

海洋碳循环模式的进展

刘瑞芝 张学洪

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100080)

提 要

本文综述了两类近年来国外使用的海洋碳循环数值模式。一类是国外通常使用的比较简单的箱模式; 另一类是基于大洋环流模式的三维无机碳循环模式, 以及在该模式的基础上引进了海洋生物群作用的海洋碳循环模式。后者是目前比较完整的模式, 也是本文重点介绍的内容。

关键词: 碳循环; 生物泵; 大洋环流模式。

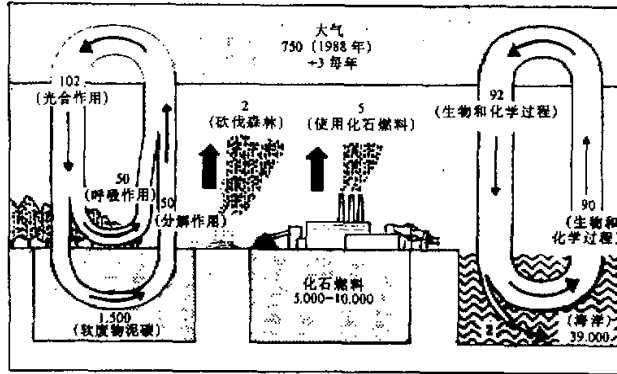
一、引 言

大气中温室气体增加引起气候和生态系统变化是下一世纪内可能影响人类生存环境的最重要的事件之一。 CO_2 是最主要的温室气体, 工业革命前大气 CO_2 浓度约为 280 ppmv, 含碳量 5750 亿吨, 而 1988 年大气 CO_2 浓度是 353 ppmv, 折合 7500 亿吨碳。这就是说, 近一百年来大气含碳量增加了 1750 亿吨, 即比工业革命前增加了 30%。大气含碳量的显著增加正是大规模人类活动改变了地球系统中碳循环过程的结果。

地球上三个主要的碳库, 即海洋、陆地生物群和大气, 它们之间通过物理的、化学的和生物的过程不断地进行着交换(图 1, 引自文献 [1])。假如没有人类活动的影响, 则每一碳库的收支基本平衡, 含碳量大体上维持常定。然而, 由于大量燃烧化石燃料和砍伐森林, 形成了大量排放 CO_2 的人为源地, 使得原有的平衡发生了变化。据估计^[2], 目前这种人为排放的碳量是每年 70 亿吨, 其中有 30 亿吨存留在大气中, 使得大气 CO_2 浓度以每年 0.4% 的速率增加, 其余一半多可能分别进入海洋和陆地生物群。这表明过去一个多世纪以来海洋和陆地生物群可能已经起到了延缓大气 CO_2 浓度增加的作用。

现在的问题是, 关于海洋和陆地生物群的作用还难以从观测上作出确切的估计, 譬如, 它们当中哪一个吸收过剩碳的能力更强一些? 在这方面一直存在着不同的看法^[3, 4]。弄清楚海洋和陆地生物群在碳循环过程中的地位是非常重要的, 因为它们当中包含的反馈过程不同, 因而吸收碳的潜力也不同, 而这在估计未来大气 CO_2 含量的增长情况时是一个关键因子。

研究碳循环问题的主要方法之一是建立碳循环过程的数学模型来进行模拟试验, 这种模型就是碳循环“模式”。利用它们不仅可以模拟工业革命前各主要碳库的平衡状态,

图1 碳循环示意图库中碳量单位: 10^9 吨通量单位: 10^9 吨/年

而且在利用某些特殊的观测资料进行校正之后还可用于预测未来大气 CO_2 的变化。国外碳循环模式的发展已经有 30 多年的历史, 从最初的只是用经验关系描写主要碳库之间的交换过程的“箱”模式, 到现在已发展出包含比较详尽的动力学过程和初步的化学和生物过程在内的三维模式。不过, 碳循环模式所涉及的过程比气候模式还要复杂, 而它目前的状况则远比气候模式落后, 因此是应当继续大力发展的。

本文着重介绍以海洋为重点的碳循环模式的进展, 特别是从 80 年代末以来德国和美国科学家研制的三维海洋碳循环模式, 以便了解碳循环模拟研究方面的最新成就。

二、“箱”扩散模式

最有代表性的简单碳循环模式是 Oeschger^[3] 等人于 1975 年提出的“箱”扩散模型, 图 2 给出了这个模型的基本结构。这模式主要考虑大气和海洋两个碳库之间的相互作用, 而将陆地生物群对大气 CO_2 含量变化的负反馈作用用简单的参数化公式来表示。大气和海洋混合层中的碳被假定为充分混合的, 其平衡值和受扰值分别由 N_a , N_m 和 $n_a(t)$, $n_m(t)$ 表示, 深海中的碳量在垂直方向是不均匀的, 其平衡值和受扰值分别由 $C_d(z)$ 和 $c_d(z, t)$ 表示。大气和海洋混合层之间的碳交换系数 k_{am} , k_{ma} 以及抑制海水对碳的吸收的缓冲因子 ζ 来控制, 而由混合层进入深海的碳则服从一个垂直扩散方程, 扩散系数为 K 。控制陆地生物群作用的参数是生物增长因子 ε 和迟滞时间尺度 τ 。所有这些参数都是可调节的以便对模式进行“校正”, 校正的方法是使得模拟的工业化前大气和海洋中 ^{14}C 的分布和观测结果一致。

在对模式中全部可调参数进行校正之后, 利用这模式模拟了由于燃烧化石燃料引起的大气 CO_2 的增加。假定 1860 年大气 CO_2 浓度是 292 ppmv, 到 1970 年人为增加的总 CO_2 是 55 ppmv, 模拟结果表明其中有 54% 存留在大气中, 使得大气 CO_2 浓度达到 322 ppmv, 而陆地生物群, 海洋混合层和深海吸收的碳量分别占总增加量的 12%,

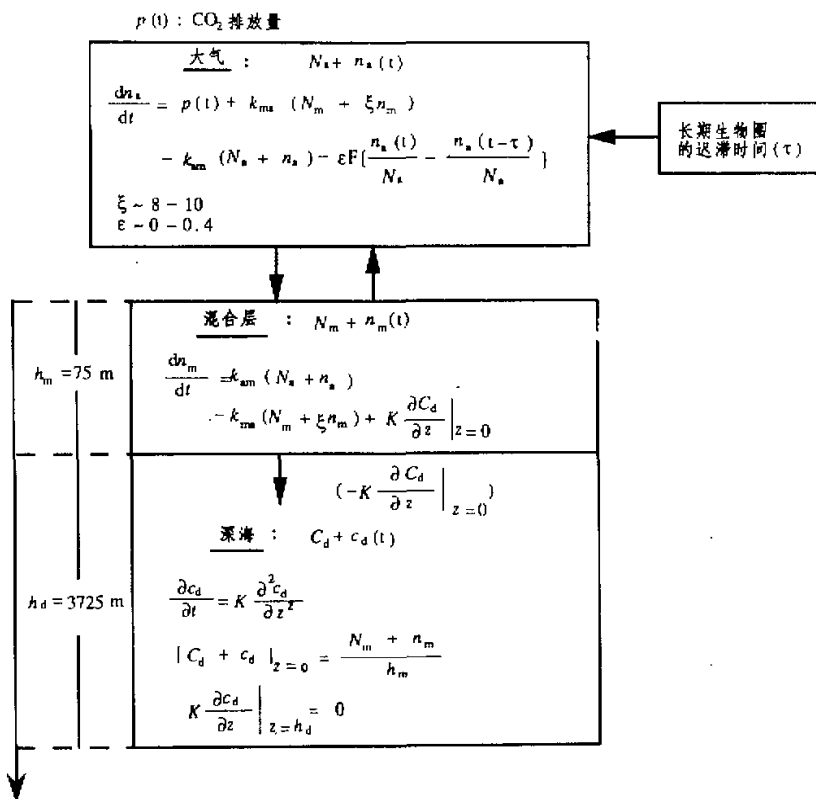


图2 CO_2 交换箱模式结构图(参考文献[3])

5% 和 29%。由此可以得出, 对于人类活动引起的 CO_2 增加来说, 海洋(尤其是深海)似乎是比较陆地生物群更重要的汇。

应当指出, “箱”扩散模式是一种高度参数化的模式, 尽管利用 ^{14}C 的观测资料可以对模式进行“校正”, 但模式对某些参数的敏感性仍可使其结果不确定, 例如, Oeschger 等人的模式模拟的陆地生物群与海洋吸收的碳量之比是正比于生物增长因子 ε 的, 即

$$\frac{\text{陆地生物群吸收的过剩碳}}{\text{海洋吸收的过剩碳}} = 1.71 \times \varepsilon,$$

而生物增长因子 ε 是一个很不确定的参数。

三、三维海洋无机碳循环模式

“箱”扩散模式是一类很有用的概念模式, 但它所能描写的只是各主要碳库之间整体上的交换关系, 而且其中可调参数太多, 原始过程太少, 因此需要发展包含较详尽过

程的三维碳循环模式。

1987 年, 联邦德国 Max-Planck 气象研究所的 Maier-Reimer 和 Hasselmann 提出了一个基于大洋环流模式的三维碳循环模式^[5], 用以研究海洋中 CO_2 的输运和储存问题。这模式只考虑大气和海洋两个碳库之间的相互交换, 略去了陆地生物群的作用。其中大气中的 CO_2 假定是充分混合的(至多只考虑由扩散过程控制的沿子午方向的不均匀性), 而在模式海洋中则考虑了三维定常流场对总无机碳的输运作用, 以及海洋混合层中 CO_2 转化为总无机碳的化学平衡过程(见图 3)。

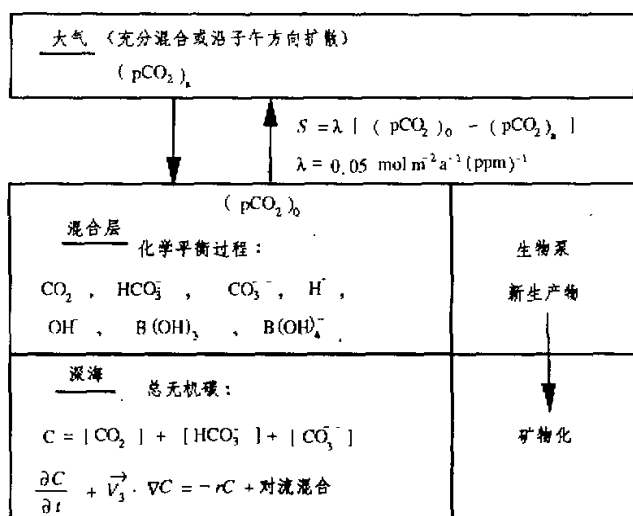


图3 三维海洋无机碳循环模式结构图

从海洋进入大气的 CO_2 通量是由海洋混合层 CO_2 分压和大气 CO_2 分压之差按 bulk 参数化公式给出的, 不过没有考虑风的影响。

在混合层内, 一部分 CO_2 溶解于水, 决定了 CO_2 在海水中的浓度, 由于溶解度与温度有关, 热带地区海温高、溶解度低, 因而 CO_2 分压较高, 高纬地区则相反。所以, 对大气而言, 热带海洋是 CO_2 的源, 而高纬海洋则是汇。

实际上, 水相 CO_2 不仅以中性的 CO_2 (或碳酸) 的形式存在, 而且以带电荷的碳酸氢根 (HCO_3^-) 和碳酸根 (CO_3^{2-}) 的形式存在, 它们的浓度之和构成了海洋中的总无机碳, 即

$$C \equiv [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}],$$

这3种与碳有关的成分的浓度必须由包括水, CO_2 , 硼以及氮、磷等在内的化学平衡来决定。在无机碳循环模式中, 不考虑与营养物有关的氮、磷等成分, 可以得出

$$C = \left(1 + \frac{K_1}{h} + \frac{K_1 K_2}{h^2} \right) S,$$

其中 $h \equiv [\text{H}^+]$ 是表征酸度的氢离子浓度, $s \equiv [\text{CO}_2]$ 是水相 CO_2 浓度, K_1 , K_2 等是化学平衡系数. 再借助于碱度方程可以推出

$$\frac{dC}{dS} < \frac{\partial C}{\partial S} = \frac{C}{S},$$

这表明, 化学平衡的结果使得海水中总无机碳的增加小于水相 CO_2 浓度的增加, 即海水的化学性质控制着海洋中总溶解的无机碳量的变化, 这称为“缓冲”作用.

在混合层及其以下的整个海洋中, 总无机碳被海洋环流所输送, 这包括三维的平流过程和高纬度海洋中对流所引起的垂直混合过程, 这些动力学参量都是由大洋环流模式模拟的定常环流给出的.

图 4 给出了无机碳循环模式模拟的平衡态的海 - 气 CO_2 分压差 (图 4a). 和相应的观测结果 (图 4c). 可以看出, 模拟的大尺度特征基本上反映了海洋表层温度场和流场的特点, 定性上和观测结果是一致的, 但定量上有显著差别, 尤其是在低纬地区.

用这模式还模拟了海洋对大气 CO_2 浓度增加的响应, 结果也是合理的, 很有趣的是: 热带海洋虽因溶解度低而使其无机碳含量较低, 却因“缓冲”因子较小而使得总溶解的无机碳增加量较大.

四、包括“生物泵”的海洋碳循环模式

1990 年, 美国 Scripps 海洋研究所的 Bacastow 和联邦德国 Max-Planck 气象研究所的 Maier-Reimer 进一步发展了上述无机碳循环模式, 以非常简单的参数化方式考虑了海洋生物群在碳循环过程中的作用^[6].

为了加进生物过程, 在海洋混合层的化学平衡中不仅要包括总无机碳和碱度, 还要包括作为营养物的磷酸盐和溶解的氧. 在一定的营养物条件下, 海洋混合层中的浮游植物通过光合作用和呼吸作用参与碳循环过程, 其中的一小部分形成大颗粒的有机物向下沉降, 称为“新生产力”. 这种大颗粒有机物的下沉速度很快, 以致于海流对它的影响可以忽略, 它们在下沉过程中又不断地分解为无机碳, 从而提供了一种沿垂直方向向下输送碳的生物学机制, 称为“生物泵”. 在 Bacastow 等人的模式中所考虑的正是这种“生物泵”作用, 而不是生物过程本身. 他们假定混合层中由于大颗粒有机物沉降而减少的碳量正比于“新生产力”的生成速率 P , 而后者则由入射光因子 L 和磷酸盐浓度 PO_4 来决定, 即

$$P = L \frac{R \cdot R_c \cdot \text{PO}_4}{H + R_c \cdot \text{PO}_4}$$

其中 R_c 是有机物合成或分解过程中的碳磷化 (称为 Redfield 比), R 和 H 是可调参数. 大颗粒有机物在其下沉过程中分解的量由一组与水深有关的“矿化”系数和在该水深处溶解氧的浓度来决定. 此外还假定到达海底后剩余的有机物再返至混合层.

尽管这种在海洋碳循环模式中加入“生物泵”的作法只是一种简单的参数化方法, 但却明显地改进了无机碳循环模式的某些不足. 例如, 比较图 4b 和图 4a 及 4c 可看出, 考虑生物泵作用后模拟的海 - 气 CO_2 分压差在热带海域大有改进, 尤其是在赤道东太

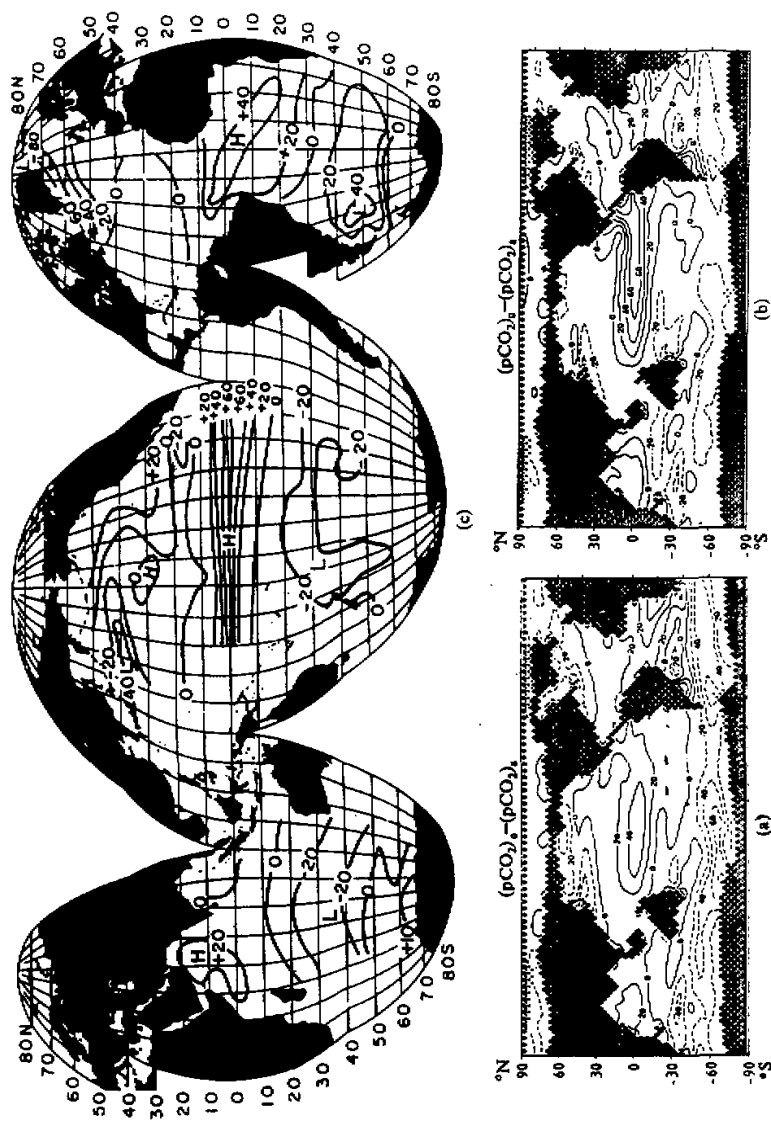


图4 a—c 用无机碳循环模式模拟的在海洋表面海—气CO₂分压差及观测结果分布图(引自[5,6])

(a)不包括海洋生物群, (b)包括海洋生物群, (c)观测结果

平洋海水上翻区,这是由于生物泵作用使下层海洋中总无机碳浓度明显增加(图略),而上翻运动又把大量的碳带到海表的缘故。

利用这模式还作了一个有趣的敏感性试验:在模式达到平衡态以后突然将海洋环流的强度减小 40%,再积分到一个新的平衡态,结果发现大气 CO_2 浓度下降了 39 ppmv,而如果去掉生物泵,则大气 CO_2 浓度下降 21 ppmv。这是因为当环流突然减弱时,由化学平衡和生物泵所控制的无机碳由海表向深海输送的过程尚来不及减弱,以致海表损失的碳量必须由大气中的 CO_2 来补充。这个试验并非是毫无根据的,因为有证据表明,北大西洋的深水形成在末次冰期时代就曾经减弱过^[7]。

五、关于大洋环流模式

三维海洋碳循环模式必须建立在可以成功地模拟出大洋环流的主要特征的大洋环流模式的基础之上,因此,研制大洋环流模式不仅是研究气候变化问题的一项基本建设,也是研究碳循环问题的一项基本建设。

本文叙述的三维碳循环模式是在 Max-Planck 研究所提出的大洋环流模式^[8]的基础上发展而来的。该模式的优点是计算非常经济,对于 $5^\circ \times 5^\circ$ 的水平网格,时间步长可取到 1 个月。不过该模式中采用了两项重要的近似:“刚盖”近似和“部分地转”近似,因而可能限制它的用途。

目前世界上最流行的大洋环流模式是 Bryan^[9] 首先提出的只基于“刚盖”近似的原始方程模式。在过去的 20 年间,这类模式已被广泛用于大洋环流的模拟以及同大气环流模式相耦合模拟气候及其变化。由于采用了“刚盖”近似,这类模式中忽略了海洋中一部分重要的能量,即由海表起伏所决定的“有效表面位能”,其量级同海洋总动能相同。

近年来,中国科学院大气物理研究所根据曾庆存的设计^[10]提出了一个基于完全的原始方程组的大洋环流模式,去掉了传统的“刚盖”近似,并已成功地模拟出大洋环流的年平均状况和季节循环^[11]。

应当指出,同大气环流模式相比,大洋环流模式的现状还落后很多,而关于气候系统和地球系统的研究对于发展大洋环流模式已经提出了很迫切的要求。因此,未来 10 年内大洋环流模式很可能会有有一个较大的进展,关于这一点,“世界海洋环流实验”(WOCE)计划的提出便是一个证据。

致谢: 作者们曾向王明星同志请教碳循环过程中的化学问题;董条玲同志阅读了本文并提出修改意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Legget, T., 1990. The nature of the greenhouse threat, in *Global Warming, the GREENPEACE Report*, Edited by J. Legget, Oxford University Press, 1990, Chapter 1, 14—43.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Scientific Assessment of Climate Change (Report of Working Group I, and Accompanying Policy Makers Summary, June, 1990)*.

- [3] Oeschger, H. et al., 1975, A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature, *Tellus*, **27**, 2, 168 — 192.
- [4] Takahashi, T., 1989, The carbon dioxide puzzle, *Oceanus*, **32** (2), 22 — 29.
- [5] Maier-Reimer, E., and K. Hasselmann, 1987, Transport and storage of CO₂ in the ocean: an inorganic ocean-circulation carbon cycle model, *Climate Dynamics*, **2**, 63 — 90.
- [6] Bacastow, R., and E. Maier-Reimer, 1990, Ocean-circulation model of the carbon cycle, *Climate Dynamics*, **4**, 95 — 125.
- [7] Boyle, E. A., and L. D. Keigwin, 1982, Deep circulation of the North Atlantic over the last 20000 years: geochemical evidence, *Science*, **218**, 784 — 787.
- [8] Hasselmann, K., 1982, An ocean model for climate variability studies, *Prog. Oceanogr.*, **11**, 69 — 92.
- [9] Bryan, K., 1969, Climate and ocean circulation III. The ocean model, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 806 — 834.
- [10] Zeng Qingcun., 1983, Some numerical ocean-atmosphere coupling models, Proceedings of the First International Symposium on Integrated Global Ocean Modelling, Tullin, USSR.
- [11] Zhang Xuehong, Bao Ning and Wang Wanjiu, 1991, Numerical simulation of seasonal cycle of world oceanic general circulation, Submitted to the Proceedings of the Sixth Japan and East China Seas Study Workshop (JECSS-VI), Fukuoka, Japan, Apr. 22 — 27, 1991.

The Progress of Oceanic Carbon Cycle Models

Liu Ruizhi Zhang Xuehong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080)

Abstract

In this paper two kinds of the oceanic carbon cycle models, having been used in the world in recent years, are briefly described: one is the simple box model; and the other contains the three-dimensional inorganic carbon cycle model based on the oceanic general circulation model, and its extension including the effect of the ocean biota. The emphasis of the authors is put on the three-dimensional model due to its completeness among the carbon cycle models available so far.

Key words: Carbon cycle. Biological pump; Oceanic general circulation model.