

# 太平洋中部锰结核世代及其与古海洋事件的关系\*

单连芳

(地质矿产部海洋地质研究所, 青岛 266071)

**提要** 于 1986—1988 年由海洋四号调查船的 HY4-861, 871, 881 三个航次采集的锰结核样品中选出 37 个以老结核或老结核碎块为核心的结核, 进行研究, 划分出 3 个结核世代, 并大致确定其生长期: 第一世代结核的生长期是在早中新世 ( $<20\text{Ma}$ ); 第二世代结核形成于早中新世—晚中新世 ( $>6\text{Ma}$ ); 第三世代结核的生长期是在上新世—第四纪。同时对老、新世代结核的矿物成份和化学成份进行分析, 并得出, 老世代结核比新世代结核含钡镁锰矿多, 富 Mn, Ni, Cu, Zn, Mg, 而贫 Fe, Co, Pb。通过引证与讨论初步得出, 前一代结核是在沉积间断时期受南极底层流的冲刷而破碎, 南极底层流为新世代结核提供物质并造成有利的生长环境; 锰结核是在气候比较寒冷、沉积速率比较低的条件下, 从盐度相对较高的海水或软泥水中析出 Fe, Mn 水合物聚结而成结核的。

**关键词** 锰结核 锰结核的世代 太平洋 古海洋事件

关于锰结核的世代和生长壳层的研究在许多有关著作中已有介绍 (Андрущенко и др, 1969; Sorem, 1973; Sorem et al., 1977; Glashy, 1978)。Sorem 等(1977)将地层的原理应用于不同锰结核的壳层对比; Marchig 等(1982)对结核新、老壳层的矿物和化学成分作过研究。但是, 前人并未将结核的世代与生长壳层的关系及其与古海洋事件的关系联系起来。本文通过对调查区不同世代结核及其所包含壳层的研究, 并综合他人对相应区域沉积柱样的研究资料, 试图探讨不同世代结核与沉积间断和沉积速率, 以及与底层流和古气候的关系。

## 1 样品和资料来源及处理方法

于 1986—1988 年由海洋四号调查船的 HY4-861, 871, 881 三个航次的 61 个锰结核样品, 分别采自中太平洋海盆 (CP 区) 和东北太平洋海盆 (CC 区)(图 1)。选出 37 个以老结核或老结核碎块为核心的结核作为研究结核世代的样品。将结核锯成两半, 一半磨成光面, 先用 10 倍放大镜对其进行观察, 然后再在光学显微镜下进行详细研究; 结核的另一半用作化学分析和等离子光谱分析。本文在研究工作的基础上, 同时对 Marchig 等(1982)的研究资料进行统计, 并将统计结果进行综合分析。

## 2 研究结果

### 2.1 结核世代的分布

\* 国家自然科学基金资助, 49272090 号。单连芳, 女, 出生于 1935 年 11 月, 高级工程师。  
收稿日期: 1992 年 11 月 15 日, 接受日期: 1993 年 7 月 22 日。

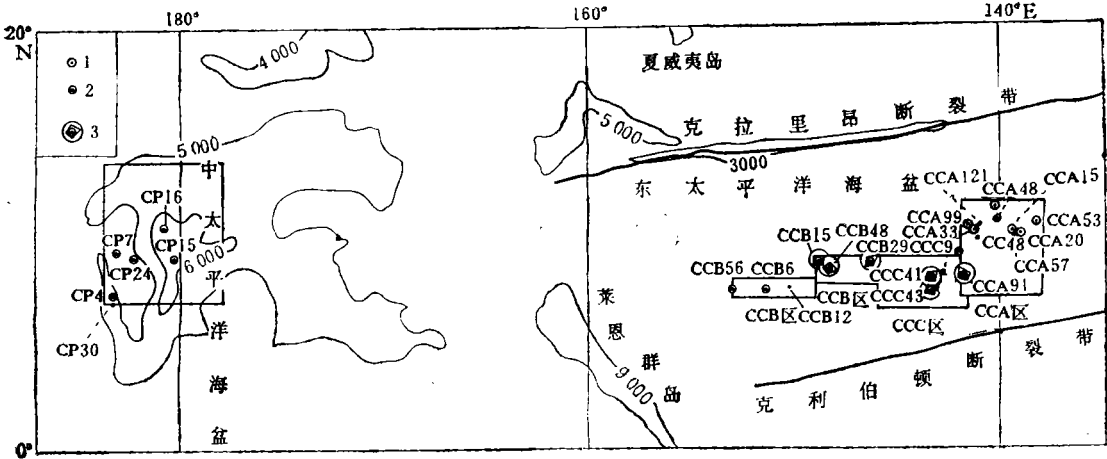


图 1 不同世代结核的分布

Fig. 1 Distribution of different generation nodules

- 1. 两个世代的结核, 第一世代结核为受强烈磨蚀的老结核; 2. 两个世代的结核, 第一世代结核为老结核碎块; 3. 三个世代的结核, 第一世代结核和第二世代结核均呈碎块状。

结核的世代是指结核生长到某一时期不再生长, 并且在较强底流作用下发生位移并受到强烈磨蚀而失去一部分或破碎, 后来在另一结核生长期又以这种被磨蚀的结核或结核碎块为核心形成新的结核。这样, 老结核或老结核碎块即为第一世代结核, 新形成的结核则为第二世代结核。

调查区内结核的世代是不同的, 因区域而异(单连芳等, 1991)。CP 区和 CCA 区的结核一般具两个世代, 第一世代结核大部分具一个壳层(图 2a)。两区所不同的是, CP 区第一世代结核多发生破碎, 而 CCA 区的则是完整的占多数; 第二世代结核的壳层数也有不同, CP 区为 1—2 个, CCA 区多具 2 个壳层(图 2b)。

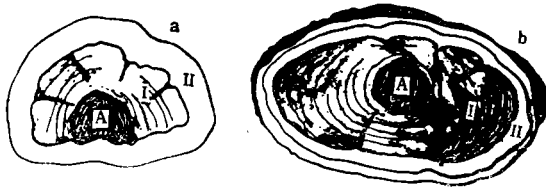


图 2 具两个世代的结核

Fig. 2 Two generations of manganese nodules

A 为第一世代结核的核心。I 为第一世代结核; II 为第二世代结核。

CCC 区和 CCB 区结核多数具 3 个世代。第一世代结核和第二世代结核多发生破碎, 第二世代结核的大部分具 4 个壳层, 第三世代结核为 1—2 个壳层。

不同世代的结核所以发生破碎, Heye (1978) 认为是由于结核在老化过程中失水而收缩, 致使发生破碎, 但我们认为是底层流冲蚀的结果。如 CP, CCB 和 CCC 区第一世代结核破碎的比 CCA 区多, 这可能由于那时南极底层流先流经 CP, CCB 和 CCC 区,

后到达 CCA 区<sup>1)</sup>,而且流到这里的底层流强度已减弱,故前三个区停留在沉积物表层或沉积间断面上的第一世代结核受到比较强的底流冲蚀,因而破碎的多。

## 2.2 不同世代结核的矿物成份和化学成份

锰结核的化学成份是不均匀的。Halbach 等(1979)曾指出,AB 型结核(半埋藏型结核)上部和下部的矿物成份和化学成份是不同的,上部主要是由紧密交生的  $\delta$ - $MnO_2$  和  $FeOOH \cdot xH_2O$  微粒组成,富 Fe,Co,而 Ni,Cu 含量较低;下部的主要矿物成份是钡镁锰矿,富 Mn,Ni,Cu 而贫 Fe,Co。他们认为这类结核所以有这种成份上的差别,是由于其上、下两部分金属组分来源不同:上部来源于底层水;下部来源于孔隙水。Marchig 等(1982)研究了东北太平洋放射虫软泥区 10 个锰结核中不同生长带的矿物和化学成份得出,层纹带是由  $\delta$ - $MnO_2$ , $FeOOH \cdot xH_2O$  和 X 射线非晶质铝硅酸盐组成;树枝状带主要由钡镁锰矿组成。在化学成分上,老层纹带比其外部的老树枝带富 Fe,Co,而老树枝带富 Mn,Ni,Cu,Zn。他们将这种差别归结为,老层纹带的物质来自海水,老树枝带的物质来自孔隙水,并将老带(老层纹带和老树枝带)比年轻带(年轻层纹带和年轻树枝带)含水少归于成岩作用的结果。

虽然本文对结核世代的划分与 Marchig 等对生长带的划分依据相似,但对不同世代结核的矿物成份和化学成份不同的原因解释却与其不同。

本文所研究的结核,老结核核心和其外部的铁锰质壳层在化学和矿物成份上都存在一定的差别:一般老结核核心含 Mn,Ni,Cu,Zn,Mg 较外壳多,含 Fe,Co,Pb, $H_2O^-$  较外壳少。 $H_2O^+$  的含量,核心与外壳相差不大(表 1)。在矿物含量上,核心含钡镁锰矿比外壳多(表 2),含钠水锰矿则比外壳少, $\delta$ - $MnO_2$  的含量,核心与外壳相关不大。

表 1 锰结核的老结核核心(老世代结核)和其铁锰质外壳(年轻世代结核)的化学成份

Tab. 1 Chemical compositions of the old nodule cores (old generations of nodule) and their Fe-Mn crusts (young generations)

| 样品号   | 分析样品  | 化 学 组 份 (%) |      |      |      |      |      |      |      |          |          |
|-------|-------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|----------|----------|
|       |       | Mn          | Fe   | Ni   | Cu   | Co   | Zn   | Pb   | Mg   | $H_2O^+$ | $H_2O^-$ |
| CCA27 | 铁锰质外壳 | 27.27       | 6.40 | 1.47 | 1.01 | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 1.54 | 8.57     | 13.01    |
|       | 老结核核心 | 32.81       | 4.50 | 1.61 | 1.26 | 0.13 | 0.19 | 0.06 | 1.97 | 8.44     | 10.22    |
| CCA41 | 铁锰质外壳 | 27.70       | 6.18 | 1.48 | 1.15 | 0.19 | 0.15 | 0.06 | 1.56 | 8.16     | 12.95    |
|       | 老结核核心 | 30.27       | 4.37 | 1.42 | 1.49 | 0.11 | 0.16 | 0.05 | 1.72 | 8.41     | 10.02    |
| CCB48 | 铁锰质外壳 | 27.54       | 6.01 | 1.46 | 1.23 | 0.17 | 0.14 | 0.06 | 1.58 | 8.32     | 12.23    |
|       | 老结核核心 | 28.58       | 4.82 | 1.51 | 1.49 | 0.17 | 0.14 | 0.06 | 1.88 | 8.91     | 9.58     |
| CCC18 | 铁锰质外壳 | 29.90       | 6.27 | 1.52 | 1.20 | 0.20 | 0.16 | 0.07 | 1.61 | 7.81     | 12.81    |
|       | 老结核核心 | 30.41       | 5.68 | 1.50 | 1.30 | 0.18 | 0.16 | 0.06 | 1.76 | 8.14     | 10.50    |
| CCC35 | 铁锰质外壳 | 28.09       | 5.79 | 1.42 | 1.35 | 0.17 | 0.12 | 0.06 | 1.60 | 8.98     | 12.23    |
|       | 老结核核心 | 33.16       | 3.64 | 1.59 | 1.81 | 0.12 | 0.14 | 0.05 | 1.88 | 8.36     | 9.88     |
| CCC72 | 铁锰质外壳 | 28.47       | 6.01 | 1.43 | 1.07 | 0.17 | 0.15 | 0.06 | 1.52 | 8.67     | 12.90    |
|       | 老结核核心 | 34.19       | 3.03 | 1.73 | 1.60 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 1.93 | 8.29     | 9.44     |

上述变化是由于结核在形成之后的成岩过程中发生了脱水、物质再分配和交代作用

1) 许东禹等,1990,太平洋中部晚新生代古海洋。(印刷中)

**表 2 锰结核的老结核核心(老世代结核)和其铁锰质外壳(年轻世代结核)的矿物组分**

Tab. 2 Mineral compositions of the old nodule cores (old generations of nodule) and their Fe-Mn crusts (young generations)

| 样品号   | 分析样品  | 矿 物 含 量 (%) |       |                            |
|-------|-------|-------------|-------|----------------------------|
|       |       | 钡镁锰矿        | 钠水锰矿  | $\delta$ -MnO <sub>2</sub> |
| CCC72 | 铁锰质外壳 | 27.07       | 21.10 | 42.83                      |
|       | 老结核核心 | 36.60       | 14.00 | 43.60                      |

所造成的(单连芳等,1993)。随着结核成岩作用的进展,首先失去吸附水(H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>),进而随着矿物交代作用(由 $\delta$ -MnO<sub>2</sub>→钠水锰矿→钡镁锰矿)Mn,Ni,Cu,Zn,Mg 逐渐富集;Fe,Co,Pb 则相对减少。

Burns 等(1978)经过对太平洋硅质软泥区锰结核的研究曾得出如下结论:“由于重结晶作用使结核内部物质重新分配,致使结核外层是非晶质或结晶较差的 $\delta$ -MnO<sub>2</sub>,内层却含有较多的钡镁锰矿。”Halbach 等(1979)所划分的 AB 型结核,虽然亦得出这类结核的上部主要由 $\delta$ -MnO<sub>2</sub>组成,其下部钡镁锰矿占优势。但经过详细地显微镜下观察,发现这类结核的上部和下部均为层纹构造,而且上部和下部层纹是连续的,所不同的是结核下部层纹中的 $\delta$ -MnO<sub>2</sub>受钡镁锰矿交代强烈。故我们不同意 Marchig 等(1982)将不同世代结核划分为老层纹带、年轻层纹带、老树枝带和年轻树枝带,而将它归并为老结核世代和年轻结核世代,我们的观点与其化学成份的变化的结果相似(表 3)。

**表 3 不同锰结核的核心与外壳的化学成份<sup>1)</sup>**

Tab. 3 Chemical compositions of core and crusts of different manganese nodules

| 样品号 | 分析样品  | 元 素 含 量 (%) |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|-------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
|     |       | Mn          | Fe   | Ni   | Cu   | Co   | Zn   | Pb   | Mg   |
| 40  | 铁锰质外壳 | 20.69       | 6.10 | 0.95 | 0.56 | 0.26 | 0.14 | 0.05 | 1.13 |
|     | 老结核核心 | 28.30       | 7.23 | 2.31 | 0.91 | 0.20 | 0.14 | 0.02 | 1.99 |
| 106 | 铁锰质外壳 | 20.54       | 5.09 | 1.08 | 0.66 | 0.19 | 0.11 | 0.08 | 1.26 |
|     | 老结核核心 | 31.48       | 3.46 | 1.44 | 1.39 | 0.13 | 0.27 | 0.01 | 2.15 |
| 134 | 铁锰质外壳 | 20.45       | 3.29 | 1.07 | 0.74 | 0.17 | 0.13 | 0.09 | 1.19 |
|     | 老结核核心 | 25.64       | 5.97 | 1.15 | 0.96 | 0.17 | 0.13 | —    | 1.79 |
| 144 | 铁锰质外壳 | 16.88       | 3.31 | 0.85 | 0.56 | 0.17 | 0.11 | 0.08 | 1.13 |
|     | 老结核核心 | 27.68       | 6.96 | 1.27 | 1.00 | 0.21 | 0.14 | —    | 1.97 |

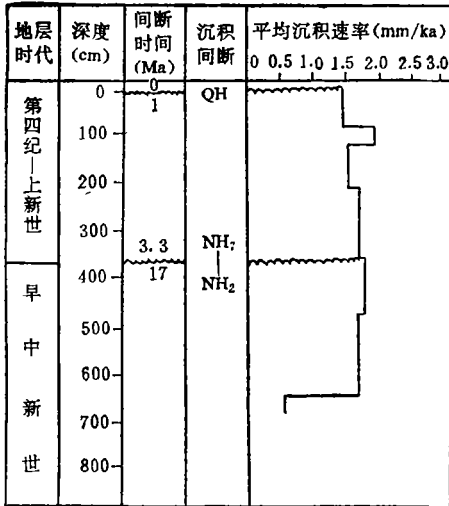
1) 据 Marchig 等,1982 年资料统计得出。

### 2.3 不同世代结核与古海洋事件的关系

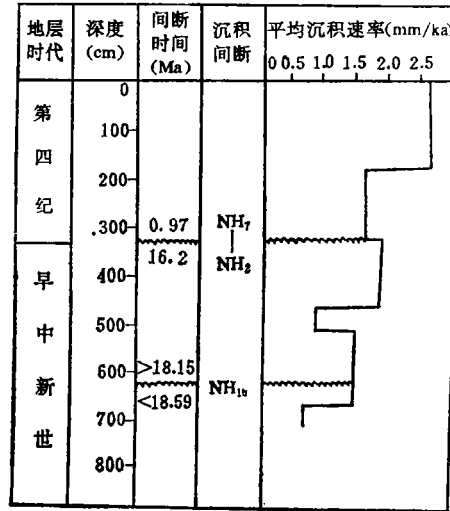
**2.3.1 与沉积间断和沉积速率的关系** Stackelberg (1979) 认为东北太平洋海盆中锰结核生长的第一阶段(老层纹带生长期)是在早中新世和晚上新世,并指出这一时期广泛地存在沉积间断;结核生长的第二阶段(老树枝带生长期)是与其划分的第 II 沉积相带的沉积期(上新世到第四纪)相对应;结核生长的第三阶段(年轻层纹带生长期)与第 I 相带的沉积期(上新世到第四纪)相当,而且第 II 沉积相带与 I 沉积相带是连续的,未发生沉

积间断。但从他们研究的结核剖面照片来看,很明显,在老树枝带与年轻层纹带之间曾发生过生长间断,而且老树枝带生长后多发生破碎。另据 Marchig 等(1982),老世代的结核是在沉积间断期间分解成碎块的。由此可见 Stackelberg (1979)所确定的结核生长期可能不确切。

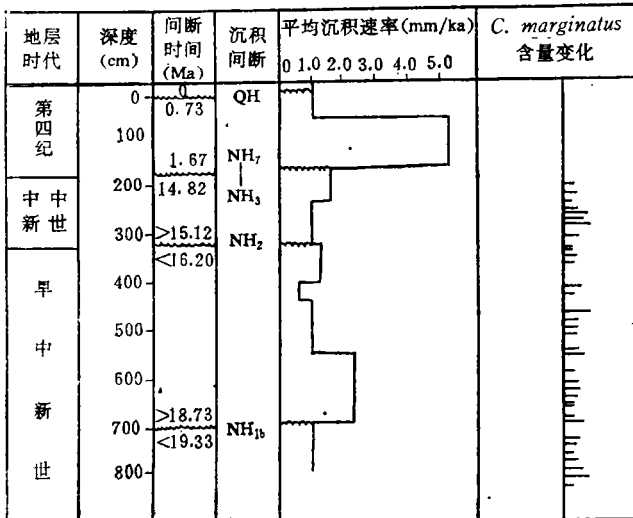
我们将不同世代结核的测年结果(表 4)和用沉积学、古地磁、古生物等方法研究得出的沉积间断(表 5)作一对照,可以得出,第一世代结核可能形成于早中新世的沉积间断 Keller 等(1983)所划分的 NH<sub>1a</sub> 发生以前低沉积速率时期,即 < 20Ma,在第一世代结核形成之后发生了 NH<sub>1a</sub> 沉积间断,在沉积间断面上结核受底层流作用而破碎或被磨



a. CP30



b. CCA121



c. CCC9

图 3 不同地区岩芯柱沉积物沉积速率的变化和沉积间断

Fig. 3 The changes of deposit rate and hiatus in cores of different area

蚀。第二世代结核形成于沉积间断 NH6 以前 (>6Ma) 早中新世—晚中新世沉积速率低的时期(图 3), 第二世代结核是在沉积间断 NH6 期间发生破碎或受磨蚀的。第三世代结核形成在上新世—第四纪的低沉积速率时期。

表 4 不同世代锰结核的形成时代

Tab. 4 Formation time of manganese nodules of different generations

| 测定方法               | 第一世代锰结核  | 第二世代锰结核     | 第三世代锰结核           |
|--------------------|----------|-------------|-------------------|
| 微体古生物学             | 早中新世晚期以前 | 早中新世晚期—晚中新世 | 上新世—第四纪           |
| <sup>10</sup> Be 法 | —        | >6Ma        | 4.8 241±0.2 243Ma |

表 5 CP 区和 CC 区的沉积间断<sup>1)</sup>

Tab. 5 The hiatus in CP and CC area

| CP 区    |          |         | CC 区    |           |               |
|---------|----------|---------|---------|-----------|---------------|
| 沉积间断    | 时代       | 时间 (Ma) | 沉积间断    | 时代        | 时间 (Ma)       |
| QH      | 第四纪      | 0—1     | QH      | 第四纪       | 0—0.73        |
| NH2—NH7 | 早中新世—上新世 | 3.3—17  | NH3—NH7 | 中中新世—第四纪  | 1.61—14.82    |
|         |          |         | NH2     | 中中新世—早中新世 | >15.12—<16.20 |
|         |          |         | NH1b    | 早中新世      | >18.15—<19.33 |
|         |          |         | NH1a    | 早中新世底部    | >19.41—<20    |

1) 引自许东禹等,1990。

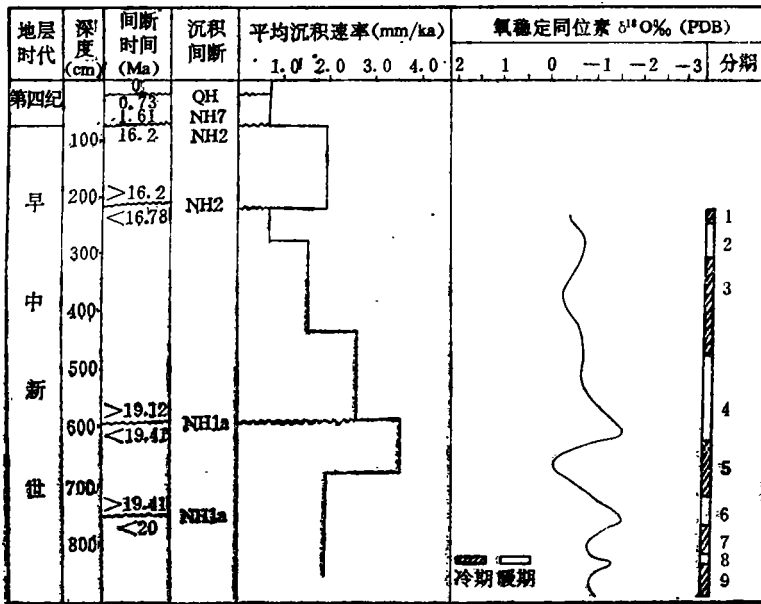


图 4 CC48 孔岩芯中沉积物的沉积速率与氧同位素的变化

Fig. 4 The changes of deposit rate and oxygen isotope of sediments in core CC48

至于每一世代结核所包含铁锰质壳层数不同的原因,这与沉积环境的变化有关。因为每一壳层代表一个生长幕(Glashy, 1978),在一个生长幕中结核是连续生长的,而生长幕和生长幕之间(即壳层与壳层之间)则发生过生长间断(单连芳,1984)。经研究发现,不同世代结核中每个壳层的生长期可能与沉积物沉积速率低的时期相对应,如第一世代结核只具一个壳层,这是因为在它形成期间(NH1a)只有一段沉积速率相对较低时期(图4),即一段时期的沉积速率为1.87mm/ka;第二世代结核,CP区多数为一个壳层,因为其生长期亦只有一段沉积速率相对较低时期(0.53mm/ka,图3a)CCA区,在NH1a, NH2期间有两次沉积速率相对较低时期(沉积速率分别为0.71mm/kg和0.83mm/ka,图3b),所以该区此世代结核有2个壳层,而CCC区和CCB的第二世代结核具4个壳层,这是因为它们在生长过程中(NH1b—NH3)<sup>1)</sup>经历了四段沉积速率相对较低时期(沉积速率分别为1.09,0.63,1.31,1.05mm/ka,图3c)。这一发现与Horn等(1972)的观点相符,并与Opdyke等(1970)总结出的规律很接近。

**2.3.2 与南极底层流的关系** 调查区早中新世沉积物中大量出现冷水种硅藻和底栖有孔虫,这说明早中新世时南极底流已进入这些区域,而且是不止一次地进入。现以CCC9孔为例(图3c),可以看出,在沉积间断面以上沉积物中冷水硅藻*Coscinodiscus marginatus*含量较高;同时在该孔700cm附近见到早中新世冷水种底栖有孔虫*Epistominella exig*, *Cibicides grimsdalei*, *Pullenia quinqueloba*。这些都说明在某些沉积阶段有南极底层水流入这一区域。南极底层水是富氧的水团,能促进Fe, Mn氢氧化物溶胶沉淀,因而有利于锰结核的形成。

**2.3.3 与古气候的关系** 本文所划分的3个世代结核生长期与根据CC48孔氧同位素所划分的冷期大致对应(图4)。由此可以得出深海结核生长期是在气候比较寒冷的时期。这是因为气候寒冷时海水含盐度高(布洛克,1974),可能含Fe, Mn等元素也比暖期高,因而这一时期来自海水的成核物质较比其它时期丰富。

综上所述可以看出,南极底层流破坏了前一代的结核,但也为新世代结核带来了丰富的物质来源,并造成有利于结核生长的环境(氧化环境);在气候比较冷,沉积速率比较低的条件下,从盐度相对较高的海水或软泥水中析出以Fe, Mn水合物为主的物质而形成锰结核。

## 参 考 文 献

- 单连芳,1984,几个不同产地铁锰结核的研究,海洋地质与第四纪地质,4(1): 67—80。  
 单连芳,姚 德,1991,太平洋中部多金属结核岩石、矿物和地球化学特征的研究,海洋地质与第四纪地质,11(增刊): 1—66。  
 单连芳,姚 德,1993,铁锰结核的矿物相变和其它次生变化,矿物学报,13(2): 150—162。  
 布洛克, W. S., 1974, 化学海洋学,刘光等译,1981,科学出版社(北京),157。  
 Burns, V. M. and Burns, R. G., 1978, Post-depositiona metal enrichment processes inside manganese nodules from the north equatorial Pacific, *Earth Planet. Sci. Letts*, 39:341—348。  
 Glashy, GoP., 1978, Notes on the surface texture, internal structure and mineralogy of manganese nodules from the South Penrhyn Basin, South Pacific, *Marine Geol. Notes.*, 1: 17—25。  
 Halbach, P. and Ozkara, M., 1979, Morphological and geochemical classification of deep-sea ferro-

1) NH2 沉积间断时间较短,在结核形成过程中影响不大。

- manganese nodules and its genetical interpretation, *Proc. Colloq. Intern. CNRS*, **289**:77—88.
- Heye, D., 1978, Growth conditions of manganese nodules, *Progr. Oceanog.*, **7**:163—239.
- Horn, D. R. et al., 1972, Distribution of ferromanganese deposits in the world ocean, National Science Foundation (Washington), 9—17.
- Keller, G. and Barron, T. A., 1983, Paleoclimatic implication of Miocene deep-sea hiatus, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**:590—613.
- Marchig, V. and Halbach, P., 1982, Internal structure of manganese nodules related to conditions of sedimentation, *Min. Petr. Mitt.*, **30**:81—110.
- Opdyke, N. D. and Foster, J. H., 1970, Paleomagnetism of cores from the North Pacific, *Mem. Geol. Soc. Am.*, **126**: 83—119.
- Sorem, R. K., 1973, Manganese Nodules as Indicators of Long-term Variations in Sea Floor Environment, Hawaii Inst. of Geophysics (Honolulu), pp. 151—164.
- Sorem, R. K. and Fewkes, 1977, Internal characteristics, Marine Manganese Deposits, Amsterdam Elsevier, pp. 147—184.
- Stackelberg, U. V., 1979, Sedimentation, hiatuses and development of manganese nodules, *Marine Sci.*, **9**: 559—586.
- Андрющенко П. Ф. и Скорнякова Н. С., 1969, Структуры и минеральный состав железомарганцевых конкреции из южной части Тихоокеана, *Океанология*, **9**(2):229—242.

## GENERATIONS OF MANGANESE NODULES FROM THE CENTRAL PACIFIC OCEAN AND THEIR RELATIONSHIP WITH PALAEO-OCEAN EVENT

Shan Lianfang

(Institute of Marine Geology, Ministry of Geology & Mineral Resources, Qingdao 266071)

### ABSTRACT

Study of 37 manganese nodules obtained by the R/V "Ocean 4" cruises HY4-861, 871, 881 showed they could be divided into three generations delimited generally by their growing period: first generation nodules formed in Early Miocene (<20Ma), second generation formed in Early Miocene—Late Miocene (>6Ma), third generation formed in Pliocene—Quaternary. Comparison of the mineral and chemical compositions of the old and young nodules showed the former contained more todorokite, and is richer in Mn, Ni, Cu, Zn, Mg, but poorer in Fe, Co, Pb than later. A preliminary conclusion is that scouring by Antarctic Bottom Water current during the hiatus, resulting in breaking and abrasion of the old generation nodules, probably provided the material and favorable growing environment for the new generation of nodules which formed probably when climate was colder, and sedimentation rate was slower and salinity higher in bottom water where pore water Fe-Mn hydroxides separated out and accumulated to manganese nodules.

**Key words** Manganese nodule Generation of manganese nodule Pacific Ocean Palaeo-ocean event