

# 西太平洋边缘海的冰期碳酸盐旋回\*

汪品先

(同济大学海洋地质国家教委开放实验室, 上海 200092)

**摘要** 碳酸盐旋回是更新世深海沉积最显著的特征。西太平洋边缘海沉积中碳酸盐含量的时空变化尤为强烈, 所含深水化学、表层生产力和汇水盆地风化作用的信息也格外丰富。对鄂霍次克海、日本海、东海、南海和苏禄海等五个边缘海表层沉积中的碳酸盐分布和冰期碳酸盐旋回进行了比较。总的看来, 较深水区(水深 > 200m)的  $\text{CaCO}_3\%$  在高纬海区甚低, 而向较低纬海盆增多, 显示出碳酸盐百分比与水温和水深的密切关系。西太平洋边缘海至少可区分出四类不同的碳酸盐旋回, 即: 西北太平洋型, 日本海型, 大西洋型和太平洋型, 每个类型都蕴含着丰富的陆地和海洋环境信号。进一步的分析可以看出, 碳酸盐旋回的不同类型取决于各个海盆深层水的来源和性质, 而后者又决定于海盆的形态特征。较低纬度海区之所以存在两类不同的碳酸盐旋回, 是由于控制碳酸盐相对含量的三项因素(碳酸盐生产力、深海溶解作用和非碳酸盐成分的稀释作用)在溶跃层上下的组合不同。从碳酸盐的保存和溶解指标看来, 上述低纬边缘海的深海化学旋回仍属“太平洋型”, 只是由于生产力和稀释作用的缘故才在溶跃层以上呈现像“大西洋型”的旋回。

**关键词** 碳酸盐 冰期旋回 边缘海 西太平洋

碳酸盐的相对含量, 是深海沉积物最直观的特征变量, 也是最重要的古环境信息来源。有“海底雪线”之称的碳酸盐补偿深度(CCD), 是现代深海海底最重要的沉积界面, 深海地层中因百分含量随冰期/间冰期升降而造成的“碳酸盐旋回”, 是半个世纪以来海洋地质经久不衰的热门话题。1947~1948年瑞典“信天翁号”环球考察在热带太平洋沉积中发现碳酸盐冰期旋回<sup>[1]</sup>之后, “碳酸盐地层学”已成为识别冰期/间冰期沉积最为简捷的方法, 甚至用浅地层剖面<sup>[2]</sup>或测井技术<sup>[3]</sup>就可以划分冰期旋回、对比深海地层。而大西洋碳酸盐旋回与太平洋的不同<sup>[4]</sup>, 又使之成为研究冰期旋回中两大洋分异现象的得力途径。近年来随着“全球变化”研究的开展, 深海碳酸盐旋回更成为追踪大气  $\text{CO}_2$  去处的重要线索, 是认识全球碳循环的关键性环节之一。回顾我国古海洋学的研究, 也正是从深海碳酸盐旋回起步的(如汪品先、郑连福, 1982)<sup>[5]</sup>。而南海碳酸盐溶跃面以上属“大西洋型”旋回<sup>[6]</sup>, 溶跃面以下属“太平洋型”旋回<sup>[7, 8]</sup>的发现, 就更加激发了对冰期碳酸盐研究的浓厚兴趣。目前, 深海碳酸盐旋回是我国对南海古海洋学工作进行最多的课题之一(如文献<sup>[9~13]</sup>)。

西太平洋边缘海处在全球最大的大陆(亚洲)和最大的大洋(太平洋)之间, 在其沉积物

\* 国家自然科学基金重点项目(第 49732060 项)

作者简介: 汪品先, 男, 1936 年出生, 中国科学院院士, 从事海洋地质与古海洋学研究, Email: Pwxang@online.sh

中蕴藏着有关海洋、陆地及其相互作用的丰富信息,冰期碳酸盐旋回便是其中重要的一项。大陆和海洋之间的物质和能量的交换,对于全球气候变化具有头等重要的意义,因此边缘海的连续记录就显得格外重要。本文根据中国海的研究成果,结合国外文献资料,对从鄂霍次克海到苏禄海的一系列边缘海进行比较,试图揭示边缘海深海碳酸盐旋回的各种不同表现,指出其控制因素和应用价值。

## 1 现代沉积物中的碳酸盐含量

沉积物中的碳酸盐百分含量,取决于三大因素<sup>[14]</sup>:(1)具碳酸盐即钙质骨骼的生物生产力,主要指浮游生物如有孔虫、颗石藻、翼足类,也包括珊瑚、苔藓虫和贝类壳体碎片的输入量;(2)非碳酸盐沉积物,首先是陆源碎屑矿物的输入,即非钙质颗粒的“稀释作用”;(3)碳酸盐的深海溶解作用,它随着水温降低、压力加大而增强。与此相应,钙质生物的产量和保存程度,也随着海区所处的纬度而异:高纬的冷水海区以硅质骨骼的浮游生物如硅藻、放射虫为多,而低纬的暖水海区一般由钙质骨骼的浮游生物如颗石藻、有孔虫占优势<sup>[15]</sup>。西太平洋边缘海沉积物中的碳酸盐含量,也就是由这些因素所控制。

汇集东亚各边缘海较深水区( $> 200\text{m}$ )表层沉积物中 $\text{CaCO}_3\%$ 的现有资料,可以得出分布概况如图1-a所示<sup>[16]</sup>。图中 $\text{CaCO}_3\%$ 向低纬度海区增高的趋势最为醒目:鄂霍次克海大部分海区几乎不含碳酸盐,一般均在0.1%之下;日本海北部碳酸盐也十分贫乏,靠近南部才有百分之几的含量;东海冲绳海槽和南海CCD以上的 $\text{CaCO}_3$ 含量至少在10%~30%之间;到苏禄海和苏拉威西海则一般均在30%以上。因此,高纬度的鄂霍次克海是全球海洋沉积物中蛋白石含量最高的海区之一<sup>[15]</sup>,而南海等低纬海区、特别是珊瑚礁附近海区,碳酸盐成为沉积物的主要成分。

如果进一步观察各个海区内部,可以看出 $\text{CaCO}_3\%$ 受水深的控制(图1-b):鄂霍次克海的深水盆地位于东南部,而海区中央由于水浅,陆源沉积又难以到达,因此 $\text{CaCO}_3\%$ 相对稍高( $> 0.1\%$ )。日本海与之相反,中央海区水体较深, $\text{CaCO}_3\%$ 较低( $< 0.1\%$ ),而在南部的大和隆起较浅水区和接近对马海峡的对马暖流流入区, $\text{CaCO}_3\%$ 一般已在10%~30%,接近珊瑚礁区可高达50%~60%,但海槽南端接近台湾处水深逾2000m, $\text{CaCO}_3\%$ 再度回落到10%以下。南海海底的碳酸盐含量十分悬殊:中央海盆因深在CCD之下, $\text{CaCO}_3$ 含量不到10%,但珊瑚礁碳酸盐台地则在30%以上。苏禄海、苏拉威西海的深水部分在其东南部,碳酸盐含量明显不如较浅水区。

综观本区沉积物中碳酸盐相对含量的分布,无非是海水化学特征和陆地剥蚀作用的反映。现代北太平洋海水中的碳酸盐饱和深度由南向北变浅<sup>[17]</sup>,西北太平洋边缘海的二氧化碳系统各不相同,而汇水盆地的剥蚀速率又以东海、南海为最高,这种种因素决定了表层沉积物中的碳酸盐相对含量的布局。冰期时的海平面与气候变化在各个边缘海造成的影响不一<sup>[18]</sup>,其碳酸盐旋回的表现形式自然也不相同。

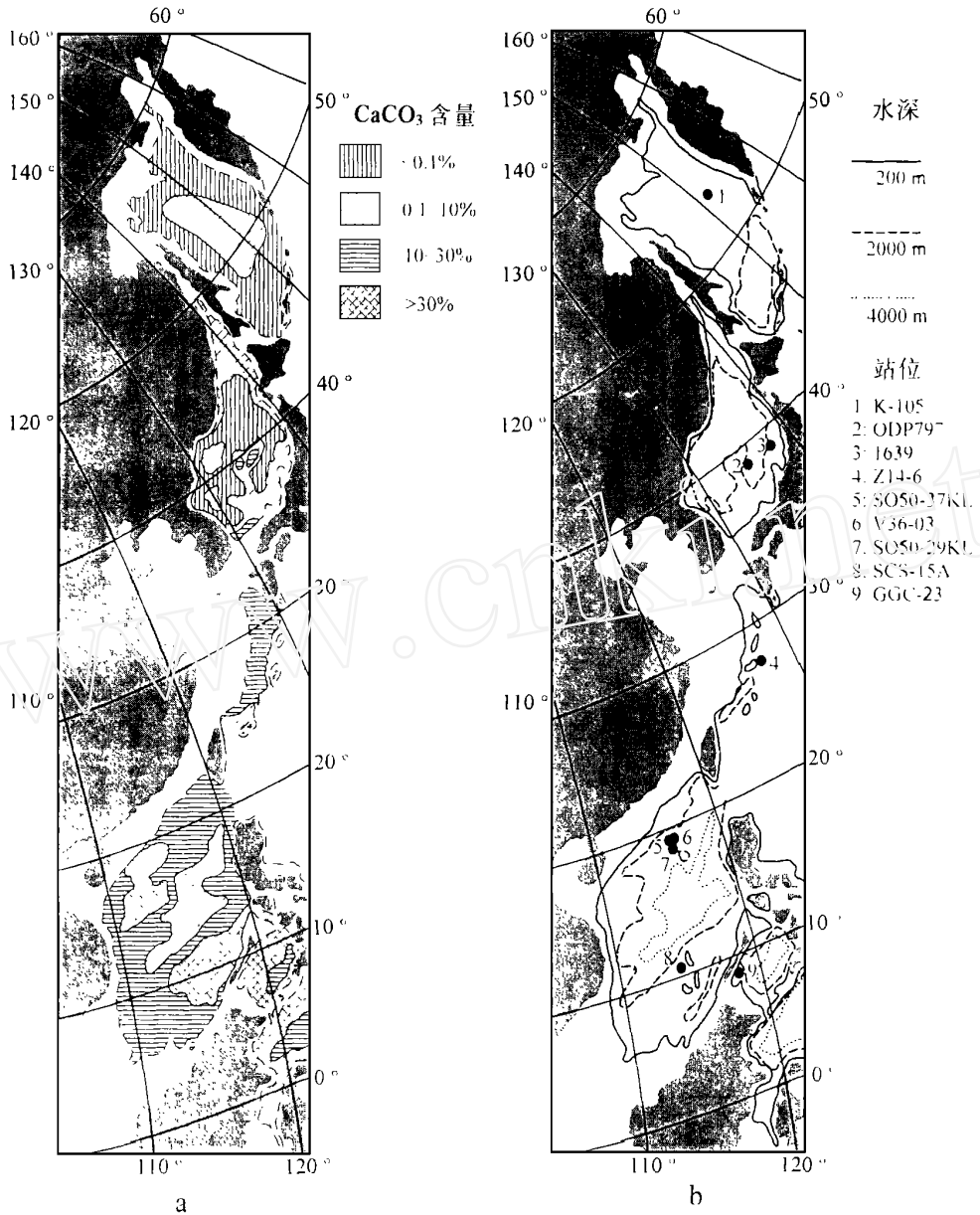


图 1 西太平洋边缘海(鄂霍次克海到苏拉威西海)较深水区 (> 200m) 表层沉积中  $\text{CaCO}_3\%$  分布<sup>[16]</sup>以及水深略图及若干沉积柱状样站位图  
a  $\text{CaCO}_3\%$  分布 b 水深及站位

Fig 1  $\text{CaCO}_3\%$  distribution in surface sediments of deeper water area (> 200m) (shown in Fig 1-a), water depth sketch and sampling sites locations (Fig 1-b) of the Western Pacific marginal seas (from the Sea of Okhotsk to the Sulawesi Sea)

## 2 冰期碳酸盐旋回的不同类型

冰期碳酸盐旋回在不同地点的共性,可以通过“碳酸盐地层学”用来对比地层;不同海域之间的差异,又可以通过相互比较来揭示环境变迁中的特色。西太平洋边缘海之间碳酸盐旋回的横向比较,在古环境研究上应当具有明显的价值。可惜迄今为止的讨论,主要局限于低纬海区,除我国的工作已如上述外,美、德等国学者在南海<sup>[19-21]</sup>和苏禄海<sup>[21,23]</sup>也进行了大量研究工作。其他海区的碳酸盐旋回缺乏专门的讨论,但可以从有关文献中提取数据加以整理,得出其代表性剖面的 $\text{CaCO}_3\%$ 曲线。在此基础上选择了五个海区(鄂霍次克海、日本海、东海、南海、苏禄海)共七个剖面的晚第四纪 $\text{CaCO}_3\%$ 曲线,示于图2,七个站位的有关情况列于表1。

表1 西太平洋五个边缘海晚第四纪典型碳酸盐剖面的位置(图1-b,图2)

Table 1 Locations of Late Quaternary typical carbonate sections from the 5 marginal seas of the Western Pacific (see Fig. 1-b and Fig. 2)

海区	站号	站位	水深(m)	资料来源
鄂霍次克海	K-105	52°53' N, 150°24' E	1 130	Gorbarenko, 1991 <sup>[24]</sup>
日本海	1639	38°38' N, 137°13' E	1 210	Gorbarenko, 1987 <sup>[25]</sup>
日本海	ODP797	38°37' N, 134°32' E	2 874	Tada et al., 1992 <sup>[26]</sup>
东海	Z14-6	27°07' N, 127°27' E	739	P. Wang, 1990 <sup>[27]</sup>
南海	SCS-15A	10°24' N, 114°14' E	1 812	C. Wang, 1986 <sup>[28]</sup>
南海	SO 50-29KL	18°20' N, 115°59' E	3 766	郑连福等, 1993 <sup>[8]</sup>
苏禄海	GGC-23	8°09' N, 188°34' E	990	Miao et al., 1994 <sup>[23]</sup>

和现代表层沉积一样,鄂霍次克海沉积物的碳酸盐含量在冰期旋回中总的来讲还是最低的。由图2-A可见,除相对暖期时出现的个别峰值外, $\text{CaCO}_3\%$ 的基本数值一直接近于零。在氧同位素1期与3期时虽然出现5%以上的短暂峰值,但并不以碳酸盐为限,而是与蛋白石以及有机碳的增多同期出现(详见Gorbarenko, 1991)<sup>[24]</sup>。这种在极低的基线上出现个别峰值的曲线,是一种与所谓“太平洋型”、“大西洋型”完全不同的碳酸盐旋回,只在西北太平洋天皇海岭上见过,被称为“西北太平洋型”<sup>[29]</sup>。

同样较高纬度区的日本海,碳酸盐旋回的曲线迥然不同。虽然 $\text{CaCO}_3\%$ 的基值也很低,但其峰值不是在暖期,而是在相对的冷期出现。如日本海中部的1639站柱状样和ODP-797孔,碳酸盐较高值都出现在氧同位素2、6和5期的晚期(图2-B<sup>[25,26]</sup>)。无论是俄罗斯还是日本学者所分析的许多沉积剖面,都表示出末次冰期( $\delta^{18}\text{O}$ 第2期)时有 $\text{CaCO}_3\%$ 峰值,而且与蛋白石的峰值明显不一致:由硅藻丰度显示的蛋白石高峰出现在暖期(图2-B)。

前面说过,早在十年前已经发现南海碳酸盐溶跃面以上的 $\text{CaCO}_3\%$ 曲线和 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线大体平行,呈现“大西洋型”的碳酸盐旋回<sup>[6]</sup>。接着又被大量南海站位<sup>[7-11,20,23,28]</sup>(如C. Wang et al., 1986; Thunell et al., 1992; Miao et al., 1994)和东海站位<sup>[27,30]</sup>的分析所证实;而溶跃面以下的站位,则呈现“太平洋型”旋回(如SO 50-29KL,图2-C、D)<sup>[7,8]</sup>。“太平洋型”与“大西洋型”碳酸盐曲线之间具有明显的相位差,而且在 $\delta^{18}\text{O}$ 第1、2期时呈现出相反的趋势<sup>[31]</sup>。同样的情况也见于苏禄海:溶跃面以上呈“大西洋型”(如GGC-23站剖面,见图2-E, Miao et al.,

1994), 溶跃面以下属“太平洋型”(如 SO 58-67KL, 8 30 N, 121 20 E, 水深3 350m<sup>[32]</sup>)。由此可见, 以溶跃面为界, 上下出现两种不同的碳酸盐旋回, 是较低纬度西太平洋边缘海的共同特点。

归纳起来, 东亚岸外的边缘海至少见到四种类型的晚第四纪碳酸盐旋回(图 3): (1)“西北太平洋型”(如鄂霍次克海, 图 2-A, 图 3-A); (2)“日本海型”(如日本海, 图 2-B, 图 3-B); (3)“大西洋型”(较低纬区溶跃面以上, 图 2-C, E 和 D 的 SCS-15A; 图 3-C); (4)“太平洋型”(较低纬区溶跃面以下, 图 2-D 的 SO 50-29KL; 图 3-D)。

### 3 边缘海碳酸盐旋回的控制因素

四类不同的碳酸盐旋回, 又一次证明了西太平洋边缘海的复杂性, 及其对冰期环境信号响应的多样性。首先是各个边缘海盆地不同的形态特征, 决定它们与大洋水体交换的区别, 导致深层水来源与性质的各异; 其次是气候环境的差别, 造成表层水生产钙质壳体能力的不同。其总体效果则表现为深积沉积中碳酸盐的获得与溶失在冰期旋回中有不同的变化趋势。

鄂霍次克海现代最大水深(B) 3 374m, 海槛水深(S) 约 2 000m, 两者相比 (S/B) 为 0.59, 属于与大洋联系

相当畅通的边缘海<sup>[16]</sup>, 与西北太平洋水体交换频繁, 因而碳酸盐旋回的类型也相一致。根据西北太平洋天皇海岭的研究, 碳酸盐含量在间冰期时增高<sup>[29]</sup>, 而较高分辨率的分析表明钙质壳生产力真正的增高发生在冰消期而不在冰后期<sup>[33]</sup>。鄂霍次克海的记录正是如此, 俄罗斯“卡里斯托号”从海区中所取五个沉积柱状样, 无论碳酸盐、蛋白石还是有机碳, 都是在氧同位素第 1、3、5 相对暖期时含量增高<sup>[34]</sup>, 与“西北太平洋类型”一致。该区生物成因的沉积

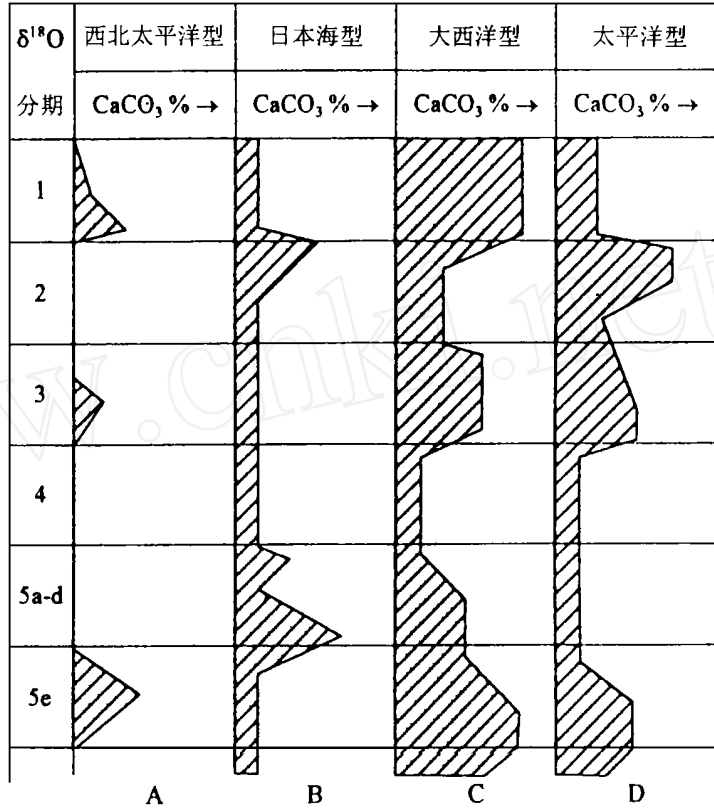


图 3 西太平洋边缘海晚第四纪  $CaCO_3\%$  曲线的四种类型

- A “西北太平洋型”碳酸盐旋回 B “日本海型”碳酸盐旋回
- C “大西洋型”碳酸盐旋回 D “太平洋型”碳酸盐旋回

Fig. 3 Types of Late Quaternary  $CaCO_3\%$  curves for Western Pacific marginal seas

A North western Pacific type, B Japan Sea type, C Atlantic type, D Pacific type

物无论钙质、硅质或有机质,在冰期时一概含量低下,推测应是海冰封锁所致。只有当转暖期海冰消融,生产力上升,才能使西北太平洋和鄂霍次克海的碳酸盐和其他生物成因的沉积物含量一起上升。

日本海的情况迥然不同。由于海槛(S)过浅(最深处仅 130m)、海盆太深(B= 4 049m),两者比值仅 0.03,日本海与太平洋的海水交换只限于最上层,由此以下直到深海底的日本海海水,都是由其北部的表层水在低温和强风作用下沉降而成,成为十分均一的“狭义日本海水(Sea of Japan Proper Water)”;水温只有 0~ 1℃,因此 1 200~ 1 400m 深处便出现溶跃层,1 400~ 1 600m 便是 CCD<sup>[35]</sup>。碳酸盐溶解深度特别浅,注定了日本海沉积中钙质化石难以保存,碳酸盐含量必然偏低。冰期时日本海完全封闭,表层水的低盐度造成海水分层,底层水咸度升高<sup>[25]</sup>,或者由于冰期时环流改组导致钙质浮游生物勃发,使冰期沉积中 CaCO<sub>3</sub>% 增高<sup>[26,36]</sup>。冰期时出现的 CaCO<sub>3</sub>% 高值并不与蛋白石或者有机碳的高值相对应(图 2-B)<sup>[24]</sup>,因此日本海的碳酸盐旋回别具一格,构成单独的类型。

东海、南海、苏禄海等的碳酸盐旋回具有相似性,已如前述,其实这些边缘海的深层水来源不一。南海主要以水深 2 600m 的巴士海峡与太平洋相通,现在其底层水来自西太平洋深层水,因此底层水温在 2℃ 左右;而苏禄海与南海之间主要以深 420m 的民都洛海峡相联通,苏禄海的底层水来自南海的次表层水,温度高达 10℃,比南海底层水暖得多,相应地其碳酸盐沉积的保存条件也好得多。碳酸盐溶跃层和 CCD 在南海分别为 3 000m 和 3 500m 左右,而在苏禄海却深达 3 800~ 4 000m 和 4 500~ 4 800m<sup>[37,38]</sup>。

南海和苏禄海的底层水既然如此不同,为什么在冰期旋回中,溶跃层上下的碳酸盐曲线会同样呈现出“大西洋型”和“太平洋型”两种类型?前面说过,CaCO<sub>3</sub>% 曲线是钙质壳生产力、深海碳酸盐溶解作用和非钙质沉积物稀释作用等三种因素迭加的产物,而要区别三者所起的不同作用,就必须引入其他的独立标志。只要具有测年数据求出不同成分的堆积速率,稀释作用的估算并不困难;而识别生产力和溶解作用的相对重要性,需要借助于深海碳酸盐溶解作用的代用标志。微体化石提供了许多可用的标志,如翼足类壳体(文石质)的丰度,有孔虫的碎壳率(碎壳与完整壳的比值),底栖与浮游有孔虫的比值和根据不同抗溶能力的浮游有孔虫属种相对含量算出的有孔虫溶解指数(详见汪品先等,1995)<sup>[39]</sup>,都具有指示深海碳酸盐溶解作用程度的能力。为了举例说明,可以选取南海溶跃层以上两个柱状样(V 36-03, 19 01 N, 116 06 E, 水深 2 809m; SO 50-37KL, 18 35 N, 115 46 E, 水深 2 695m)的有关曲线,示于图 4。无论是 V 36-06 站的有孔虫溶解指数 FDX 或者底栖与浮游有孔虫比值,都与 CaCO<sub>3</sub>% 没有显著的相关性(图 4-A)<sup>[11]</sup>;同样,SO 50-37KL 站翼足类含量曲线,也并不与 CaCO<sub>3</sub>% 曲线相对应(图 4-B)<sup>[13]</sup>。相反,两站的这些曲线都显示出“太平洋型”碳酸盐旋回的特征,即末次冰期时溶解作用减弱。最近南海北部两个站位(SCS90-36 和 31KL)近 25 000 年以来碳酸盐保存状况的分析<sup>[12]</sup>也证明冰期后半段的保存状况最佳,与“太平洋型”旋回完全一致。由此可见,西太平洋低纬边缘海的碳酸盐旋回无论在溶跃层上、下,从深海溶解作用说来都属于“太平洋型”;溶跃层以上出现“大西洋型”曲线,应当是陆源物质输入量在冰期时增长使“稀释作用”加强,或者还有生产力变化的作用所致。有关南海等低纬边缘海区碳酸盐旋回多种模式的成因,我们将有专文论述,此处不拟作进一步讨论。

## 4 结束语

在古环境研究中, 边缘海在大洋与大陆之间起着桥梁作用。西太平洋边缘海沉积中记录的冰期碳酸盐旋回, 是亚洲与太平洋之间陆海相互作用变化的历史见证, 也是研究全球碳循环演变的重要内容。对于每个边缘海来说, 碳酸盐百分含量曲线在一定海域内的相似性, 特别是低纬海区溶跃面以上  $\text{CaCO}_3\%$  与  $\delta^{18}\text{O}$  曲线平行的特征, 是碳酸盐地层学对比地层的良好依据; 而不同纬度、不同水深和不同类型边缘海之间  $\text{CaCO}_3\%$  曲线的不同, 又为揭示边缘海的水体交换和海水化学的特征, 以及表层生产力和陆源物输入量的变化提供了钥匙, 是研究边缘海古海洋学的重点之一。然而, 本文只是对西太平洋边缘海冰期碳酸盐旋回在总体上进行讨论, 如果能在高分辨率地层学的基础上, 对边缘海不同海区深海沉积序列中的碳酸盐含量变化作系统分析, 并着重在大量测年数据基础上求取碳酸盐通量变化的信息, 必将为西太平洋和东亚地区在冰期旋回中的古环境定量研究开辟新的途径。

致谢: 本文承黄维、刘志伟等各位协助制作图件、文稿, 谨致谢意。

## 参 考 文 献

- 1 Arrhenius G O S Sediment cores from the east Pacific Rep. Swed Deep Sea Exped 1947~ 1948, 1952, 5: 1~ 288
- 2 Mayer L. Deep sea carbonates: acoustic, physical and stratigraphic properties J. Sediment Petrol, 1979, 49: 819~ 836
- 3 Dadey K A, Lyle M. Development of a high-resolution calcium carbonate stratigraphy from logging data In: N. Pisias et al (eds ), Proc ODP, Sci Results, 1995, 138: 25~ 30
- 4 Luz B, Shackleton N J.  $\text{CaCO}_3$  solution in the tropical east Pacific during the past 130 000 years Cushman Found Foram. Res, Spec Publ, 1975, 13: 142~ 150
- 5 汪品先, 郑连福 太平洋美拉尼西亚海盆深海碳酸盐溶解旋回的初步研究 海洋与湖沼, 1982, 13(5): 389~ 394
- 6 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 冯文科 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义 地质学报, 1986, 60(3): 215~ 225
- 7 卞云华, 汪品先, 郑连福 南海北部晚第四纪浮游有孔虫的溶解作用旋回 见: 业治铮, 汪品先主编 南海晚第四纪古海洋学研究 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992, 216~ 273
- 8 郑连福, 郭育廷, Winn K, Stoffers P. 南海北部晚第四纪碳酸盐旋回及其地层学意义. 南海海洋沉积作用过程与地球化学研究. 北京: 海洋出版社, 1993, 109~ 123
- 9 李粹中. 南海深水碳酸盐沉积作用 沉积学报, 1989, 7: 35~ 43
- 10 王慧中, 翦知 南海晚第四纪碳酸盐的稀释旋回 见: 业治铮, 汪品先主编 南海晚第四纪古海洋学研究 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992, 283~ 294
- 11 Wang Pinxian, Wang Luejiang, Bian Yunhua, Jian Zhimin Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles Marine Geology, 1995, 127: 145~ 165
- 12 Chen M T, Huang C Y, Wei K Y. 25 000-year Late Quaternary records of carbonate preservation in the South China Sea Palaeo., 1997, 129: 155~ 169
- 13 Wang Luejiang, Jian Zhimin, Chen Juan Late Quaternary pteropods in the South China Sea: carbonate preservation and paleoenvironmental variation Marine Micropaleontology, 1997, 32(1/2): 115~ 126
- 14 Berger W H. Pacific carbonate cycles revisited: arguments for and against productivity control In: Ishizaki, K. & Saito, T. (eds ), Centenary of Japanese Micropaleontology, Terra, Tokyo. 1992, 15~ 25
- 15 Lisitzin A P. Sedimentation in the World Ocean SEPM Spec Publ, 1972, 17: 218p.
- 16 Wang P. Response of west pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features

- Marine Geology, in press
- 17 Chen C T A, Feely R A, Gendron J F. Lysocline, calcium carbonate compensation depth, and calcareous sediments in the North Pacific Ocean. *Pacific Science*, 1988, 42(3/4): 237~ 252
  - 18 汪品先 西太平洋边缘海对我国冰期干旱化影响的初步探讨. *第四纪研究*, 1995(2): 111~ 124
  - 19 Rottmen M L. Dissolution of planktonic foraminifera and pteropods in South China Sea, *Sediments Jour. Foramin. Res.*, 1979, 9: 41~ 49
  - 20 Thunell R, Miao Q, Calvert S E, Pedersen T F. Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: productivity variations and surface pCO<sub>2</sub>. *Paleoceanography*, 1992, 7: 143~ 162
  - 21 Schonfeld J, Kudrass H R. Hemipelagic sediment accumulation rates in the South China Sea related to Late Quaternary sea-level changes. *Quaternary Research*, 1993, 40: 368~ 379
  - 22 Linsley B K. Carbonate sedimentation in the Sulu Sea linked to the onset of Northern Hemisphere glaciation, 2.4 Ma. In: Silver E A, Rangin C, von Breymann M T, et al. *Proc ODP, Init Repts.*, 1991, 124: 299~ 342
  - 23 Miao Q, Thunell R C, Anderson D M. Glacial-Holocene carbonate dissolution and sea surface temperatures in the South China and Sulu Seas. *Paleoceanography*, 1994, 9: 269~ 290
  - 24 Gorbarenko S A. Stratigraphy of Late Quaternary sediments in Seas of Japan and Okhotsk and their paleoceanographic conditions. *CCOP/TP*, 1991, 22: 11~ 24
  - 25 Gorbarenko S A. Paleogeography of the Japan Sea during the Late Pleistocene and Holocene. *Izvestia AN USSR, Seriya Geografitschekaya*, 1987(6): 106~ 113 (in Russian)
  - 26 Tada R, Koizumi I, Cramp A, Rahman A. Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. In: Pisciotto K A, Ingle Jr J C, von Breymann M T, Barron J et al. *Proc ODP, Sci Repts.*, 1992, 127/128, Pt 1, 577~ 601
  - 27 Wang Pinxian. The ice-age China sea-research results and problems. In: Wang P., et al (eds.), *Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology*, China Ocean Press, 1990, 181~ 197
  - 28 Wang Chung-Ho and Chen M P, Lo S C. Stable isotope records of Late Pleistocene sediments from the South China Sea. *Bull. Inst. Earth Sci., Acad. Sinica, Taipei*, 1986, 6: 185~ 195
  - 29 Haug G H, Maslin M A, Samthein M, Stax R, Tiedmann R. Evolution of northwest Pacific sedimentation patterns since 6Ma (Site 882). In: Rea D K, Basov I A, Scholl D W, Allan J F (eds.), *Proc ODP, Init Repts.*, 1995, 145: 85~ 119
  - 30 阎军 西太平洋边缘海沉积物中碳酸盐旋回. *海洋科学*, 1989(5): 28~ 32
  - 31 Crowley T J. Calcium-carbonate preservation patterns in the central North Atlantic during the last 150 000 years. *Marine Geology*, 1983, 51: 1~ 14
  - 32 Vollbrecht R, Kudrass H R. Geological results of a pre-site survey for ODP drill sites in the Sulu Basin. *ODP Proceedings, Init Repts*, 1990, 124: 105~ 111
  - 33 Keigwin L D, Jones G A, Froelich P N. A 15 000 year paleoenvironmental record from Miji Seamont, far northwestern Pacific. *Earth & Planetary Science Letters*, 1992, 111: 425~ 440
  - 34 Gorbarenko S A et al. Late Quaternary sediments of the Okhotsk Sea and reconstruction of paleoceanographic conditions. *Pacific Ocean Geology*, 1988(2): 25~ 34 (in Russian)
  - 35 Chen A C T, Wang S L, Bychkov A S. Carbonate chemistry of the Japan Sea. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(C7): 13737~ 13745
  - 36 Oba T, Kato M, Kitazato H, Koizumi I, Omura A, Sakai T, Takayama T. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85 000 years. *Paleoceanography*, 1991, 6: 499~ 518
  - 37 Exon M F, Haake F W, Hartmann M, Kogler F C, Muller P J, Whiticar M J. Morphology, water characteristics and sedimentation in the Sulu Sea, southeast Asia. *Marine Geology*, 1981, 39: 165~ 195
  - 38 Linsley B K, Thunell R C, Morgan C, Williams D F. Oxygen minimum expansion in the Sulu Sea, western equatorial Pacific, during the last glacial low stand of sea level. *Marine Micropaleontology*, 1985, 9: 395~ 418
  - 39 汪品先主编 十五万年来的南海. 上海: 同济大学出版社, 1995, 1~ 184



## GLACIAL CARBONATE CYCLES IN WESTERN PACIFIC MARGINAL SEAS

Wang Pinxian

(SCE PRC Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

### Abstract

Carbonate cycle is the most prominent feature in deep-sea sediments of the Pleistocene. The temporal and spatial variations of carbonate content in sediments are very significant in the Western Pacific marginal seas and are particularly informative in terms of deep-water chemistry, surface productivity and weathering conditions in the drainage basins.

In the present paper, the carbonate distribution in surface sediments and the glacial carbonate cycles are compared between five marginal seas: the Sea of Okhotsk, the Sea of Japan, the East China Sea, the South China Sea and the Sulu Sea. In general,  $\text{CaCO}_3\%$  in deep water sediments ( $> 200\text{m w. d.}$ ) is extremely low in the high-latitude seas and increases towards the low latitude basins (Fig. 1-a), revealing a close relationship between carbonate percentage and water temperature and water depth (Fig. 1-b). At least four types of carbonate cycles can be distinguished in the Western Pacific marginal seas: the Northwestern Pacific type (Fig. 2A; Fig. 3A), the Japan Sea type (Fig. 2B; Fig. 3B), the Atlantic type (Fig. 2C, E and D SCS-15A; Fig. 3C), and the Pacific type (Fig. 2D SO 50-29KL; Fig. 3D), and each of those embodies rich environmental signals both from land and sea.

As shown by more detailed analyses, the variety of carbonate cycle types is largely dictated by the origin and characteristics of the deep waters of the individual sea basins which in turn depend on the basin morphology. The existence of two different types of carbonate cycles in low-latitude seas is explained by different combinations below and above lysocline of the three controlling factors: carbonate production, deep-sea dissolution and dilution by non-carbonate components. Judging from the carbonate preservation and dissolution indices, the cycle of deep water chemistry in the marginal seas in question is of "Pacific type", whereas the apparent "Atlantic type" above lysocline is ascribed to the effect of production and dilution (Fig. 4).

**Key words:** carbonate    glacial cycles    marginal seas    Western Pacific