

东太平洋海盆 PC5794 柱状样的氧同位素 地球化学的初步研究*

沈桂梅 杨慧宁

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

主题词 氧同位素 古温度 成矿元素 东太平洋

提 要 根据东太平洋海盆 PC5794 柱状样 147—695cm (早中新世早期)的氧同位素、生物 CaCO_3 、古温度及成矿元素等的研究表明, 该区早中新世早期沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 大致可分为五组, 所反映的气候变化存在三个暖期和二个冷期的冷暖交替。氧同位素与生物 CaCO_3 呈正相关关系; 无生物 CaCO_3 条件下的成矿元素与古温度的变化趋势具三种情况: Mn、Fe、Co 含量变化趋势与古温度呈正比; Cu 含量与古温度呈反比; Ni 介于上述两种类型之间。PC5794 早中新世早期的硅钙质软泥与钙硅质软泥为寒冷气候下的沉积物, 有利于沉积型多金属结核的形成。

20 多年以来, 人们对沉积物氧同位素研究不仅应用于地层划分和对比, 而且应用于古气候、海平面变化等古海洋学研究。Louit 等 (1981) 认为稳定同位素丰度的演化是新第三纪以来 (最近 22.5Ma) 海洋变化最详细的记录者。本文通过 PC5794 柱状样早中新世早期的钙硅质软泥及硅钙质软泥中氧同位素组成的分析, 研究其与生物 CaCO_3 、古温度及成矿元素等之间的关系。

1 样品与分析

PC5794 柱状样取自东太平洋海盆东南部 (45°15'W, 7°30'E) 深海丘陵区, 水深小于 5000cm, 在 CCD 线之上, 样品总长 710cm。其中 0—10cm 为第四系的硅质软泥, 10—35cm 为上新统的硅质软泥, 与上层段之间存在一沉积间断, 35—140cm 为下中新—中新统早期的硅质软泥。本文研究取自 140—710cm 的下中新统早期的钙硅质软泥及硅钙质软泥, 以每 10cm 的间距进行系统取样, 样品由地矿部海洋地质实验测试中心测定其氧、碳同位素含量, 采用 PDB 标准, 分析精度达 $\sigma = \pm 0.03\%$ 。本文主要对氧同位素进行讨论与研究。

2 氧同位素特征

2.1 氧同位素分组

根据氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$) 的大小将 PC5794 柱状样 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势由上到下分为五组,

* 本文于 1997 年 5 月收到, 1997 年 7 月改回。

各组特征如下 (见表1、图1):

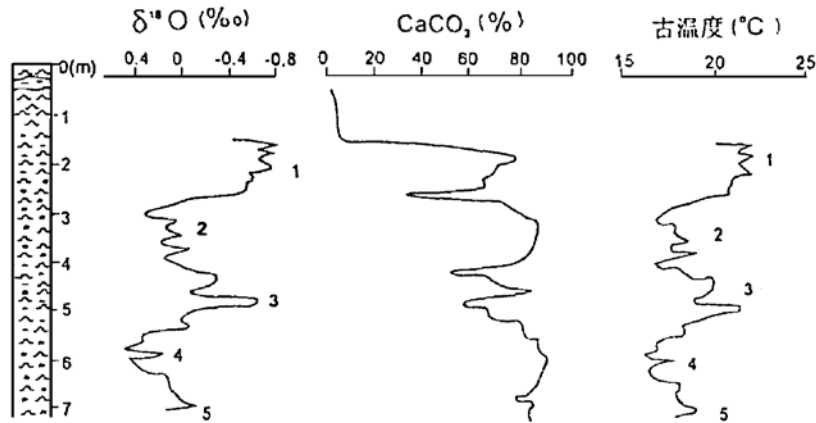


图1 PC5794柱状样氧同位素及古温度、生物CaCO₃变化图

Fig. 1 Variations of oxygen isotopes, paleotemperature and biogenic CaCO₃ shown by PC 5794 columnar sample

表1 氧同位素、古温度、生物碳酸钙与成矿元素数据

Table 1 Data of oxygen isotopes, paleotemperature, biogenic CaCO₃ and ore-forming elements

组别	深度 (m)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	古温度 (°C)	CaCO ₃ (%)	Fe (%)	Mn (%)	Ni (10 ⁻⁶)	Co (10 ⁻⁶)	Cu (10 ⁻⁶)
1	147—262.5	-0.58	20.84	63.93	3.60	0.79	170	38.85	765
2	262.5—392.5	0.11	17.79	80.55	2.70	0.57	145	30.51	1057
3	392.5—522.5	-0.22	19.20	69.00	3.43	0.75	160	46.88	805
4	522.5—622.5	0.29	16.96	86.64	3.34	0.63	158	44.80	993
5	622.5—695	0.05	18.01	82.82	3.71	0.67	159	45.94	847

1) 深度为147—262.5cm, $\delta^{18}\text{O}$ 最高值-0.04‰, 最低值-0.87‰, 平均值-0.58‰, 为本柱状样 $\delta^{18}\text{O}$ 最低值, $\delta^{18}\text{O}$ 均为负值, 峰值变化较小。

2) 262.5—392.5cm, $\delta^{18}\text{O}$ 较高, 为-0.15‰—0.33‰, 平均为0.11‰。

3) 392.5—522.5cm, $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 为-0.65‰—0.04‰, 平均为-0.22‰。

4) 522.5—622.5cm, $\delta^{18}\text{O}$ 全为正值, 0.08‰—0.48‰, 平均为0.29‰, 为本柱状样 $\delta^{18}\text{O}$ 最高层段。

5) 622.5—692.5cm, 本组 $\delta^{18}\text{O}$ 虽大部分为正值, 但最高值仅0.14‰, 最小值-0.43‰, 平均0.05‰。

从表1和图1可看出, $\delta^{18}\text{O}$ 从下向上的变化趋势为由低→高→低→高→低两个半旋迴, 而由下向上 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化总趋势是逐渐变小。

2.2 氧同位素与生物CaCO₃间的关系

由表1、图1中可看出生物CaCO₃含量的变化趋势与 $\delta^{18}\text{O}$ 基本相同, 它们间呈正相关关系, 即生物CaCO₃含量高, $\delta^{18}\text{O}$ 也高, 可认为本柱状样的氧同位素主要为生物成因CaCO₃的氧同位素。

2.3 氧同位素与古温度变化

应用生物成因碳酸盐的氧同位素组成可以计算古温度。Epstein 等^[1]首先建立根据生物成因碳酸盐物质的氧同位素组成计算古温度的方程式：

$$t = 16.5 - 4.3 (\delta^{18}O_C - \delta^{18}O_w) + 0.14 (\delta^{18}O_C - \delta^{18}O_w)^2$$

式中 t 为氧同位素古温度， $\delta^{18}O_C$ 为碳酸盐物质的氧同位素组成， $\delta^{18}O_w$ 为冰期与间冰期大洋氧同位素组成变化。应用这一方程的关键是 $\delta^{18}O_w$ 取值问题，不同学者取值不同，如 Shackleton^[2]取 1.0‰，Savin (1975)取值 0.85‰—1.0‰，而 Epstein (1956)则建议取 0.4‰。

根据以上公式 ($\delta^{18}O_w$ 采用 0.4‰) 计算 PC5794 柱状样的古温度，并绘制了温度变化曲线 (见图 1, 表 1)。

据计算结果分析，研究区早中新世早期 (约 22.33—18.77Ma) 古温度最高为 22.16℃ (在 162.5cm 处)，最低为 16.16℃ (在 572.5cm 处)，与氧同位素的分组相同。古温度的平均温度由上往下可分为五组，(包括三个暖期和两个冷期)，其变化由下往上平均温度 18.01℃ (暖期，最高温度 18.88℃)—16.96℃ (冷期，最低温度 16.16℃)—19.20℃ (暖期，最高温度 21.33℃)—17.79℃ (冷期，最低温度 16.79℃)—20.84℃ (暖期，最高温度 22.16) 即古温度自下往上由高 (深度 622.5—695cm)→低 (深度 522.5—622.5cm)→高 (深度 392.5—522.5cm)→低 (深度 262.5—392.5cm)→高 (深度 147—262.5cm) 两个半旋迴的发展韵律。由图 1 可看出本研究区早中新世早期气候变化总趋势变暖，这与 Lawrence A. Frakes^[3] (根据氧同位素组成) 提出的晚第三纪全球性古温度变化趋势，即渐新世至中新世早期显著变暖是一致的。

对 PC5794 柱状样氧同位素演化曲线 (图 1) 进行分析，发现早中新世早期 (22.33—18.77Ma) 东太平洋经历了 3 次大气温度回升和 2 次下降的发展阶段。

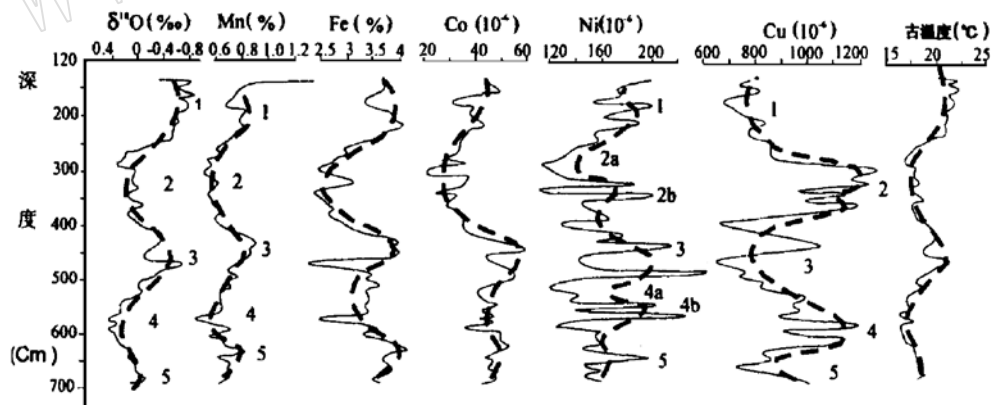


图 2 古温度、氧同位素与成矿元素含量变化图

Fig. 2 Variation of paleotemperature and oxygen isotope and ore-forming elements

注：成矿元素含量为无生物 $CaCO_3$ 条件下的含量；虚线代表变化总趋势

Emiliani 等 (1975) 认为在加勒比海和热带大西洋从冰期到间冰期氧同位素大约改变 1.8‰ (PDB); Shackleton and Opdyke (1973) 认为赤道太平洋冰期和间冰期氧同位素改变

1.2‰ PDB); Birchfield^[5]根据大西洋、印度洋和太平洋深水氧同位素的测定结果认为冰期与间冰期其变化值为 1.1‰ PDB)。因此可看出冰期与间冰期氧同位素改变为 1.1‰—1.8‰ PDB), 对应的温度变化约 5—7℃。PC5794 柱状样古温度变化第 1 期(暖期)的最高温度与第 2 期(冷期)的最低温度相差 5.37℃; 第 3 期(暖期)的最高温度与第 4 期(冷期)的最低温度相差 5.15℃; 而第 4 期(冷期)与第 5 期(暖期)的最大温差仅 2.72℃。根据上面论述的冰期与间冰期的温度变化为 5—7℃, 可看出本研究区早中新世早期(22.33—18.77Ma)可能出现两次冷期(冰期), 这与许靖华^[5]的推测、陈宗团等^[6]研究东太平洋 CC48 (140°01' W, 9°47' N) 柱状样氧同位素古温度结果认为东太平洋早中新世期间至少出现过两次冰期是一致的。

2.4 古温度与成矿元素的关系

为了解 PC5794 柱状样古温度与多金属结核形成及成矿元素 (Mn、Fe、Co、Ni、Cu) 富集的关系, 将测得的成矿元素含量与古温度含量在纵向上的变化进行对比、分析。

因早中新世早期沉积物中生物 CaCO₃ 异常发育, 其含量高达 50%—80%, 使成矿元素含量受到稀释; 为了客观地进行古温度与成矿元素组成的对比, 必须将所有的成矿元素数据换算成无生物 CaCO₃ 条件下的数据。经换算后的数据, 除成矿元素含量增高外, 古温度与 Cu 相关关系发生了变化, 即由正相关变为负相关 (详见表 1, 图 2), 而其余成矿元素仍保持正相关关系 (见表 2)。因而变化趋势出现下列三种情况。

1) Mn、Fe、Co, 由图 2 可清楚地看出它们纵向上的变化趋势 (图中虚线所示) 与古温度的变化韵律极为相似, 具良好的可对比性 (见图 2, 表 1)。与古温度为正相关关系。

表 2 古温度与成矿元素间的相关关系

Table 2 Correlation of Paleotemperature and ore-forming elements

	古温度	Mn	Fe	Co	Ni	Co
古温度	1					
Mn	0.59	1				
Fe	0.32	0.62	1			
Co	0.06	0.46	0.67	1		
Ni	0.27	0.34	0.24	0.44	1	
Cu	-0.56	-0.31	-0.26	-0.22	-0.09	1

① Mn 的平均含量在纵向上的变化可分为五组: 由下往上由高 (0.67%) → 低 (0.63%) → 高 (0.75%) → 低 (0.57%) → 高 (0.79%) 的韵律性变化。

② Fe 在纵向上的变化趋势与锰相似: 由下往上由高 (3.71%) → 低 (3.34%) → 高 (3.43%) → 低 (0.27%) → 高 (3.6%) 的韵律变化。

从上述 Mn、Fe 的变化趋势可以看出, 它们与古温度的变化是一致的, 即温度越高, 对 Mn、Fe 的富集越有益。Mn、Fe 与古温度的相关系数分别为 0.59 和 0.32; 而 Fe 与 Mn 也呈正相关关系, 相关系数为 0.63。

③ Co 含量在纵向上的变化趋势与 Fe、Mn 相似, 从下往上呈现由高 (45.94×10^{-6}) →

低 44.8×10^{-6})→高 46.88×10^{-6})→低 30.51×10^{-6})→高 38.85×10^{-6})的韵律性变化。由图 2 可看出, C_o 与古温度的变化趋势较明显的一致,但算出的 C_o 与古温度的相关系数仅 0.06。

2) Cu 的变化趋势与其它成矿元素相反,由下往上由低 847×10^{-6})→高 993×10^{-6})→低 805×10^{-6})→高 1057×10^{-6})→低 765×10^{-6})的韵律性变化。即 Cu 与古温度的变化趋势相反,温度低对 Cu 的富集有利。

3) Ni 为过渡类型,介于 Mn、Fe、Co 与 Cu 之间。由图 2 可看出 Ni 含量在纵向上的变化具其独特性,总的变化趋势由表 1 可看出,由下往上由高 159×10^{-6})→低 158×10^{-6})→高 160×10^{-6})→低 145×10^{-6})→高 170×10^{-6})的韵律变化,但由图 2 的 Ni 的含量变化图可看出第 4 组中可分为高、低的小旋迴,经计算 4a 的平均含量为 163×10^{-6} (深度 542.5—622.5cm),同样第 2 组中也可分为 2a 和 2b 的小旋迴。由此可见 Ni 兼有 Fe、Mn 和 Cu 的特性,这可能是由于 Ni 是介于 Fe、Cu 间的过渡族元素特性所决定的。

2.5 钙硅质软泥、硅钙质软泥与多金属结核形成的关系

PC5794 柱状样早中新世早期沉积物 (厚约 560cm) 主要为硅钙质软泥和钙硅质软泥,根据 Ramsay (1974) 所说的第三纪的寒冷期导致了低纬度碳酸盐的大量沉积。由于信风的加强,太平洋东部 (美洲) 岸外高营养物质的深层上升流与加利福尼亚流的加速运动,使北赤道流与赤道逆流获得更多的营养物质的补充,引起生物生产力的提高,从而使东赤道太平洋得到丰富的物质供给,而沉积了厚层的硅钙质软泥。据氧同位素研究 PC5794 早中新世早期有两次冰期,也可认为本研究区的硅钙质软泥的富集在一定程度上为寒冷气候环境下的产物。另外根据黄永祥等^[7]的观察,发现沉积物中 $CaCO_3$ 含量降低层段生物扰动构造发育,沉积物颜色较深,是一种富氧环境,有利于生物的活动和金属的氧化。另外还有南极底层流的影响,使这一时期具备了有利于多金属结核形成的环境,这时期主要形成沉积型多金属结核。

3 结 论

利用钙硅质和硅钙质软泥,系统地研究其氧同位素组成,可了解研究区古温度的变化趋势及其与成矿元素的关系等,主要结论如下:

1) 本研究区早中新世早期氧同位素的组成可分为五组,由下往上由高→低→高→低→高两个半旋迴。

2) 据氧同位素值换算成古温度,可知本区早中新世早期出现三次暖期和二次冷期。冷期为冰期。

3) 无生物 $CaCO_3$ 条件下的成矿元素与古温度间的关系具三种状态: Mn、Fe、Co 含量变化趋势与古温度呈正比; Cu 含量与古温度呈反比; Ni 则介于上述二种类型之间。究其原因可能是: 多金属结核、沉积物和大洋水共处于一个统一的体系中,在冰期南极底层流相对较发育,更有利于多金属结核的形成。大量的 Mn、Fe、Co 赋存于结核矿物中,而相应的少量的 Mn、Fe、Co 存留在沉积物中。在冰期结核形成时部分 Cu 进入其中,但还有相当一部分保留在沉积物中,因而在南极底层流相对发育的冰期沉积物中的 Cu 含量高于暖期。

4) 本研究区早中新世早期硅钙质软泥与钙硅质软泥为寒冷气候下的沉积物,有利于沉

积型多金属结核的形成。

参 考 文 献

- 1 Epstein S et al. Revised carbonate-water isotope temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1953, 64:1315—1326.
- 2 Shackleton N J and Opdyke N D. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific Core V28—238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research.* 1973, 3: 39—55.
- 3 弗雷克斯 L A 著. 赵希涛等译. 地质时代的气候. 海洋出版社, 1984.
- 4 Birchfield G E. Changes in deep-ocean water $\delta^{18}\text{O}$ and temperature from the last glacial maximum to the present. *Paleoceanography.* 1987, 2: 341—342.
- 5 许清华. 古海洋学的历史与趋向. *海洋学报*, 1984, 6 (6): 830—842.
- 6 陈宗团等. 东太平洋中新统氧同位素地层与古海洋学意义. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13 (1): 84—94.
- 7 黄永洋等. 东太平洋海底沉积物类型及其地球化学环境对多金属结核形成与分布的控制作用. 中国地质大学 (武汉) 出版社, 1996.

Oxygen Isotope, Paleoclimate and Ore-forming Element Characteristics of East Pacific Basin Reflected by PC 5794 Columnar Sample

Shen Guimei, Yang Huining

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Key words: oxygen isotope; paleoclimate; ore-forming element; East Pacific Ocean

Abstract

According to the study of PC 5794 columnar sample (47—695cm, early period of Early Miocene) from East Pacific Basin in such aspects as oxygen isotopes, biogenic CaCO_3 , paleotemperature and ore-forming elements, the region had the following features in the early period of Early Miocene: $\delta^{18}\text{O}$ values of sediments might be roughly divided into five groups; paleoclimate experienced cold-warm alternations composed at least of three warm periods and two cold (ice) periods; oxygen isotopes were in direct correlation with biogenic CaCO_3 ; Mn, Fe, Co, Ni were in negative correlation with $\delta^{18}\text{O}$ values but Cu in direct correlation with paleotemperature.