

南海溶解氧通量的初步研究*

林洪瑛 韩舞鹰

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

提要 根据南海1984—1994年的观测资料,采用箱式模型,计算溶解氧在南海三箱子的各通量值,并建立起南海溶解氧的通量模型。结果表明,南海溶解氧的总输入通量为 280.4×10^4 mol/s,其中通过外洋输入的氧量占总输入氧量的49.2%;生物光合作用释放的氧量占总输入氧量的30.3%;降雨输入的氧量占总输入氧量的3.0%;河流输入的氧量占总输入氧量的0.4%;通过海气界面向海洋输入的氧量占南海总输入氧量的17.0%。

关键词 南海 溶解氧 通量 消耗率

学科分类号 P734.2

海水中的溶解氧与水生生物密切相关,是水生生物赖以生存的的必要条件和重要的生源要素之一,其在水中的含量受大气溶解平衡、生物光合作用而增加,受生物呼吸、有机质分解矿化而消耗。本文根据南海1984—1994年的观测资料,采用箱式模型,计算南海溶解氧在各箱的通量,并率先在国内建立起氧的通量模型,从而定量表征溶解氧的主要变化过程,为进一步开展边缘海的生物地球化学循环研究,决定海洋生态系统的结构和机能打下基础。

1 研究方法

根据跃层深度和海槛深度,南海可分成三个箱子(韩舞鹰等,1992),箱子I是50m厚的上准均匀层;箱子II是1950m厚,即深度由50—2000m的中层;箱子III是2000m厚,水深由2000—4000m的深海盆。根据南海1984—1994年的观测资料、溶解氧在各箱子的主要变化过程,计算溶解氧在各箱子的通量,从而建立溶解氧的通量模型。

2 计算结果

2.1 南海氧的消耗通量和消耗率

由于海水中有机的矿化作用,氧被消耗,产生一定比例的二氧化碳、无机氮化合物和无机磷酸盐,其原子比为 $O:C:N:P = 276:106:16:1$ 。因此,根据在各箱子中分解的颗粒态磷的数量,便可求得各个箱子中氧的消耗通量($\mu\text{mol/s}$)。

$$\text{箱子 I } O_1 = (P - P_1) \times 138 \times 10^3 \quad (1)$$

$$\text{箱子 II } O_{II} = (P_1 - P_2 - P_4) \times 138 \times 10^3 \quad (2)$$

*国家自然科学基金资助项目,49176274号;“八五”国家科技攻关项目,85-927-04号。林洪瑛,女,出生于1964年3月,学士,副研究员, Fax:0086-020-84451672

收稿日期:1995-01-09,收修改稿日期:1997-06-20

$$\text{箱子 III } O_{\text{III}} = (P_2 - P_3) \times 138 \times 10^3 \quad (3)$$

其中, P 为河流及下层海水补充进入南海上层箱 I 的总磷数量; P_1, P_2, P_3 分别是在箱子 I, II, III 中由于生物吸收而转变成颗粒态磷的通量; P_4 为箱子 II 中颗粒态磷转入沉积的通量。根据南海 1984—1990 年的观测资料 (Han *et al.*, 1993), 计算得 P, P_1, P_2, P_3, P_4 值分别为 $616.6 \times 10^4 \text{ mmol/s}$, $584.8 \times 10^4 \text{ mmol/s}$, $7.2 \times 10^4 \text{ mmol/s}$, $3.2 \times 10^4 \text{ mmol/s}$ 和 $10.2 \times 10^4 \text{ mmol/s}$ 。根据每个箱子的体积, 便可求得氧的消耗率, 其计算结果列于表 1。

表1 南海氧的消耗通量和消耗率

Tab.1 Consumption flux and consumption rate of oxygen in the South China Sea

箱子	厚度(m)	面积(m ²)	消耗通量(μmol/s)	消耗率 [μmol/(dm ³ ·s)]
I	50	3.5×10^{12}	4.4×10^{10}	2.5×10^{-7}
II	1 950	2.2×10^{12}	78.3×10^{10}	1.8×10^{-7}
III	2 000	0.84×10^{12}	0.55×10^{10}	0.033×10^{-7}

实际情况中, 消耗率一般是随深度而有变化的。以上计算结果, 只是代表了箱子的平均状况。同样, 也可由停留在箱子中的颗粒态碳来计算氧的消耗。对箱子 I 和箱子 II, 计算结果相差不大, 但对箱子 III 差别较大, 这是因为深层水生物硬组织大于软组织的缘故。

值得指出的是, 对深层海水, 溶解氧的消耗率通常随深度呈指数规律变化。根据稳态垂直移流扩散模型 (Wyrki, 1961; 韩舞鹰, 1983), 用 1990 年中国科学院南海海洋研究所实验 3 号船获得的南海观测资料 (韩舞鹰等, 1995), 求得深海盆水 1 000—4 000m 处氧的消耗率, 其中 2 000—4 000m 的平均氧消耗率为 $0.33 \times 10^{-10} \text{ ml/(L} \cdot \text{s)}$, 即 $0.03 \times 10^{-7} \text{ μmol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$ 。1992 年 3 月, 对南海东北部海盆水进行研究, 由位温随深度的分布及溶解氧的垂直分布计算得南海东北部海盆水溶解氧的平均消耗率为 $0.3 \times 10^{-10} \text{ ml/(L} \cdot \text{s)}$, 即 $0.027 \times 10^{-7} \text{ μmol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$ (林洪瑛等, 1996)。这些结果与上面由磷的关系计算得出的箱子 III 溶解氧的平均消耗率值非常接近。

由稳态垂直移流扩散模型可求得 1 000—4 000m 的溶解氧的平均消耗率, 那么 50—800m 之间的溶解氧的平均消耗率可由下式计算:

$$R_D = \frac{R_{\text{II}} Z_{\text{II}} - \sum \Delta Z_i (\Delta R_i / 2)}{800 - 50} \quad (4)$$

其中, R_{II} 是箱子 II 的平均氧消耗率; Z_{II} 是箱子 II 的厚度; ΔZ_i 是相邻两层的距离; ΔR_i 是相邻两层溶解氧消耗率的差值。取箱子 I 溶解态氧的平均消耗率作为 50m 层氧的平均消耗率。根据大西洋计算结果 (Riley, 1974), 800m 水深处海水氧的消耗率比 2 000m 水深处氧消耗率大约 20 倍。这样, 可得 800m 处氧的平均消耗率为 $1.25 \times 10^{-7} \text{ μmol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$ 。由 (4) 式可求得 R_D 为 $4.06 \times 10^{-7} \text{ μmol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$ 。在箱子 II 50—800m 水深所消耗的氧占整个箱子 II 消耗的氧的分数为:

$$\frac{R_D (800 - 50)}{R_{\text{II}} \cdot Z_{\text{II}}} = 86.7\%$$

即进入箱子 II 的颗粒物质 86.7% 在 800m 层内已全部分解。因为进入箱子 II 的颗粒物质占总生成颗粒物的 95% (Han *et al.*, 1993)。这就是说总生成颗粒物质 82% 是在 50—800m 的范围内分解的。

2.2 南海的氧通量

2.2.1 箱子 I 的溶解氧通量 对箱子 I, 氧的质量平衡方程有:

$$O_R W_R + O_P W_P + O_M W_M + O = O_O W_O + O_G + O_{r,I} \quad (5)$$

式中, O_R 是河流中氧的平均浓度, 由河流不同季节时的氧含量, 并经丰、枯水流量加权平均求得, 其值为 $0.41 \text{ mol} / \text{m}^3$; W_R 为河流进入南海的水量, 约为 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ (韩舞鹰等, 1992); O_P 为降雨中氧的平均浓度, 取值与 O_R 相同; W_P 是降水量, 约为 $20.5 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ (Wyrki, 1961); O_M 是箱子 II 氧的平均含量, 取值为 $0.19 \text{ mol} / \text{m}^3$; W_M 是箱子 II 的水上升进入箱子 I 时的流量, 取值为 $311.5 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ (韩舞鹰等, 1992); O 是箱子 I 中光合作用释放的氧量, 由上升进入箱子 I 的磷量计算, 其值为 $85.1 \times 10^4 \text{ mol} / \text{s}$; O_O 是箱子 I 中氧的平均含量, 取值为 $0.42 \text{ mol} / \text{m}^3$; W_O 是流出箱子 I 的水流量, 取值为 $317.9 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ (韩舞鹰等, 1992); O_G 是海气界面释放到大气中的氧通量; $O_{r,I}$ 是呼吸消耗的氧量, 约占 O 值的 80% (布洛克, 1974), 即为 $68.1 \times 10^4 \text{ mol} / \text{s}$ 。由式 (5) 计算 O_G 得 $-47.8 \times 10^4 \text{ mol} / \text{s}$, 负值表示海气界面氧通量的方向应为由大气向海洋。由南海的面积 $3.5 \times 10^{12} \text{ m}^2$ 可换算得 O_G 为 $4.3 \text{ mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。 O_G 值大于河水和雨水的氧通量之和, 说明南海对大气中的氧是一个汇。

2.2.2 箱子 II 的溶解氧通量 对箱子 II, 氧的质量平衡方程式有:

$$O_{r,II} + O_M W_M + O_{II} = O_D W_D + O_{OM} W_{OM} \quad (6)$$

其中, $O_{r,II}$ 为箱子 II 中生物呼吸消耗的氧通量。由于此值与其它几项相比较, 数值较小, 故忽略不计; O_{II} 是箱子 II 溶解氧的平均消耗通量; O_D 是深层水中氧的平均含量, 取值为 $0.21 \text{ mol} / \text{m}^3$; W_D 是深层水上升进入箱子 II 的水的流量, $67 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ (韩舞鹰等, 1983); O_{OM} 是外洋流入南海的水的平均含氧量; W_{OM} 是外洋水流入南海的流量。根据 (6) 式可计算得 $O_{OM} W_{OM}$ 项为 $123.4 \times 10^4 \text{ mol} / \text{s}$ 。该项为外洋流入南海的氧的净通量。

南海与外洋的水交换, 主要是通过巴士海峡而进行的, 在水交换过程中, 同时进行着物质的交换。根据 1992 年 3 月作者对南海东北部的调查, 在巴士海峡口实测到 50—1 500m 深度海水溶解氧的平均浓度为 $0.31 \text{ mol} / \text{m}^3$ 。由外洋输入南海箱子 II 的氧的净通量可计算西北太平洋水进入南海箱子 II 时的总流量 W_X :

$$\begin{aligned} W_X &= W_{OM} + \Delta W_{OM} \\ &= \frac{O_{OM} W_{OM} - W_{OM} O_{OS}}{O_{OS}} + W_{OM} \end{aligned}$$

其中, ΔW_{OM} 为外洋海水流进南海箱子 II 后, 又从箱子 II 流出外洋的水量; O_{OS} 为外洋海水经巴士海峡口流入南海箱子 II 时海水的溶解氧含量, 取值为 $0.31 \text{ mol} / \text{m}^3$ 。由此计算得 W_X 为 $398.1 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{s}$ 。

巴士海峡是指台湾岛和菲律宾吕宋岛之间的总水域, 宽约 380km。根据台湾岛鹅銮鼻至吕宋岛的迈赖腊角断面水深的变化曲线 (黄企洲, 1984), 可求出该水域水深为 50—2 000m 深, 断面面积约为 $45.6 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。这样, 由西北太平洋进入南海箱子 II 的总的水流量, 可求得西北太平洋水经巴士海峡 50—2 000m 深的断面流入南海箱子 II 时水的平均流速为 $0.87 \text{ cm} / \text{s}$ 。

2.2.3 箱子 III 的溶解氧通量 氧的质量平衡方程可建立为:

$$O_D W_D + O_{III} = O_{OD} W_{OD} \quad (7)$$

其中, O_{III} 是箱子 III 中氧的平均消耗通量; $O_{OD} W_{OD}$ 项为外洋流入南海深层的氧的通量, 由 (7) 式计算可得 $14.6 \times 10^4 \text{ mol / s}$ 。

2.3 南海氧的通量模型

把南海各箱子的氧通量计算结果绘于图 1。

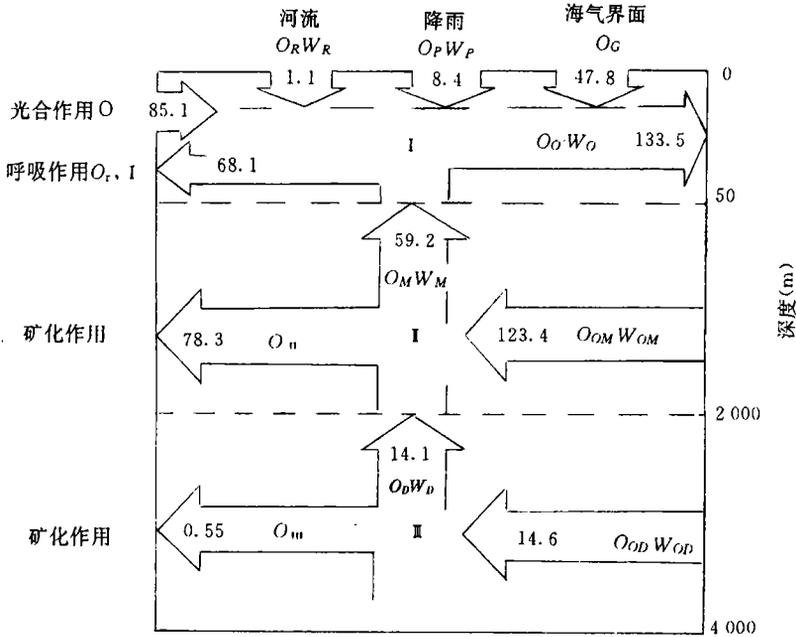


图 1 南海溶解氧的通量 ($\times 10^4 \text{ mol / s}$) 模型

Fig. 1 A model for dissolved oxygen fluxes ($\times 10^4 \text{ mol / s}$) in the South China Sea

3 结果与讨论

由图 1 可知, 在海洋上层, 生物光合作用释放的氧占总氧输入的 42.2%; 底层水上升带人的氧量占总氧输入的 29.4%; 而河水和降雨带人的氧只占总输入的 4.7%。由于下层上升的海水的氧饱和度都比较低, 因此生物光合作用释放的氧除呼吸消耗外, 基本上溶存于上层海水中, 和大气向海洋上层输入的氧量一起用于提高上层海水的饱和度。这一部分氧也就随海水的流出而离开南海。只有当氧含量略高于饱和度时, 才在海气界面出现氧的逸出通量。海水温度的季节变化和日变化以及生物活动的周期性变化, 都会改变海水氧的饱和度。因此海气间氧的交换是不间断地在进行, 由于这些变化都显示出周期性的特点, 其变化的净结果是大气在海气界面上向海洋输入氧量, 约占南海海洋上层总输入氧量的 23.7%。箱子 II 中占总氧量输出的 56.9% 是有机物矿化耗氧, 43.1% 的氧通过海水上升运动而进入海洋上层。箱子 III 中有机物的矿化耗氧只占总氧输出的 3.8%, 绝大多数的氧是随着海水的上升进入箱子 II 中。

中层和深层的外洋水给南海带入氧, 这些氧在南海被消耗掉 57%, 只有当升入南海上层后, 海水中的氧才得以补充。南海与外洋氧的净通量为 $4.5 \times 10^4 \text{ mol / s}$, 方向是由外洋流入南海。由于南海与大气氧交换净通量是由大气到海洋, 因此可以把南海看成是全球

海洋和大气氧通量中的一个汇点。南海氧的总输入通量为 $280.4 \times 10^4 \text{ mol / s}$, 其中通过外洋输入的氧量占总输入氧量的 49.2%; 生物光合作用释放的氧量占总输入氧量的 30.3%; 降雨输入的氧量占总输入氧量的 3.0%; 河流输入的氧量占总输入氧量的 0.4%; 通过海气界面向海洋输入的氧量占南海总输入氧量的 17.0%。

参 考 文 献

- 林洪瑛 韩舞鹰 蔡艳雅等, 1996. 南海东北部海盆水氧的消耗率. 见: 南海东北部海区环流课题组主编. 中国海洋学文集(6). 北京: 海洋出版社. 104—109
- 黄企洲, 1984. 巴士海峡的海洋学状况. 南海海洋科学集刊, 6: 53—67
- 韩舞鹰, 1983. 深海盆水氧的消耗率. 南海海洋科学集刊, 4: 115—120
- 韩舞鹰 林洪瑛, 1992. 南海的水通量. 海洋通报, 11(2): 89—90
- 韩舞鹰 王明彪 林洪瑛, 1995. 南沙群岛海域深层海水碳垂直通量. 海洋学报, 17(3): 118—121
- 布罗克 W S, 1974. 刘 光 胡明辉译, 1981. 化学海洋学. 北京: 科学出版社. 114—138
- 赖利 J P., 斯基罗, G., 1974. 刘 光 邱贞花 陈文豪译, 1982. 化学海洋学(第 1 卷). 北京: 海洋出版社. 601—613
- Han Wuying, Lin Hongying, Rong Ronggui, 1993. Phosphorus Flux in the South China Sea. In: Su Jilan, Wen Shengchang eds. Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas. Beijing: China Ocean Press. 348—353
- Wyrki K, 1961. Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. In: Naga Report. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution. 2: 96—109

A STUDY ON THE DISSOLVED OXYGEN FLUX IN THE SOUTH CHINA SEA

LIN Hong-ying, HAN Wu-ying

(South China Sea Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301)

Abstract The material flux in the ocean is one of the important factors to determine the structure and function of the marine ecosystem. The content of dissolved oxygen in sea water is influenced by the organisms, currents, temperature and oxidation; hence, it is of great significance to quantitatively study the dissolved oxygen flux in sea water, for identifying more related material cycles.

According to the depth, the South China Sea can be divided into three boxes by a pycnocline and a sill. The upper homogeneous layer with 0—50m depth is taken as Box I; the 50m depth is characterised by the pycnocline. Box II lies between 50m and 2 000m. Below 2 000m is the deep basin water referred to as Box III. Based on the box model, and using the data of the amounts of particulate phosphorus in Box I, Box II and Box III, the consumption fluxes of dissolved oxygen have been calculated to be $4.4 \times 10^{10} \mu\text{mol / s}$ in Box I; $78.3 \times 10^{10} \mu\text{mol / s}$ in Box II, and $0.55 \times 10^{10} \mu\text{mol / s}$ in Box III. Meanwhile, the average rate of oxygen consumption and has been estimated to be $2.5 \times 10^{-7} \mu\text{mol / (dm}^3 \cdot \text{s)}$ in Box I; $1.8 \times 10^{-7} \mu\text{mol / (dm}^3 \cdot \text{s)}$ in Box II; $0.033 \times 10^{-7} \mu\text{mol / (dm}^3 \cdot \text{s)}$ in Box III. The value for Box III is very close that calculated using a vertical shift-eddy

mix model, based upon the vertical distribution patterns of the potential temperature and the dissolved oxygen content.

Using the equations of mass conservation for dissolved oxygen, incorporating the data sets obtained in 1984—1994, the fluxes of dissolved oxygen in Box I, Box II and Box III have been calculated; the box model of dissolved oxygen in the South China Sea has been established.

The total input flux of oxygen in the South China Sea is calculated to be $280.4 \times 10^4 \text{ mol / s}$, of which 49.2% is from the adjacent oceans, 30.3% is derived from organism photosynthesis, 3.0% is from the rainfall, 0.4% is from the river water, and 17.0% is due to the interaction at the air-sea interface.

Key words South China Sea Dissolved oxygen Flux Consumption rate

Subject classification number P 734.2

《海洋与湖沼》学报历年获奖目录

1988年	山东省科协优秀科技期刊	一等奖
1990年	中国科学院优秀自然科学期刊	二等奖
1991年	山东省科委、山东省新闻出版局、山东省科协优秀科技期刊 (总分第一名)	一等奖
1992年	中国科学院优秀科技期刊	二等奖
1992年	中国科协优秀科技期刊	一等奖
1992年	国家科委、中宣部、国家新闻出版总署优秀科技期刊	二等奖
1993年	华东区优秀科技期刊	一等奖
1997年	全国优秀科技期刊	三等奖
1997年	中国科协优秀科技期刊	二等奖