

生物泵在海洋碳循环中的作用*

金 心 石广玉

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 生物过程在海洋碳的自然分布中起着重要的作用, 它使海洋中碳的储量大大增加。作者用包含海洋化学过程和一个简单生物过程的三维碳循环模式模拟了生物泵在海洋碳循环中的作用。模式计算的结果表明: 生物过程产生的海-气通量的量级非常大; 在高纬度和赤道它的量级与因溶解度泵产生的碳的海-气通量差不多。在高纬度地区这两个通量符号相反, 使组合模式中的通量大小比只有溶解度泵时的通量小, 而在赤道两者的符号相同, 使组合模式在赤道的通量大于只有溶解度泵时的通量。在稳态条件下生物泵对海洋吸收人为 CO_2 的直接影响很小。

关键词: 生物泵; 碳循环; 二氧化碳; 三维模式

1 引言

生物过程在海洋碳的自然分布中起着重要的作用, 它使海洋中碳的储量大大增加。为了研究海洋中碳的浓度梯度的建立和维持的机制, Volk 和 Hoffert^[1]1985年引入了溶解度泵、碳酸盐泵和软组织泵。我们一般用生物泵来表示碳酸盐泵和软组织泵的和。在本文中我们用包含海洋化学过程和一个简单生物过程的三维碳循环模式^[2]来研究溶解度泵和生物泵在海洋碳循环中的作用。为了研究溶解度泵和生物泵在自然碳循环中的作用以及对海洋吸收人为 CO_2 的影响, 我们用两组运行来模拟溶解度泵和生物泵的作用, 一组运行只包含溶解度泵过程, 称为溶解度模式; 另一组运行, 称为组合模式, 包含溶解度泵和生物泵过程。生物泵的贡献就是这两组模式模拟的差。本文先简单介绍所用的模式, 然后对结果进行分析和讨论, 最后给出小结。

2 模式简介

所用的模式是一个包含海洋化学过程和一个简单的生物过程的海洋三维碳循环模式^[2,3]。下面对该模式进行简单的介绍。

环流模式以目前应用最广的美国地球流体动力实验室 (GFDL) 的三维海洋环流模式 (MOM2) 为基础, 考虑了真实的海底地形。模式的坐标系是经度、纬度和深度, 网格点为 Arakawa B 格点。水平分辨率为 2° (纬度) $\times 4^\circ$ (经度)。垂直方向分成 15 层。动量通量取 Hellerman 和 Rosenstein 的年平均^[4], 温度和盐分取 Levitus 的年平均观测值^[5]。在海洋表面温度和盐分的恢复系数为 $1/30 \text{ d}$, 在海洋内部恢复系数为 0。

2000-01-17 收到, 2000-04-18 收到修改稿

* 中国科学院大气物理研究所创新面上基金 8-1305 (海洋三维碳循环模式中生物化学过程的研究) 资助

运行 3 000 a 后得到海洋的平衡态^[6]。

在本文的模式中, 由于大气 CO₂ 的混合过程比海气交换的时间快很多, 所以认为大气是一个二氧化碳均匀混合的箱室, 它的性质由二氧化碳的分压 p_{CO_2} 表示。在海洋中的预报变量有: 海洋总 CO₂ 含量 (T_{CO_2})、总碱度 (T_{alk}) 和磷酸盐 [PO₄] 浓度。

在模式中没有考虑海底的沉积过程和河流的输入。这是因为在我们考虑的时间尺度内可以认为海洋的自然碳循环过程是处于稳态的, 而一般认为河流的碳输入等于海底沉积过程的碳减少, 因此不考虑海底的沉积过程和河流的输入并不会影响模式的模拟结果。由此, 在海洋中磷酸盐和总碱度的值也是守恒的。

海水表面的 CO₂ 的分压 p_{CO_2} 可由碱度、总 CO₂ 含量、温度和盐度求得, 总碱度由碳-硼酸盐-水系统决定, 硼酸盐的含量是盐度的线性函数, 碳、硼酸盐和水的化学平衡常数取自文献[7~9], 二氧化碳的溶解度取自文献[10], 海气 CO₂ 的交换通量与大气和海洋中的 p_{CO_2} 的差值成正比,

$$S = K_g (p_{\text{CO}_2, \text{O}} - p_{\text{CO}_2, \text{A}}), \quad (1)$$

交换系数取 $K_g = 0.6 \text{ mol m}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, 这是与风速有关的气体交换系数的全球平均值^[11]。

海洋生物过程对海洋化学物质浓度的分布产生影响。我们考虑了其中简单但最重要的生物过程——新生产。在海洋表面大多数初级生产只在生成的地方循环, 只有其中一部分叫做新生产的有机物下沉到深海并再矿化, 所以我们要模拟的是这些新生产。光合作用和生物生产只在海洋表面发生。新生产 P 是磷酸盐 [PO₄] 和光因子 L_f 的函数 (Michaelis-Menten 动力学^[11]),

$$P = r \cdot D_e \cdot L_f \cdot [\text{PO}_4] \cdot \frac{[\text{PO}_4]}{h + [\text{PO}_4]}, \quad (2)$$

其中 h 是磷酸盐浓度的半饱和常数^[11] ($0.02 \mu\text{mol L}^{-1}$), D_e 是表面层厚度, 等于 47 m, r 是比例系数, 取 2 a^{-1} (称为生物生产效率), 入射光因子 L_f 与年平均太阳辐射成正比, 是纬度的函数并归一化为 $0 \leq L_f \leq 1$ 。POC 的组成遵从 Redfield 比率,

$$\text{P:N:C:O}_2 = R_P:R_N:R_C:R_O = 1:16:106:138 \quad (3)$$

模式中的参数下落比 (海洋深海和表面层之间总 CO₂ 浓度差与碱度的相应值的比值) 取 $R = 0.06$ ^[12]。

模式中 POC 通量的表达式如下,

$$F = \left(\frac{z}{100} \right)^a, \quad (4)$$

$a = 0.858$ (在海洋表面透光层下 POC 垂直通量分布取自文献[13]的观测值)。

再矿化立即发生并等于 $-dF(z)$ 。方解石在 1500 m 以下均匀分解。因为在我们的模式中不考虑沉积过程, 所有到达海底的 POC 和方解石都加到表面层以保证物质守恒。虽然这是一种数学上的处理方法, 但从物理意义上来说也是合理的。这可以看作是一种虚拟的河流输入和海底沉积过程的输出的一种动态平衡。

3 结果和讨论

3.1 溶解度泵和生物泵

用溶解度模式模拟全球海洋中碳的分布, 得到海洋中碳的含量为 29 120 Pg (1 Pg = 10^{15} g), 相应的大气中的碳含量为 600 Pg。海洋中巨大的碳含量主要以碳酸氢盐和碳酸盐离子的形式存在, 如果 CO_2 不与水反应生成这些离子, 那么海洋的容量将小于 250 Pg。图 1 显示的是模式预报的总碳和相应的观测值的垂直廓线。对溶解度模式的模拟结果来说, 深海的浓度比表面高 $50 \mu\text{mol kg}^{-1}$, 这是因为在冷水中 CO_2 的溶解度较高所致。这一差值比观测值小很多, 只有观测值的约 1/5。而组合模式中的相应值与观测值很接近。说明在决定海洋中碳的垂直分布中生物泵起着非常重要的作用。

组合模式给出的海洋碳的含量比溶解度模式模拟的值高 1900 Pg (6.5%)。如图 1 所示, 这是因为深海中浓度增加所致。与此同时, 海洋表面 CO_2 的浓度减少, 这是因为 CaCO_3 的循环使表面碱度减少, 在给定 p_{CO_2} 的条件下含碱度较低的水容纳碳的能力减少。在有生物泵的时候人们经常把深海中碳浓度的增加描述成是有机物在那里再矿物化产生的碳的输入结果。也可以说, 深海碳浓度的增加是由海洋碳循环的平衡所要求的。在有机物从表面到深海有一个通量时, 若没有额外的碳源的话, 要达到稳态的唯一方法就是海水中溶解的无机碳向上输送, 即由于无机碳在深海和表面层之间的浓度差产生的向上扩散。这样就必须增加垂直梯度, 从而要求增加深海浓度。这种深海浓度的增加就是生物泵对海-气 CO_2 平衡的贡献。如果海洋生物泵的效率发生变化, 那么深海中碳的含量也会发生变化, 从而将大大地改变大气中 CO_2 的含量^[14~16]。

纬向平均的海-气通量显示在图 2 中。从图 2 溶解度模式模拟的结果可以看出: 在 25°S 和 25°N 之间有一个很强的从海洋到大气的碳的通量, 而在 70°S 至 45°S 、 40°N 至 65°N 均有很强的大气到海洋的碳的通量。这就是说在低纬度碳从海洋释放到大气中, 而在高纬度海洋吸收大气中的 CO_2 。这与预期的在加热区 CO_2 溶解度的减少,

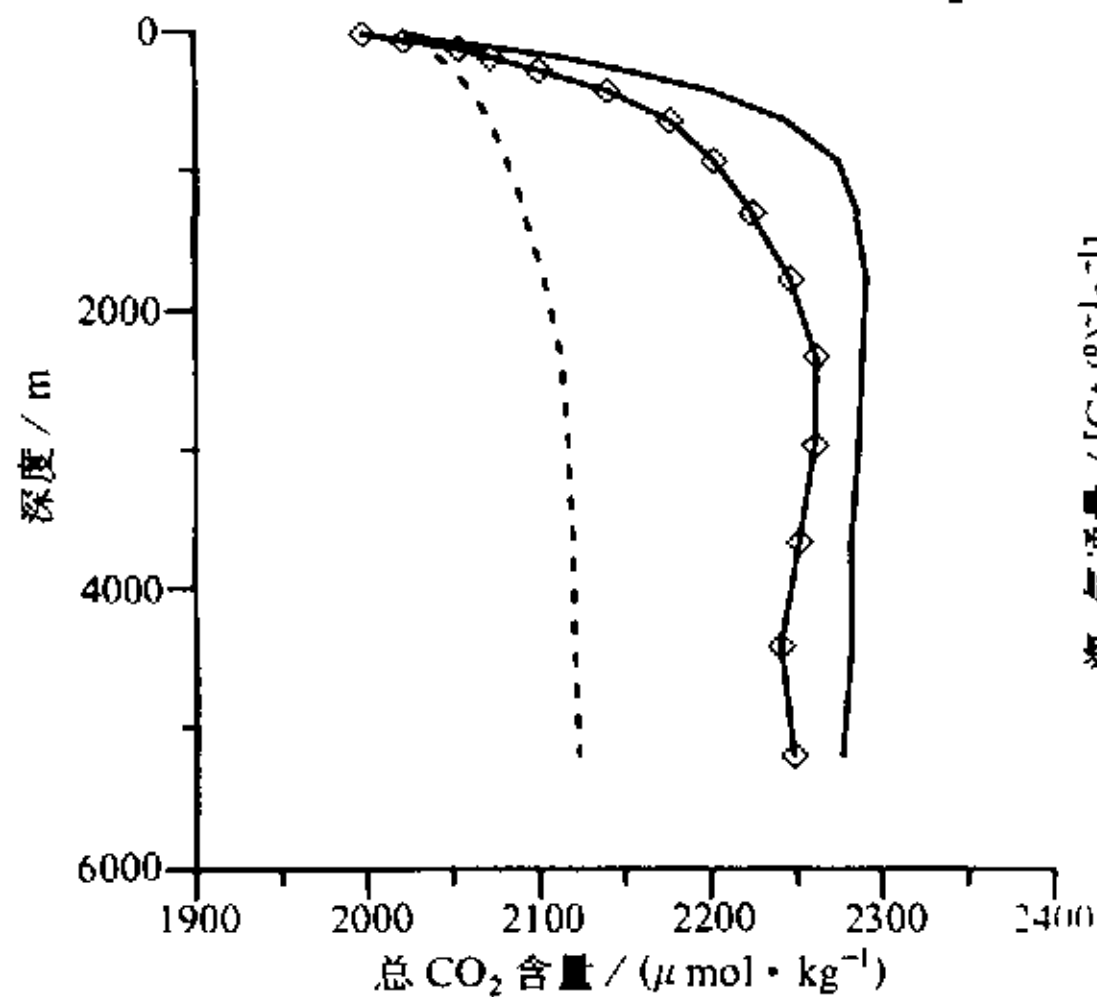


图 1 工业化前海洋碳的垂直廓线

-----溶解度泵; ——观测; —◇—组合泵

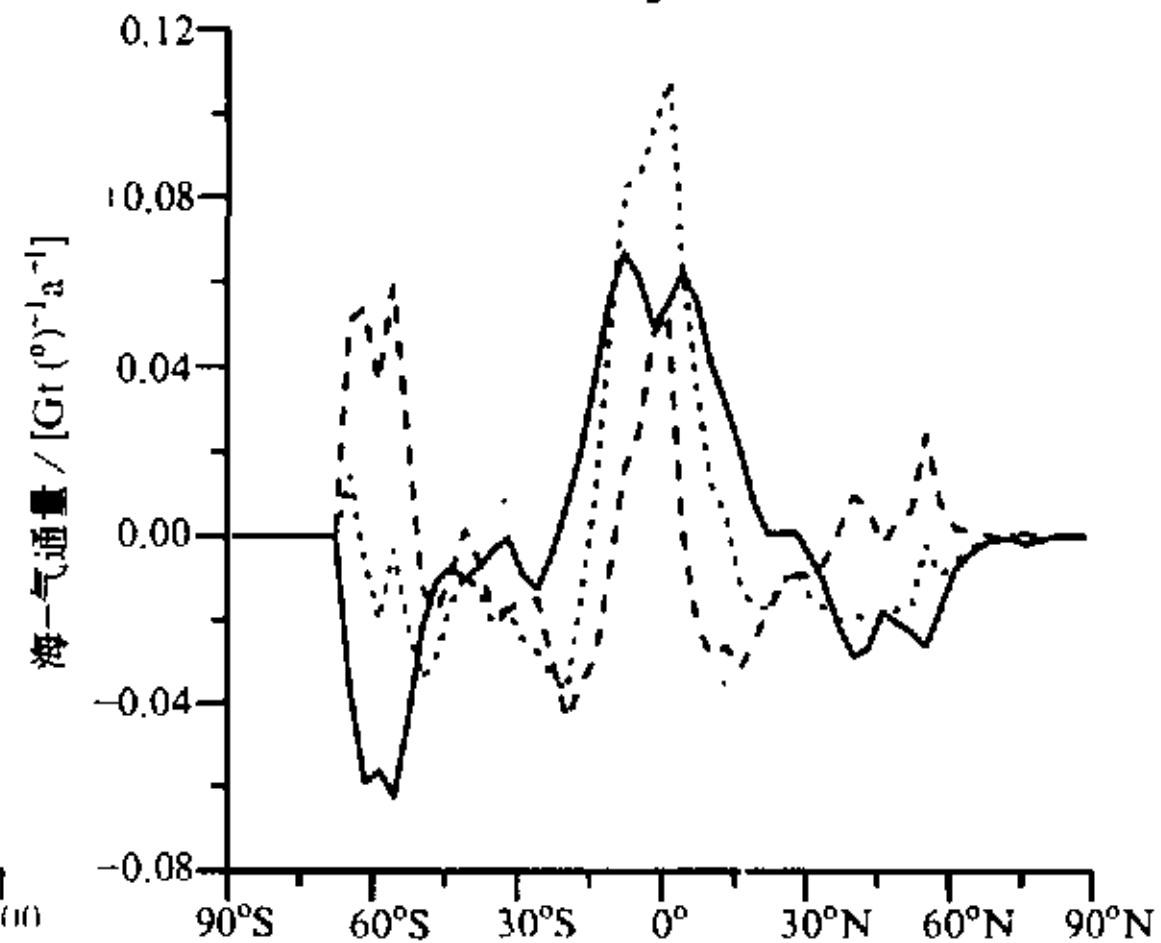


图 2 纬向积分的全球海洋到大气 CO_2 的通量

.....组合泵; ——生物泵; -----溶解度泵

在冷却区溶解度的增加是一致的。

我们用组合模式的模拟结果和溶解度泵模式模拟结果的差来分析生物泵的贡献。从图 2 反映生物过程贡献的曲线可以看出：在赤道区和亚极地漩涡区有很强的从海洋到大气的碳通量，即在这些区域生物泵的贡献使海洋中的碳被释放到大气中去；而在副热带涡旋区有很强的从大气到海洋中的碳的通量，即在这些区域生物泵的贡献使海洋吸收大气中的碳。生物过程对海-气碳通量的影响是通过海洋表面碳的分布变化而实现的。海洋表面碳的分布主要由海洋中的生物生产过程、碳的扩散过程和对流过程所决定的。比如，在上涌区和深对流区（如赤道区和亚极地漩涡区），含有丰富碳的深水在表面露头，使那里的表面海水中的碳含量大大地增加，导致过量的 CO_2 释放到大气中去。从图 2 中还可以看出生物过程产生的海-气通量的量级非常大，在高纬度和赤道它的量级和溶解度泵差不多。在高纬度地区这两个通量符号相反，使组合模式中的通量大小比只有溶解度泵时的通量小；而在赤道两者的符号相同，使组合模式在赤道的通量大于只有溶解度泵时的通量。这与 Sarmiento 等对大西洋的分析结果是一致的^[17]。

3.2 泵在海洋吸收人为 CO_2 中的作用

以大气 p_{CO_2} 的观测值为海洋表面上的大气边条件，由于大气中 CO_2 的分压增加，海-气碳通量就会发生变化，由此计算海洋对人为 CO_2 的吸收（所谓海洋对人为 CO_2 的吸收是指人类活动产生的 CO_2 中进入海洋中去的部分）。图 3 显示了到 1990 年人为 CO_2 进入海洋的通量分布。在海洋各处的通量都是流入海洋的。图 3 还画出了用溶解度泵计算得到的结果，并由此求出了生物泵的贡献。从图 3 中可以看出生物泵对人为 CO_2 吸收分布的影响相对比较小，但还是有一定的影响，在高纬度地区吸收，在中低纬度释放 CO_2 ，对总的人为 CO_2 的吸收没有贡献。生物泵对人为 CO_2 吸收的贡献很小这一结果与以前的研究结果是一致的，Sarmiento 等^[18]认为限制人为 CO_2 吸收的因子是海洋环流和混合过程。为了进一步研究生物泵对海洋吸收人为 CO_2 的影响，我们用溶解度模式和组合模式分别计算了海洋对人为 CO_2 的吸收，结果如图 4 所示。从图 4 中

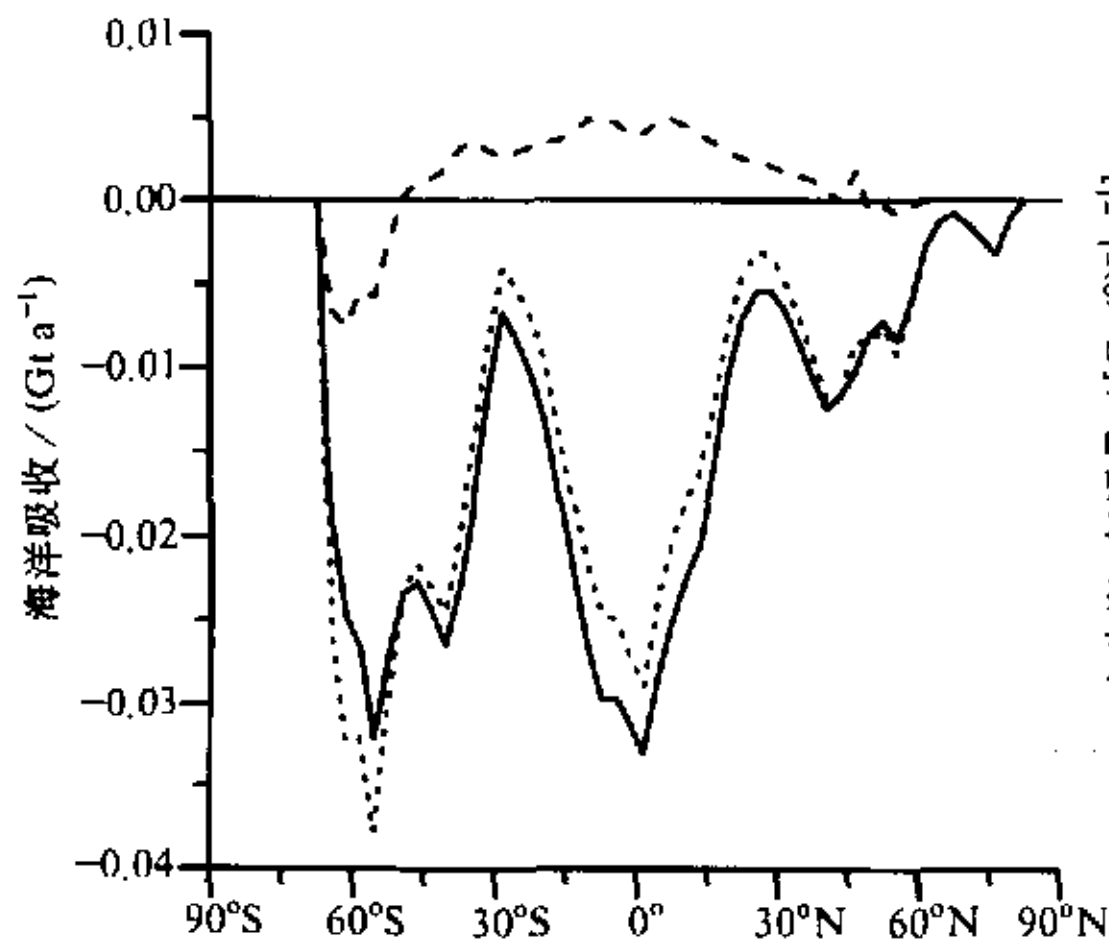


图 3 纬向积分的 1990 年全球海洋人为 CO_2 吸收
.....组合泵；-----生物泵；——溶解度泵

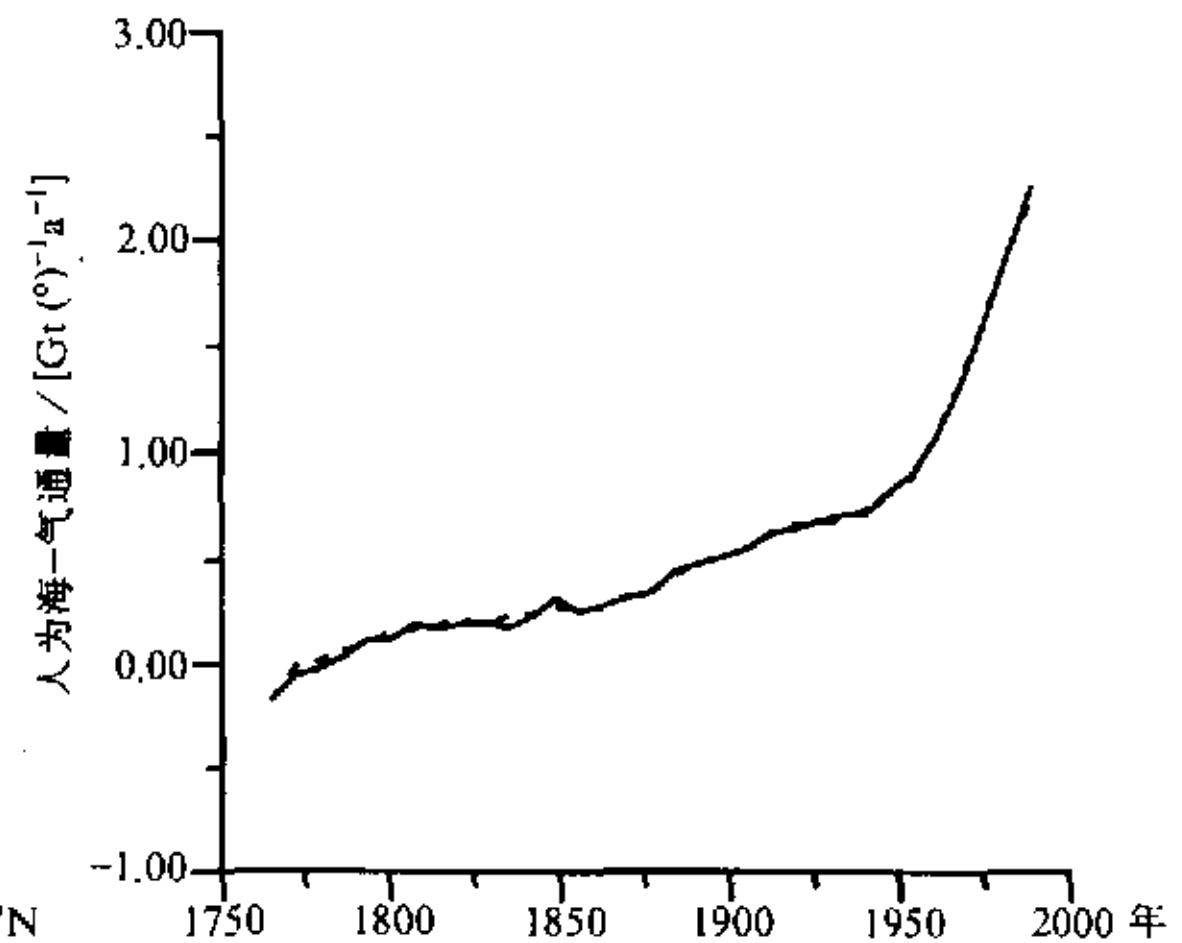


图 4 用溶解度模式和组合模式分别计算的海洋对人为 CO_2 的吸收
——溶解度泵；-----组合泵

可以看出用溶解度模式和组合模式分别计算的海洋对人为 CO_2 的吸收曲线无大的差别, 几乎相互重叠。这说明生物泵对海洋吸收人为 CO_2 的贡献(图 4 中两条曲线的差)几乎是零。由于在模式的运行中假定海洋中的生物过程是处于动态平衡的, 因此对模式结果的分析表明: 在稳态条件下生物泵对人为 CO_2 的吸收几乎没有贡献。

上述分析表明: 生物泵对海洋吸收人为 CO_2 的直接影响很小。它的作用决定现在海-气 CO_2 通量的分布, 以及具有使海-气碳平衡发生巨大变化的潜力, 这一点要通过改变生物泵本身才能实现。

4 小结

用海洋三维碳循环模式来研究溶解度泵和生物泵在海洋碳循环中的作用。结果表明: 生物过程产生的海-气通量的量级非常大, 在高纬度和赤道它的量级和溶解度泵差不多。在高纬度地区这两个通量符号相反, 使组合模式中的通量比只有溶解度泵时的通量小; 而在赤道两者的符号相同, 使组合模式在赤道的通量大于只有溶解度泵时的通量。生物泵对海洋吸收人为 CO_2 的直接影响很小, 它的作用决定现在海-气 CO_2 通量的分布以及具有使海-气碳平衡发生巨大变化的潜力。

参 考 文 献

- 1 Volk, T. and Hoffert, M. I., Ocean carbon pumps: analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO_2 changes, in: *The Carbon Cycle and Atmospheric CO_2 : Natural Variations Archean to Present* (ed. E. T. Sundquist and W. S. Broecker), 1985, 99~110.
- 2 金心、石广玉, 海洋中碳及营养物自然分布的模拟, 气候与环境研究, 1999, 4(4), 375~387.
- 3 金心、石广玉, 海洋对人为 CO_2 吸收的三维模式研究, 气象学报, 2000, 58(1), 40~48.
- 4 Hellerman, S. and M. Rosenstein, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, 13, 1093~1104.
- 5 Levitus, S., Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Prof. Pap. 13, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1982.
- 6 金心、石广玉, 海洋环流模式模拟自然和核辐射 ^{14}C 的分布, 大气科学, 2000, 24(3), 341~354.
- 7 Dickson, A. G. and F. J. Millero, A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in sea water media, *Deep-Sea Res.*, 1987, 34, 1733~1743.
- 8 Johansson, Q. and M. Wedborg, On the evaluation of potentiometric titrations of seawater with hydrochloric acid, *Oceanologica Acta*, 1979, 5, 209~218.
- 9 Dickson, A. G. and J. P. Riley, The estimation of acid dissociation constants in seawater media from potentiometric titrations with strong base. I. The ionic product of water (K_w), *Marine Chemistry*, 1979, 7, 89~99.
- 10 Weiss, R. F., Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of non-ideal gas, *Marine Chemistry*, 1974, 2, 203~215.
- 11 Maier-Reimer, E., Geochemical cycles in an ocean general circulation model. Preindustrial tracer distributions, *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, 7, 645~677.
- 12 金心, 海洋生物化学环流模式的建立及对人为 CO_2 吸收的研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1998.
- 13 Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl and W. W. Broenkow, VERTEX: Carbon cycling in the northeast Pacific, *Deep-Sea Res.*, 1987, 34, 267~285.
- 14 Siegenthaler, U. and Wenk, T., Rapid atmospheric CO_2 variations and ocean circulation, *Nature*, 1984, 308, 624

~ 625.

- 15 Sarmiento, J. L. and Orr, J. G., Three-dimensional simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO₂ and ocean chemistry, *Limnol. Oceanogr.*, 1991, **36**, 1928~1950.
- 16 Archer, D. and Maier-Reimer, E., Effect of deep-sea sedimentary calcite preservation on atmospheric CO₂ concentration, *Nature*, 1994, **367**, 260~263.
- 17 Sarmiento, J. L., R. Murnane and C. Le Quere, Air-sea CO₂ transfer and the carbon budget of the North Atlantic, *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 1995, **348B**, 211~219.
- 18 Sarmiento, J. L. and J. C. Orr, A perturbation simulation of CO₂ uptake in an ocean general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 3621~3645.

The Role of Biological Pump in Ocean Carbon Cycle

Jin Xin and Shi Guangyu

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A three-dimensional ocean carbon cycle model, which is a general circulation model coupled with simple biogeochemical processes, is used to simulate the role of biological pump in ocean carbon cycle. A model simulation of the global carbon cycle demonstrates that the biological and solubility pumps are of comparable importance in determining the spatial distribution of annual mean air-sea fluxes in the world ocean. The model also confirms that the impact of the (steady state) biological pump on the magnitude and spatial distribution of anthropogenic CO₂ uptake is minimal.

Key words: biological pump; carbon dioxide; three-dimensional model; carbon cycle model