

带生物泵三维全球海洋碳循环模式*

邢如楠

(北京气象学院, 北京 100081)

摘 要 建立了一个带生物泵的三维全球海洋碳循环模式, 该模式在海气界面上与一个 CO_2 充分混合的大气箱进行 CO_2 交换, 模式积分 1 200 年达到准稳定态的海水总 CO_2 、碱度及溶解氧的浓度、表层新生产力、海气分压差等的分布与实测相接近。通过带生物泵和不带生物泵的对比实验, 表明海洋生物过程在海洋吸收大气中 CO_2 能力上起着重要作用。

关键词: 生物泵; 二氧化碳; 碳循环模式

1 引言

全球气候变暖已不仅仅是科学家所关心的问题, 它还引起了各国政府的普遍关注。根据冰芯测量所得到的资料表明, 大气温度的变化与大气中 CO_2 含量的变化是同步增长或稍有滞后^[1]。工业化前 1860 年大气中 CO_2 体积分数为 $(280 \pm 10) \times 10^{-6}$, 如今由于工业化及人类活动如森林砍伐等, 已增至 360×10^{-6} , 过去 100 年间全球大气的平均温度也增加了约 $0.5 \sim 0.6^\circ\text{C}$ ^[1]。

海洋是地球上最大的碳库, 海洋作为一个净汇, 每年从大气净吸收 $1.2 \sim 2.8 \text{ Gt}$ 碳 ($1 \text{ Gt} = 10^{15} \text{ g}$), 海洋吸收碳的能力约占大气中人为释放 CO_2 量的 $40\% \sim 50\%$ 。因此, 研究海洋碳循环过程, 深入了解海洋碳化学量的分布与变化, 对预测未来由于人为排放 CO_2 量的增加引起的全球气候变暖问题有着重要意义。

国外早在 70 年代就已有了研究海洋碳循环的模式, Oeschger^[2]提出了一维箱室扩散模式, 后来又有了二维^[3,4]及 Marier-Reimer 等^[5]和 Bacastow 等^[6]建立的三维碳循环模式。国内有关海洋碳循环模式的研究虽然起步较晚, 自 90 年代以来也相继建立了一维至三维的海洋碳循环模式^[7~9], 但带生物泵的碳循环模式还只是一维和二维的。这些模式基本上能描述海洋吸收和输送 CO_2 的机制与过程, 以及模拟自工业化以来大气中 CO_2 的增加。

我国海洋科学工作者在 TOGA 和 WOCE 期间, 曾对热带西太平洋海水总 CO_2 、海气 CO_2 分压等进行了多次调查, 测量资料表明在 El Niño 期间, 热带西太平洋 (150°E 以西) 和赤道中、东太平洋海水总 CO_2 有着明显的相反变化^[10], 要数值研究这种不同海域碳化学量的变化问题, 仅用二维模式是不够的。此外, 海洋中的碳循环过程是一个复杂的生物化学过程, 大气中的 CO_2 通过海气界面进入海洋, 通过海洋环流、海洋生物和海洋化学之间的关系转化为碳的化合物, 从海洋上层进入到海洋深层, 碳的

这种垂直沉降转移就是“生物泵”过程。要研究海洋内部碳化学量的变化,就必须考虑生物泵过程。基于上述原因,本文建立了带生物泵的三维全球海洋碳循环模式。本模式中有关生物泵的计算是采用了文献[6]中的计算方法,与之不同的是,本模式中还考虑了江河流入而增加的碳,并对一些参数取法有所不同,计算结果有所改进。

2 模式

2.1 海洋环流模式

本文用于平流海洋碳循环的流场以一个8层三维全球海洋环流模式得到。该海洋环流模式的基本方程组和物理过程,计算方法均与文献[11]中的相同。方程组为球坐标下的原始方程组,有实际海岸线、无海底地形。模式水平分辨率为 5° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度),时间步长为4小时。垂直方向分为8层,各层界面分别在50、150、250、450、700、1000、2000和3000 m深,海洋总深度为4500 m。该模式在年平均大气风应力和热力场强迫下积分1200年,达到准平衡态,计算的全球海洋年平均气候温度场和流场的大尺度特征与实测相一致,如热带西太平洋是一个暖池,赤道东太平洋为一个冷舌(图略)。表层海流除赤道逆流外,几支主要海流都模拟出来了,如南赤道流、北赤道洋流、黑潮、北太平洋海流等。赤道逆流没有模拟出来,与模式分辨率较大有关,但是在250 m深处的赤道潜流被很好地模拟出来了(图略)。

2.2 带生物泵的碳循环模式

带生物泵的碳循环模式与上述8层海洋环流模式有相同的水平和垂直结构,模式中大气被视为是一个 CO_2 充分均匀混合的箱,在海气界面上与海洋交换 CO_2 ,其交换通量 S 的大小由海水 CO_2 分压($p_{\text{CO}_2, \text{o}}$)和大气 CO_2 分压($p_{\text{CO}_2, \text{a}}$)之差决定,即

$$S = \lambda(p_{\text{CO}_2, \text{o}} - p_{\text{CO}_2, \text{a}}), \quad (1)$$

这里 λ 为交换系数,它是风速的函数,本文中取为常数 $\lambda = 0.05 \times 10^6 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。海水 CO_2 分压($p_{\text{CO}_2, \text{o}}$)可由下式得到:

$$p_{\text{CO}_2, \text{o}} = (2c_{\text{C}} - c_{\text{A}})^2 k'_2 / (c_{\text{A}} - c_{\text{C}}) k'_0 k'_1, \quad (2)$$

上式中 c_{C} 是海水总无机碳的浓度, c_{A} 为碱的浓度, k'_0 是 CO_2 在水中的溶解度, k'_1 和 k'_2 分别为碳酸在水中的第一和第二表观离解常数,它们是海水温度和盐度的函数(详见文献[12])。

在海洋内部,海水总 CO_2 、碱度及溶解氧的浓度被海洋环流输送,并考虑了垂直和水平方向的扩散过程。

$$\frac{\partial c_{\text{C}}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{\text{C}}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{\text{C}}}{\partial y} + w \frac{\partial c_{\text{C}}}{\partial z} = k_{\text{H}} \nabla^2 c_{\text{C}} + k_{\text{Z}} \frac{\partial^2 c_{\text{C}}}{\partial z^2} + c_{\text{C}, \text{b}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_{\text{A}}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{\text{A}}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{\text{A}}}{\partial y} + w \frac{\partial c_{\text{A}}}{\partial z} = k_{\text{H}} \nabla^2 c_{\text{A}} + k_{\text{Z}} \frac{\partial^2 c_{\text{A}}}{\partial z^2} + c_{\text{A}, \text{b}}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial y} + w \frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial z} = k_{\text{H}} \nabla^2 c_{\text{O}_2} + k_{\text{Z}} \frac{\partial^2 c_{\text{O}_2}}{\partial z^2} + c_{\text{O}_2, \text{b}}. \quad (5)$$

这里, k_H 和 k_Z 分别是水平和垂直方向的扩散系数, $k_H = 1.0 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$, $k_Z = 1.26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $c_{C,b}$, $c_{A,b}$ 和 $c_{O_2,b}$ 分别代表由海洋生物泵引起的海水总 CO_2 、碱度及溶解氧浓度的变化。

海水中碳的循环过程是一个十分复杂的生物化学过程, 海洋中碳向下输送的大部分与海洋生物过程有关, 在海洋表面的透光层中, 大量的浮游植物通过光合作用, 吸收海水中的 CO_2 , 将其转化为颗粒有机碳, 形成初级生产力, 初级生产的大部分在透光层中再循环, 只有一小部分下沉到深层, 并在下沉过程中被氧化分解和溶解。初级生产中下沉到深海的这一部分叫作新生产, 新生产的量级约占初级生产的 $1/10$, 海洋总初级生产约为 $(20 \sim 45) \times 10^{15} \text{ g/a}$, 而新生产的量级约为 $3 \times 10^{15} \text{ g/a}^{[12]}$, 由有机物生产、沉降和分解等一系列生物过程构成的碳从海洋表层向深海转移, 称为“生物泵”(Biological pump)。本文中生物泵模式化的方法采用文献[6]中的方法。

光合作用仅限于表层, 新生产率 $P(\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{a}))$ 与倾斜光因子 L_C 和磷酸盐浓度有关,

$$P = L_C [(R R_C c_{\text{PO}_4}) / (H + R_C c_{\text{PO}_4})], \quad (6)$$

这里 R 和 H 为参数, 取 $R = 20 \mu\text{mol}/\text{l}$, $H = 40 \mu\text{mol}/\text{l}$, L_C 关于赤道是对称的, 与纬度有关^[6], c_{PO_4} 是磷酸盐浓度, R_C 是碳对磷酸盐的比。碳、硝酸盐和氧对磷酸盐的比为

$$\text{C} : \text{N} : \text{P} : \text{O}_2 = R_C : R_N : 1 : R_O = 105 : 15 : 1 : 175. \quad (7)$$

计算海洋生物泵过程要考虑颗粒有机碳、无机碳、海水中碱度和溶解氧的浓度的变化。假定新生产全部下沉, 并在下沉过程中不断吸收氧, 被氧化分解, 放出碳。因此下层海水中的碳因颗粒有机碳的氧化分解而增加, 氧被消耗而减少。在表层由于光合作用除产生颗粒有机碳外, 海洋生物还产生悬浮无机碳 CaCO_3 , 其数量为 $P_S P_A$, P_S 为表层的新生产, P_A 是因光合作用产生的无机碳和有机碳之比 $P_A = 0.15$ 。碳酸钙在下沉过程中会被缓慢溶解, 增加了深层海水中的碳。

表层由于光合作用吸收硝酸盐的影响, 碱的浓度增加 $(P_S R_N / R_C)$, 下层随颗粒有机碳的氧化分解而相应减少, 表层碱的浓度还因碳酸钙的产生减少 $2 P_S P_A$, 下层因碳酸钙的溶解而增加 $2 P_k P_A$ (这里 P_k 代表第 k 层的新生产)。模式中各层颗粒有机碳的氧化分解系数 $D_M(k)$ 和无机碳的溶解系数 $D_I(k)$ 如表 1 所示。因本文模式只有 8 层, 与文献[6]模式的层次不同, 因此表 1 中的数值是以文献[6]给出的数据为基础, 按本模式垂直结构调整后得到的。调整的依据是使模式各碳化学量的垂直分布尽量与实测值接近。

表 1 各层有机碳氧化分解系数 D_M 和无机碳的溶解系数 D_I

层号 k	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M(k)$	—	0.175 0	0.202 9	0.274 9	0.424 9	0.760 3	0.570 3	1.0
$D_I(k)$		0.0	0.0	0.0	0.2	0.9	0.9	1.0

表层溶解氧一般是过饱和 $3\%^{[13]}$, 因此本文模式中表层氧的浓度是置于过饱和 3% 的状态不变的, 氧的饱和值可以从温度和盐度求得, 下层溶解氧的浓度按(7)式中 C 与

O_2 的比减少。

文献[6]中在表层只计算了新生产, 本文除了计算新生产之外, 还在表层考虑了由于陆地江河流入海洋的碳。每年从陆地江河流入海洋的碳约为 $0.8 \times 10^{15} \text{ g/a}^{[14]}$, 其量约占新生产量 $3 \times 10^{15} \text{ g/a}$ 的 $1/3$ 。因此, 本文模式中取表层因陆地江河流入的碳量为模式计算生产力的 $1/3$ 。

计算新生产所需的表层磷酸盐在文献[6]中用的模式计算值, 所得结果比实况偏大, 新生产的分布在南北半球的海洋中部偏大 $1 \sim 2$ 倍。本文用实测表层磷酸盐^[6]来计算表层新生产, 所得结果更接近新生产的观测值。

3 模拟结果

带生物泵全球海洋碳循环模式积分所需流场和温度场用全球海洋环流模式的气候模拟结果。初始时刻大气 CO_2 分压为零, 给定 $c_C = 2217 \mu\text{mol/kg}$, $c_A = 2373 \mu\text{eq/kg}$, 积分时间步长取 4 小时, 在海气界面上每半个月进行一次 CO_2 交换, 海洋生物泵过程也每半个月计算一次, 积分 1200 年, 大气 CO_2 分压基本稳定在 280×10^{-6} ,

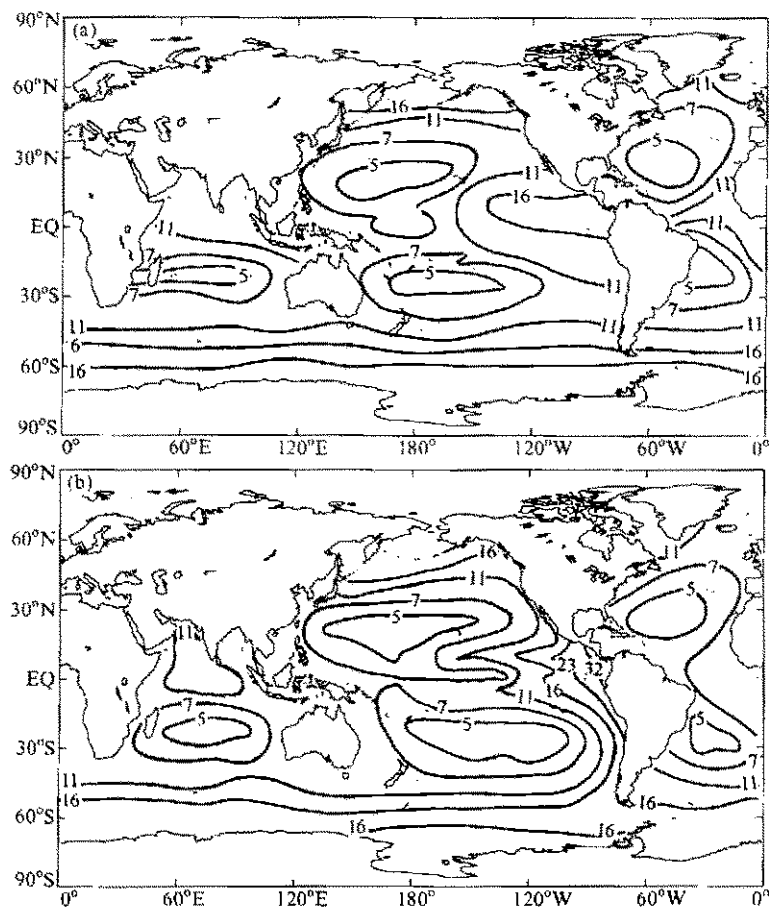


图1 计算的新生产 (a) 和观测值^[6] (b)。单位: $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

达到了工业化前的水平。

图 1a 为计算的新生产, 与实况相比, 基本分布是一致的, 赤道东太平洋上为高生产力区, 西太平洋为低生产力区, 计算值在东太平洋比实测偏低。

图 2a 为模拟的海气分压差, 即 $p_{CO_2, o} - p_{CO_2, a}$ 的分布, 从图上可以看到, 计算与实测基本相同, 特别在赤道地区为正值, 表明热带海洋对大气是 CO_2 的源, 而除赤道地区以外的广大海洋绝大部分区域为负值, 即汇区。由于源区只集中在赤道附近的区域, 所以海洋作为一个整体碳库对大气基本上是一个 CO_2 的汇。我们注意到热带西太

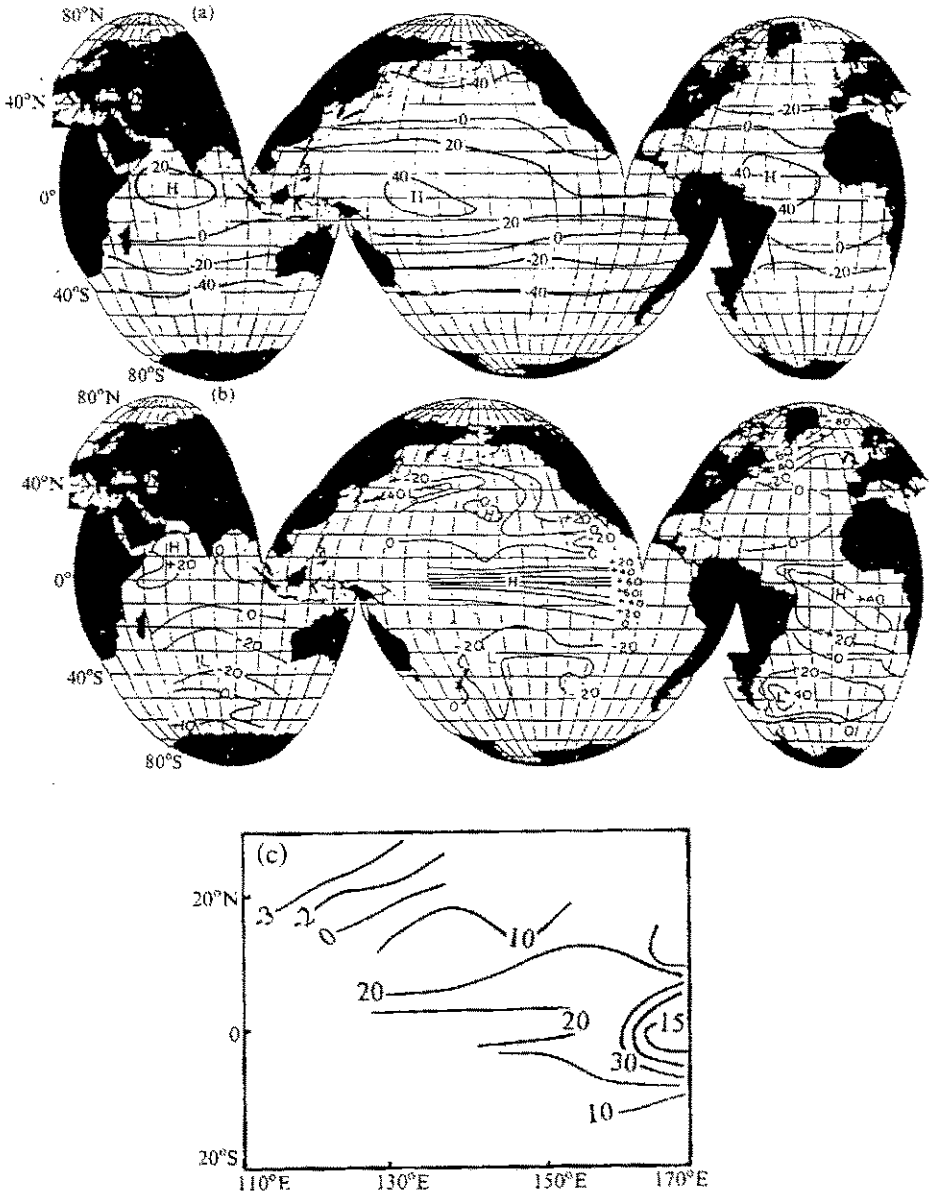


图 2 海气分压差 ($\times 10^{-6}$)

(a) 计算; (b) 观测; (c) TOGA 实测^[10]

平洋 (150°E 以西) 区域计算的是一个较赤道中东太平洋弱的源区, 这与我们 TOGA 计划期间实测结果 (图 2c) 相一致。

计算的表层总 CO_2 分布 (图 3) 表明, 赤道东太平洋由于海水上升总 CO_2 浓度是比较高的, 热带西太平洋相对较低。平均太平洋的总 CO_2 浓度又高于印度洋和大西洋, 由于本模式在海表考虑了由于陆地江河流入而增加的碳, 计算的表层碳比文献[6]的值大, 北太平洋表层总 CO_2 平均值稍高于实测值 (见图 4), 文献[6]中低于实测值。

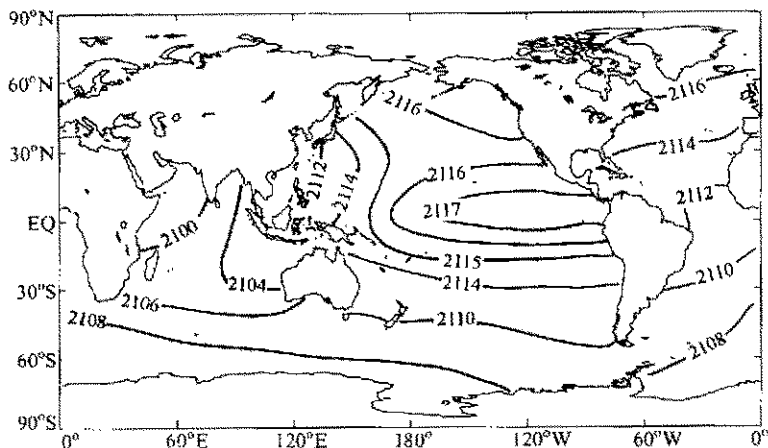


图 3 计算的表层总 CO_2 。单位: $\mu\text{mol}/\text{kg}$

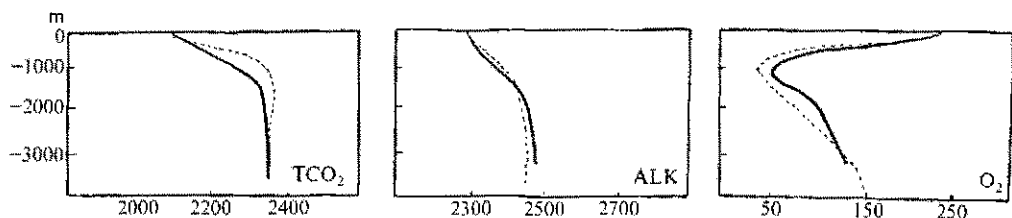


图 4 计算的 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 北太平洋平均总 CO_2 (TCO_2)、碱和溶解氧的浓度 (ALK 和 O_2) 随深度的变化
单位: TCO_2 : $\mu\text{mol}/\text{kg}$; ALK: $\mu\text{eq}/\text{kg}$; O_2 : $\mu\text{mol}/\text{kg}$
实线为计算值, 断线为观测值

图 4 是模拟的北太平洋 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间总 CO_2 、碱度和溶解氧浓度的平均垂直剖面。此垂直剖面较好地反映了太平洋中总 CO_2 、碱度和溶解氧的浓度随深度的变化, 由于碳循环模式中加进了生物泵, 海表与深海总 CO_2 浓度差加大, 在 1000 m 左右出现了总 CO_2 极大值。溶解氧的浓度在 1000 m 左右达到了一个极小值, 碱度随深度的变化不大, 这一模拟结果与实测结果相接近 (图 4 中断线)。

4 生物泵在调节气候变化中的作用

工业化以来由于人类大量燃烧石化燃料使大气中 CO_2 含量迅速增加。据估计, 人为排放到大气中的 CO_2 约有 $40\%\sim 50\%$ 进入了海洋。本文用带生物泵的碳循环模式,

做了带生物泵和不带生物泵(死海)两种情况下,模拟海洋对大气中 CO_2 吸收能力的对比试验,来了解海洋生物泵在吸收大气 CO_2 能力方面的作用。

试验是以上节带生物泵碳循环模式的准稳定态为初始场,此时大气中 CO_2 的体积分数是 280×10^{-6} ,正好相当于工业化前 1860 年大气中 CO_2 的含量。令模式大气 CO_2 含量平均每年增加 0.6×10^{-6} ,在带生物泵和不带生物泵两种情况下,海洋碳循环模式分别积分 100 年。在 100 年间,大气 CO_2 含量人为增加了 60×10^{-6} 。试验结果表明,在带生物泵情况下,大气中 CO_2 体积分数最终达到了 315×10^{-6} ,此值刚好是观测的 1960 年大气中 CO_2 的含量,大气 CO_2 体积分数实际只增加了 35×10^{-6} ,海洋吸收了 42%。在不带生物泵(死海)情况下,最终大气 CO_2 体积分数达到了 336×10^{-6} ,即大气 CO_2 实际增加了 56×10^{-6} ,此时,海洋吸收大气 CO_2 仅为 7%。这一试验结果表明,正是由于有了海洋生物泵过程,才大大提高了海洋吸收大气中 CO_2 的能力,显示了海洋生物泵在全球碳循环和调节气候变化中的重要作用。

5 海洋碳循环对 ENSO 现象的响应

热带西太平洋是全球气候异常 ENSO 事件的一个非常重要的海区。我国海洋科学工作者在 TOGA 和 WOCE 期间,对热带西太平洋进行多次海水总 CO_2 和海水分压调查,调查资料表明,热带西太平洋与赤道中东太平洋一样,是对 ENSO 事件的“敏感区”^[10]。在 El Niño 期间,海水总 CO_2 的变化在热带西太平洋(150°E 以西)与赤道中东太平洋区域相反,在 La Niña 期又与 El Niño 期相反。用本文的带生物泵全球碳循环模式模拟的 ENSO 期间,在热带西太平洋和赤道中东太平洋两个海区,海水总 CO_2 的变化与观测完全相符合,这部分结果在另一篇文章^[15]中有详细介绍。

6 小结

8 层全球带生物泵三维海洋碳循环模式较好地模拟了海洋的三维碳循环过程及分布。通过模拟因工业化大气中 CO_2 含量不断增加,由于海洋生物泵过程,大大提高了海洋对大气 CO_2 的吸收能力,显示了海洋生物泵在全球气候调节中的重要作用。用该模式对 ENSO 期间热带太平洋上总 CO_2 变化的数值模拟结果,进一步证实了 TOGA 计划的观测事实,表明了本文的带生物泵的三维全球海洋碳循环模式有能力模拟气候变化引起的实际海洋碳化学量的变化。

参 考 文 献

- 1 田中正元(石广玉、李明昌译),地球在变暖,北京:气象出版社,1992,132pp.
- 2 Oeschger, et al., A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature, *Tellus*, 1975, 27, 168~192.
- 3 Sarmiento, J. L. et al., A perturbation simulation of CO_2 uptake in an ocean general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 1992, 97, 3621~3645.
- 4 Vecelli, I. A. et al., A carbon cycle model with latitude dependence, *Climatic Change*, 1981, 3, 281~301.

- 5 Maier-Reimer, E. et al., Transport and storage of CO_2 in the ocean—an inorganic ocean-circulation carbon cycle model, *Climate Dynamics*, 1987, **2**, 63~90.
- 6 Bacastow, R. et al., Ocean-circulation model of the carbon cycle, *Climate Dynamics*, 1990, **4**, 95~125.
- 7 石广玉、郭建东, 全球二氧化碳循环的一维模式研究, *大气科学*, 1997, **21**(4), 413~425.
- 8 邢如楠, 一个三维全球海洋碳循环模式, *北京气象学院学报*, 1995, No. 2, 37~41.
- 9 徐永福等, 二维海洋温盐环流碳循环模式, *大气科学*, 1997, **21**(5), 573~579.
- 10 Ma Limin et al., The concentration of total dissolved CO_2 in the surface water in ENSO event, *Acta Ocean. Sinica*, 1995, **14**(2), 209~223.
- 11 Xing Runan and Chao Jiping, The numerical simulation of pacific ocean circulation with five-level model, *Acta Ocean. Sinica*, 1993, **12**(3), 395~404.
- 12 Peng, T. H. et al., Carbon Dioxide in the Ocean, Publication No. 3311, Environmental Sciences Division, ORNL, 1989, 67pp.
- 13 Broecker, W. S. and T. H. Peng, *Traces in the Sea*, New York: ELDIGIO Press, 1982, 690pp.
- 14 Watson, R. T. et al., Greenhouse gases and aerosols, in: *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment* (J. T. Houghton, et al. ed.), Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 1~40.
- 15 邢如楠, 热带太平洋表面水 CO_2 对El Niño事件响应的数值模拟, *气象学报*, 2000, **58**, (待发表)

A Three-Dimensional World Ocean Carbon Cycle Model with Ocean Biota

Xing Runan

(Beijing Meteorological College, Beijing 100081)

Abstract A three-dimensional world ocean carbon cycle model with ocean biota pump is developed. In the model, the atmosphere is represented by a well-mixed box of CO_2 , where CO_2 is exchanged with CO_2 from the surface water. The carbon cycle model has been numerically integrated for 1 200 years to a quasi-equilibrium state. The results of the total CO_2 , alkalinity and dissolved oxygen concentration in sea water, the distributions of new production and differences in P_{CO_2} between the sea and the air are close to the observations. In comparison of the cases between with ocean biota pump and without, it is shown that there are significant effects of ocean biota pump on the capacity of ocean for absorbing CO_2 in the air.

Key words: biota pump; carbon dioxide; carbon cycle model