

# 红海及亚丁湾间之海水交换

陈镇东 吴朝荣

(中山大学海洋地质研究所, 台湾高雄)

## 提 要

分析表观耗氧量、滴定碱度及总二氧化碳量等资料来研判红海及亚丁湾间之海水交换。结果显示, 红海深层水的方解石及霏石饱和度均比亚丁湾和阿拉伯海深层水的饱和度高。红海全水柱之方解石和霏石都处于过饱和状态, 亚丁湾和阿拉伯海中各深度之方解石亦呈过饱和状态, 但霏石的饱和深度则大约在 500m 左右。分析深层水之生物体无机碳与有机碳的分解比值, 可以发现此地区深层水中, 大约有 25% 的总二氧化碳增加量是由无机碳酸钙溶解而来。

关键词: 红海, 亚丁湾, 海水交换, 溶解氧, 二氧化碳, 方解石, 霏石

红海乃一几乎完全封闭之海湾, 除北端透过苏伊士运河与地中海进行非常有限的海水交换之外, 主要透过曼德海峡 (Bab el Mandeb) 与亚丁湾相通。由于曼德海峡水深仅达 110m, 而海峡两侧水深超过 2 000m, 透过该海峡交换之海水在海峡两侧造成明显之水团改变。基本上红海附近区域并无河流, 蒸发亦超过降雨, 因此北印度洋表层水流入红海, 补充蒸发之水份。北印度洋表层水由亚丁湾流到曼德海峡, 之后穿过红海, 真到苏伊士湾及亚喀巴湾 (Agaba); 由于蒸发, 使表层水之盐度及密度均逐渐增加。冬季表层水并于苏伊士湾及亚喀巴湾下沉, 形成深层水而回流<sup>[1]</sup>。除此之外, 明显之水团下沉, 仅出现在曼德海峡南侧出口处<sup>[2-6]</sup>。本文主要使用 GEOSECS (Geochemical Ocean Sections Study) 航次于 1977 年 12 月在红海、亚丁湾及阿拉伯海所收集之温度、盐度、滴定碱度、总二氧化碳及溶解氧等化学资料<sup>[7]</sup>, 简略地描述红海、亚丁湾及阿拉伯海之表观耗氧量, 碱度及总二氧化碳的垂直分布, 及无机碳对有机碳的分解比例等, 讨论红海与亚丁湾间之海水交换。

## 一、AOU 分布

图 1 是在 GEOSECS 航次中从红海经亚丁湾到阿拉伯海 (测站 405—416) 的 AOU (apparent oxygen utilization)<sup>[8]</sup> 垂直分布断面图。其中红海的分布大致和使用 MEROU 航次资料所得的分布情形类似<sup>[9,10]</sup>。其分布是底层水由北向南 AOU 值递增, 于极南端 400±100m 处出现极大值。中层的回流水向北流动, 其 AOU 值因与较年轻之水混合而逐

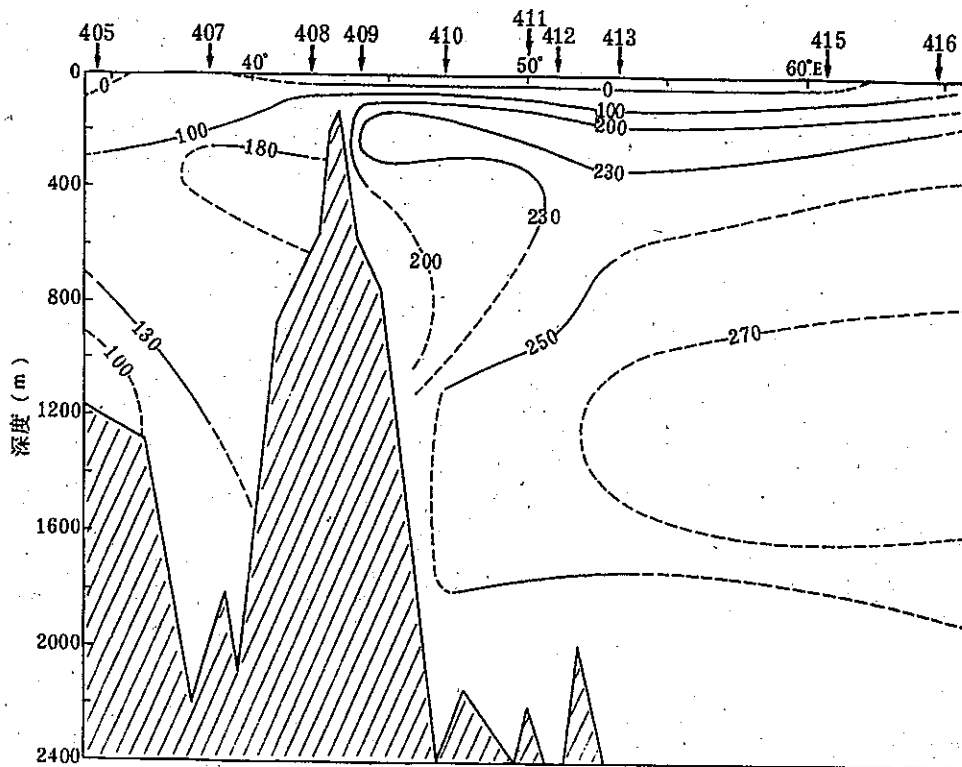


图1 红海经亚丁湾到阿拉伯海的 AOU ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ) 垂分布断面

Fig. 1 Crosssection of AOU in the vicinity of Gulf of Aden

( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ , based on GEOSECS data)

渐减少。除红海中的情形外,还可看到冬天红海的海水越过  $43^\circ\text{E}$  处的海槛而进入亚丁湾,这种情形和前人的研究相符合<sup>[11,12]</sup>。在冬天,红海和亚丁湾的海水交换大致分为两层,从表层到 80m 深的上层水较暖、盐度较低,由亚丁湾流入红海中。而下层由 80m 深至海槛深度(大约 110m 深),则是相对较高盐度的红海水流入亚丁湾中<sup>[11,12]</sup>。

由图 1 可看到流出红海的较富溶解氧之海水,因其盐度较高、密度较大,故在流入亚丁湾后即迅速下沉。在亚丁湾北端接近曼德海峡处,可以看到因具较小 AOU 值之红海水下沉所造成的影响。此低 AOU 值红海水,具较高之超重氢浓度<sup>[13]</sup>,亦显示其年龄较小。另外,图上也显示在阿拉伯海中有一 AOU 极大值层,曾有许多学者研究过这一层低溶解氧值区<sup>[5]</sup>,他们认为低溶解氧浓度的形成和维持最主要的原因:高生产量的上升流(upwelling)区,带来了多量的有机物质,使得耗氧较多;又因为有很强热带斜温层,限制了溶解氧的往下传递。另外由亚丁湾和波斯湾流到此区域的海水,也是些已经耗氧很多的较老海水。再加上印度洋北边是封闭的陆地,不像大西洋北端有深层水形成,可以将富氧的海水带入深层。于是由南极地区生成、越过赤道而来的南极中层水,在经过漫长的路程后,已经消耗了不少的溶解氧。流到此区域时又因北方陆地的阻挡,阻碍了次表层水深解氧的补充。这些因素的影响,造成了阿拉伯海中(图 1)的低溶解氧值区<sup>[5,14]</sup>。

## 二、NTA, NTCO<sub>2</sub> 分布

仅使用滴定碱度(TA)和二氧化碳(TCO<sub>2</sub>),从所画出的断面图并不太容易看出红

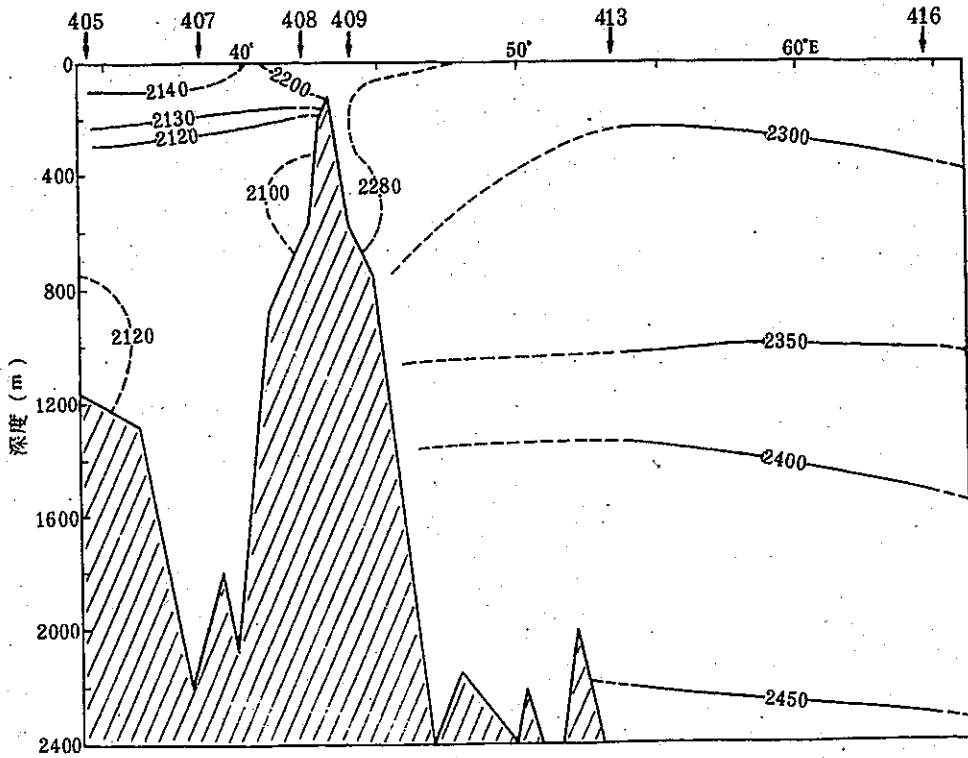


图 2 红海经亚丁湾到阿拉伯海的 MTA ( $\mu\text{eq}/\text{kg}$ ) 垂直分布断面图

Fig. 2 Crosssection of NTA in the vicinity of Gulf of Aden ( $\mu\text{eq}/\text{kg}$ , based on GEOSECS data)

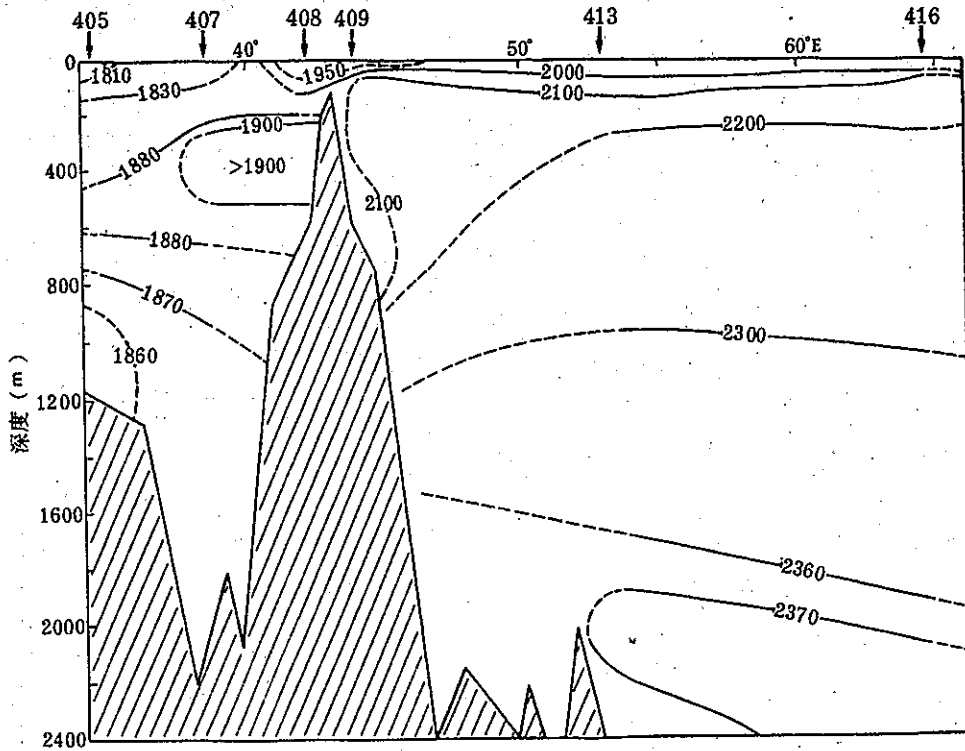


图 3 红海经亚丁湾到阿拉伯海的  $\text{NTCO}_2$  ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ) 垂直分布断面图

Fig. 3 Crosssection of  $\text{NTCO}_2$  in the vicinity of Gulf of Aden ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ , based on GEOSECS data)

海海水进入亚丁湾的讯号<sup>[15]</sup>。但作盐度修正后便可使这个讯号清楚地浮现。图2及图3是 GEOSECS 测站从红海经亚丁湾至阿拉伯海的 NTA ( $NTA = TA \times 35/s$ ) 及  $NTCO_2$  ( $NTCO_2 = TCO_2 \times 35/s$ ) 断面分布。由 NTA 及  $NTCO_2$  可以看出红海海水进入亚丁湾后下沉的情形 (较低的 NTA 及  $NTCO_2$  被带入较深层中)。NTA 及  $NTCO_2$  在亚丁湾和阿拉伯海中的垂直分布, 都是随深度的增加而增加的。在红海中深水之  $NTCO_2$  随水团流动而递增, 越老的水含  $NTCO_2$  越多。而因红海表层水由南往北行进过程中不断有碳酸钙沉淀, 因此於北端下沉海水之 NTA 较低, 使得深层往南回流海水之 NTA 较往北流动之表层水为低。 $NTCO_2$  在极南端约  $400 \pm 100m$  深处出现极大值, 还可在极南端处看到 NTA 极小值。红海部分两者的分布情形和以 MEROU 资料所画的分布图类似<sup>[16,17]</sup>。

### 三、碳酸钙的饱和度

为了解方解石 ( $\Omega_c$ ) 和霏石 ( $\Omega_n$ ) 在海水中的饱和度, 本文使用温度、盐度、滴定碱度和总二氧化碳量等资料计算。方解石和霏石饱和度可由下式求得:

$$\Omega_i = ICP / K'_{sp} \times 100\%$$

其中  $ICP = (Ca^{2-}) \times (CO_3^{2-})$  (mol/kg)<sup>2</sup>;

$K'_{sp}$  为方解石和霏石的表观溶度积常数。

压力对溶度积常数之影响可由下式求得:

$$K'_{sp} P_{(i)} = K'_{sp} (i) \times \exp[-(\Delta V_i / RT)_p + (0.5 \Delta k_i / RT) P^2]$$

其中  $\Delta V_i$  为偏摩尔体积变化;  $\Delta k_i$  为偏摩尔压缩度变化。

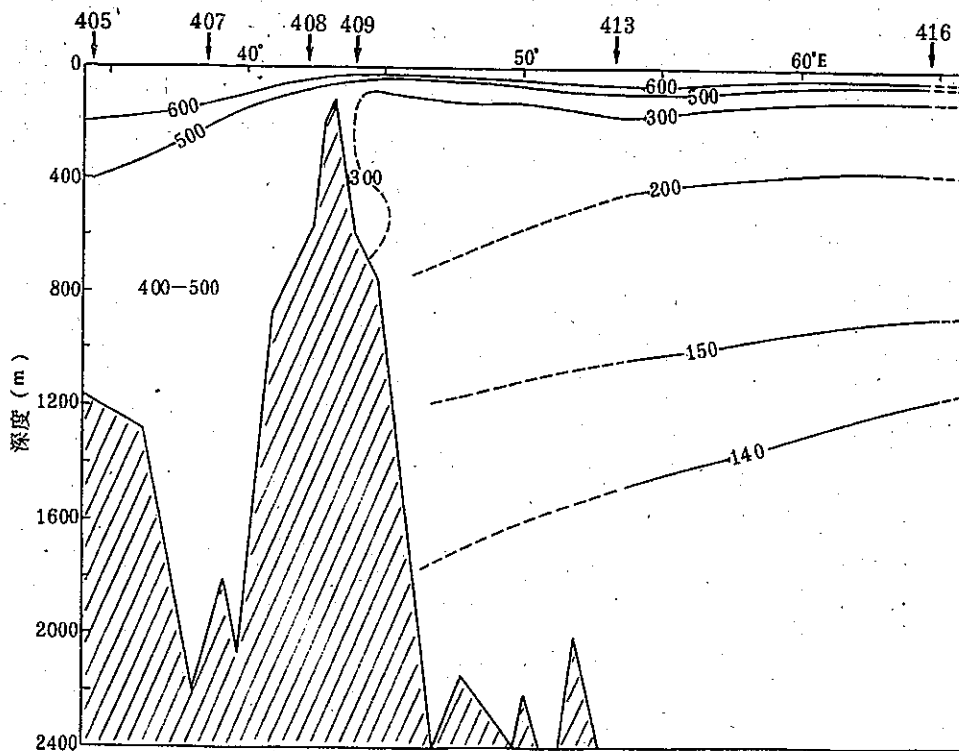


图4 红海经亚丁湾到阿拉伯海的  $\Omega_c$  (%) 垂直分布断面图

Fig. 4. Crosssection of  $\Omega_c$  in the vicinity of Gulf of Aden (% , based on GEOSECS data)

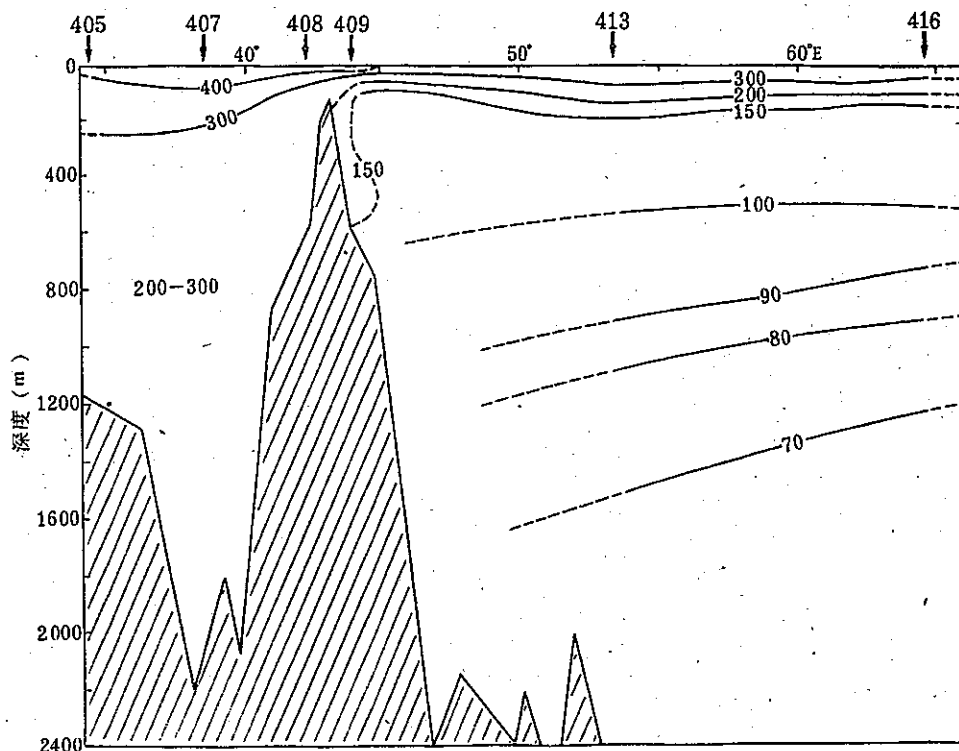


图5 红海经亚丁湾到阿拉伯海的  $\Omega_c$  (%) 垂直分布断面图

Fig. 5 Crosssection of  $\Omega_c$  in the vicinity of Gulf of Aden (% , based on GEOSECS data)

各项浓度及常数主要是参照 UNESCO<sup>[18]</sup> 所建议的程序求得。图4及5分别为采用从红海经亚丁湾到阿拉伯海之 GEOSECS 测站资料计算所得之  $\Omega_c$  及  $\Omega_a$  垂直剖面图。由图也可看出红海海水流入亚丁湾后所造成的影响。对整个红海来说，所有海水对方解石和霏石都呈现过饱和状态。表层水的  $\Omega_c$  大约等于 750%， $\Omega_a$  约为 400%；深层水的  $\Omega_c$  约等于 450%， $\Omega_a$  约为 250%。深层水的饱和度大约较表层水减少 40% 左右，其减少的原因，大部分是由压力对碳酸钙溶解度的影响所致。

至於由亚丁湾和阿拉伯海测站各深度计算所得的  $\Omega_c$ ，也是呈过饱和状态，不过其过饱和程度远低于红海海水。由於压力对碳酸钙溶解度之影响，深层水之  $\Omega_c$  降至不及 140%。而霏石的饱和深度大约位于 500m 深处左右，深层水之  $\Omega_a$  不及 70%。若以红海深层水和相同深度的阿拉伯海海水相比，可发现红海深层水的饱和度较相同深度的阿拉伯海高出甚多（图4，5）。这是由於阿拉伯海深层水中有较多的有机物氧化，使  $\text{CO}_3^{2-}$  减少，所以才使得饱和度比红海低（详见后述）。

#### 四、有机碳与无机碳之分解比值

图6是 GEOSECS 航次位在亚丁湾口及阿拉伯海中测站（测站 413 及 416），深度在 1000m 以下的生物体无机碳与有机碳的分解比值（IC/OC）随深度变化。（计算 IC/OC 比值的公式取自文献 [13]，其中修正的人为二氧化碳量，使用  $35\mu\text{mol}/\text{kg}$ <sup>[19,20]</sup>）。由该图可看出，在 1000m 以深 IC/OC 比值 0.1 随深度增加到约 0.35。这种分布情形显示出，较

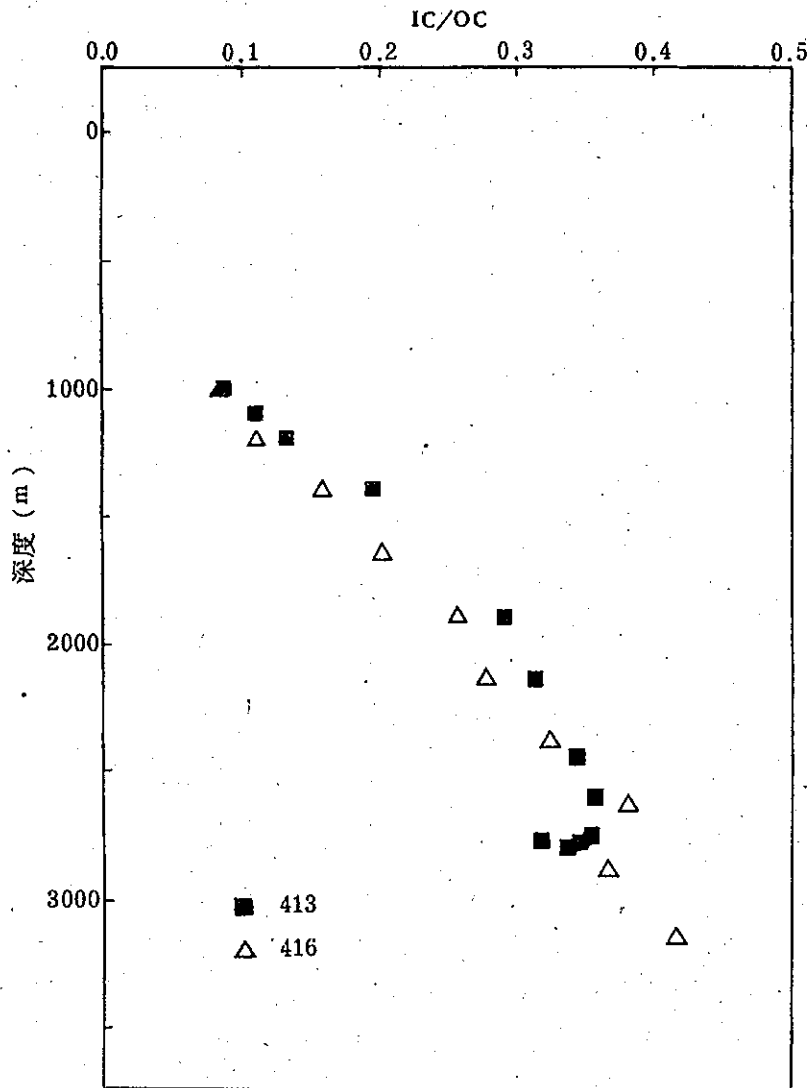


图6 GEOSECS测站413, 416之IC/OC随深度变化图

Fig. 6 Vertical distributions of IC/OC at GEOSECS stations 413 and 416

浅的海水中较多的有机物质分解,使得IC/OC值较深层水的低。一个值得注意的现象发生在测站413,在接近海底时其IC/OC比值呈现减少的情形。

测站413在 $13^{\circ}21'N$ ,  $53^{\circ}16'E$ 处,约位于亚丁湾口。由Wyrski<sup>[21]</sup>的表层水硝酸盐分布图可以看出,这附近表层水有大量的硝酸盐,许多学者指出这区域有上升流发生<sup>[5,22,23]</sup>。由上升流带来的丰富营养盐,使这区域有较大的生产力,许多未完全分解的有机物质掉到海底(海底的深度不到3000m),在底层中分解,这便会使得IC/OC的比值减少。另外由这两个测站的IC/OC比值,可以求得深层水中大约有25%的总二氧化碳增加量,是由于无机碳酸钙溶解而来的。陈达伟<sup>[19]</sup>使用GEOSECS资料,算出印度洋1000m以深之深层水的IC/OC平均比值为0.22,即平均大约有18%的总二氧化碳增加量是由碳酸钙溶解来的;CHEN<sup>[24]</sup>计算在太平洋深层水中,有25%的总二氧化碳增加量是由碳酸钙的溶解而来的;Craig<sup>[25]</sup>求得在南太平洋1—4km的深度范围中,25%的总二氧化碳增加量是由碳酸钙的溶解而来的;Tsunogai<sup>[26]</sup>计算在太平洋1—4.5km的深度范围,有29%总二氧化碳增加量是由碳酸钙的溶解而来,以上数值均十分接近。

## 五、结 论

由以上结果可知, 利用 AOU, NTA, NTCO<sub>2</sub>,  $\Omega_c$ ,  $\Omega_n$  等的断面图, 皆可以追踪到红海的海水越过 43°E 处之海槛而流入亚丁湾中的情形; 红海全水柱之  $\Omega_c$  及  $\Omega_n$  都是处于过饱和状态。亚丁湾和阿拉伯海中和深度的  $\Omega_c$  亦呈过饱和状态, 而  $\Omega_n$  的饱和深度大约位在 500m 左右, 亚丁湾和阿拉伯海深水中大约有 25% 的总二氧化碳量由无机碳酸钙溶解而来。

## 参 考 文 献

- [1] Krumholz, B. S., J. Erez and C. T. Chen., 1990, Anthropogenic CO<sub>2</sub> penetration in the northern Red Sea and in the Gulf of Elat (Aqaba), *Oceanologica Acta*, 13: 283—290.
- [2] Bogdanova, A. K., 1974, Indirect estimation of the seasonal variation of the water exchange through Bab-el-Mandeb, 1' *Océanographie Physique de la Mer Rouge*, CNEXO, (2): 257—270.
- [3] Gorman, J. M., D. G. Browning, E. N. Jones, 1974, Circulation between the Red Sea and the Gulf of Aden in late summer. 1' *Océanographie Physique de la Mer Rouge*, CNEXO, (2): 207—232.
- [4] Patzert, W. C., 1974, Volume and heat transports between the Red Sea and Gulf of Aden, and notes on the Red Sea heat budget, 1' *Océanographie Physique de la Mer Rouge*, CNEXO, (2): 195—206.
- [5] UNESCO, 1985, MABAHISS/John Murry 50th anniversary: Marine science of the North West Indian Ocean and adjacent waters, UNESCO reports in *Mar. Sci.*, 31: 145.
- [6] Van Aken, H. M., L. Otto, 1974, Observations of the exchange of water in the strait Bab-el-Mandeb in 1967, 1' *Océanographie Physique de la Mer Rouge*, CNEXO, (2): 233—256.
- [7] Weiss, R. F., W. S. Broecker, H. Craig and D. Spencer, 1983, GEOSECS Indian Ocean Expedition, *Hydrographic Data*, 1977—1978, National Science Foundation, Washington, D. C., 5: 48.
- [8] Chen, C. T., 1981, Oxygen solubility in seawater, in: *Solubility Data Series, Oxygen and Ozone*, R. Battino, ed., Pergamon Press, 7: 41—55.
- [9] Poisson, A., B. Schauer, and C. Brunet, 1985, Les rapports des campagnes a la mer, MD43/INDIGO 1, *Les Publ. Mission Rech.*, 85, 06, Terres Australes et Antarctiques Fr., Paris, 267.
- [10] Poisson, A., B. Schauer, and C. Brunet, 1986, Les rapports des campagnes a la mer, MD49/INDIGO 2, *Les Publ. Mission Rech.*, 86, 02, Terres Australes et Antarctiques Fr., Paris, 234.
- [11] Maillard, C., 1971—1972, Etude hydrologique et dynamique de la Mer Rouge en hiver, *Annales de l'Institut Océanographique*, T48, 113—140.
- [12] Maillard, C. and G. Soliman, 1986, Hydrography of the Red Sea and exchanges with the Indian Ocean in summer, *Oceanologica Acta*, 9 (3): 249—269.
- [13] Andrie, C. and L. Merlivat, 1989, Contribution des données isotopiques de deutérium, oxygène-18, hélium-3 et tritium, a l'étude de la circulation de la Mer Rouge. *Oceanologica Acta*, 12: 165—174.
- [14] Haqvi, S., 1987, Some aspects of the oxygen-deficient conditions and denitrification in the Arabian Sea, *J. Mar. Res.*, 45: 1049—1072.
- [15] Spencer, D., W. S. Broecker, H. Craig and R. F. Weiss, 1982, GEOSECS Indian Ocean Expedition, 6, Sections and profiles, National Science Foundation, Washington, D. C., 140.
- [16] 吴朝荣, 1990, 红海及邻近水域的碳化学研究, 中山大学海洋地质研究所(台湾高雄) 硕士论文, 128.
- [17] 吴朝荣、陈镇东, 1992, 红海的碳化学研究, *海洋学报*, 14 (3): 55—64.
- [18] UNESCO, 1987, Thermodynamics of the carbon dioxide system in seawater, UNESCO Tech., Paper in *Mar. Sci.*, 51: 55.
- [19] 陈连伟, 1988, 印度洋之二氧化碳问题及深水氧消耗速率, 中山大学海洋地质研究所(台湾高雄) 硕士论文, 173.
- [20] 陈镇东、吴朝荣, 1991, 红海兴西北印度洋之人为二氧化碳, *海洋与湖沼*, 22: 434—442.
- [21] Wyrtki, K., 1971, *Oceanographic Atlas of the International Indian Ocean Expedition*, National Science Founda-

- tion, Washington, D. C., 531.
- [22] Schott, F., 1983, Monsoon response of the Somali Current and associated upwelling, *Progress in Oceanography*, 12: 357—381.
- [23] Swallow, J. C., 1984, Some aspects of the physical oceanography of the Indian Ocean, *Deep-Sea Res.*, 31: 639—650.
- [24] Chen, C. T. A., 1990, Rates of calcium carbonate dissolution and organic carbon decomposition in the North Pacific Ocean; *J. Oceano. Soc. Japan*, 46: 201—210.
- [25] Craig, H., 1971, The deep metabolism: Oxygen consumption in abyssal ocean water, *J. Geophys. Res.*, 75: 7641—7647.
- [26] Tsunogai, S., 1972, An estimate of the rate of decomposition of organic matter in the deep water of the Pacific Ocean, in: *Biological oceanography of the northern North Pacific Ocean*, A. Y. Takenouti, ed., Idemitsu Shoten, 517—535.

## EXCHANGE OF SEAWATER BETWEEN THE RED SEA AND THE GULF OF ADEN

C. T. A. Chen    C. J. Wu

(*Institute of Marine Geology National Sun Yat-Sen University Kaohsiung, Taiwan*)

### Abstract

The apparent oxygen utilization, titration alkalinity and total CO<sub>2</sub> data have been used to study the exchange of seawater between the Red Sea and the Gulf of Aden. The Red Sea is supersaturated in both calcite and aragonite and the degrees of saturation are higher than found in the Gulf of Aden. The Gulf of Aden and the Arabian Sea are supersaturated in calcite but the aragonite becomes undersaturated below 500m.

Analysis of the biogenic inorganic carbon/organic carbon ration indicates that about 25% of the increase in total CO<sub>2</sub> originates from the dissolution of calcium carbonate.

**Key words:** Red Sea, gulf of Aden, exchange of seawater, dissolved oxygen, Carbon dioxide, calcite aragonite