

南沙群岛海域深层海水碳垂直通量*

韩 舞 鹰

(中国科学院南海海洋研究所, 广州)

王 明 彪

林 洪 瑛

(国家海洋局南海分局, 广州)

(中国科学院南海海洋研究所, 广州)

关键词 南沙群岛海域 碳 垂直通量

前 言

生命物质在海洋中由一个深度向另一个深度传输的通量是决定海洋生态系统结构和机能的重要因素之一. 定量研究海水中碳的垂直通量是了解上述总通量过程中的重要一环. 由于碳循环与人类生存密切相关, 近年来这方面的研究工作已引起越来越多科学家的兴趣^[1-5]. 定量研究深层海水中碳垂直通量是碳循环研究的一个方面.

1 调查区域、方法和计算

本文根据 1984~1991 年南沙群岛海域 ($12^{\circ}00' \sim 3^{\circ}30'N$, $108^{\circ}00' \sim 120^{\circ}00'E$) 碳化学调查资料, 对深层水 ($>1000m$) 中碳的垂直通量进行定量讨论.

本文使用的观测资料包括温度、盐度、溶解氧、pH 和总碱度. 观测仪器、方法和海水中总二氧化碳的计算方法见文献 [6].

2 南沙海域深层水的上升速度

表 1 列出南海深层水的观测结果. 由表可看出, 南海深层水无论在时间上或是空间上都是性质极其稳定的水体.

图 1 是南沙海域深层水位温、盐度垂直分布图 ($12^{\circ}09.81'N$, $112^{\circ}59.95'E$). 该图与笔者在南海中部和北部所得结果是一致的^[7], 与“Dana”号和李绪录所得结果也是一致的^[8,9]. 由图 1 可见, 2000m 以下到海底, 位温随深度增加而减低, 盐度则略为增加. 图 2 是位温-盐

本文于 1991-12-23 收到, 修改稿于 1993-10-14 收到.

* 中国科学院南沙综合科学考察成果.

度图，由图可见南沙群岛海域深层水 $\theta-S$ 为一直线，表明其深层水是由两个水源混合而成。

表1 南海深层水观测结果

深度 (m)	温 度 (°C)				位 温 (°C)				盐 度			
	北部	中部	南部	Dana*	北部	中部	南部	Dana	北部	中部	南部	Dana
2 000	2.53	2.63	2.50	2.53	2.38	2.47	2.35	2.38	34.62	34.61	34.61	34.58
2 500	2.46	2.40	2.38	—	2.25	2.20	2.18	—	34.62	34.62	34.62	—
3 000	2.36	2.38	2.36	2.38	2.12	2.13	2.12	2.13	34.63	34.62	34.62	34.63
3 500	2.40	2.40	2.39	—	2.09	2.10	2.09	—	34.64	34.62	34.62	—
4 000	2.41	2.47	2.44	2.44	2.09	2.10	2.08	2.08	34.64	34.62	34.62	34.63

*1929年“Dana”号的观测结果。

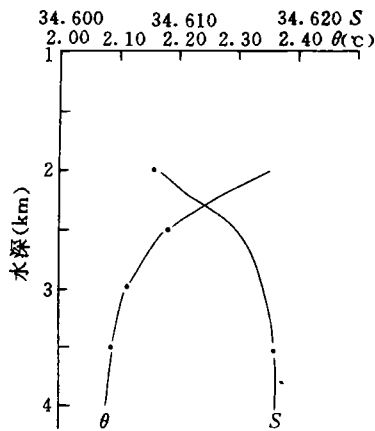


图1 南沙群岛海域位温、盐度垂直图

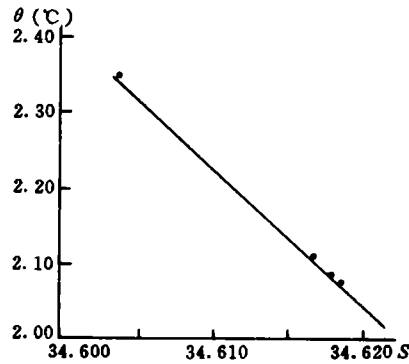


图2 南沙群岛海域位温-盐度图

这两个水源混合的物理过程如何呢？如果是纯粹的垂直混合过程，那么随着混合时间的增加，温度和盐度随深度的变化不应如图1所示呈曲线变化，而应呈直线变化。因此，较好的假设是底层水均匀向上流动与随机涡动混合这两个过程相互叠加^[3]，即向上移流和涡动混合结合，就会产生图1的曲线形状。

韩舞鹰^[7]给出位温的深度分布方程：

$$\ln(\theta - \theta_i) = \ln C + \frac{W}{A}Z, \tag{1}$$

式中， W/A 称之为混合参数，可由位温深度分布用最小二乘法求得，亦可由盐量平衡求得。根据1990年1号

表2 不同海区深层水混合参数计算结果 ($\times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$)

海区	南海中部	南沙海域	班达海	苏禄海	苏拉威西海	萨武海	北太平洋
W/A	2.0	2.1	1.4	1.2	1.8	1.6	1.1

测站(位置见表3)深度2 000~4 000m的观测资料,求得 W/A 为 $2.1 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ ($r=0.99$)。此值与韩舞鹰^[7]、李绪录^[8]在南海中部求得结果 2.0×10^{-5} 和 $2.2 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ 相接近。深层水 A 值取 $4 \text{cm}^2/\text{s}$ ^[9], 求得 W 值为 $8.4 \times 10^{-5} \text{cm}/\text{s}$ 。东南亚一些海盆的计算结果见表2。

3 南沙群岛海域深层水总二氧化碳的再生速率

表 3 南沙海域深层海水总二氧化碳与溶解氧含量

深度 (m)	总二氧化碳 (mmol/dm ³)	溶解氧 (10 ⁻³)
1 000	2.40	1.92
1 500	2.40	2.04
2 000	2.44	2.32
2 500	2.45	2.46
3 000	2.45	2.57
3 500	2.45	2.56
4 000	2.45	2.56

* 观测位置:12°09.8'N,112°55.9'E;观测时间:1990-05-14.

方程的解为:

$$C = C_0 + (C_m - C_0)f(Z) - (E/W)[Z - Z_m f(Z)], \quad (3)$$

其中,

$$f(Z) = (e^{\frac{W}{A}Z} - 1) / (e^{\frac{W}{A}Z_m} - 1), \quad (4)$$

C_m 和 C_0 是深层水上界和下界 ΣCO_2 浓度. 根据南沙海域深层水 ΣCO_2 的观测结果(表 3), 由式(3)求得 E/W 值为 $0.0025 \times 10^{-5} \text{mmol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{cm})$. 前面求得 W 为 $8.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, 因此 E 值为 $0.021 \times 10^{-10} \text{mmol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{s})$.

式(2)同样适用于深层水溶解氧分布, 只是右边衰变项为负值. 同理, 由表 3 结果求得深层水溶解氧的消耗率 R 值为 $0.031 \times 10^{-10} \text{mmol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{s})$.

如果深层水中有机物氧化分解是 ΣCO_2 的主要补充源, 而深层水中有机物主要是浮游生物的残骸, 那么按照浮游植物成分的氧碳比($\Delta\text{O}_2/\Delta\text{CO}_2$ 呼吸商)应当为 1.3. 南沙群岛海域 $\Delta\text{O}_2/\Delta\text{CO}_2 = R/E = 1.476$ 与理论呼吸商相差不大. 造成差别的原因, 可能与观测误差有关, 与计算时的一些假设有关, 也有可能是南沙群岛海域深层水有机物的呼吸商特殊或 ΔCO_2 受碳酸钙的溶解影响所致.

4 南沙群岛海域深层水碳的垂直通量

根据前面求得深层水 ΣCO_2 的再生速率和深层水的上升速度, 由下式可求深层水的停留时间 τ .

$$\tau = h/W, \quad (5)$$

以 1990 年 1 号测站为例, 深层水厚度 h 为 2 500m, 由式(5)求得停留时间 τ 值为 94a.

深层水在停留时间内再生的 ΣCO_2 由下式求得:

$$\Delta\Sigma\text{CO}_2 = \tau E, \quad (6)$$

ΣCO_2 值为 $0.006 \text{mmol}/\text{dm}^3$. 从观测资料已知南沙海域深层水 ΣCO_2 平均值为 $2.447 \text{mmol}/\text{dm}^3$, 可见在南沙深层水中再生的 ΣCO_2 仅占原 ΣCO_2 很少一部分, 约为 0.25%. 因此, 可将深水 ΣCO_2 视为保守性的.

对深层水, 可把总二氧化碳(ΣCO_2)的水平梯度忽略, 其稳态分布由垂直移流、垂直涡流扩散和现场总二氧化碳再生量所维持. 假定垂直扩散系数 A 、垂直移流速度 W 和 ΣCO_2 再生速率 E 与深度 Z 无关, 深层水 ΣCO_2 浓度 C 由下式描述^[9]:

$$A \frac{d^2C}{dZ^2} - W \frac{dC}{dZ} = E, \quad (2)$$

已知 ΣCO_2 再生率为 $0.021 \times 10^{-10} \text{mmol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{s})$, 取 h 为 2 000m 时, 深层水柱中碳的再生量 T_1 为:

$$T_1 = Eh, \quad (7)$$

求得 T_1 值为 $4.2 \times 10^{-6} \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 深层水 ΣCO_2 含量处于稳态, 即可认为由中层水沉降进入深层水并且氧化分解的颗粒碳量为 $4.2 \times 10^{-6} \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 即 $3.6 \times 10^{-4} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 剩下未分解而进入深积的颗粒碳由下式计算:

$$T_2 = vrC_0, \quad (8)$$

式中, v 为深积速率, r 为干容量, C_0 为有机碳百分含量.

根据观测资料^[10], v 值取 2cm/ka , r 值取 1.37g/cm^3 , C_0 值取 1.35% , 由式(8)求得 T_2 值为 $8.5 \times 10^{-5} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 这样由中层水沉降进入深层水中的颗粒有机碳总量为 $T_1 + T_2$ 即 $4.45 \times 10^{-4} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

如果把深层水看作一个箱子, 由质量平衡可有下式:

$$C_1W + T = (C_1 + \Delta\Sigma\text{CO}_2)W + T_2, \quad (9)$$

C_1 是由外洋进入南海深层海水 ΣCO_2 浓度. 将式(9)改写成:

$$T = \Delta\Sigma\text{CO}_2 \cdot W + T_2, \quad (10)$$

求得 T 为 $5.15 \times 10^{-9} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

公式(9)中右边第一项是再生的溶解态二氧化碳通过海水上升运动而进入中层水的量, 根据观测值求得其值为 $2.1 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

5 结论

南沙海域颗粒碳由中层至深层水的垂直向下通量为 $5.15 \times 10^{-9} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 这部分颗粒碳 98% 氧化分解, 2% 进入沉积, 分解的这部分碳随着海水的上升运动, 垂直向上又返回中层水. 这部分再生碳只占总的垂直向上通量的很少部分, 约占 0.25%. 溶解态二氧化碳通过海水上升运动进入中层水的量值为 $2.1 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 绝大部分垂直向上的 ΣCO_2 是来自外洋的.

参考文献

- 1 Moller F. On the influence of change in the CO_2 concentration in air on the radiation balance of the earth's surface and on the climate. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**, 3877~3886
- 2 Revelle Roger (ed.). Atmospheric carbon dioxide, Zn restoring the quality of our environment. *Rept. Sci. Aclv. Com.*, 1965, 111~133
- 3 Broecker W S. Atmospheric gas and volcanic gas. In: *Chemical Oceanography*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc. New York, 1974, 114~138.
- 4 Bolin B. Carbon cycle modelling, SCOPE 16, Carbon Cycle Modelling. John Wiley & Sons, 1981, 1~28
- 5 韩舞鹰等. 大亚湾和珠江口的碳循环. 北京: 科学出版社, 1991
- 6 韩舞鹰等. 水化学要素调查手册. 北京: 海洋出版社, 1986, 88~102, 179~182
- 7 韩舞鹰. 深海盆水氧的消耗率. 南海海洋科学集刊, 第4集, 1983, 115~120
- 8 李绪录. 南海中部深水中位温和盐度垂直分布数学模拟. 海洋学报, 1989, **11** (1): 115~120
- 9 Wyrski. *Physical Oceanography of Southeast Asian Water*, Dana Report, Vol.2
- 10 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及邻近海区综合调查研究报告(一). 北京: 科学出版社, 1989, 453~544