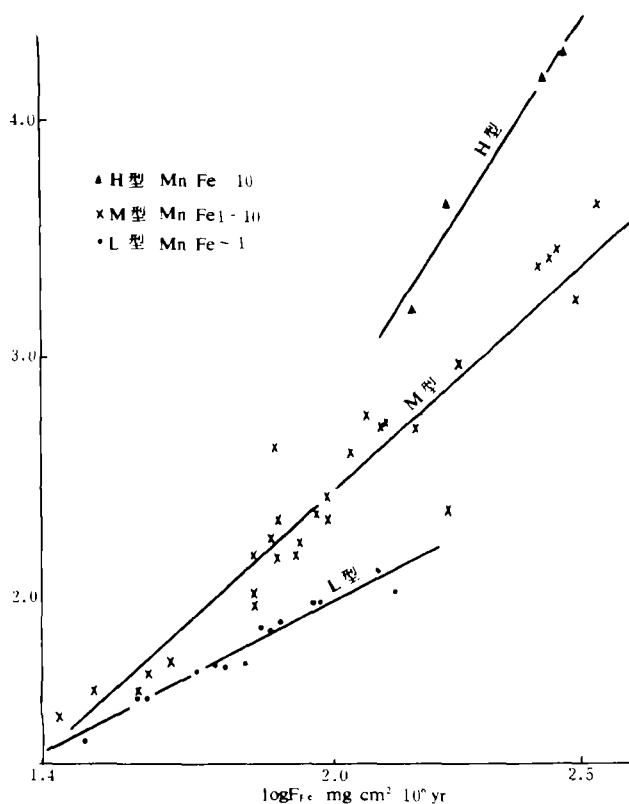


图3. 锰结核的锰、铁通量相关关系
Fig.3 Correlations of manganese to iron fluxes of manganese nodules

或表示为:

$$\left. \begin{aligned} L\text{型: } \frac{\Delta F_{Mn}}{F_{Mn}} &= 1.04 \frac{\Delta F_{Fe}}{F_{Fe}} \\ M\text{型: } \frac{\Delta F_{Mn}}{F_{Mn}} &= 1.80 \frac{\Delta F_{Fe}}{F_{Fe}} \\ H\text{型: } \frac{\Delta F_{Mn}}{F_{Mn}} &= 3.27 \frac{\Delta F_{Fe}}{F_{Fe}} \end{aligned} \right\} (4)$$

(3) 式说明不同沉积环境以不同的方式积累的铁和锰, 其通量是正相关的, 但是, 不同沉积环境锰和铁是以不同的比例结合到锰结核中的: L型 — $F_{Mn} / F_{Fe}^{1.04} = \text{常数}$; M型 — $F_{Mn} / F_{Fe}^{1.80} = \text{常数}$; H型 — $F_{Mn} / F_{Fe}^{3.27} = \text{常数}$. 环境成岩作用愈强, 铁通量 F_{Fe} 的幂次愈高. 因而, 从前的研究者不考虑环境的变化而笼统地描述成锰通量与铁通量的平方呈正比关系 ($F_{Mn} / F_{Fe}^2 = \text{常数}$) 恐怕是不符合实际的.

由 (4) 式可以清楚地看出, 随着环境的成岩作用加强, 锰通量的相对变化率比铁通量的相对变化

率要大得多. 对于 L 型锰结核, 二者几乎相等; 而 M 型, 前者比后者大将近一倍; H 型则大两倍以上.

2. 锰通量与锰 / 铁比值之间的关系

笔者将锰通量和锰 / 铁比值的对数值按前述的三种类型, 进行线性回归分析, 同样可得三个相关关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} L\text{型: } \lg F_{Mn} &= 5.01 \lg Mn / Fe + 1.87 \quad r = 0.86 \\ M\text{型: } \lg F_{Mn} &= 1.66 \lg Mn / Fe + 1.70 \quad r = 0.94 \\ H\text{型: } \lg F_{Mn} &= 1.20 \lg Mn / Fe + 2.13 \quad r = 0.94 \end{aligned} \right\} (5)$$

由 (5) 式可以指出不同环境的锰结核, 其锰通量和锰 / 铁比值均是正相关的, 其差别是关系式右边第一项的系数随环境成岩作用增强而减小, 这表明随着成岩作用的增强, 锰 / 铁比值的变化比锰通量的变化来得显著, 也就是说自生作用为主的锰结核锰通量改变使得锰 / 铁比值变化较小, 而成岩为主的锰结核锰通量改变使得锰 / 铁比值变化较大. 此外, 由 (5) 式可以得出这样的结论, 尽管锰结核的锰通量和生长速率变化各异, 但是锰含量与生

长速率的乘积得出的锰通量与锰/铁比值的变化是一致的,即相同锰/铁比值的锰结核具有相同的锰通量(尽管生长速率和锰含量都不一定相同)。这就是笔者揭示生长速率与化学组成内在联系的理论依据。

三、 生长速率与锰、铁含量的关系

由(5)式给我们一个这样的启示:

$$\lg[\text{锰含量} \times \text{生长速率}] = n \lg \frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} + \text{常数}$$

由这样一种关系式笔者就可以根据锰结核铁锰含量来计算生长速率。然而问题并不这么容易就解决了,关键是不同环境的锰结核具有不同的系数 n , 能不能找出一个统一的生长速率与化学组成的关系式,而与沉积环境的改变无关呢? 这样就要根据前述的事实作出一些假设。由表1不难看出,以自生为主的L型锰结核,其锰通量变化不大,因此假设锰结核锰含量由自生的和成岩的两部分构成——前者基本恒定,后者则是可变的,并且假设“纯”自生锰结核具有恒定的锰通量和锰/铁比。虽然目前还很难分出“纯”的自生组份,但是“纯”自生锰结核的锰通量和锰/铁比均应小于L型锰结核。综合分析表1的数据,假设“纯”自生锰结核锰通量($F_{\text{Mn}}la$)和锰/铁比($\text{Mn}/\text{Fe}la$)分别为:

$$F_{\text{Mn}}la = 20 \text{mg} / \text{cm}^2 \cdot 10^6 \text{yr} \quad \text{Mn} / \text{Fe}la = 0.60$$

此假设正确与否可以通过下列关系式来说明:

$$\left. \begin{aligned} L\text{型: } \lg[F_{\text{Mn}} - 20] &= 1.274 \lg \left[\frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} - 0.60 \right] + 2.102 \quad r = 0.755 \\ M\text{型: } \lg[F_{\text{Mn}} - 20] &= 1.470 \lg \left[\frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} - 0.60 \right] + 1.905 \quad r = 0.932 \\ H\text{型: } \lg[F_{\text{Mn}} - 20] &= 1.133 \lg \left[\frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} - 0.60 \right] + 2.218 \quad r = 0.957 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $[F_{\text{Mn}} - 20]$ 和 $\left[\frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} - 0.60 \right]$ 分别为锰结核锰通量和锰/铁比的成岩贡献。将(6)式与

(5)式比较,可以发现对于三种类型的锰结核,扣除自生组份的锰通量和锰/铁比的相关关系式趋于一致。据此,可以推断,成岩贡献的锰通量和锰/铁比变化是线性相关的,而与沉积环境的分类无关。

由图4可以获得统一的表达式如下:

$$\lg[F_{\text{Mn}} - 20] = 1.250 \lg \left[\frac{\text{Mn}}{\text{Fe}} - 0.60 \right] + 2.017 \quad r = 0.953 \quad (7)$$

由(7)式不难导出锰结核生长速率 S ($\text{mm} / 10^6 \text{yr}$) 与锰/铁比(锰/铁)及锰含量 $[\text{Mn}]$ ($\text{wt}\%$) 的关系式如下:

$$S (\text{mm} / 10^6 \text{yr}) = \frac{[52.0(\text{Mn} / \text{Fe} - 0.60)]^{1.25} + 10}{[\text{Mn}]} \quad (8)$$

(8)式中右边第一项为成岩作用对生长速率的贡献,第二项为自生作用的贡献。根据

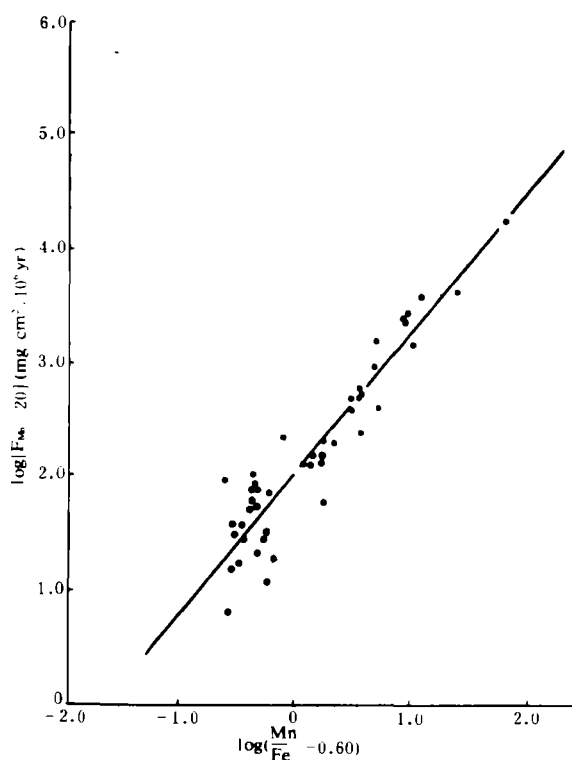


图4. 锰结核中成岩来源的锰通量与 Mn / Fe 比值的
 Fig.4 Correlation of diagenetic manganese fluxes to Mn / Fe
 ratios of manganese nodules

锰 / 铁比和锰含量, 由 (8) 式就能计算出生长速率 (如表 1 的 S_c ($\text{mm} / 10^6 \text{yr}$)). 作为比较, 表 1 还列出了实测的及由其它研究者提出的经验公式计算的的生长速率. 不难看出, 由 (8) 式计算的的生长速率在 $0.8-200 \text{mm} / 10^6 \text{yr}$ 速率范围与实测值基本吻合. 其偏差可能由两个原因引起, 一是数据的分散性; 二是其它来源的贡献. 值得注意的是, 某些样品由其它经验公式计算的的生长速率亦存在很大的偏差, 特别是 Lyle (1982) 的公式, 对于速率 $> 50 \text{mm} / 10^6 \text{yr}$ 的锰结核偏差太大, 以致不能适用. 但是, 更重要的是表达式 (8) 是根据锰通量与锰 / 铁比的相关关系归纳出来的. 它以统一的形式表达了不同环境的锰结核, 在其生长过程中生长速率与锰、铁含量的制约关系, 为从本质上揭示锰结核生长机制提供了有力的依据.

收稿日期 1987年7月28日

参 考 文 献

- (1) Dymond J. and Lyle M. et al., 1984, *Geochim.Cosmochim.Acta* 48, p.931-949.
- (2) Finney B., Health G.R. and Lyler M., 1984, *Geochim.Cosmochim.Acta* 48, p.911-917.
- (3) Heye D. and Marchig V., 1977, *Mar. Geol.* 23, M19-M25.
- (4) Huh C.A. and Ku T.L., 1984, *Geochim.Cosmochim.Acta* 48, p.951-963.
- (5) Krishnaswami S. and Lal D., 1972, *Manganese nodules and Budget of trace soluble in the oceans*, In: *The Changing Chemistry of the Oceans, Noble Symposium 20* (eds.D. Dyrssen and Tegner), New York, Wiley Interscience.
- (6) Ku T.L. 1977, *Rates of accretion*, In: *Marine Manganese Deposits* (ed. G.P.Glasby) .
- (7) Kusakabe M. and Ku T.L. 1984, *Geochim.Cosmochim.Acta* 48, 2187-2193.
- (8) Lyle M., 1982, *Geochim.Cosmochim.Acta*, 46, p.2301-2306.
- (9) Mero J.M. 1965, *The Mineral Resources of the Sea*, Amsterdam, Elsevier.
- (10) Moore W.S. et al., 1981, *Earth Planet.Sci. lett.* 52, p.151-171.

- (11) Reyss J.L. et al., 1982, Nature 295, p.401-403.
 (12) Somayajulu B.L.K. et al., 1971, Geochim.Cosmochim.Acta, 35, p.621-624.
 (13) Tsunogai S., et al. 1982, Geochem.J.16, p.199-212.

RELATIONSHIP BETWEEN ACCRETION OF MANGANESE NODULES AND SEDIMENTARY ENVIRONMENTS

Luo Shangde Wang Lei Huang Yipu

(Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen)

Abstract

48 data sets on the major chemical compositions (Mn and Fe concentrations) and growth rates of manganese nodules from different sedimentary environments of the oceans have been collected and their fluxes of manganese and iron have been calculated. It has been shown that although the chemical compositions and growth rates of manganese nodules from different areas of the oceans are largely different (Mn: 11.3-44.9%; Fe: 0.724-20.5%; growth rates: 0.80-200mm / 10⁶yr), there are small differences in Fe fluxes (10-10²mg Fe / cm² · 10⁶yr at most) but large one in Mn fluxes (in range of 10 to 10⁴mg Mn / cm² · 10⁶yr), reflecting that the diagenetic reactivity of manganese is much stronger than that of iron in marine environments.

It has been demonstrated by statistical analyses the (1) the concentrations of manganese and iron of individual nodules are correlative positively for the nodules with the Mn / Fe ratios of ~ 1 but negatively for those with high Mn / Fe ratios because of different contribution of diagenetic manganese; (2) The relationships of Mn fluxes to Fe fluxes or Mn / Fe ratios of the manganese nodules are dependent on classification of sedimentary environments, but the changes of Mn fluxes and Mn / Fe ratios caused only by diagenetic processes are linearly correlative, independent on the classification of sedimentary environments. The following equation, derived from the correlation of Mn fluxes to Mn / Fe ratios of manganese modules, can be used to predict the growth rates from the Mn concentrations and Mn / Fe ratios of the nodules and reveal the importance of sedimentary environments to the chemical composition and growth rate of manganese nodules:

$$S(mm / 10^6 yr) = [52.0(Mn / Fe - 0.60)^{1.25} + 10] / [Mn]$$