

太平洋 CC 区的沉积间断与多金属结核的关系^①

钱江初

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

提 要 根据对取自东北太平洋“克拉里昂”和“克里帕顿”两断裂带之间的 430 号柱状岩芯的多学科的综合分析结果, 发现该岩芯中至少存在四个比较明显的沉积间断。这四个沉积间断分别处于岩芯的表层、28cm、215cm 和 320cm 处, 其年代分别为全新世、中更新世、上上新世和中中新世—上上新世。南极底层流的发育则是造成上述沉积间断的主要原因。在该柱状岩芯中, 除了在其表层有多金属结核外, 另外还在其 28cm 处和 320cm 处发现有埋藏结核层, 这三层结核的形态、矿物及年代等诸方面虽有差异, 但它们均先后形成于该岩芯中的 320cm 处、其起始年代为距今 1.2×10^7 a 的那个大的沉积间断中。

关键词 北太平洋 南极底层流 沉积间断 多金属结核

分类号 P 512.3

作者简介 钱江初 男 47 岁 副研究员 海洋地质 地球化学

大洋多金属结核的生长和发育, 受到诸多因素的影响, 如组成结核的物质来源、结核的核心材料、水深、沉积物—水界面的 pH、Eh 等地化特征及上覆水体的生物生产力等。但是, 多金属结核所处的海底沉积作用对结核的生长发育影响最大。众多的研究已经表明: 沉积间断或者极低的沉积速率是多金属结核能否生成并发育的最为重要的控制因素。

在 88 航次所取得的第 430 号站柱状岩芯中, 发现在 28cm 深处有两个埋藏结核; 而在 320cm 处发现有一埋藏结核层, 共有 9 个结核, 据计算其丰度高达 $30\text{kg}/\text{m}^2$ 。为了搞清这些埋藏结核与表层结核之间的联系, 了解多金属结核的生长发育与沉积间断的关系, 我们对该柱状岩芯进行了沉积物岩性、矿物、化学、古生物、古地磁及同位素测年等多学科的分析测试。在综合上述分析测试结果后, 发现在 430 柱状岩芯中, 至少存在四个比较明显的沉积间断, 而且无论是表层结核还是埋藏结核, 它们的生长发育都跟沉积间断有密切的关系。

1 柱状沉积样的基本特征与地层时代

430 站柱状沉积样取自东太平洋“克拉里昂”和“克里帕顿”两断裂带(亦称 CC 区)之间的西部($10^{\circ}30.67'N, 156^{\circ}29.50'W$)。该站水深为 4781m, 柱状岩芯长 395cm。取样地点位于海山斜坡的下部, 表

层沉积物为钙质粘土。

该柱状沉积物由下至上的沉积相可分: 富含铁锰的泥质沉积相—富硅质壳体的硅质沉积相—富钙质壳体的钙质沉积相。沉积物色调为棕褐色—褐色—褐黄色而由深变浅。在矿物组分上, 由下到上, 沸石和粘土含量渐渐减少而生物组分则逐渐增多。在构造上为均质构造—斑点状构造—环状构造—团块角砾状构造; 生物扰动现象自下而上逐渐增强^[1]。

根据微体古生物的分析研究, 该区域的 CCD 位置约为 4900m 左右, 因此该站正处于 CCD 界线附近, 表层 28cm 以上层段含有丰富的有孔虫壳体及其碎片, 碳酸钙含量一般在 20% 以上; 而 28cm 以下层段基本不见钙质有孔虫, 碳酸钙含量只有 5%, 这说明柱样中 28cm 以下层段是在 CCD 界面以下的沉积环境中形成的^[1]。

值得指出的是, 该柱样岩芯除了在表层发现有多金属结核以外, 还在 28cm 处和 320cm 处分别发现有埋藏结核, 尤其是在 320cm 处为一密集的结核埋藏层, 共有 9 个结核, 据计算其丰度高达 $30\text{kg}/\text{m}^2$ 。这样高的丰度即使在表层中也绝无仅有的。这说明该处当时具备了极为有利于结核生长发育所需的沉积和地化等环境条件。

为了进行该柱状岩芯的古地磁测试, 从该岩芯的顶部到底部连续取得厚度为 2.2cm 的小柱状分样 131 块。样品经过天然剩余磁化强度(NRM)的

① 收稿日期: 1996-09-02

测定以及经 20mT 的交变退磁后得出该柱状岩芯的磁倾角的测试结果(图 1)。图中原生剩磁的地层层序、磁化极性期和极性事件,以距今 5Ma 以来修正了的地磁极性年表为准(Mankinen and Darymple, 1979)⁽¹⁾。从图中可知,自上而下依次为布容正相期、松山反相期和高斯正相期,磁性地层大致上具连续沉积的特征。从岩芯的 214cm 处一直到岩芯底部都呈正相极性,是否均属高斯正相期尚难定论。根据铀系测年结果,该站的沉积速率约为 0.8mm/ka 左右,属极慢的沉积区。高斯正相期的年代跨度约为 900ka 左右,而柱状岩芯长度却大于 181cm (214cm~395cm),其平均沉积速率则大于 2mm/ka。另根据在该岩芯的 320cm 处的那一层埋藏结核等资料分析,该处很可能有一个时间跨度很大的沉积间断,综合上述的资料可知,岩芯底部的正相极

性,可能不属高斯正相期,而可能是吉尔伯特反相期中的某个正极性事件。

430 号柱状岩芯的沉积物特征、古地磁极性期和地层的划分见图 2。

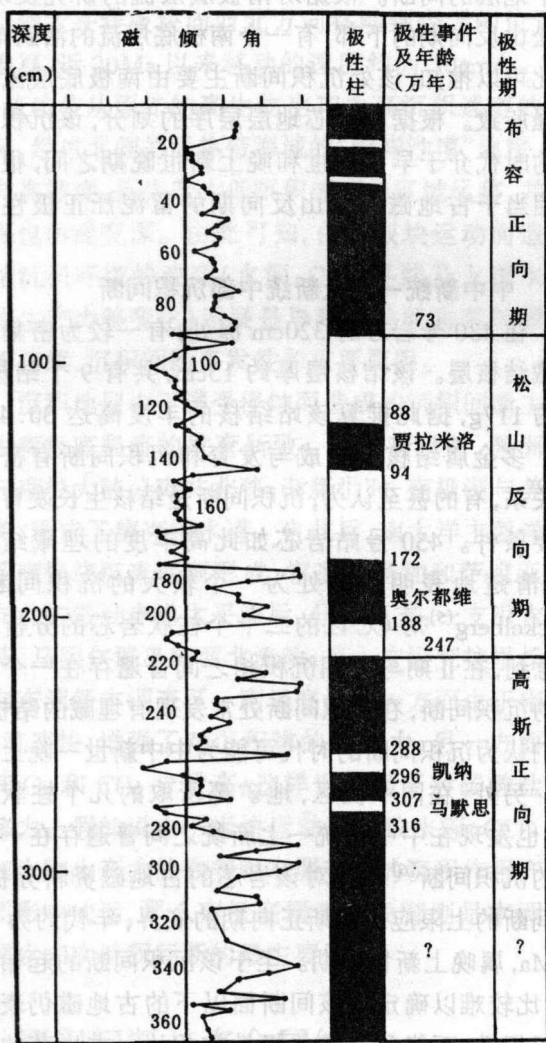
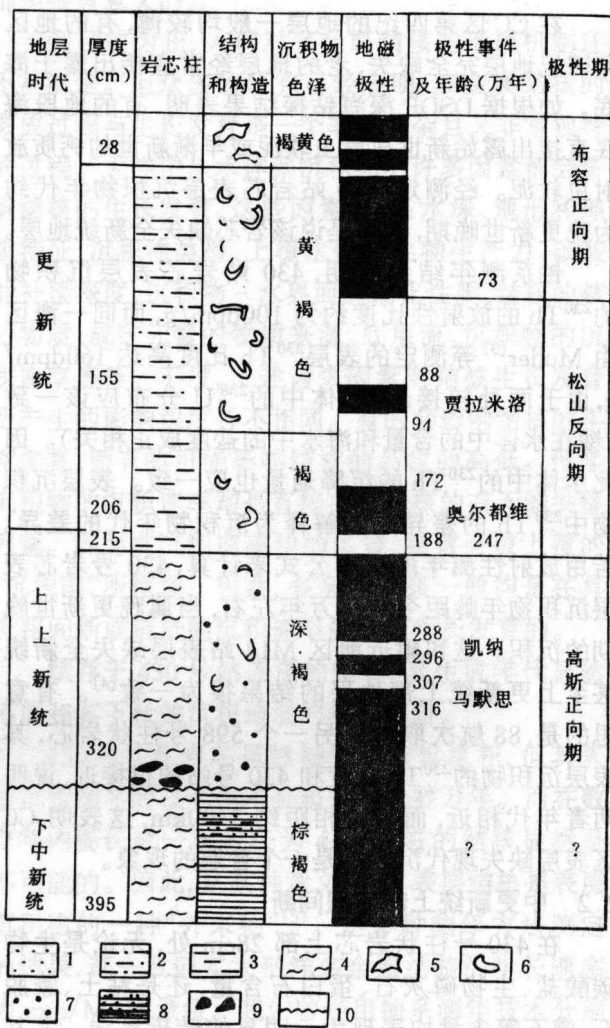


图 1 430 柱样古地磁地层分析

Fig. 1 The paleomagnetic analysis of Core 430



- 1. 钙质粘土 2. 硅质粘土 3. 深海粘土
- 4. 含沸石粘土 5. 角砾状构造 6. 团块构造 7. 斑点状构造
- 8. 均匀细腻结构 9. 锰结核 10. 间断面

图 2 430 柱岩芯的地层时代和沉积物特征

Fig. 2 The sedimentary characteristics and the stratigraphic age of Core 430

2 沉积间断

大量的研究已经表明,深海大洋的沉积作用并非一定是一连续的过程。沉积间断无论从空间上还是从时间上来说均具普遍性。例如,早第三纪广泛分布的深海沉积间断((PH)有五个,而晚第三纪沉积间断(NH)有九个⁽²⁾。

根据 88 航次 430 站柱状岩芯的沉积物类型、矿物、化学、微体古生物、古地磁和铀系测年等资料,以及对该柱样地层的划分和年代的推测,可以初步确定该岩芯有四个沉积间断。

2.1 全新统地层的缺失

在 CC 区第四纪的地层一般均较薄,有的地区第四纪地层完全缺失,老的地层经常直接出露于海底。如根据 DSDP 深海钻探结果表明,有的地段海底直接出露始新世放射虫软泥或早渐新世的钙质放射虫软泥。经测定,430 站岩芯表层沉积物年代约为晚更新世晚期,也就是说该岩芯缺失全新统地层。

铀系测年结果表明,430 站岩芯表层沉积物的²³⁰Th 的放射性比度约为 100dpm/g,而同一海区由 Muller^[3]等测定的表层²³⁰Th 比度高达 160dpm/g,由于两处较接近,水体中的²³⁸U 分布应该一致(铀在水体中的含量和海水中的盐度成正相关)。因此水体中的²³⁰Th 的沉降通量也应一致。表层沉积物中²³⁰Th 的差异只能解释为沉积物年代的差异。若用放射性测年的基本公式来计算,430 号岩芯表层沉积物年龄距今约四万年左右,当属晚更新世晚期的沉积。这和附近海区 M14 站表层缺失全新统甚至上更新统上部地层的结果很为一致^[4]。有意思的是,88 航次取得的另一个 598 号柱状岩芯,其表层沉积物的²³⁰Th 比度和 430 号站的很接近,说明两者年代相近,而两站相距约 1400km,这表明 CC 区表层缺失现代沉积物是一个普遍的现象。

2.2 中更新统上部沉积间断

在 430 号柱状岩芯上部 28cm 处,无论是生物碳酸盐、生物磷灰石、蛋白石含量,还是粘土、蒙脱石、沸石等含量均表现为一明显的转折界线。尤其是生物碳酸盐含量最为明显。在 28cm 以上的沉积物中含有丰富的有孔虫,碳酸钙含量一般在 20% 以上;在 28cm 以下基本不见有孔虫,碳酸钙含量也只有 5% 左右。岩芯的沉积物类型亦由上部的钙质粘土变为下部的硅质粘土。这些现象表明当时的沉积环境可能有一个较大变化。前者可能是 CCD 界面之上的沉积,后者可能为 CCD 界面之下的沉积。此外,在该处还发现两个埋藏多金属结核。综合上述资料,该处存在有一个沉积间断的可能性比较大,而且该沉积间断可能是由于古气候抑或其他原因导致了测区的 CCD 界面的改变,从而产生沉积作用的间断。

古地磁资料显示该处为布容正向期中的一个反

向极性事件。若用布容正向期平均沉积速率 1.3mm/ka 来推算,该处的年代约为 230ka 左右,由此推知,该事件可能为牙买加事件或琵琶湖反向极性事件,但还有待于其他资料的证明。

2.3 上上新统上部沉积间断

从 430 号岩芯的古地磁资料可知,Olduvai 事件的底界在岩芯 206cm 处,而松山反向期的底界在 215cm 处,其间岩芯厚度不足 10cm,而年代跨度有 500ka 左右。照此推算,这一期间平均沉积速率不足 0.2mm/ka,这比岩芯其他任何时代的平均沉积速率都要小很多。从沉积物类型看,自 206cm 到 215cm 处,粘土矿物含量和蒙脱石含量有一大的变化过程,沸石含量相对增加。另外,生物蛋白石(海绵骨针)却从很低的含量转变为稳定的较高的含量。这些都表明该处沉积环境有较大的变化,可能存在一个地层的间断。根据对南极底层流的研究发现,在松山反向期的下部,有一个南极底层流的活跃期,由此可以推知,该处沉积间断主要由南极底层流的增强所致。根据本岩芯地层层序的划分,该沉积间断的时代介于早更新世和晚上新世晚期之间,很可能相当于古地磁的松山反向期的留泥汪正极性事件。

2.4 中中新统一上上新统中部沉积间断

在 430 号岩芯的 320cm 深处,有一较为密集的埋藏结核层。该结核层厚约 15cm,共有 9 个结核,重约 117g,据此推算该站结核的丰度高达 30.4g/m²。多金属结核的生成与发育和沉积间断有密切的关系,有的甚至认为,沉积间断是结核生长发育的必要条件。430 号站岩芯如此高丰度的埋藏结核层,清楚地表明了该处为一个较大的沉积间断。Stackelberg^[5]对 CC 区的二十个柱状岩芯的分析后注意到,在 II 期与 III 期沉积相之间普遍存在一个较大的沉积间断,在沉积间断处常发现有埋藏的结核。他们认为沉积间断的时代可能为中中新世—晚上新世。另外,在同一测区,地矿部所取的几个柱状岩芯,也发现在中中新统一上新统之间普遍存在一个大的沉积间断^[6]。经对该岩芯的古地磁资料分析,该间断的上限应为高斯正向期的底界,年代约为 3.48Ma,属晚上新世中期。至于该沉积间断的起始年代,比较难以确定。该间断面以下的古地磁仍表现为正极性,不能和标准的极性柱相比。本岩芯的放射虫分析表明,岩芯底部存在中中新统下部地层,但缺失中中新统中部、上部及上新统下部的地层^[1]。由此

可推知该沉积间断起始于中新世中期,结束于晚上新世中期,其中,中新统上部、上新统下部及中部地层缺失,这和 Stackelberg 及 Glasby 的结果相符。因此,我们可以推测该沉积间断可能就是太平洋存在最广泛,对多金属结核生长发育影响最大的距今约 12Ma 的沉积间断事件^[7]。

以上是 430 号站柱状岩芯的主要沉积间断。另外还可能存在时间跨度短、规模比较小的沉积间断,如松山反向期贾拉米洛和奥尔都维事件之间也可能有一沉积间断,但因其它证据不足,故无法确定。

沉积间断的产生主要是由于地层长期无沉积或受侵蚀这两种情况所致。而地层长期无沉积主要由低的生物生产力,CCD 界面的上升或者底层水对碳酸盐溶解作用加强等因素所造成。

根据对太平洋板块活动的推测,大约在 50Ma 以前,430 号站所处的位置紧靠赤道区(约 1.5°N),尔后随太平洋板块向西北方向移动到今天的位置。据推算,近 20Ma 以来移动的速度约为 10cm/a。因此,该站位从原先的高生物生产力高沉积速率的赤道区,经过北侧的亚热带海域的“海洋沙漠”地带,逐渐向高纬度,低生产力低沉积速率的区域运移,并且水深也由浅变深。由此可知,由于板块运动而造成该站沉积环境的改变(水深、CCD 界线及上覆水体生物生产力等变化)无疑是导致该柱状岩芯沉积作用不连续,沉积间断多发性的主要原因。

沉积地层由于遭受侵蚀而造成的沉积间断主要是由南极底层流的发育所致。在始新世时,澳洲大陆与南极大陆分离并北移;渐新世时,南极洲与美洲分离,形成了德克雷水道。自此后,南大洋主要洋流体系南极绕极流逐渐形成,它通过汤加和萨摩亚海盆向北扩散到赤道太平洋后,分为两支:一支沿吉尔伯特,马绍尔群岛向西北流动;另一支沿克拉里昂通道向东流经本调查区。南极底层流一方面由于密度大、流速快,增强了对沉积物的冲刷力;另一方面由于其 O₂ 和 CO₂ 含量高,这样也增强了对碳酸盐的溶解力。假如说由于板块运动而导致水深,CCD 界面和生物生产力的改变对本调查区的沉积作用产生重要影响的话,那么南极底层流的发育则是本调查区产生多次沉积间断的最主要原因。

3 沉积间断与多金属结核

在 430 号柱状岩芯共发现有 3 层结核,它们分

别为:1. 表层结核;2. 在 28cm 处有两个较小的埋藏结核;3. 位于 320cm 处,共有 9 个埋藏结核,其粒径比表层的要小,据估算该层结核的丰度高达 30kg/m²。显然,了解这三层结核之间的相互关系,对于搞清结核形成的年代以及沉积间断的关系等问题,都是很有意义的。

到目前为止,人们对多金属结核的形成机制还不甚清楚。但众多的研究已经表明,多金属结核的形成过程与生长发育是一个非常复杂且又非常独特的过程。大洋中从水体到沉积物的许多因素都会影响结核的生长发育,这些因素包括:水深、地形和地貌特征、沉积物类型、上覆水体的生物生产力、碳酸盐补偿深度、沉积物-水界面的地化性质、结核的核心物质、成矿元素的物质来源、底层流、沉积物的沉积速率等等。不过,上述诸多因素对结核生长发育所产生的影响程度各不相同。有的会影响结核的丰度多寡;而有的可能影响结核的品位的高低。但是沉积物的沉积速率却是直接决定结核的有无的关键因素。因为在沉积速率快的区域,结核会被上覆的“沉积雨”所掩埋。因此,多金属结核一般均是在具沉积间断或极低的沉积速率的海底生长发育的。

赋存于 430 号站表层的结核,其生成年代显然不能和其下伏的沉积地层的年代相符。

430 号柱状岩芯虽然缺失全新世沉积,但其表层沉积物年龄最老也不会超过距今数万年。而在数万年内要长成一层粒径为 4cm 左右的结核显然是不可能的。因此,从某种意义上来说,表层结核是表层沉积物的一种“外来物”^[5]。用多种测年方法测定的结果,都一致证实太平洋多金属结核的生长速率为 mm/Ma 数量级。我们曾经用铀系测年技术分别对 85、87 和 88 航次所取得的 5 个结核的上部和下部共 10 组样品进行测定。得出结核的生长速率在 1~7mm/Ma 之间^[1,8],其中多数为 3mm/Ma 左右(表 1)。表层结核的粒径一般都在 4cm 左右,即使结核自形成后连续生长而未间断过,那么长成粒径为 4cm 的结核,至少需要 6Ma 以上。参照 430 号站柱状岩芯地层的划分时代的推测,年代老于 6Ma 且又适宜于结核生长的沉积间断只有位于 320cm 处的那个大的沉积间断。

位于 320cm 处的埋藏结核的粒径一般较小,其中最大的一个为 4×3.5×2cm。设该处的结核开始时亦以 3mm/Ma 的速率生长,但一旦被掩埋后生长就停止,那么据估计这些结核从形成至今的年龄约

为9Ma(结核生长的年龄加上被埋藏后至今的年龄)。这也正好落在320cm处的沉积间断内。

表1 多金属结核生长速率测定结果

Table 1 The growth rates of the polymetallic nodules

| 结核编号 | 外型 | 粒径 (mm) | 部位 | ^{230}Th 测定生长速率 (mm/Ma) | $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 测定生长速率 (mm/Ma) |
|-------|--------|------------|----|----------------------------------|--|
| M1 | 扁圆球 | 50×35×30 | 上部 | 1.11 | 1.02 |
| | | | 下部 | 2.43 | 2.55 |
| M2 | 圆球 | 50×40×45 | 上部 | 2.28 | 2.98 |
| | | | 下部 | 6.98 | 8.58 |
| M3 | 椭圆球 | 50×35×55 | 上部 | 2.93 | 3.07 |
| | | | 下部 | 3.31 | 3.27 |
| M4 | 三角形 | 结核长在鲨鱼牙齿之上 | 上部 | 3.46 | 3.65 |
| | | | 下部 | / | / |
| m5 | 圆盘状 | 40×30×20 | 上部 | 2.04 | 2.06 |
| | | | 下部 | 5.24 | 3.24 |
| M1—M5 | 平均生长速率 | | | 3.31 | 3.48 |

从结核的形态上看,两层结核均同属于S型,而X衍射分析结果表明两者都以1nm锰矿相为主,少量的0.7nm锰矿相(埋藏结核的0.7nm/1nm要比表层的大些)。虽然表层结核的Cu、Co、Ni的含量比埋藏结核的大得多。但有文献报道,结核被埋藏后,长期处于压实状态及还原环境中,经过脱水和成岩作用,成矿元素Mn、Cu、Ni和Co等将从结核中释放出来,而那些成岩元素可能被结核所汲取。因此,我们有理由推测,这些结核在被埋藏前的成矿元素的含量可能和表层结核的相似。

Stackelberg^[5]发现在CC区的埋藏结核大都位于中中新世—上上新世的沉积间断中。他们对比了表层和埋藏结核的核心物质,发现两者的结构和组分均相似,由此,他们认为表层结核和埋藏结核是在同一时代内生成的。我们虽未对这些结核的核心物质进行分析,但根据上述对两者年龄的推测,表面形态及X衍射特征,并综合本测区南极底层流消长,沉积间断等资料,可以推测430号站柱状岩芯的表层和埋藏结核均先后形成于时代为12Ma~3.5Ma的中中新世—上上新世的沉积间断中。由于该沉积间断的时间跨度大,在该间断先后不同时代形成了年龄老幼各异,粒径大小不一的各类结核。当沉积间断结束后,其上部重新开始接受沉积物。有些结

核,在底栖生物或底流等外力作用下,克服了上覆沉积物的掩埋,一直能保持在沉积物的表层,并且逐渐长成为目前的表层结核;而另一些结核,却被逐渐增厚的沉积物所掩埋,分别成为目前位于320cm处和28cm处的埋藏结核。因此,用形象的语言表示:这三层结核犹如同一父母所生的孩子,而被埋藏的结核仅仅是表层结核的由于某种原因而早夭的兄弟。

虽然从总体而言,埋藏结核仅占结核总数的极小部分。但是,在相同的沉积环境中,为何这些结核在生长发育中途被沉积层所掩埋,而大部分其他结核却一直能保留在沉积物—水界面之上这一疑问,是多金属结核研究中的最为棘手的问题之一。虽然不少学者对这个问题进行了不少的研究,提出了诸如火山作用、地震作用、底流作用和底栖生物作用等多种假设,但至少尚未有圆满的答案,有待于今后进一步深入的研究。

4 小 结

(1)根据对430号站岩芯多学科的分析资料,该岩芯自中新世早期以来不是一个连续沉积过程,其中至少有四个明显的沉积间断,它们的年代分别为全新世、中更新世、上上新世和中中新世—上上新世。

(2)上述沉积间断的产生原因,一方面可能是由于太平洋板块向西北方向的移动,从而导致该地区CCD界面上升,沉积环境的改变所致;但其主要原因可能是由于自中新世以来所发生的南极底层流的消长所引起的。

(3)根据对430号站岩芯表层及埋藏结核的分析后发现,尽管结核的产状不同,但它们的生成、发育与沉积间断有密切的关系,它们均生成于位于320cm处的这个北太平洋发育最普遍的中中新世—上上新世的沉积间断中。

参 考 文 献

- [1] “东太平洋多金属结核资源调查”(1987~1990). 国家海洋局科技司,北京:海洋出版社,1996.
- [2] Keller. et. al., Paleocceanographic implications of Middle Eocene hiatuses. Second International Conference on Paleocceanography, Abstracts with Program, Woods Hole, 1986.
- [3] Muller. et. al., Organic carbon decomposition rates in the sediments of the Pacific manganese nodule belt dated by ^{230}Th and ^{231}Pa . Earth and Planet. Sci. Lett., 1980, 51:94~114.

- [4] “太平洋北部锰结核调查综合研究报告”. 国家海洋局第一海洋研究所, 北京: 海洋出版社, 1986.
- [5] Stacklberg. Sedimentation, hiatuses and development of manganese nodules. *Marine Science*, 1979, 9: 559~586.
- [6] “太平洋中部多金属结核的研究”. 地矿部海洋地质调查局, 北京: 地质出版社, 1990, 11.
- [7] Glasby. Deep-sea manganese nodules in the stratigraphic record: evidence from DSDP core. *Marine Geology*, 1978, 28: 51~64.
- [8] 钱江初. 太平洋锰结核生长速率的初步研究. *沉积学报*, 1990, 8(1): 123~128.

The Relationship between the Sediment Hiatuses and the Polymetallic Nodules in the CC Zone of North Pacific

Qian Jiangchu

(Second Institute of Oceanography, SOA., Hangzhou 310012)

Abstract

According to the results of multidisciplinary analyses with different methods, we found that there were at least four hiatuses in a sediment core taken from CC Zone in North Pacific. These hiatuses are as follows: Holocene, Middle Pleistocene, Upper Pliocene and Middle Miocene. The main cause of these hiatuses is the Antarctic Bottom Water (AABW).

There were three layers of polymetallic nodules in this sediment core. They were the surface nodules, the buried nodules in the depth of 28cm and 320cm in the core respectively. These nodules were different in the size, chemical composition, mineral phases and age, but the origin of these nodules were all related to the hiatus in 320cm of the core which began at 1.2×10^7 a BP.

Key Words North Pacific Antarctic Bottom Water hiatus polymetallic nodules