

二维海洋温盐环流碳循环模式

徐永福 王明星

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

金向泽

(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 100080)

摘 要 提供了由二维温盐环流动力学模式得到的定常流场驱动的海洋碳循环模式。在认为海洋生物碳循环达到动态平衡的情况下, 着重研究了无机碳的循环。在给定的工业革命前的大气 CO_2 浓度强迫下, 对海洋碳循环模式积分 5000 年后, 使其达到稳态。对于人为扰动, 采用给定大气 CO_2 浓度作为上边界条件, 结果是, 1980 年至 1989 年海洋能吸收人为排放 CO_2 的 36%。通过使用 CO_2 的工业排放源和大气及海洋的联合模式, 得到 1980 至 1989 年的边际气窗比为 0.66。比较两种方法所得的结果, 可推出在工业革命前存在着非工业源, 即生物源; 1940 年以后, 则还存在着一个未知的汇。

关键词 温盐环流 碳循环模式 非工业源

1 引言

自工业革命以来大气中 CO_2 的含量逐年增加, 由此而造成的全球气候变化已引起社会的广泛关注。如果人为排放的 CO_2 (包括化石燃料燃烧、水泥生产和土地利用变化所排放的碳) 全部停留在大气中, 那么大气 CO_2 浓度将会增加 60% 以上。计算人为碳的输送有三个库: 大气、海洋、陆地生物圈, 通常认为海洋肯定已近似地吸收了人为输入的一半。全球碳循环模式的发展一直受到制约, 除了在估价陆地生物圈方面有困难外, 目前的海洋碳循环模式不完善也是原因之一。

海洋碳循环模式的研究已有 30 多年历史了, 主要可分为简单描述海洋混合和水流的箱模式以及基于海洋动力学的环流模式。尽管通过标定海洋箱扩散模式能满意地重现示踪物的平均分布[如 ^3H , 自然 ^{14}C 和核试验产生的 ^{14}C (称为弹 ^{14}C)], 但因该类模式的过分简单处理, 往往导致不同模式的响应特性有较大的差别。近年来, 三维海洋碳循环模式已有一些研究报道^[1,2], 但此方面的研究至今仍有不少问题。鉴于三维模式的复杂性及计算上的费时, 且海洋许多参数大致可认为是沿纬圈均匀的, 所以使用二维模式无疑是非常有益的, 可以进行很多敏感性试验。

本工作不考虑与海洋生物和陆地生物圈有关的碳的源和汇, 也不包括碳的河流源和沉积汇。Maier-Reimer 和 Hasselmann^[1]已经阐述了使用这种基本无机碳循环模式的三个重要理由。首先, 无机碳循环作为有效的一级近似, 因为海水有足够高的碳浓度, 任

何额外 CO_2 吸收几乎不影响海洋生物循环; 无机碳循环可以作为研究生物过程影响碳循环的基础, 以此来区别化学分布的哪些特性是受大尺度的海洋翻转的影响, 哪些是由生物泵控制的。另外, 此模式的结果可与早期的箱模式工作的结果进行比较。本工作使用的二维温盐环流模式是由 Wright 和 Stocker^[3]提出的, 经金向泽和张学洪^[4]改进后, 用于气候研究, 我们已用 ^{14}C 对该模式进行了研究, 所选的参数是经过若干数值实验后得到的。本工作使用该物理模式对于不同的扰动方法进行了研究, 以此来探讨非工业源的问题。

2 模式结构

2.1 环流模式

本工作的环流模式是二维温盐环流模式, 有关细节见文献[4]。

2.2 碳循环模式

本工作主要研究无机碳在海洋中的输送、分配和贮藏。海洋分为上层海洋和内部海洋, 其中上层海洋与大气发生交换。

2.2.1 大气

大气常被认为是一个混合均匀的箱或用一个高度扩散的层来代表。在一维扩散处理中, 大气只提供从 CO_2 低溶解度的暖区向高溶解度的冷区输送; 扩散被限制在经向, 大气的半球间混合的时间尺度常选为 1 年。这种处理比视大气为混合均匀的箱只有较小的改正^[1]。所以, 本工作视大气为一个混合均匀的箱。大气 CO_2 浓度通常用其在干空气中的分压 $p_d(\text{CO}_2)$ 表示。混合海水表面 CO_2 分压 $p_a(\text{CO}_2)$ 为

$$p_a(\text{CO}_2) = p_d(\text{CO}_2) \left(1 - \frac{e_s}{p_a}\right), \quad (1)$$

p_a 为海平面上大气压, 取为 1017 hPa, e_s 是海面上水蒸气饱和蒸气压。

2.2.2 上层海洋

CO_2 在大气和海洋界面的交换是由它们的分压差决定的, 其交换通量可用以下方程表示:

$$F_{ge} = S_g [p_o(\text{CO}_2) - p_a(\text{CO}_2)], \quad (2)$$

这里的 S_g 是 CO_2 的交换系数, 从 Broecker 等^[5]的方程得到。 $p_o(\text{CO}_2)$ 可从已知的温度、盐度、总碱度和总 CO_2 (总溶解无机碳, C_t) 计算得到^[6]。

2.2.3 内部海洋

在海洋内部, 总 CO_2 是一个被动的示踪物, 即可用平流扩散方程来描述:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{cV}{a} C_t \right) + \frac{\partial}{\partial z} (W C_t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c^2 K_h}{a^2} \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_t}{\partial z} \right), \quad (3)$$

其他符号的意义见文献[4]。

3 结果与讨论

3.1 稳态平衡

在模拟海洋吸收人为排放 CO_2 之前, 首先对 ^{14}C 在海洋中的分布进行了研究, 使用观测到的 ^{14}C 检验了此模式, 在模式所用的参数值下, 模拟结果基本符合观测到的许多特征。本文所用的垂直湍度扩散系数(K_z)依深度从表层的 $0.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 变化到底层的 $1.45 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 交换系数从 Broecker 等^[4]的方程得到。

在模拟稳态结果, 即工业革命前的情况下, 涉及到一个十分重要的量, 即人为扰动前大气 CO_2 的含量。冰芯测量表明, 在公元 1800 年前的 1000 年时间内, 大气 CO_2 的浓度(体积分数)约为 280×10^{-6} , 其波动不超过 10×10^{-6} , 因此, 可以认为这段时期为稳态^[7]。模式使用 280×10^{-6} 的大气 CO_2 为强迫, 模式积分 5000 年以后达到准稳态, 图 1 表示了稳态时海洋与大气 CO_2 的分压差随纬度的变化。图 1 中的负值表示 CO_2 从大气转移到海洋, 正值是从海洋到大气。这里已将南大洋的结果合并在大西洋和太平洋的结果中了。图 2 表示了稳态时总 CO_2 在海洋中的分布。由于模式没有明显地包括海洋生物过程, 因此其值是不能与观测资料进行比较的。

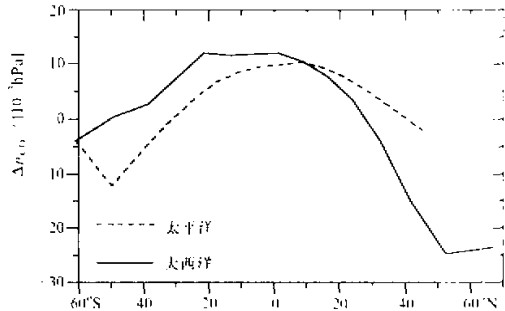


图 1 稳态时 $\Delta p(\text{CO}_2) = p_a(\text{CO}_2) - p_s(\text{CO}_2)$ 随纬度的变化

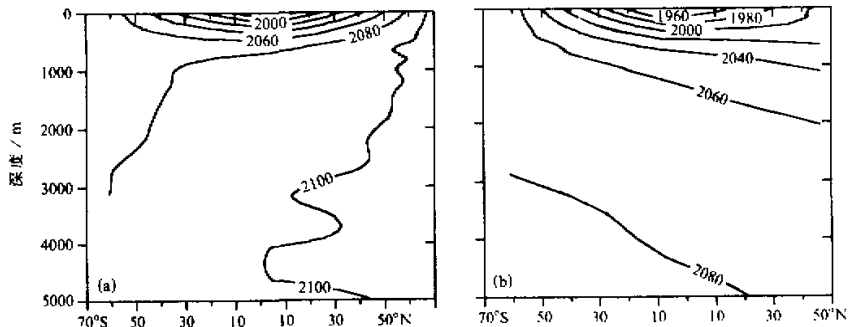


图 2 模拟的稳态 C_T 在大西洋 (a) 和太平洋 (b) 的分布, 单位为 $\mu\text{mol} / \text{kg}$

从图 1 和图 2 可知, 无机碳循环模式反映了海洋碳循环分布的主要特征, 如大尺度经向翻转和赤道与两极间的表面温度梯度。经向翻转指北大西洋深水的形成和北太平洋底水的上翻(见文献[4]中图 4)。但是, 北太平洋的模拟结果尚有不足之处, 即上翻不够, 致使最老的水出现在海底, 而不是出现在 2500 m 左右处^[1]。北大西洋是大气 CO_2

的最重要的汇, 热带地区, 无论大西洋还是太平洋都是大气 CO_2 的源; 大部分副热带地区也是大气 CO_2 的源。

3.2 人为扰动

自从工业革命以后, 人类活动向大气排放的 CO_2 , 主要来自化石燃料燃烧、水泥制造和土地利用变化 (非森林化)。对于海洋吸收多少 CO_2 的问题的研究往往采用两种方法, 一是直接使用大气 CO_2 的含量与海洋交换; 二是使用排放源, 后者要使用大气和海洋的耦合模式, 这里分别使用该两种方法进行了研究。本工作定为 1790 年为起始时间, 上述的稳态用作扰动的初始态。

3.2.1 给定的大气 CO_2 浓度

本文采用的 1790 年到 1958 年的大气 CO_2 浓度 (引自文献[2]中图 1), 该曲线是研究者对冰芯数据进行样条拟合得到的, 1958 年后的数据直接使用 Mauna Loa 的年平均

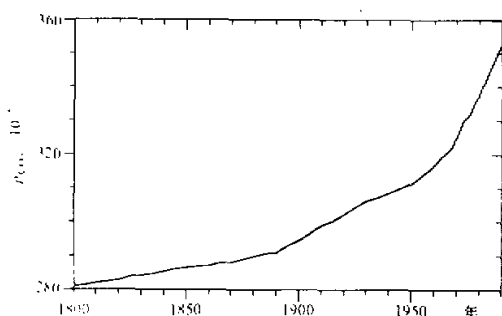


图 3 大气 CO_2 浓度的逐年增加

观测数据。其中 1990 年的大气 CO_2 体积浓度为 353×10^{-6} , 缺少年份采用线性内插和外推法补上。

使用图 3 的大气 CO_2 浓度与海洋相互作用, 稳态的 C_i 值作为初值, 对模式进行时间积分。图 4 表示了 CO_2 分压差 (相对于稳态) $\delta\Delta p(\text{CO}_2)$ 随纬度的变化。 $\delta\Delta p(\text{CO}_2)$ 均为负值, 说明在 1990 年海洋是大气的汇; 具体地说, 就是热带和副热带海洋作为大气 CO_2

的源减小, 中高纬度地区作为大气 CO_2 的汇增加。图 5 表示了工业革命以后大气 CO_2 在海洋中的穿透, 从图 5 可知, CO_2 主要从北大西洋的高纬处进入海洋。由于强烈的对流作用, 致使人为 CO_2 进入到了海底, 在其他海洋区域, CO_2 穿透到了上千米的深度, 而在南大洋已超过了 2 km 的深度。

由于模式没有包括印度洋, 模式海洋远远小于实际海洋, 这里使用大西洋和太平洋的 CO_2 交换通量的加权平均外推到全球海洋, 以全球海洋的面积为 $3.52 \times 10^{14} \text{ m}^2$ 计算海洋对人为排放 CO_2 的吸收^[8]。表 1 给出了模式得到的气留比与其他模式结果的比较。这里的气留比定义为大气 CO_2 的增加与大气 CO_2 增加+海洋吸收 CO_2 之比, 即

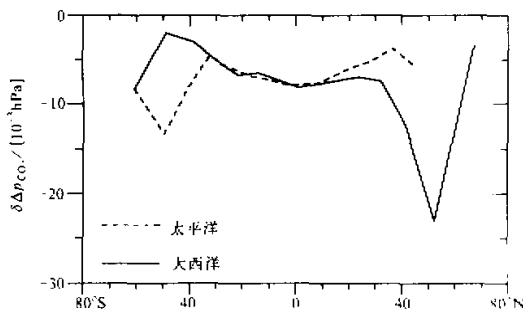
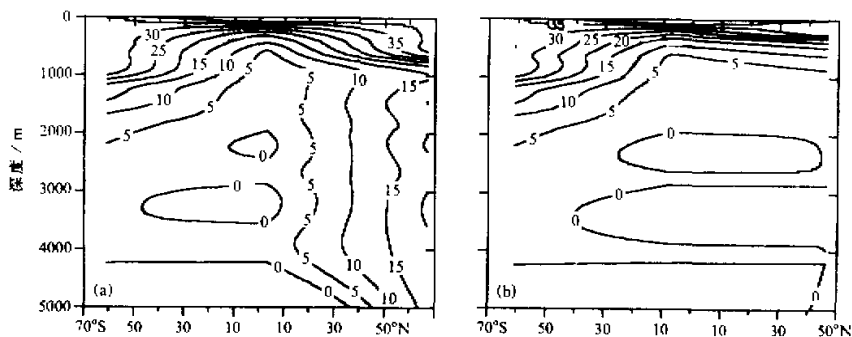


图 4 CO_2 分压差 $\delta\Delta p = \Delta p(\text{CO}_2, 1990) - \Delta p(\text{CO}_2, 1790)$ 随纬度的变化

$$F(t_1 - t_2) = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} C_a}{\sum_t (C_a + C_o)} \quad (4)$$

表1 气留比 (给定的大气 $p(\text{CO}_2)$)

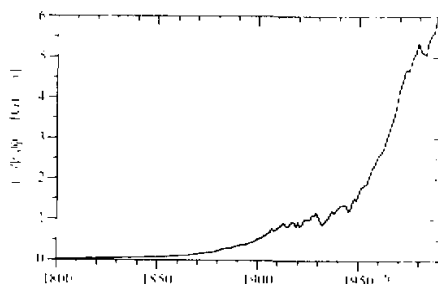
年 份	BD ^[2]	3-D (GFDL) ²	本工作
1790~1980	0.510	0.582	0.607
1959~1983	0.581	0.642	0.656
1980~1989		0.63	0.644

图5 $C_1(1990) - C_1(1790)$ 在大西洋 (a) 和太平洋 (b) 的分布, 单位为 $\mu\text{mol}/\text{kg}$

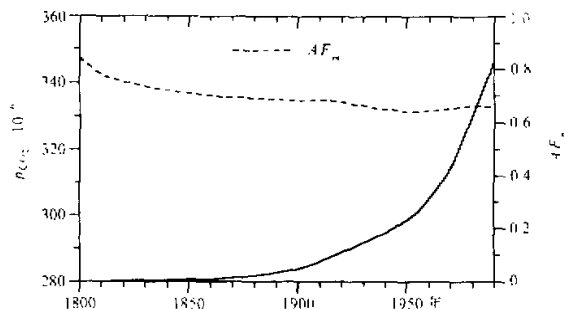
3.2.2 工业源

从1860年到1984年的工业排放 CO_2 的速率是根据能源消耗(包括煤、油和气)和水泥生产的年平均量估计出来的^[9,10], 而1790年至1860年的值则是根据1860~1900年的排放率数据以指数函数的形式经外推得到, 1984~1990年的数据来自于IPCC报告^[11], 缺少年份采用插值和外推获得, 结果如图6所示。

使用图6的工业排放 CO_2 的速率和耦合的大气和海洋模式, 以稳态的 C_1 作为初值对模式进行时间积分。图7表示了模拟的大气 CO_2 浓度随时间的变化。将图7与图3比较可知, 模拟的 CO_2 浓度要低于实际观测值, 这说明大气中的 CO_2 不仅仅来自于工业源。图7中的边际气留比定义为大气中 CO_2 增加与工业排放 CO_2 的量之比 (相对于1790年), 即

图6 CO_2 工业排放源随时间的变化

$$F_m(t_0 - t) = \frac{\sum_{t_0}^t C_a}{\sum_{t_0}^t S_{\text{ind}}(t)} \quad (5)$$

图7 模拟的大气 CO_2 浓度及边际气留比随时间的变化

F_m 从 1800 年的大于 0.8 随时间逐渐变小, 这是由于海洋对大气 CO_2 的吸收有一个滞后, 约过 50 年以后, F_m 的变化才比较小, 介于 0.7 与 0.6 之间, 到了 20 世纪 90 年代, 其值为 0.66。表 2 总结了不同时间段使用工业源得到的气留比的结果以及来自其他模式的结果及观测结果。这里所谓的观测结果是图 3 中大气 CO_2 增加的量与工业排放 CO_2 的量之比。观测的 F 大于模拟的结果 (如 1790~1980 年), 表明大气中的 CO_2 并非都来自于工业源, 即存在着非工业源, 反之 (如 1980~1989 年) 则说明存在一个额外的汇。

表 2 边际气留比 (工业源)

年 份	BD ^[2]	3-D (GFDL) ^[2]	3-D (Hamburg) ^[2]	本工作	观测
1790~1980	0.612	0.638		0.662	0.775
1955~1975	0.66	0.672	0.68	0.679	0.566
1959~1983	0.625	0.666		0.677	0.578
1980~1989				0.658	0.558

从表 1 和表 2 均可看出, 总体上说, 本工作得到的气留比结果比箱模式和三维环流模式得到的结果大些, 即海洋吸收 CO_2 能力小些。实际上, 与三维环流模式和 BD 模式分别相差不超过 4% 和 9% (1790~1980)。这说明了海洋中温盐环流起了十分重要的作用, 风生环流可能对海洋吸收人为 CO_2 有一定的作用。

3.2.3 非工业源的估计

以上的讨论已经指出, 要使碳的收支得到平衡, 除了工业源和海洋汇以外, 还需存在另外的源和汇。为了鉴定该源和汇随时间的演化, 这里作一个简单的计算, 即使用每年大气 CO_2 增加, 加上海洋吸收 (来自给定大气 CO_2 浓度的模拟结果), 减去工业排放的 CO_2 , 结果如图 8 所示。由此可知, 在工业革命前 (1860 年) 就存在着一个小的非工业源, 大约在 19 世纪末和 20 世纪初达到极大; 从 1940 年以后, 该曲线随时间振荡激烈, 而且有时出现负值, 其主要原因是使用的资料, 如大气 CO_2 增加迅速, 资料为年平均, 年间变化较大, 总的说来, 大气加海洋的增加小于工业源。这说明 1940 年以后, 有一个未被认识的汇。从 1790 年到 1990 年的模拟时期可知, 平均而言, 除了

工业源外, 还存在着一个净的, 大小为 45 Gt 碳的非工业源, 这个非工业源是随时间变化的。普遍认为, 该非工业源来自于陆地生态系统, 即土地利用所排放的。这些结论与 Siegenthaler 和 Oeschger^[12]使用一维模式和 Sarmiento 等^[2]使用三维模式得到的结论一致。

从 1958 年到 1990 年, 大气 CO_2 浓度已有了较好的记录。在该段时期, 大气碳增加加海洋碳吸收小于工业排放量。为了说明该工业源, 海洋得多吸收 13 Gt 碳, 或者有量级相应的其他汇; 此外, 还必须说明陆地开发使用的排放源。因此, 大气碳的增加加海洋对碳的吸收不能说明因工业源排放、非森林化和陆地使用变化所产生的碳。为了说明全球碳收支, 除了海洋外尚需另外的汇, 即所谓的“遗漏的汇”。目前, 一般认为, 该汇是在陆地生物圈, 可能的解释包括 CO_2 施肥作用、氮施肥作用和气候变化的反馈作用, 对此尚需做深入的研究。

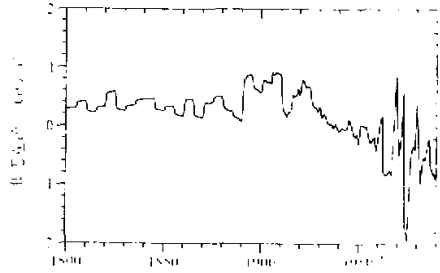


图 8 非工业源随时间的变化

4 小结

使用二维温盐环流碳循环模式, 不管是用给定大气 CO_2 浓度的方法, 还是用工业排放源的方法, 所得的海洋吸收人为排放 CO_2 的能力十分接近于三维环流碳循环模式得到的结果。要说明全球碳收支, 工业革命前存在一个非工业源; 而 1940 年以后需要一个额外的汇。

参 考 文 献

- 1 Maier-Reimer, E. and K.Hasselmann, 1987, Transport and storage of CO_2 in the ocean — an inorganic ocean-circulation carbon cycle model, *Cli. Dyn.*, **2**, 63~90.
- 2 Sarmiento, J.L. et al., 1992, A perturbation simulation of CO_2 uptake in an ocean general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **97**, 3621~3645.
- 3 Wright, D.G. and T.F. Stocker, 1991, A zonally averaged ocean model for the thermohaline circulation, *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 1713~1739.
- 4 金向泽、张学洪, 1994, 温盐环流与全球变暖的数值模拟, (一) 纬向平均的温盐环流的模拟, *大气科学*, **18**, 增刊, 669~779.
- 5 Broecker, et al., 1985, The distribution of bomb radiocarbon in the ocean, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6953~6970.
- 6 Xu Yongfu, 1992, The buffer capability of the ocean to increasing CO_2 , *Adv. Atmos. Sci.*, **9**, 501~510.
- 7 Siegenthaler, U. et al., 1988, Stable-isotope ratios and concentration of CO_2 in air from polar ice cores, *Ann. Glaciol.*, **10**, 1~6.
- 8 Bacastow, R. and E.Maier-Reimer, 1990, Ocean-circulation model of the carbon cycle, *Cli. Dyn.*, **4**, 95~125.
- 9 Rotty, R. M., 1981, Data for global CO_2 production from fossil fuels and cement, in: *Carbon Cycle Modelling, SCOPE 16* (ed. B.Bolin), Chichester, Wiley, 121~125.
- 10 Rotty, R.M. 1987, A look at the 1983 CO_2 emissions from fossil fuels (with preliminary data from 1984), *Tellus*, **39B**, 203~208.

- 11 Houghton, J. T. et al., 1992, *Climate Change. The Supplement Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge Univ. Press, 200pp.
- 12 Siegenthaler, U. and H. Oeschger, 1987, Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data, *Tellus*, **39B**, 140~154.

A Two-Dimensional Ocean Thermohaline Circulation Carbon Cycle Model

Xu Yongfu, Wang Mingxing

(LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Jin Xiangze

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract This paper presents an ocean carbon cycle model driven by a constant flow field produced by a two-dimensional thermohaline circulation model. Under the assumption that ocean biogenic carbon is considered to be in a dynamic equilibrium, the inorganic carbon cycle is emphatically studied. Under the forcing of given preindustrial atmospheric carbon dioxide concentration, carbon cycle model is integrated for over five thousand years to obtain a steady state. For the human perturbation, prescribed atmospheric carbon dioxide concentrations are used as the upper boundary condition. Results show that the oceans can take up 36% of carbon dioxide released by human activities for the period of 1980~1989. By using industrial emission sources of carbon dioxide and a combined model of the atmosphere and ocean, a marginal airborne fraction of 0.66 is obtained for the period of 1980~1989. Through the comparison of the results from these two methods, it can be deduced that before industrial revolution a non-industrial source exists, while after 1940, an extra sink is needed.

Key words thermohaline circulation carbon cycle model non-industrial source