

# 南海东北部之海水碳酸盐现况

黄明祥 陈镇东

(中山大学海洋地质研究所, 台湾高雄)

**摘 要** 为探讨南海的海水碳酸盐现况, 本文利用“海研一号”三个航次(第 266、287 及 316 航次)的机会, 搜集南海东北角的碳酸盐因子, 如温度、盐度、pH 值、总碱度及总二氧化碳等。南海深层水具有西菲律宾海水深约 2 200m 的水团特性, 实测结果显示此两水团的碳酸盐因子并没有明显的差异。由滞留时间、无机碳及有机碳分解速率计算结果显示, 南海深层水的滞留时间以 40a 较为合理。

**关键词** 碳酸盐 总碱度 总二氧化碳 滞留时间 分解速率 南海

在上层海水中, 西菲律宾海与南海的水团性质有相当大的差异。西菲律宾海的水团中, 每一水层的来源都不同, 且垂直混合亦不明显, 因此, 每一水层都有不同的特性。例如在水深 200m 左右的次表层水, 有一盐度极大值, 其值大于 34.90; 中层水在水深 600m 左右, 则有一盐度极小值, 其值小于 34.20。南海由于降雨量多且有大量陆水排入, 使得表层水之盐度低于一般之开放性大洋。又因为南海内部涌升流盛行, 造成较为强烈的垂直混合, 而使不同水层的特性差异渐趋模糊。因之, 我们可从温盐图型上, 区分水深 1 300m 以上的南海水与西菲律宾海水<sup>[1-5]</sup>。

西菲律宾海深层水流经吕宋海峡进入南海, 开成南海的深层水及底层水<sup>[6,7]</sup>。由于吕宋海峡上, 深层水入口的深度约为 2 200m, 因此南海的深层水及底层水, 应当有西菲律宾海水深 2 200m 左右的海水特性。而南海内部具强烈的涌升作用与垂直混合作用<sup>[8]</sup>, 亦是影响南海水文特性的主要因素之一。

本文系根据“海研一号”第 266、287、316 航次所取得的资料<sup>[9-11]</sup>, 研究南海东北部海域的碳酸盐现况。

## 1 方法

本文所使用的资料, 有第 266 航次 28、38、57、72 测站(1990 年 12 月 19~27 日)、第 287 航次 131、132 测站(1991 年 7 月 9 日)及第 316 航次 1、2、3 测站(1992 年 5 月 7~8 日)的资料, 研究区域及测站位置如图 1。

pH 值之测定是以 Radiometer PHM-85 型酸碱仪配以 GK 2401C 型复合酸碱电极, 在  $25 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 、常压的情况下进行, 以美国国家标准及技术所(NIST)4.006 及 7.400 的缓冲溶液校正电极, 受测样品的精密度在  $\pm 0.003$  pH 单位以内<sup>[12]</sup>。

总碱度(TA)以电位滴定法测定。自动滴定系统包括十六位元微电脑、Radiometer PHM-84 型酸碱仪、GK 2401C 型酸碱复合电极、ABU-80 自动滴定仪、恒温水槽及自行制作的滴定容器,在  $25 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 、常压情况下进行,利用 Gran Function 判定滴定终点<sup>[9~11,13]</sup>,精确度在  $3 \mu\text{mol}/\text{kg}$  以内。总二氧化碳量( $\text{TCO}_2$ )则是由 pH 及总碱度的资料算得,精确度为  $4 \mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

碳酸钙及有机质分解都会使海水中的总二氧化碳量增加,碳酸钙溶解所提供的是无机碳(inorganic carbon; IC),有机质分解所提供的则为有机碳(organic carbon; OC)。

我们以下列式子来计算海水中 IC 与 OC 的分解速率比<sup>[14]</sup>:

$$\text{IC}/\text{OC} = [0.16038 \times (\Delta\text{NTCO}_2 + 40) + \Delta\text{NTA}] / [2 \times (\Delta\text{NTCO}_2 + 40) - \Delta\text{NTA}]$$

式中  $\text{NTA} = \text{TA} \times 35/S$

$$\text{NTCO}_2 = \text{TCO}_2 \times 35/S$$

$$\Delta\text{NTA} = \text{NTA}(\text{实测值}) - \text{NTA}^\circ(\text{起始值})$$

$$\Delta\text{NTCO}_2 = \text{NTCO}_2(\text{实测值}) - \text{NTCO}_2^\circ(\text{起始值})$$

始值)

北太平洋深层水及底层水来自南大洋,起始值为:

$$\text{NTA}^\circ(\mu\text{mol}/\text{kg}) = 2384 - 4.2 \times \theta(\pm 9)$$

$$\text{NTCO}_2(\mu\text{mol}/\text{kg}) = 2219 - 11 \times \theta(\pm 16)$$

盐度极小值之水团来自北太平洋,起始值为:

$$\text{NTA}^\circ(\mu\text{mol}/\text{kg}) = 2384 - 3.36 \times \theta(\pm 11)$$

$$\text{NTCO}_2(\mu\text{mol}/\text{kg}) = 2219 - 12.08 \times \theta(\pm 18)$$

由于上层海水的 IC/OC 值,存在着较大的不确定性,本文仅探讨盐度极小值以下水团的 IC/OC 值。

碳酸钙饱和度的计算式如下:

$$\Omega = \text{ICP}/K_{sp} \times 100\%$$

$$\text{ICP} = [\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$$

$K_{sp}$ :方解石(calcite)或霏石(aragonite)的溶度积,其中  $[\text{Ca}^{2+}]$  由盐度估算<sup>[15,16]</sup>,  $[\text{CO}_3^{2-}]$  则是以 pH 及 TA 来计算的。

## 2 结果与讨论

图 2 是南海 pH 值垂直分布。表层海水的 pH 值介于 8.23~8.27 之间,pH 值随深度之增加递减,递减的幅度在水深 600m 以上比较大。在水深 1000m 处,pH 值介于 7.65~7.69 之间,在水深 1000m 以下,pH 值随深度的变化并不明显。与西菲律宾海<sup>[9~11,16~18]</sup>比较,这两个海域最大的差异是,在水深 1000m 上下南海 pH 极小值的讯号较不明显。在水深 100~600m 之间,南海水的 pH 值约比西菲律宾海水低 0.15pH 单位,但是在水深 600~1500m 之间,则是西菲律宾海水的 pH 值低于南海水。在水深 2200m 以下的南海深层水,其 pH 值则与西菲律宾海水深 2200m 左右的海水相当。

图 3 是沿着  $119^\circ\text{E}$ ,由  $14^\circ \sim 22^\circ\text{N}$  之 pH 值断面。从图上可看出 pH 值随深度之增加渐减,

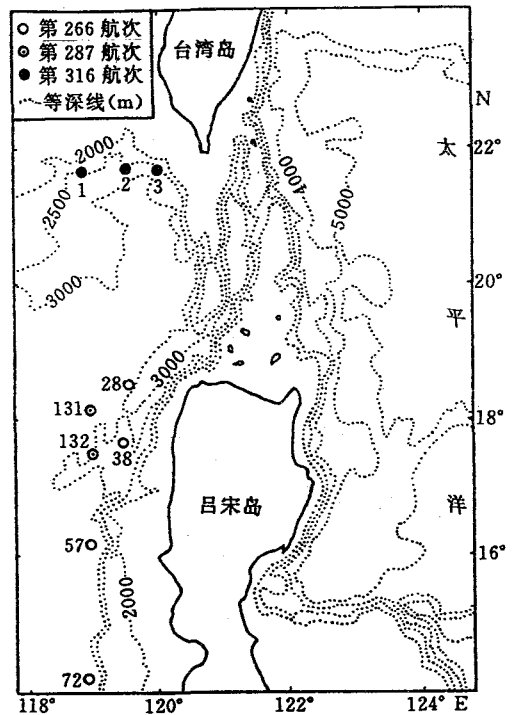


图 1 研究区域及测站位置

Fig. 1 Study area and sampling stations

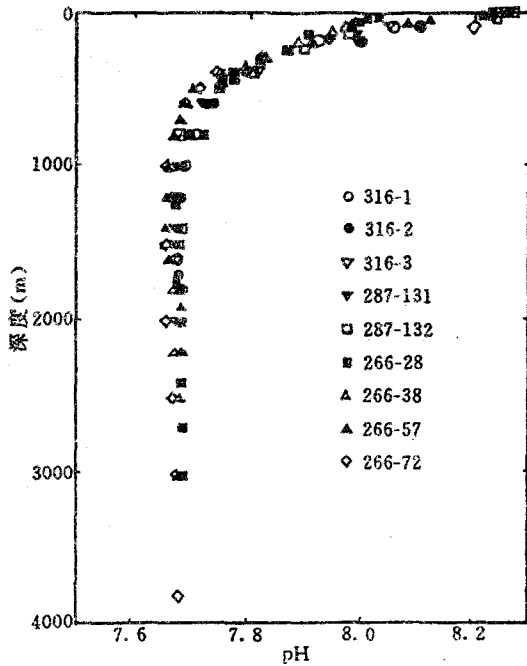


图 2 pH 值垂直分布

Fig. 2 Vertical distributions of pH

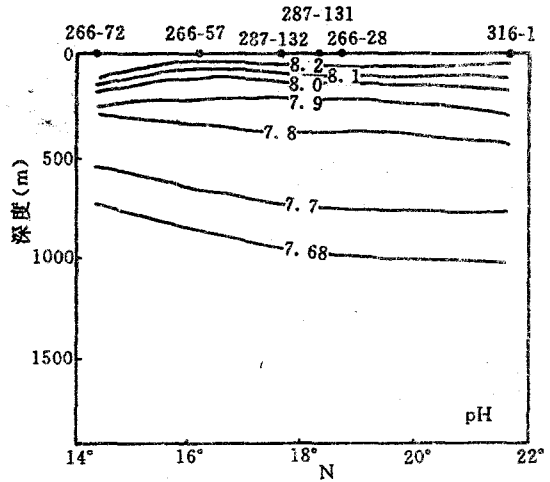


图 3 沿 119°E 之 pH 值断面

Fig. 3 Cross-section of pH along 119°E

pH 小于 7.80 的等值面由北向南渐渐变浅,也就是说,在同一深度,愈往南 pH 值愈小,这可能是反映出南海内部之涌升流带来较老、pH 值较低之深层海水。与西菲律宾海<sup>[9~11,16~18]</sup>比较,这两个海域 pH 值断面分布最大的不同是,南海并没有 pH 值的极小值核心。此外,pH 值大于 7.80 的等值面,南海较西菲律宾海浅,而 pH 值为 7.70 的等值面,则是西菲律宾海浅于南海。

图 4 是南海水位温和 pH 值的关系。图上显示 pH 值随位温之降低而变小。位温在 4℃ 以上,二者呈现良好的正相关,pH 值随位温之降低的降幅约为 0.03pH(pH unit)/℃。在位温 4℃ 以下,pH 值变化并不明显,其值介于 7.65~7.69 之间。从图 4 亦可看出,位温在 12℃ (水深约 250m) 以下,同一位温的 pH 值,南边则站(266-57、72)略低于北边测站,此一现象可能与较南边测站的海水较老有关。与西菲律宾海比较,在位温 8℃ 以上,同一位温中,南海水的 pH 值略低于西菲律宾海。西菲律宾海由于深层水与底层水的来源不同(底层水回流形成深层水),在位温 4℃ 左右,pH 值有明显的钩回<sup>[9~11,16,17]</sup>。而南海的深层水与底层水来源相同(西菲律宾海水深 2 200m 左右的海水),因此 pH 值并没有钩回的现象。

图 5 是 pH 值和表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU)的关系。南海并没有明显的 pH 值极小值及 AOU 极大值,因此在图上之深水区并没有明显的转折。pH 值对 AOU 呈现很好的线性关系,pH 值随 AOU 之增加而下降,降幅约为 2.4(pH unit)/(mmol/kg),略低于王树伦<sup>[17]</sup>在同一区域所计算之 2.8(pH unit)/(mmol/kg)。而与 Chen et al.<sup>[16]</sup>所计算太平洋大部分区域的 2.5(pH unit)/(mmol/kg),及黄明祥<sup>[18]</sup>计算西菲律宾海的 2.5(pH unit)/(mmol/kg)相当。

图 6 是南海 NTA 垂直分布。在水深 100m 上下,隐约可看见一极小值(266-72 除外),此

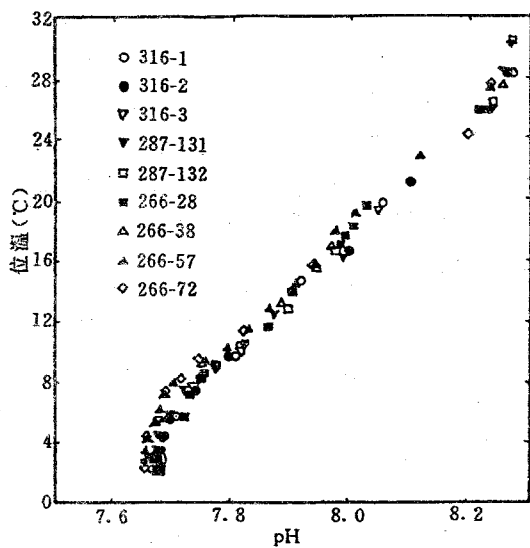


图 4 位温和 pH 的关系

Fig. 4 Correlations of  $\theta$  with pH

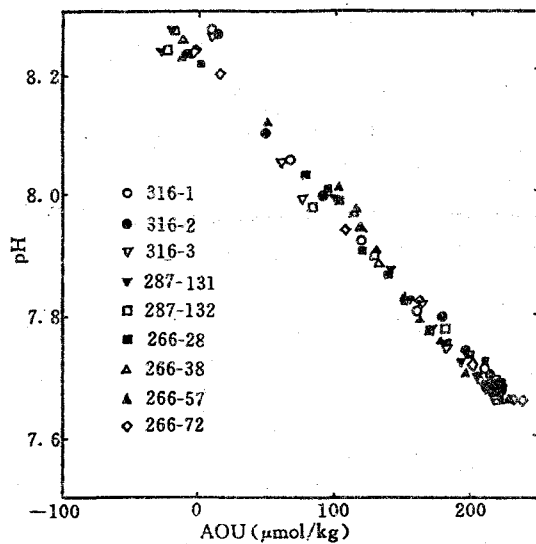


图 5 pH 和 AOU 的关系

Fig. 5 Correlations of pH with AOU

一现象可能是因为盐度极大值的海水,含较低NTA,或者是因为有机质分解,分解一份有机质

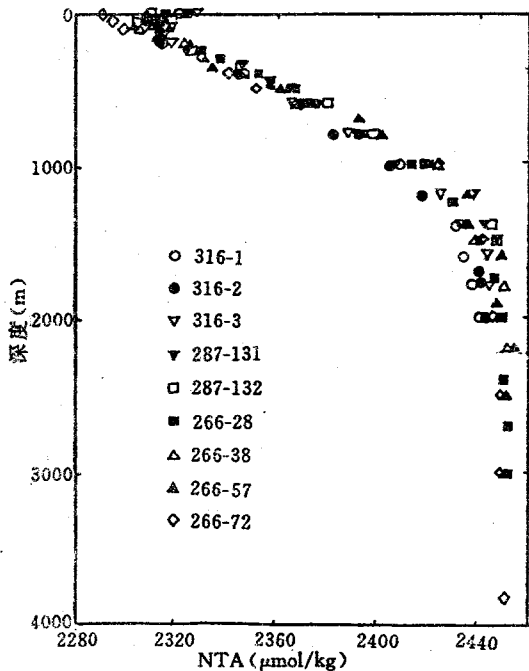


图 6 NTA 垂直分布

Fig. 6 Vertical distributions of NTA

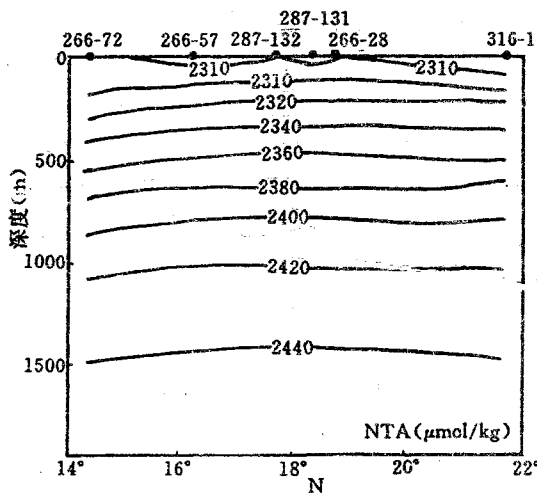


图 7 沿 119°E 之 NTA 断面

Fig. 7 Cross-section of NTA along 119°E

减少 17 份总碱度<sup>[19]</sup>。往深处 NTA 大致随深度之增加而增大,在水深 1 500m 处,其值介于 2. 435~2. 450mmol/kg 之间,再往深处其变化则不明显。北太平洋在水深 2 500~3 000m 之间有一 NTA 极大值<sup>[16~18,20,21]</sup>,而南海则没有此一现象。其原因是南海之深层水与底层水为同一

来源(西菲律宾海水深 2 200m 左右的海水)。

图 7 是沿着 119°E, 由 14°~22°N 之 NTA 断面。在水深 100m 上下有一极小值, 其值小于 2. 310mmol/kg。往下等值面大致平行, NTA 随深度之增加而增大: 在水深 500m 处, NTA 介于 2. 350~2. 360mmol/kg 之间; 在水深 1 000m 处, NTA 介于 2. 410~2. 420mmol/kg 之间; 在水深 1 500m 以下, NTA 大于 2. 440mmol/kg。和西菲律宾海 NTA 断面图<sup>[9~11, 18]</sup>比较, NTA 小于 2. 380mmol/kg 的等值面, 南海水略浅于西菲律宾海水; NTA 大于 2. 400mmol/kg (水深约 800m 以下) 的等值面, 在这两个海域则没有明显的差异。

图 8 是位温和 NTA 的关系。图上显示位温在 12℃ (水深约 250m) 以下, 有较好的线性关系。NTA 值随位温降低而增加的增幅约为 12μmol/(kg · °C)。位温在 12℃ 以上, NTA 值介于 2. 290~2. 330mmol/kg 之间, 其变化趋势并不明显。造成 12℃ 以下 NTA 增幅较大的原因, 可能与霰石 (aragonite) 及方解石 (calcite) 的饱和深度有关。温度愈低、压力愈大, 碳酸钙的溶解度愈高, 所以深水 (水温低) 有较多的碳酸钙溶解。南海水之 NTA 值随位温的变化趋势与西菲律宾海<sup>[9~11, 18]</sup>比较, 并没有明显的差异。

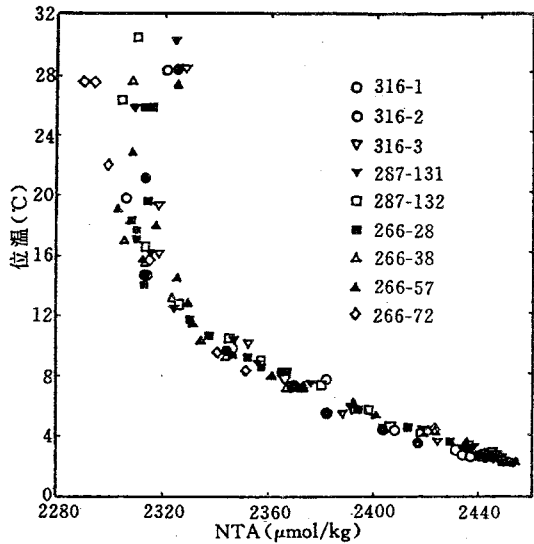


图 8 位温和 NTA 的关系图

Fig. 8 Correlations of  $\theta$  with NTA

图 9 是南海水 NTCO<sub>2</sub> 垂直分布。南海水的 NTCO<sub>2</sub> 含量约略随着深度之增加而增大, 在水深 1 400m 处, 其值约为 2. 375mmol/kg, 再往深处其变化则不明显。南海水与西菲律宾海水的 NTCO<sub>2</sub> 在垂直分布上最大的差异是, 西菲律宾海在水深 1 000m 以下, 有一 NTCO<sub>2</sub> 的极大值, 其值介于 2. 390~2. 400mmol/kg 之间, 南海水则没有明显的 NTCO<sub>2</sub> 极大值出现。此外, 在水深 100~600m 之间, 南海水的 NTCO<sub>2</sub> 约比西菲律宾海水高 0. 100mmol/kg 左右<sup>[9~11, 18]</sup>。此一深度, 南海水 AOU 约比西菲律宾海水高 0. 125mmol/kg<sup>[22]</sup> 左右, 此一现象可能与南海内部有较强的涌升现象及垂直混合作用有关。而在水深 600~1 500m 之间, 则是西菲律宾海水的 NTCO<sub>2</sub> 略高于南海水。

图 10 是沿着 119°E, 由 14°~22°N 之 NTCO<sub>2</sub> 断面。图上显示等值面大致平行, NTCO<sub>2</sub> 含量随深度之增加而渐增, 在水深 500m 处的等值面约为 2. 250mmol/kg; 在水深 1 000m 处, 其值介于 2. 340~2. 350mmol/kg 之间; 水深大于 1 500m, NTCO<sub>2</sub> 含量大于 2. 370mmol/kg。与西菲律宾海最大的不同是, 西菲律宾海水在水深 1 000m 以下, 有一极大值的核心带出现<sup>[9~11, 18]</sup>, 而南海水则无。

图 11 是位温和 NTCO<sub>2</sub> 的关系。此一图型与西菲律宾海的差别是, 西菲律宾海水在位温 3℃ 左右有一明显的转折<sup>[9~11, 18]</sup>, 而南海则无。南海水在位温 16℃ (水深 100~200m) 以下, 有较好的线性关系。NTCO<sub>2</sub> 含量随位温降低而增加的增幅约为 0. 014mmol/(kg · °C), 位温在 16℃ 以上, NTCO<sub>2</sub> 之变化可能是受到季节性变化、生物作用, 或是受黑潮水流入的多寡不一,

及各测站涌升程度不同的影响所致。

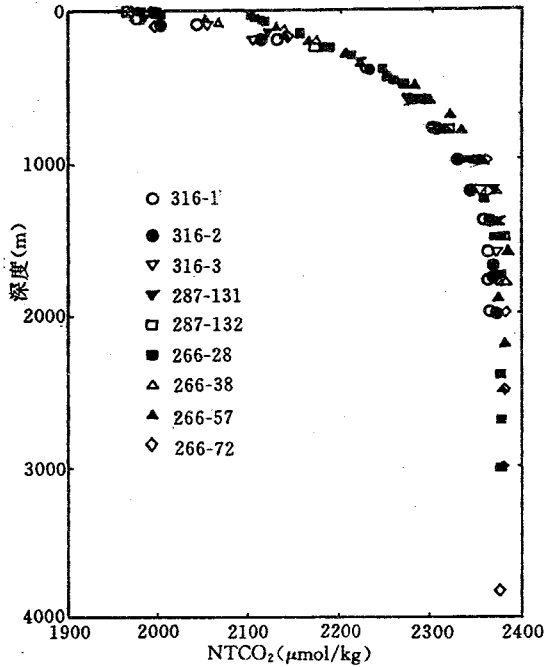


图 9 NTICO<sub>2</sub> 垂直分布

Fig. 9 Vertical distributions of NTICO<sub>2</sub>

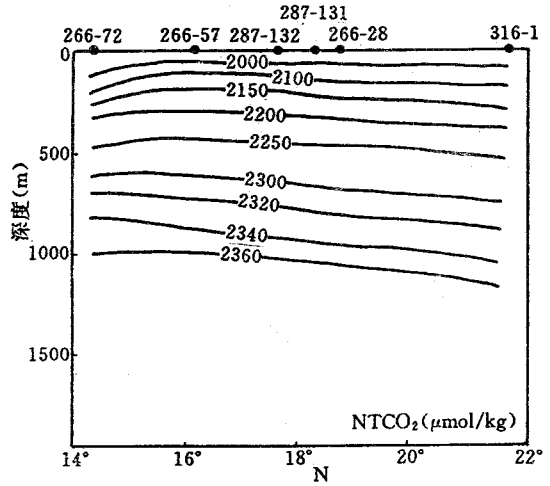


图 10 沿 119°E 之 NTICO<sub>2</sub> 断面

Fig. 10 Cross-section of NTICO<sub>2</sub> along 119°E

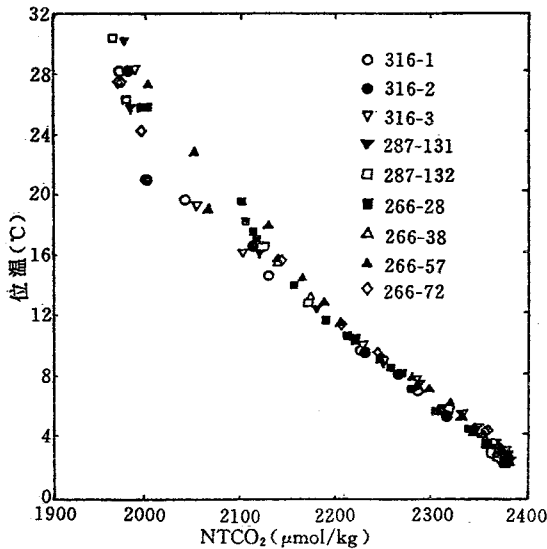


图 11 位温和 NTICO<sub>2</sub> 的关系

Fig. 11 Correlations of  $\theta$  with NTICO<sub>2</sub>

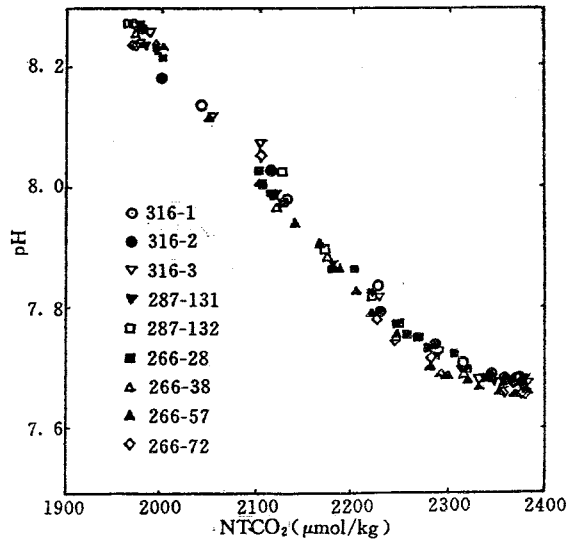


图 12 pH 和 NTICO<sub>2</sub> 的关系

Fig. 12 Correlations of pH with NTICO<sub>2</sub>

图 12 是 pH 值和 NTICO<sub>2</sub> 的关系。此一图型与西菲律宾海的不同是，西菲律宾海有 pH 极

小值与  $\text{NTCO}_2$  极大值<sup>[9~11,18]</sup>。从图上可看出,  $\text{NTCO}_2$  含量和 pH 值呈现二段式线性关系, 转折点的 pH 值约为 7.70,  $\text{NTCO}_2$  含量约为 2.31mmol/kg(水深约 800m)。在 pH 值 7.70 以上, pH 值随  $\text{NTCO}_2$  含量增加而降低的降幅约为 1.7(pH unit)/(mmol/kg), 在 pH 值 7.70 以下, 降幅约为 0.3(pH unit)/(mmol/kg)。图 13 则是  $\text{NTCO}_2$  与 AOU 的关系。图上显示  $\text{NTCO}_2$  含量约略随 AOU 值之增加而增加,  $\text{NTCO}_2$  及 AOU 并没有明显的极大值出现。

Li et al.<sup>[23]</sup>利用盒子模式(box model)估计深海碳酸钙溶解时认为, 约有 20% 总二氧化碳量来自无机碳酸钙的溶解。Tsunogai<sup>[24]</sup>认为在水深 1 000~4 500m 之间, 约有 40% 总二氧化碳量来自无机碳酸钙的溶解。Edmond<sup>[25]</sup>计算深海中无机碳与有机碳比率时, 并未考虑到过量二氧化碳的影响, 而高估了无机碳的比率。Chen<sup>[14]</sup>修正 Edmond 的模式指出, 北太平洋海域在水深 500~2 500m 之间, 无机碳所占的比率由 0.1 渐增为 0.36, 在水深 2 500m 以下, 其变化则不明显。

图 14 是南海的 IC/OC 值垂直分布。IC/OC 值大致随深度之增加而增加, 显示总二氧化碳由无机碳所供给的比率随深度之增加而增加; 在水深 1 000m 处, IC/OC 值介于 0.21~0.24 之间; 在水深 2 000m 处则介于 0.27~0.30 之间, 再往深处其变化则不明显。此值略低于王树伦<sup>[17]</sup>在同一区域所计算的值, 但与北太平洋资料<sup>[14]</sup>及西菲律宾海资料吻合<sup>[18]</sup>。

图 15 是  $\Omega_c$ (方解石饱和度)随深度之变化。表层水  $\Omega_c$  值介于 470%~530% 之间。在水深 500m 以上,  $\Omega_c$  值随深度之增加而剧减。南海方解石的饱和深度约在 2 400m 上下, 此一  $\Omega_c$  值

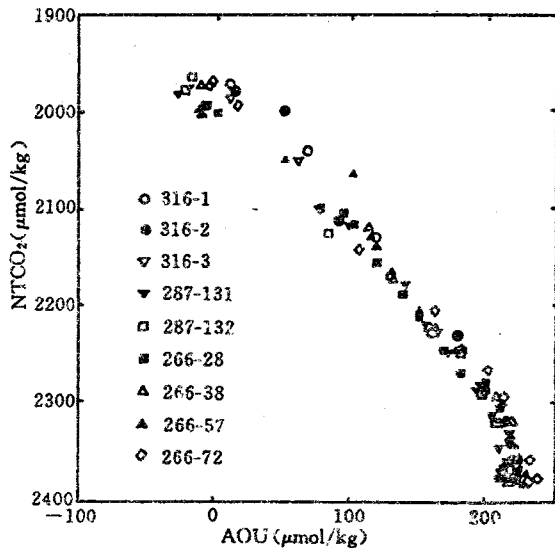


图 13  $\text{NTCO}_2$  和 AOU 的关系

Fig. 13 Correlations of  $\text{NTCO}_2$  with AOU

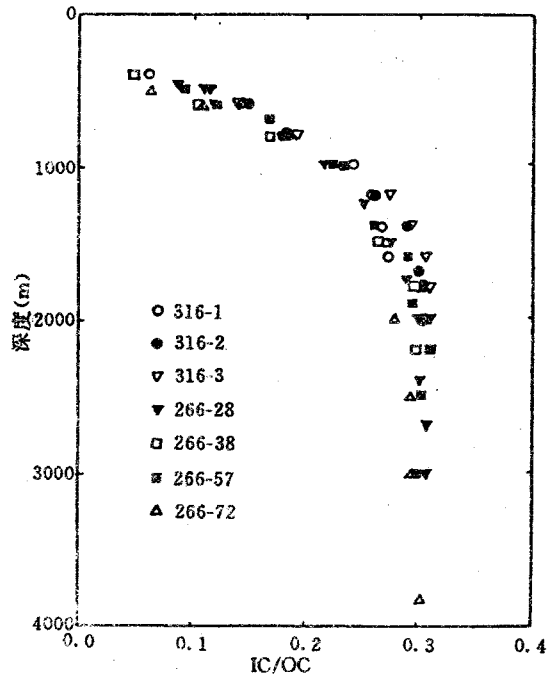


图 14 IC/OC 值垂直分布

Fig. 14 Vertical distributions of IC/OC

比韩舞鹰和马克美<sup>[26]</sup>计算南海东北部海域的值大 10% 左右, 饱和深度则较韩舞鹰和马克美<sup>[26]</sup>所计算的 1 630m 深。图 16 是  $\Omega_c$ (霰石饱和度)随深度之变化。表层水的  $\Omega_c$  值介于 325%

~365%之间,在水深 300m 以上, $\Omega_c$  值随深度之增加而剧减,往下  $\Omega_c$  值随深度之增加略减。霏石饱和深度位于水深 600m 上下,与 Chen et al. [27] 所计算之北太平洋霏石的饱和深度相当,而深于韩舞鹰和马克美 [26] 所计算的 435m。在水深 1 500m 以下, $\Omega_c$  值小于 80%。Chen et al. [27] 认为,北太平洋有一  $\Omega_c$  及  $\Omega_a$  的极小值核心,由此向南推进。陈镇东等人 [9-11] 于西菲律宾海的

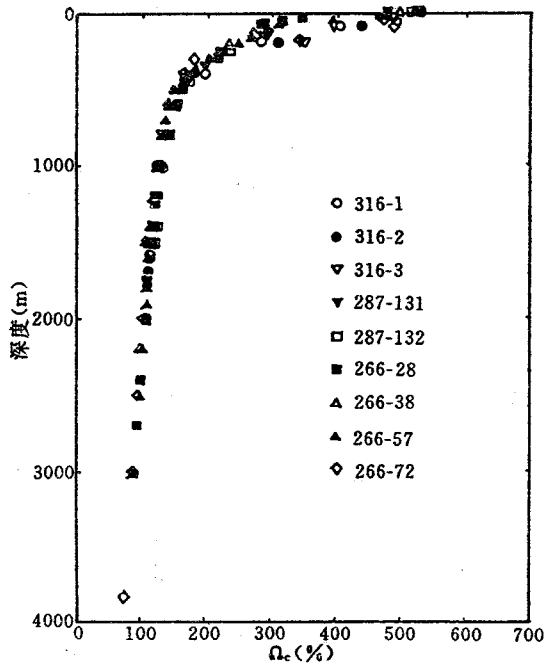


图 15 方解石饱和度随深度之变化

Fig. 15 Vertical distributions of  $\Omega_c$

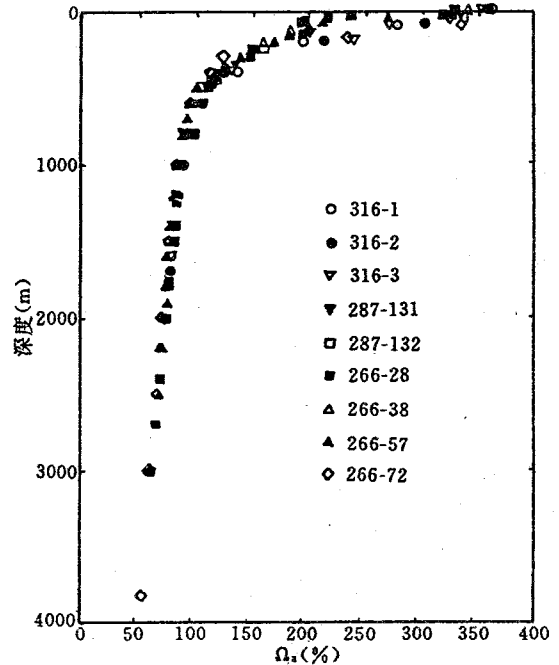


图 16 霏石饱和度随深度之变化

Fig. 16 Vertical distributions of  $\Omega_a$

资料,所计算的结果显示,在水深 1 000m 上下,有一  $\Omega_c$  和  $\Omega_a$  的极小值,南海则没有  $\Omega_c$  和  $\Omega_a$  的极小值。

碳酸盐饱和深度、碳酸钙迅速溶解深度(lysocline)及碳酸钙补偿深度(calcium carbonate compensation depth; CCD)可能与海洋沉积物中碳酸钙富集的程度有关。欲了解此三者的特性,必须对它们的分布加以探讨。Peterson [28] 和 Berger [29] 曾在北太平洋中部现场测得碳酸钙迅速溶解深度为 3 700m,由于缺乏实测数据, Berner 和 Wilde [30] 及 Chen et al. [27] 曾分别以  $\Omega_c$  为 91% 和 90% 为碳酸钙迅速溶解深度。北太平洋的 CCD 约在 4 400m 上下 [31], 南海东北部海域的 CCD 约为 4 600m [26]。

假设南海东北部海域碳酸钙迅速溶解深度的  $\Omega_c$  值介于 90%~91% 之间,则碳酸钙迅速溶解深度介于 2 800~3 000m 之间,与文献 [26] 的相当。综合上述资料,南海东北部海域方解石及霏石饱和深度分别为 2 400m 及 600m,碳酸钙迅速溶解深度介于 2 800~3 000m 之间,碳酸钙补偿深度则为 4 600m。

在西菲律宾海中,每一水层都有不同的来源。大部分的有机质在水深 1 000m 左右已完全分解。北太平洋中层水流至西菲律宾海,途中不断累积有机物所分解的物质。而西菲律宾海的底层水源自有有机质分解较少的南极底层水,且深层水为南极底层水回流,水团最老,累积较多



碳酸钙分解所产生的总碱度,使得西菲律宾海有明显的 pH 极小值、总二氧化碳极大值,及总碱度极大值。南海的深层水与底层水的来源相同,且西菲律宾海 pH 极小值及总二氧化碳极大值进入南海的讯号较为微弱。此外,南海的滞留时间短,及南海内部的垂直混合与涌升作用,使得南海 pH 极小值、总二氧化碳极大值,及总碱度极大值的讯号消失。

由于受到涌升作用与垂直混合的影响,在水深 100~600m 之间,南海的 pH 值小于西菲律宾海,总二氧化碳则大于西菲律宾海。可是在水深 600~1 500m 之间,二者的关系则相反,其原因除了西菲律宾海 pH 极小值及总二氧化碳极大值,进入南海的讯号较为微弱之外,亦与南海内部的垂直混合及涌升作用有关。

南海与西菲律宾海深水之碳酸盐因子的数值孰大孰小,其差别究竟有多大,亦是我们所最关切的问题。实测的结果显示,此二者并没有明显的差异。Broecker et al.<sup>[32]</sup>由<sup>14</sup>C 的资料,估计南海深层水的滞留时间少于 100a,韩舞鹰和林洪瑛<sup>[33]</sup>由南海的水通量估计,南海深层水的滞留时间为 76a,南海水的平均滞留时间为 42a。Gong et al.<sup>[22]</sup>由水体体积及水流量估算南海水的滞留时间。他们由水深 1 500m 处流量为 0.42Sv(1 Sv=10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/s),及水深 2 000~2 700m 之间的流量为 1.2Sv,估计南海水的滞留时间介于 40~115a 之间。Chen et al.<sup>[16]</sup>估计北太平洋有机碳分解速率为 0.107μmol/(kg·a),碳酸钙分解速率则为 0.053μmol/(kg·a),溶氧消耗速率为 0.13μmol/(kg·a)。依据上述资料计算,则南海深层水的总二氧化碳含量应比西菲律宾海水深 2 200m 处高,其差值应介于 6.4~18.4μmol/kg 之间。总碱度的差值应介于 3.6~10.2μmol/kg 之间。AOU 的差值应介于 5.2~15.0μmol/kg,而 pH 的差值则介于 7×10<sup>-3</sup>~23×10<sup>-3</sup>个 pH 单位之间。由实测的资料显示,南海深层水与西菲律宾海水深 2 200m 处的碳酸盐因子并没有明显的差异,且 AOU 及营氧盐的资料<sup>[22]</sup>也显示,此二者间亦没有明显的差异。因此我们认为南海深层水的滞留时间应以由水深 2 000~2 700m 之间的流量 1.2Sv 所估算的 40a 较为合理。

### 3 结论

(1)由于涌升与垂直混合作用较为强烈,且深层水与底层水的来源相同使得南海水 pH 极小值,及 NTA 与 NTCO<sub>2</sub> 极大值的讯号消失或非常微弱。

(2)南海深层水应具有西菲律宾海水深约 2 200m 的水团特性。由滞留时间、无机碳及有机碳分解速率计算结果显示,此二水团之 pH、总碱度及总二氧化碳的差值应分别介于 7×10<sup>-3</sup>~23×10<sup>-3</sup>个 pH 单位、3.6~10.2μmol/kg 及 6.4~18.4μmol/kg 之间。实测结果证实此二水团的碳酸盐因子并没有明显的差异,南海深层水的滞留时间应以 40a 较为合理。

(3)南海东北部海域之方解石及霏石饱和深度,分别为 2 400m 及 600m,碳酸钙迅速溶解深度介于 2 800~3 000m 之间。

### 志谢

本研究承“国科会”经费资助(NSC82-0209-M110-041),王树伦先生协助采样分析,台湾大学刘倬腾、白书颀教授、WOCE 技术员、“海研一号”船长与全体船员于出海采样期间给予帮忙,以及审稿人指正特此志谢。

## 参考文献

- 1 朱祖佑. 台湾近海之海洋状况. 渔业生物试验所研究报告, 1963, 1(4): 29~44
- 2 Chu T Y. A study on the water exchange between Pacific Ocean and the South China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1972, (2): 11~24
- 3 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流(一)对南海暖涡之初步观测. 台湾大学海洋学刊, 1987, (18): 92~103
- 4 Shaw P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94 (C12): 18 213~18 226
- 5 Shaw P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine sea water into the South China Sea. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(C1): 821~827
- 6 Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H and Yoshida K ed. *Kuroshio*. Univ. of Washington Press, Seattle, 1972, 129~163
- 7 Liu C T, Lin R J. The deep current in the Bashi Channel. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1988, (20): 107~116
- 8 Wyrtki K. Physical oceanography of the southeast Asian waters, *NAGA report V. 2*, Scientific results of marine investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, Calif., 1961, 195
- 9 陈镇东, 黄明祥, 王树伦等. “海研一号”257、262 航次初步报告: 79 年 10~11 月于菲律宾海. 台湾中山大学海洋地质研究报告第 13 号, 1993, 132
- 10 陈镇东, 黄明祥, 王树伦等. “海研一号”266、287 航次碳酸盐数据初步报告. 台湾中山大学海洋地质研究报告第 14 号, 1993, 65
- 11 陈镇东, 黄明祥, 王树伦等. “海研一号”316 航次碳酸盐及有机颗粒数据初步报告. 台湾中山大学海洋地质研究报告第 15 号, 1993, 52
- 12 Chen C T. Carbonate chemistry of the Weddell Sea. *Department of Energy Technical Report*, DOE/EV/10611-4, 1984, 118
- 13 Bradshaw A L, Brewer P G, Shafer D K et al. Measurements of total carbon dioxide and alkalinity by potentiometric titration in the GEOSECS program. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1981, 55: 99~115
- 14 Chen C T A. Rates of calcium carbonate dissolution and organic carbon decomposition in the North Pacific Ocean, *J. of Oceanogra. Soc. Japan*, 1990, 46(5): 201~210
- 15 Chen C T, Pytkowicz R M, and Olson E J. Evaluation of the calcium problem in the South Pacific. *Geochemical Journal*, 1982, 16: 1~10
- 16 Chen C T, Rodman M R and Wei C L et al. Carbonate chemistry in the North Pacific Ocean. U. S. *Department of Energy Technical Report*, DOE/NBB-0079, 1986, 176
- 17 王树伦. 台湾临近海域溶解性碳酸盐之研究. 台湾中山大学海洋地质研究所硕士论文, 1988, 102
- 18 黄明祥. 吕宋海峡两侧之水团交换及其碳酸盐现况. 台湾中山大学海洋地质研究所硕士论文, 1993, 163
- 19 Chen C T, Millero F J and Pytkowicz R M. Comment on calculating the oceanic CO<sub>2</sub> increase: a need for caution by Shiller A M. *J. Geophys. Res.*, 1982, 87, 2 083~2 085
- 20 Horibe Y. *Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH-68-4* (Southern Cross Cruise), Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 1970, 67
- 21 Fiadeiro M. The alkalinity of the deep Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1980, 49, 499~505
- 22 Gong G C, Liu K K and Liu C T et al. The Chemical hydrography of the South China Sea west of Luzon and a comparison with the West Philippine Sea, *Terrestrial. Atmospheric and Oceanic Sciences.*, 1993, 3 (4): 587~602

- 23 Li Y H, Takahashi and T Broecker W S. Degree of saturation of  $\text{CaCO}_3$  in the oceans. *J. Geophys. Res.*, 1969,74,5 507~5 525
- 24 Tsunogai S. An estimate of the rate of decomposition of organic matter in the deep water of the Pacific Ocean. In: Takenouti Y ed. *Biological Oceanography of the northern North Pacific Ocean*. Idemitsu Shoten, Tokyo, 1972,517~533
- 25 Edmond J M. On the dissolution of carbonate and silicate in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, 1974,21, 455~479
- 26 韩舞鹰, 马克美. 南海东北部海区碳酸钙的饱和面、溶跃面和补偿深度. 海洋通报, 1988,7(3):84~89
- 27 Chen C T A, Feely R A and Gendron J F. Lysocline, calcium carbonate compensation depth, and calcareous sediments in the North Pacific Ocean. *Pacific Science*, 1988,42:237~252
- 28 Peterson M N A. Calcite: Rate of dissolution in a vertical Profile in the central Pacific, *Science*, 1966, 154,1 542~1 543
- 29 Berger W H. Foraminiferal ooze: Solution at depth. *Science*, 1967,156,383~385
- 30 Berner R A and Wilde P. Dissolution kinetics of  $\text{CaCO}_3$  in seawater I. Saturation state parameters for kinetics calculations. *Amer. J. Sci.*, 1972,273,826~839
- 31 Berger W H, Adelseck Jr D G and Mayer L A. Distribution of carbonate in surface sediments of the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1976,81,2 617~2 627
- 32 Broecker W S, Patzert W C and Toggweiler J R et al. Hydrography, chemistry and radioisotopes in the southeast Asian basins. *J. Geophys. Res.*, 1986,91(C12):14 345~14 354
- 33 韩舞鹰, 林洪瑛. 南海的水通量. 海洋通报, 1992,11(2):89~90

## Carbonate chemistry in northeast South China Sea

Huang M H and Chen C T A

(*Institute of Marine Geology, National Sun Yat-Sen Univ., Gaoxiong, Taiwan*)

### Abstract

In order to understand the dissolved carbonate system in the South China Sea, we participated in three WOCE cruises (Cruise 257, 287 and 316) aboard R/V Ocean Researcher 1. Temperature, salinity, pH, alkalinity and total  $\text{CO}_2$  were measured.

The South China Sea Deep Water should have the characteristics similar to the water at about 2 200m in the west Philippine Sea. The measured results show that there are no distinguishable differences between these two water masses. The calculated results from the residence time, the inorganic carbon dissolution rate and the organic carbon decomposition rate imply a short deep water residence time of approximately 40 a.

KEYWORDS Carbonate, total alkalinity, total  $\text{CO}_2$ , residence time, dissolution rate, South China Sea