

南海中部深水中溶解氧和总无机碳的垂直分布模式及其相互关系

李 绪 录

(国家海洋局南海分局, 广州, 510300)

周 毅 频

(中国科学院南海海洋研究所, 广州, 510310)

摘要 根据1983年9月至1984年12月4个航次的调查资料,应用非线性最小二乘迭代拟合法,得出南海中部深水中溶解氧和总无机碳的垂直分布模式——稳定态非守恒组分的一维垂直扩散-对流方程 $KC'' - \omega C' + J = 0$; 溶解氧和总无机碳的平均拟合方差分别为 $\pm 0.03 \text{ ml/kg}$ 和 $\pm 0.02 \text{ mol/kg}$ 。与它们相应的测量精密度很相近。同时也简要地讨论了调查海区深水中溶解氧和总无机碳之间的相互关系。结果表明,南海中部深水中的平均氧消耗与总无机碳的再生量基本相同。

一维垂直扩散-对流模式^[3,4]是研究海洋深水各种理化性质的有效方法。作者曾经选择温、盐度的实测数据,应用非线性最小二乘迭代拟合法,求出南海中部深水中一维垂直扩散-对流模式的混合参数 α ^[5]。本文在此基础上,依据“向阳红05”号和“向阳红14”号海洋调查船于1983年9月,1984年4月、7—8月和12月在南海中部海区(12°00'—19°30'N, 111°00'—118°00'E)中4个调查航次中4个加深测站的数据,采用数学处理方法,求出该模式的另一参数 J/ω ,从而得到调查海区深水中溶解氧和总无机碳的垂直分布模式,并初步探讨它们的相互关系。4个站的位置、水深和最大观测深度列于表1。

表1 测站的位置、水深和最大观测深度

Tab. 1 Locations of the hydrographic stations water depths and maximum observed depths

站号	位 置	水深(m)	最大测深(m)
8324	18°00.1'±0.2'N, 113°59.8'±0.3'E	3 260	3 091.5
8327	18°01.8'±3.1'N, 117°02.3'±1.1'E	4 020	4 000.0
8353	13°30.4'±0.6'N, 114°00.3'±0.5'E	4 320	4 038.3
8356	13°30.6'±0.2'N, 116°59.9'±0.7'E	4 220	4 072.2

一、方 法

1. 观测

海水样品用1000ml或1200ml铜质颠倒采水器采集并在船上实验室进行现场分析。

收稿日期: 1989年5月11日。

温度用颠倒温度表测定,盐度用电导式盐度计测定,溶解氧由 Winkler 碘量滴定法测定, pH 值用 pH s-3A 型 pH 计测定,总碱度由 pH 电测法测定。依据这些观测数据,利用同一样品的密度把体积氧含量转换成重量氧含量;并用文献 [2] 的方法求出样品的总无机碳含量。

2. 数据拟合

一维垂直扩散-对流模式的一般方程为^[4]:

$$KC'' + J = \omega C' + \lambda C \quad (1)$$

式中, K 为垂直内动扩散系数; ω 为垂直对流速度; J 为中间再生(或消耗)率; λ 为放射性衰变系数。由于深水中的氧和总无机碳属于稳定态非守恒组分 ($\lambda = 0$), 所以得:

$$KC'' - \omega C' + J = 0 \quad (2)$$

方程 (2) 的解为^[4]:

$$(C - C_0) = (C_m - C_0)f(z) + (J/\omega)[z - z_m f(z)] \quad (3)$$

式 (3) 中

$$f(z) = (e^{z/z^*} - 1)/(e^{z_m/z^*} - 1); z^* = K/\omega$$

这里 z 向上为正; C_m 和 C_0 分别是垂直扩散-对流混合区间上界 ($z = z_m$) 和下界 ($z = 0$) 的组分浓度。Wyrski 指出^[6], 氧极小值所处深度太浅时, 用与深度无关的消耗率模式, 一般不能很好地拟合溶解氧的观测数据。Craig 和 Weiss 也曾表明这样的模式不能再现氧极小值以下的特征拐点^[5]。所以作者还用 Wyrski 提出的与深度成指数关系的消耗率模式来拟合氧的观测数据。Wyrski 模式中的消耗率定义为:

$$J = J_0 e^{-\mu z} \quad (4)$$

这样方程 (2) 的解为^[5]:

$$(C - C_0) = (C_m - C_0)f(z) + \frac{(J_0/\omega)}{\mu(1 + \mu z^*)} \cdot [(1 - e^{-\mu z}) - (1 - e^{-\mu z_m})f(z)] \quad (5)$$

根据文献 [3] 的结果, 南海中部的混合区间可选定为 660 至 4 000m (8324 站为 660 至 3 090m), 即 $z_m = 3.34\text{km}$ (8324 站 $z_m = 2.43\text{km}$)。并选取由位温导出的混合参数 z^* 值来进行溶解氧和总无机碳的数据拟合, 因为温度的观测数据似乎更加可靠些。也即 8324, 8327, 8353 和 8356 站的 z^* 值分别取为 0.464, 0.463, 0.434 和 0.424km。然后, 应用非线性最小二乘迭代拟合法, 依据调查期间四个站在混合区间内的观测数据按方程 (3) 和 (5) 的关系, 求出最佳参数 J/ω (或 J_0/ω 和 μ) 和混合区间的边界浓度 C_m 和 C_0 。

二、结果与讨论

1. 深水中溶解氧和总无机碳的垂直分布模式

通过对混合区间内观测数据的拟合, 得出符合方程 (3) 和 (5) 的最佳参数, 分别列于表 2—4 中。由这些参数和方程 (3) 和 (5) 的关系, 结合上述的 z^* 值, 便可得到南海中部 4 个不同区域深水中溶解氧和总无机碳的一维垂直扩散-对流模式。用这些模式求出的混合区间中溶解氧和总无机碳的垂直分布曲线以及 4 个站的观测数据点集表示在图 1 中。从这些图表中可以看到, 在拟合溶解氧数据时确实有较大的缺陷, 不但其拟合方差较

大(约 ± 0.06 ml/kg), 而且不能再现极小值下面的特征拐点; 而方程 (5) 能够相当好地拟合氧的观测数据, 其平均拟合方差为 ± 0.033 ml/kg, 这与溶解氧的测量精度基本一致。对于总无机碳, 方程 (3) 则能很好地拟合观测数据, 其平均拟合方差为 ± 0.022 m mol/kg, 这优于总碱度的测量精度^[4]。有必要指出的是, 作者也用方程 (5) 来拟合总无机碳的数据, 但未能得到更好的结果。至于总无机碳数据只须用 J/ω 常数比率方程而不必用随深度变化的再生比率方程来拟合的原因, 可能是深水中颗粒碳酸钙的溶解速率随深度的增加差不多抵消了有机物的氧化分解速率随深度的下降。

表 2 符合方程 (3) 的溶解氧最佳参数

Tab. 2 Best-fit parameters of the dissolved oxygen from Equation (3)

站号	测样个数	C_o (ml/kg)	C_m (ml/kg)	J/ω [ml/(kg·km)]	拟合方差 (ml/kg)
8324	23	2.57	1.87	-0.290	± 0.046
8327	23	2.61	1.79	-0.156	± 0.050
8353	23	2.55	1.64	-0.173	± 0.067
8356	28	2.53	1.63	-0.152	± 0.062

表 3 符合方程 (5) 的溶解氧最佳参数

Tab. 3 Best-fit parameters of the dissolved oxygen from Equation (5)

站号	测样个数	C_o (ml/kg)	C_m (ml/kg)	J_o/ω [ml/(kg·km)]	μ (km^{-1})	拟合方差 (ml/kg)
8324	23	2.51	1.92	-6.59×10^{-2}	-1.07	± 0.036
8327	23	2.53	1.89	-1.31×10^{-2}	-1.23	± 0.029
8353	23	2.47	1.76	-1.04×10^{-2}	-1.39	± 0.036
8356	28	2.46	1.75	-0.95×10^{-2}	-1.39	± 0.032

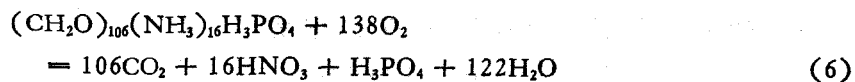
表 4 符合方程 (3) 的总无机碳最佳参数

Tab. 4 Best-fit parameters of the total CO_2 from Equation (3)

站号	测样个数	C_o (m mol/kg)	C_m (m mol/kg)	J/ω [m mol/(kg·km)]	拟合方差 (m mol/kg)
8324	23	2.29	2.24	1.37×10^{-2}	± 0.022
8327	23	2.34	2.27	0.85×10^{-2}	± 0.020
8353	23	2.32	2.24	0.97×10^{-2}	± 0.024
8356	28	2.33	2.25	0.98×10^{-2}	± 0.020

2. 深水中溶解氧和总无机碳之间的相互关系

有关海洋中浮游有机物的氧化分解, Redfield 等提出了如下的模式^[7]:



根据式 (6) 海水中氧的消耗和无机碳的再生应有以下的关系:

$$J_{\text{O}_2}/J_{\text{CO}_2} = -138/106 = -1.30 \quad (7)$$

然而, 海洋深水中总无机碳的再生并不是完全来自有机物的氧化。Li 等曾经表明^[6], 颗粒碳酸钙在深水中的溶解产生的二氧化碳约占总无机碳再生量的 20%; 而有机物的氧

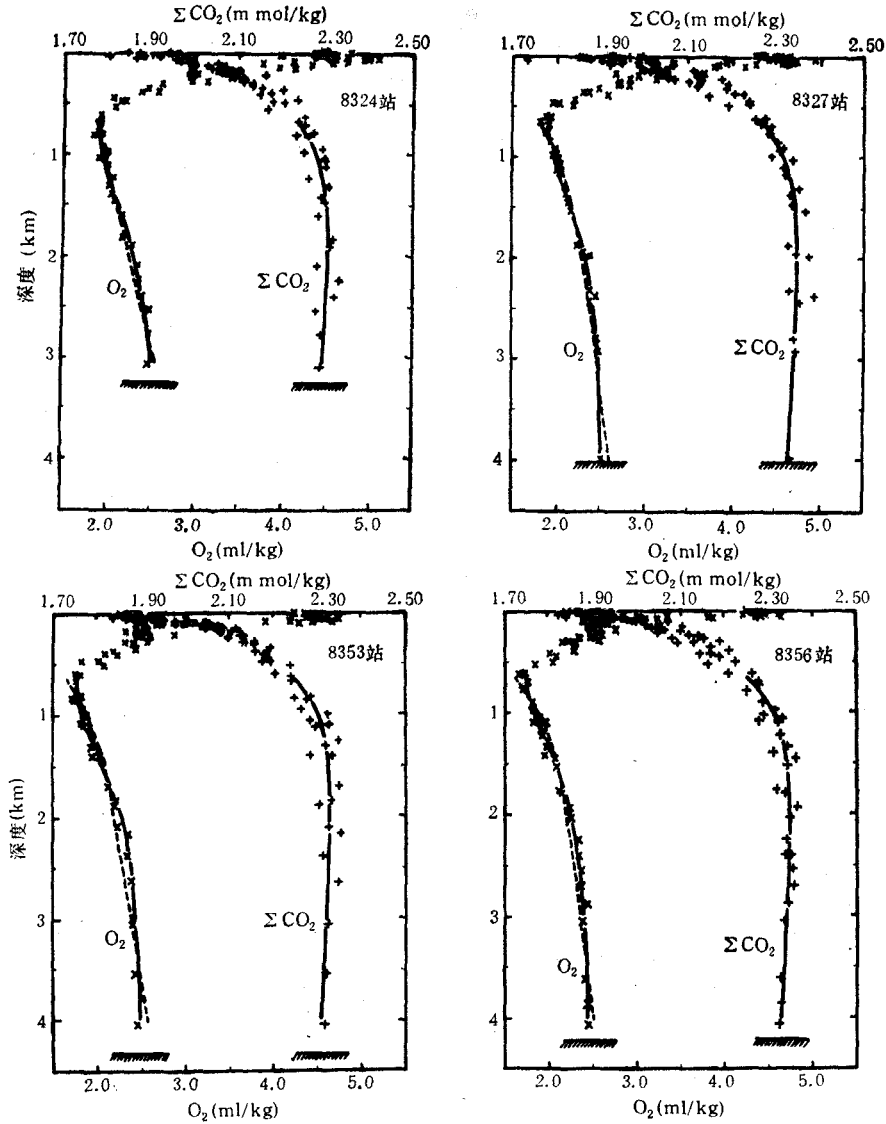


图1 南海中部海区中溶解氧和总无机碳的垂直分布

Fig. 1 Profiles of the dissolved oxygen and total carbon on the central South China Sea

实线是由方程(5)和(3)计算的溶解氧和总无机碳的垂直分布；虚线是由方程(3)计算的溶解氧的垂直分布。

化产生的二氧化碳约占80%。所以，对于深水中总的氧消耗和无机碳再生，式(7)应修改为：

$$J_{O_2}/J_{CO_2} = -1.30 \times 80\% \approx -1 \quad (8)$$

而且总无机碳和氧含量的总和 ($\Sigma CO_2 + O_2$) 应是一个守恒量，在深水混合区间内是位温或盐度的线性函数^[4]，具有文献[3]中方程(8)的垂直分布模式。

用表3中的 J_o/ω 和 μ 值，对方程(4)进行积分可求出混合区间内的平均氧消耗比率参数 $(J)/\omega$ ，结果列于表5。这些 $(J)/\omega$ 值相当于出现在深度为1750m左右的 J/ω

表 5 南海中部深水中的平均氧消耗和总无机碳再生比率参数的比较

Tab. 5 Comparisons for J/ω of the dissolved oxygen and total CO_2 in the abyssal central South China Sea

站号	$(J_{\text{O}_2})/\omega$ [ml/(kg·km)]	$(J_{\text{CO}_2})/\omega$ [ml/(kg·km)]
8324	-0.314	0.305
8327	-0.191	0.189
8353	-0.232	0.216
8356	-0.213	0.218

值。

为了便于比较,我们把表 4 中总无机碳的再生比率参数 J/ω 乘上转换系数 22.26^[5],使其与氧消耗比率参数的单位相同。结果也列于表 5。由表 5 中可以看到,混合区内的平均氧消耗比率参数与总无机碳再生比率参数基本上符合式 (8) 的关系,即南海中部深水中的平均氧消耗与总无机碳的再生量基本相同。

参 考 文 献

- [1] 李绪录, 1989. 南海中部海区中两个夏季航次的碱氯比率及其 σ_t 三次样条含数的参照方程. 海洋与湖沼 22(1): 56—62.
- [2] 李绪录、朱国凤、詹进源, 1987. 南海中部海水中的碳酸盐体系. 海洋学报 9(6): 718—724.
- [3] 李绪录、詹进源, 1989. 南海中部深水中位温和盐度垂直分布的数字模拟-垂直扩散-对流模式. 海洋学报 11(1): 115—120.
- [4] Craig, H., 1969. Abyssal carbon and radiocarbon in the Pacific. *J. Geophys. Res.*, 74(23): 5491—5506.
- [5] Craig, H. and R. F. Weiss, 1970. The Geosecs 1969 intercalibration station: Introduction, hydrographic features, and total CO_2 - O_2 relationships. *J. Geophys. Res.* 75(36): 7641—7647.
- [6] Li, Y. H., T. Takahashi and W. S. Broecker, 1969. The degree of saturation of CaCO_3 in the oceans. *J. Geophys. Res.* 74(23): 5507—5525.
- [7] Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards, 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. In *The Sea*, Vol. 2, Interscience, New York, pp. 26—77.
- [8] Wyrski, K., 1962. The oxygen minimum in relation to oceanic circulation. *Deep-Sea Res.* 9(1): 11—23.

THE VERTICAL DISTRIBUTION MODELS OF DISSOLVED OXYGEN AND TOTAL CARBON, AND THE TOTAL CO₂-O₂ INTERRELATIONSHIPS IN THE DEEP-WATER AREA OF THE CENTRAL SOUTH CHINA SEA

Li Xulu

(*South China Sea Sub-administration, SOA, Guangzhou, 510300*)

Zhou Yipin

(*South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica, Guangzhou, 510310*)

ABSTRACT

The vertical distribution models of dissolved oxygen and total inorganic carbon, one-dimensional vertical diffusion-advection equations for the stable nonconservative tracers, $KC'' - \omega C' + J = 0$, in the deep-water area of the central South China Sea have been derived by using a nonlinear least-squares iterative fitting procedure from the investigation data obtained at four stations during four cruises from September, 1983 to December, 1984. The model can fit the observed data well. The mean fitting square deviations are about $\pm 0.03 \text{ ml/kg}$ for the dissolved oxygen and $\pm 0.02 \text{ mol/kg}$ for the total inorganic carbon. These are nearly equal to the measurement precisions. The total CO₂-O₂ interrelationships in the deep waters of the studied area have also been investigated. It shows that the mean consumption of oxygen is approximate to the production of total inorganic carbon.